

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe LM-33

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

In
Attività Di Supporto Alla Didattica Tecnologia Meccanica

TITOLO

ANALISI DELLA LAVORAZIONE DI
RULLATURA DI TUBI

CANDIDATO

Fabio Morotti

RELATORE

Prof Ing. Giampaolo Campana

CORRELATORE

Prof. Ing. Lorenzo Donati

Ing. Raffaele Caminati

Anno Accademico 2011/12

Sessione III^a

INDICE

I - INTRODUZIONE.....	pag. V
II - L'AZIENDA.....	pag. VII
1 - TUBI LISCI.....	pag. 9
1.1 – Tubo Seamless	pag. 10
1.1.1 – Processo Produttivo	pag. 11
1.1.1.1 – Produzione del forato.....	pag. 11
1.1.1.2 – Stiratura e finitura.....	pag. 16
1.2 – Tubo Welded.....	pag. 25
1.2.1 – Processi di saldatura a pressione	pag. 26
1.2.2 – Processi di saldatura a fusione	pag. 30
1.3 – Formatura a freddo.....	pag. 34
1.3.1 – Trafilatura a freddo.....	pag. 35
1.3.2 – Trafilatura a freddo a passo di pellegrino.....	pag. 37
2 - TUBI ALETTATI	pag. 39
2.1 – Generalità.....	pag. 39
2.2 – Tubi ad aletta alta.....	pag. 42
2.3 – Tubi ad aletta integrale.....	pag. 47
2.4 – Tubi internamente rigati	pag. 51
2.5 – Tubi corrugati	pag. 52
3 - SCAMBIATORI DI CALORE: CENNI.....	pag. 55
3.1 – Generalità.....	pag. 55
3.2 – Fascio tubiero.....	pag. 59
3.3 – Diaframmi.....	pag. 60
4.4 – Piastre tubiere	pag. 60
4 - TUBI AD ALETTA INTEGRALE.....	pag. 63
5 - IL PROCESSO PRODUTTIVO.....	pag. 69
5.1 – I componenti	pag. 70

5.2 – Settaggio macchina	pag. 75
5.3 – Problematica dell'alettatura.....	pag. 82
6 - SPERIMENTAZIONE	pag. 89
6.1 – Pianificazione	pag. 89
6.2 – Preparazione dei campioni	pag. 97
6.3 – Procedura di misurazione	pag. 100
6.4 – Rappresentazione parametri	pag. 107
6.4.1 – Diametro esterno, di nocciolo ed interno	pag. 108
6.4.2 – Passo e angolo di torsione.....	pag. 114
6.4.3 – ΔL , altezza dell'aletta e spessore sotto aletta	pag. 120
6.4.4 – Variazione dei parametri al variare della dimensione dell'anima	pag. 124
7 - ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI.....	pag. 133
7.1 – Elaborazione degli andamenti al variare dell'anima	pag. 133
7.2 – Elaborazione degli andamenti al variare del materiale	pag. 140
7.3 – Verifica del flusso di materiale in direzione dell'elica	pag. 150
CONCLUSIONI	pag. 155
SVILUPPI FUTURI	pag. 157
NOMENCLATURA	pag. 159
BIBLIOGRAFIA	pag. 161
RINGRAZIAMENTI	pag. 163

INTRODUZIONE

L'obiettivo che ci siamo posti nello sviluppo di questa tesi di laurea è quello di ampliare il know-how aziendale in materia di produzione di tubi ad aletta integrale, i cosiddetti tubi LowFin.

Le ragioni che ci hanno spinto ad approfondire questo tipo di argomento risiedono principalmente nella richiesta sempre più frequente di lavori fuori dallo standard, che richiedono una stima sufficientemente accurata di quelle che sono le caratteristiche dimensionali del tubo a seguito dell'alettatura.

Un'ulteriore motivazione risiede nella diminuzione dei tempi di settaggio della rullatrice definendo le tolleranze con i quali i parametri macchina devono essere impostati al fine di limitare la successione di prove preliminari che attualmente vengono svolte prima dell'inizio di ogni produzione per raggiungere una condizione di lavoro ottimale.

In questa trattazione, a seguito di una introduzione relativa al panorama nel quale il tubo alettato LowFin viene impiegato, approfondiremo quelle che sono le caratteristiche geometriche di questo tubo alettato.

Verrà inoltre illustrato il processo attualmente utilizzato per la produzione introducendo i parametri operativi di processo.

Verrà quindi eseguita una sperimentazione variando i parametri operativi della macchina, quali materiali e caratteristiche degli utensili, allo scopo di osservare e mappare i fenomeni che si verificano sul tubo .

L'AZIENDA

Be.Ca. Engineering Soc. Coop. è stata costituita nel 2007 dal tecnico Giacomo Benini e dall'ingegnere Raffaele Caminati.

La sua attività si inserisce nel settore industriale, specializzata nelle lavorazioni di tubi destinati a scambiatori di calore e caldaie.

Il core business della società è rappresentato dalla produzione di tubo bimetallico e tubo alettato LowFin.



Fig.1 - Tubo alettato LowFin - Inconel alloy 600



Fig.2 - Tubo alettato LowFin - C6870



Fig.3 - Tubo BIM - SS304L/Rame 99,9%



Fig.4 - Tubo BIM - CS/C6870

Con riferimento al tubo bimetallico e la relativa tecnologia di produzione è stato depositato dall'azienda un brevetto.

I tubi bimetallici sono costituiti essenzialmente da due tubi di materiale differente inseriti l'uno all'interno l'altro, utilizzando spessori idonei al tipo di missione a cui devono adempiere.

La gamma di materiali utilizzabili per l'accoppiamento è molto vasta, la scelta quindi ricade su quello che risulta essere più affine al fluido con il quale andrà poi a contatto.

Utilizzando il tubo bimetallico si possono unire alle elevate prestazioni di resistenza alla corrosione tipiche di materiali come rame o di altri materiali

nobili, l'elevata resistenza agli stress meccanici dell'acciaio al carbonio, dell'acciaio inossidabile o del titanio.

Parallelamente alle produzioni standard sopracitate vengono portati avanti progetti interni.

Tra questi vi è il reparto di progettazione di macchine per eseguire prove idrostatiche e pneumatiche su tubi ed il reparto di ricerca e sviluppo relativamente alla produzione di tubi alettati e bimetallici.

Gli sviluppi che si vogliono ottenere nel settore del tubo alettato riguardano fondamentalmente il miglioramento delle prestazioni dello stesso a seconda del tipo di funzione che dovrà svolgere una volta installato.

In altre parole si vuole incrementare la gamma di prodotti che l'azienda è in grado di produrre introducendo delle modifiche al tubo LowFin attualmente prodotto.

Queste modifiche comprendono:

- Modifiche del profilo sulla superficie interna del tubo, per incrementare la turbolenza del flusso di fluido;
- Modifiche del profilo dell'aletta per funzioni speciali, quali ad esempio il favorire la formazione di bolle di fluido in tubi per evaporatore.

TUBI LISCI

Come già anticipato lo scopo di questo elaborato consiste nell'ottimizzazione del processo di alettatura di tubi LowFin.

Prima di arrivare però al cuore del discorso facciamo qualche premessa su quelle che sono le principali tecnologie per la produzione di tubo liscio e su alcune delle tipologie di tubo alettato presenti sul mercato.

In particolare in questo capitolo approfondiremo quelle che sono le metodologie produttive per la produzione di tubo liscio.

La prima cosa da evidenziare è l'esistenza principalmente di due tipologie di tubo:

- *Tubo seamless*, ovvero senza saldatura, prodotto utilizzando il metodo mannesman;
- *Tubo saldato*, ricavato da nastro saldato sui lembi.



fig. 1a - Tubo Seamless, vista fronte



fig. 1b - Tubo Seamless, vista fianco

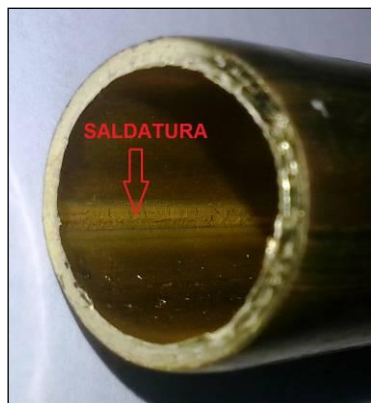


fig. 2a - Tubo Welded, vista frontale



fig. 2b - Tubo Welded, vista fianco

Di seguito verranno descritte le filiere per la produzione di queste tipologie di tubi.

1.1 – Tubo Seamless

Come anticipato il tubo seamless è un tubo che non presenta saldature, viene quindi ricavato dal pieno.

Questo è possibile grazie ad una tecnologia studiata dai fratelli Max e Reinhard Mannesmann, questi osservarono (nel 1885) che al centro di una barra di acciaio, che avanza tra due cilindri obliqui rotanti nello stesso senso si forma una cavità.

Da questo fenomeno nasce l'intuizione che sta alla base dell'intero processo produttivo.

I due fratelli realizzarono e perfezionarono una macchina, ovvero il laminatoio a cilindri per la produzione di forati di acciaio destinati ad essere trasformati in tubi.

Fino a quel momento i tubi venivano prodotti per fusione in stampi, per foratura di cilindri o per saldatura di nastri curvati, tutte tecniche che al tempo risultavano insoddisfacenti perché i tubi così realizzati non sopportavano alte pressioni ed erano soggetti a deformazioni.

Grazie a questa nuova tecnologia le tecniche tradizionali vennero messe in secondo piano in quanto i tubi prodotti col metodo Mannesmann possedevano proprietà meccaniche decisamente superiori.

Questo metodo di produzione ebbe subito un gran successo, al punto che in pochi anni vennero realizzati stabilimenti produttivi non solo in Germania, ma anche in Gran Bretagna, Francia e Italia, più precisamente nella località di Dalmine, vicino a Bergamo.

Attualmente, grazie all'introduzione dei nuovi sistemi elettrici di saldatura, si è potuto ritornare anche alla fabbricazione di tubi saldati, anch'essi ormai con ottime prestazioni meccaniche e strutturali.

Entriamo ora nel dettaglio di quello che è il processo produttivo per la realizzazione di questa tipologia di tubo.

1.1.1 – Processo Produttivo

Il processo di produzione dei tubi seamless si articola in due fasi principali:

- *Produzione del forato*: il lingotto o il laminato pieno vengono trasformati in un corpo forato caratterizzato da pareti spesse e di limitata lunghezza;
- *Stiratura o finitura*: il forato viene allungato con conseguente diminuzione di spessore mediante laminazione longitudinale.

1.1.1.1 – Produzione del forato

In questa prima fase viene utilizzato metodo di produzione brevettato dai fratelli Mannesmann.

Questo metodo è utilizzato in diversi processi tecnologici tra i quali:

- Metodo Mannesmann o della laminazione obliqua;
- Metodo Stiefel;
- Laminatoio presso-foratore (Press Piercing Mill) PPM.

In tutti i procedimenti appena descritti è previsto l'utilizzo di una spina interna per calibrare il foro.

METODO MANNESMANN

Il principio sulla quale si basa il processo consiste nella compressione di un massello plastico cilindrico tra due cilindri rotanti nello stesso senso.

La faccia superiore del massello tende a scorrere in senso opposto rispetto a quella inferiore, si genera uno stato tensionale nel materiale tale che nella zona centrale lo scorrimento del materiale provoca la lacerazione dello stesso (vedi fig.3).

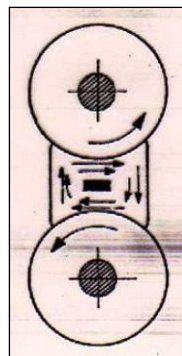


fig. 3 - Rappresentazione stato tensionale

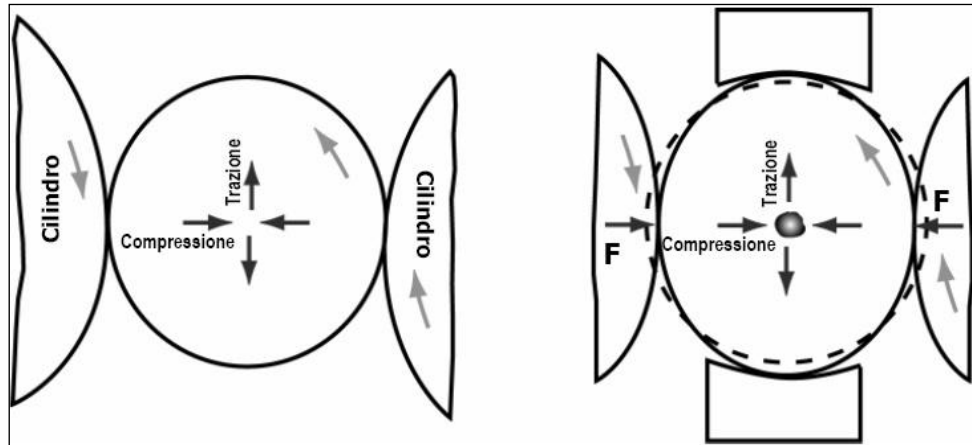


fig. 4 - Raffigurazione sistema prima e dopo il contatto

Nel procedimento Mannesmann classico, il massello plastico è una barra di acciaio riscaldato a circa 1300°C.

I cilindri del laminatoio sono montati ad assi sghembi.

La parte anteriore dei cilindri è sagomata a botte per facilitare l'ingresso della barra e aumentare gradualmente la pressione.

Azione di compressione generata dai cilindri crea un'azione di attrito tra rulli e tubo indicata in fig.5 come T .

Questa è inclinata rispetto l'asse del tubo, presenta quindi due componenti:

- Una ortogonale all'asse del tubo che impartisce la rotazione;
- Una in direzione dell'asse del tubo responsabile dell'avanzamento.

Di seguito uno schema che illustra il principio di funzionamento del processo che stiamo descrivendo e delle raffigurazioni che descrivono qualitativamente la deformazione del pezzo durante il processo.

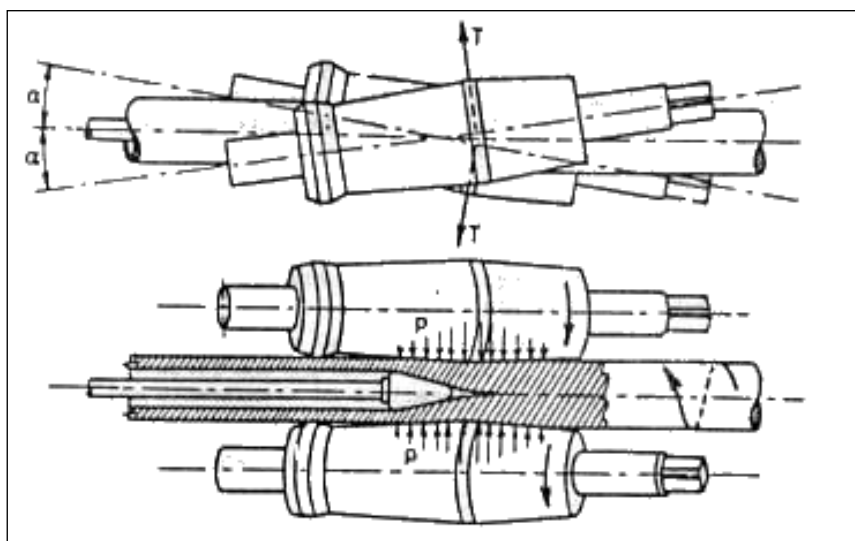


fig. 5 - Schema di principio del procedimento Mannesmann

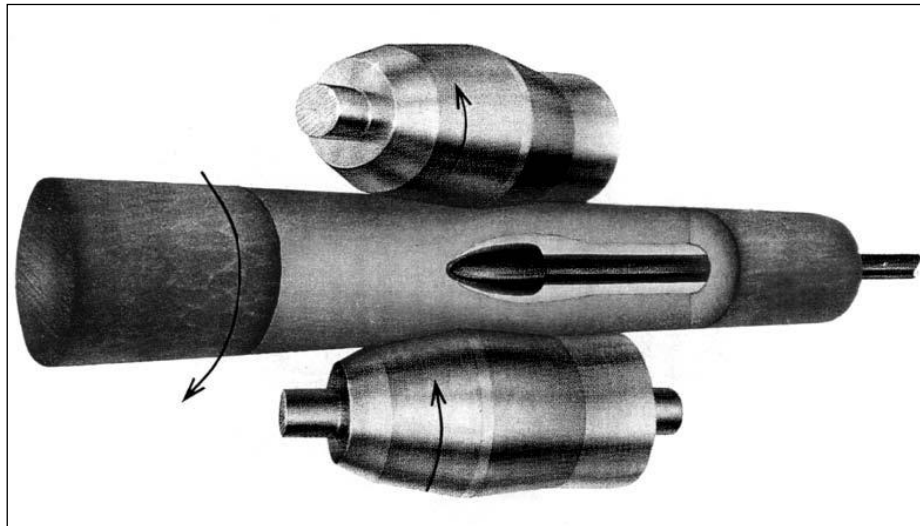


fig. 6 - Raffigurazione tecnologia Mannesmann

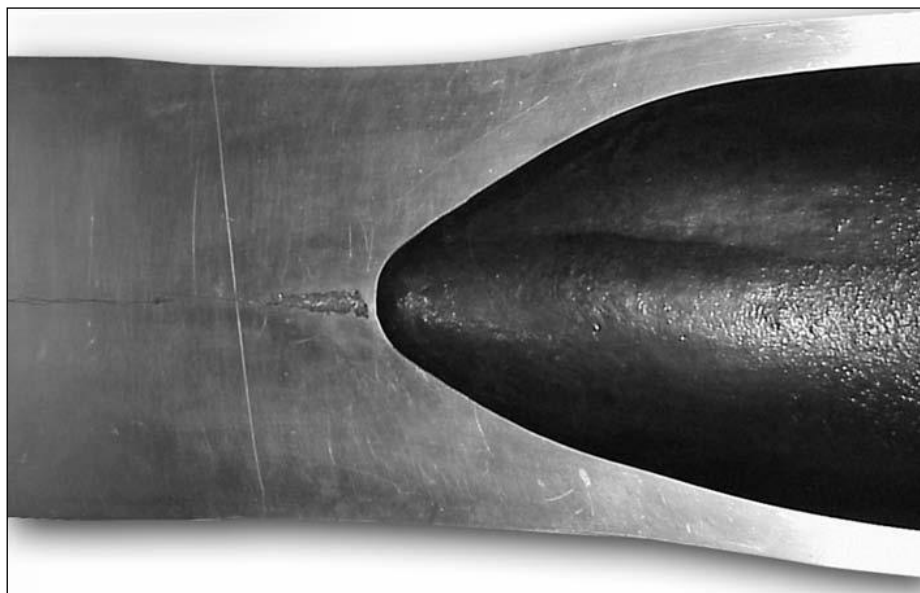


fig. 7 - Sezione del forato

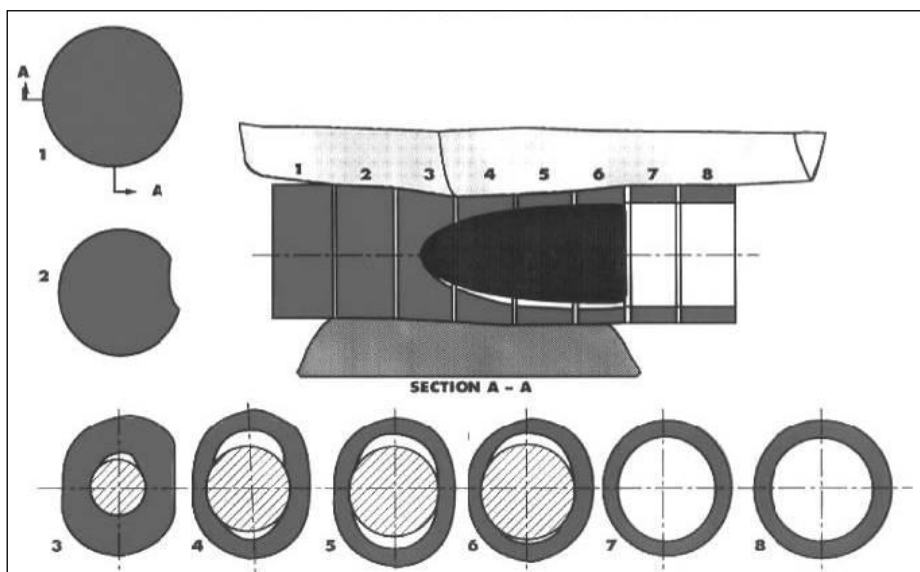


fig. 8 - Raffigurazione qualitativa calibrazione dell'interno

Durante questo processo il pezzo in lavorazione può subire un allungamento fino a $1,5 \div 2$ volte rispetto la lunghezza iniziale, mentre la sezione può ridursi da un 33% fino ad un 50%.

METODO STIEFEL

Anche il metodo Stiefel ed il PPM sfruttano il principio di Mannesmann alla base della loro tecnologia.

Nel caso del metodo Stiefel, la differenza principale dal metodo Mannesmann risiede nell'impiego di due dischi di forma piano-conica che ruotano con asse di rotazione ortogonale all'asse del tubo.

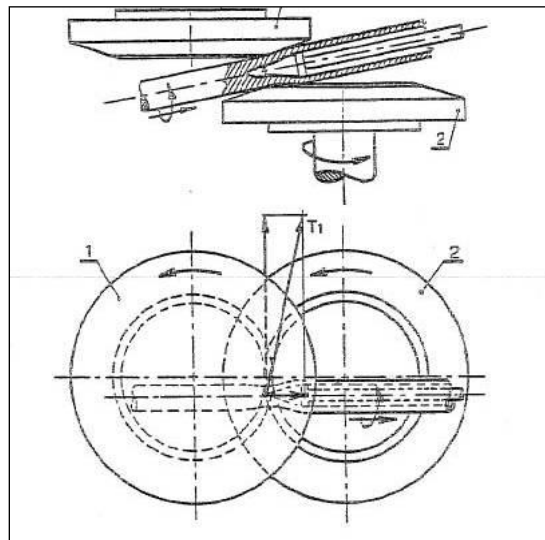


fig. 9 - Schema di principio del procedimento Stiefel

Come si può osservare da fig.9, l'asse del tubo è spostato dal piano formato dagli assi dei dischi.

Questo accorgimento ha la funzione di generare una componente tangenziale della pressione esercitata tale da consentire l'avanzamento del pezzo.

LAMINATOIO PRESSO-FORATORE

In PPM (Press Piercing Mill), per la produzione di tubo vengono utilizzati dei rulli sagomati.

La materia prima di partenza è un pieno a sezione quadrata, a differenza dei processi fino ad ora descritti i quali richiedono un pieno di sezione circolare.

In questo tipo di processo sono due i fenomeni principali:

- Sagomatura della superficie esterna: questa per effetto della compressione tra i rulli assume un profilo circolare;
- Foratura del pieno.

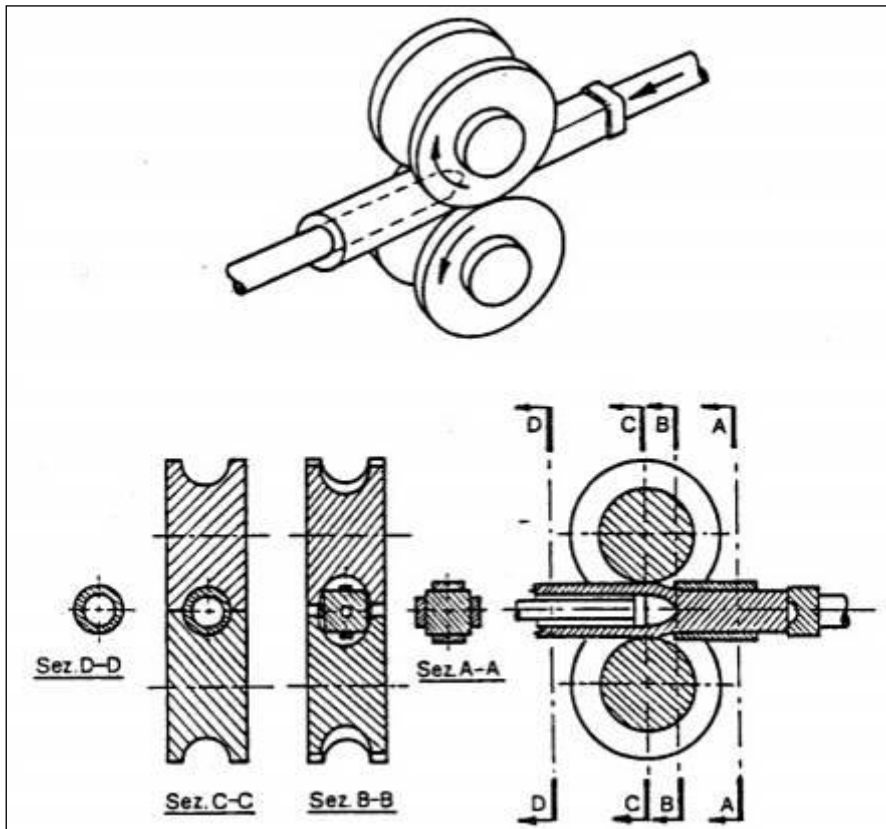


fig. 10 - Schema di principio del procedimento di presso-foratura

Con questo metodo si ottiene una qualità superiore del tubo rispetto ai metodi precedentemente descritti in quanto le sollecitazioni che induciamo nel materiale sono prevalentemente di compressione.

In fig.10 è possibile identificare fasi che compongono la lavorazione:

- Sez. A-A: quadro di partenza all'interno di una guida;
- Sez. B-B: fase di imbocco;
- Sez. C-C: fase di laminazione-foratura;
- Sez. D-D: forato con fondello.

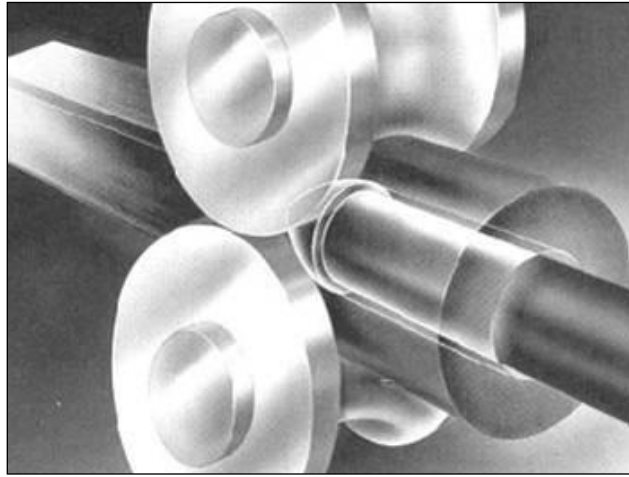


fig. 11 – Raffigurazione tecnologia PPM

1.1.1.2 – Stiratura e finitura

A seguito della foratura del pieno, è necessario eseguire delle operazioni al fine di calibrare il semilavorato alle dimensioni richieste.

A tale scopo esistono diverse tecnologie produttive quali:

- Laminatoio a passo di pellegrino;
- Laminatoio a tappo;
- Laminatoio continuo;
- Laminatoio a spinta;
- Laminatoio riduttore stiratore.

LAMINATOIO A PASSO DI PELLEGRINO

Il sistema è composto da:

- Due cilindri sagomati per la sagomatura del pezzo in lavorazione;
- Un pistone collegato ad un apparato di movimentazione che alimenta il pezzo all'interno del sistema.

Di seguito un'immagine rappresentativa della sagoma dei rulli utilizzati per la calibrazione.

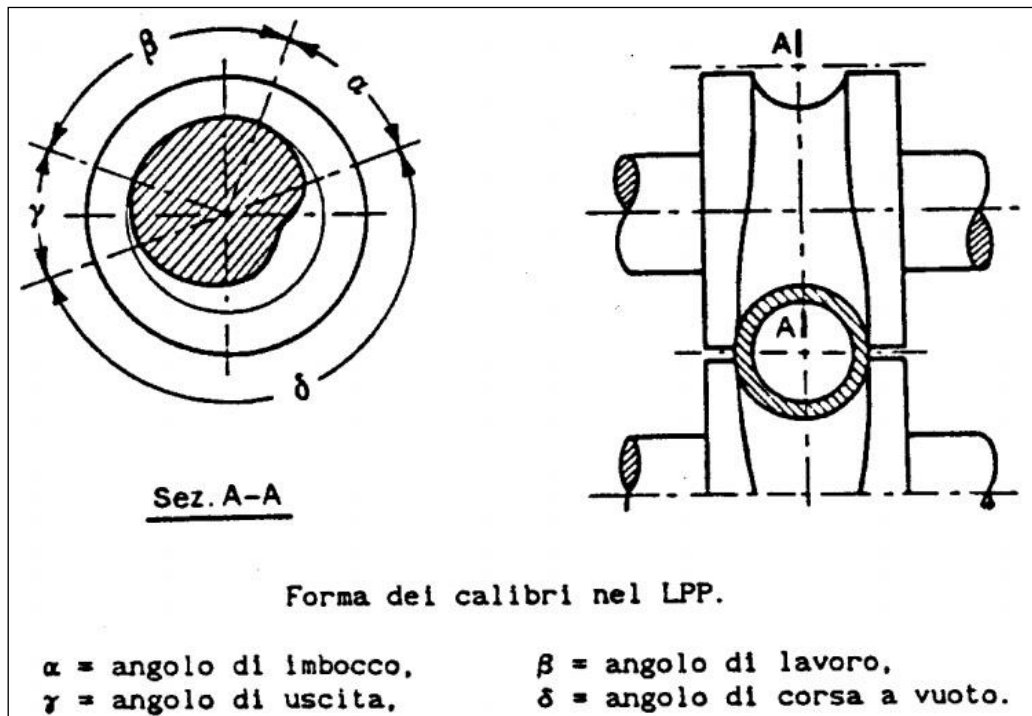


fig. 12 - Sagoma rulli

Il rullo è suddiviso in quattro regioni, che identificano le fasi di cui è composta questa lavorazione.

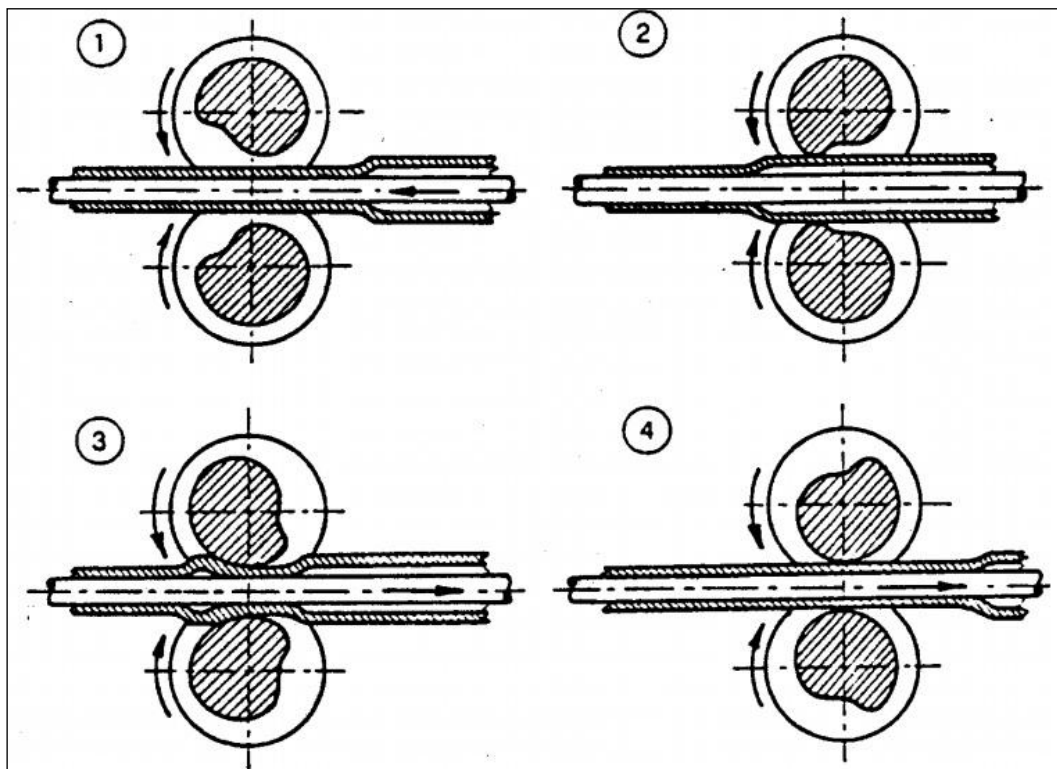


fig. 13 - Fasi lavorazione passo di pellegrino

Ai rulli viene impartita una rotazione in direzione opposta a quella di avanzamento del tubo.

Le fasi del processo sono le seguenti:

1. I rulli si trovano nella regione di corsa a vuoto, il tubo viene fatto avanzare per mezzo del pistone centrale fino a che non raggiunge la posizione di lavoro;
2. Il rullo viene a contatto con il tubo e si comincia a deformare;
3. Il tubo viene calibrato alla dimensione definita nella regione di lavoro dei rulli, viene inoltre invertito il moto del pistone per favorire l'operazione;
4. Uscita del tubo dalla zona di lavoro.

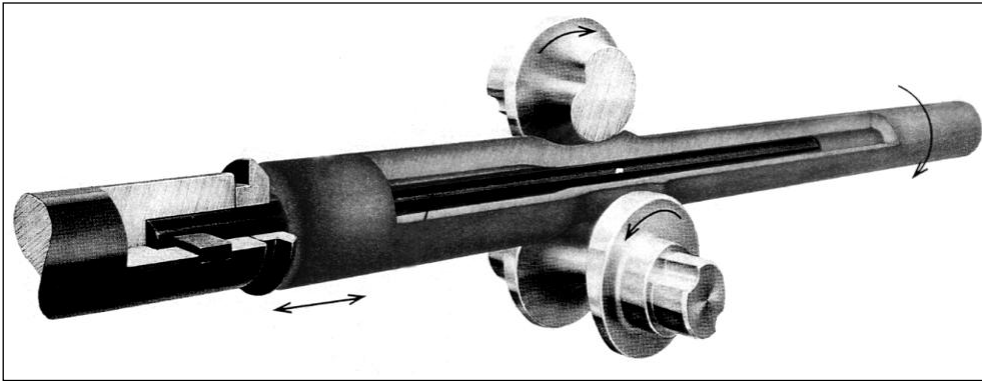


fig. 14 - Rappresentazione calibratura a passo di pellegrino

Questo processo copre una vasta gamma produttiva con le seguenti caratteristiche:

- $OD = 60 \div 660$ mm;
- $t = 3 \div 125$ mm;
- $L < 28$ m.

LAMINATOIO A TAPPO

Questa tecnologia prevede l'utilizzo di una serie di coppie di rulli contro-rotanti con luce di passaggio variabile.

All'interno è prevista una spina, denominata "tappo", a cui viene deputata la funzione di calibratura della sezione interna del tubo.

Questo genere di lavorazione richiede generalmente passate in posizioni diverse per giungere al diametro ed allo spessore richiesto.

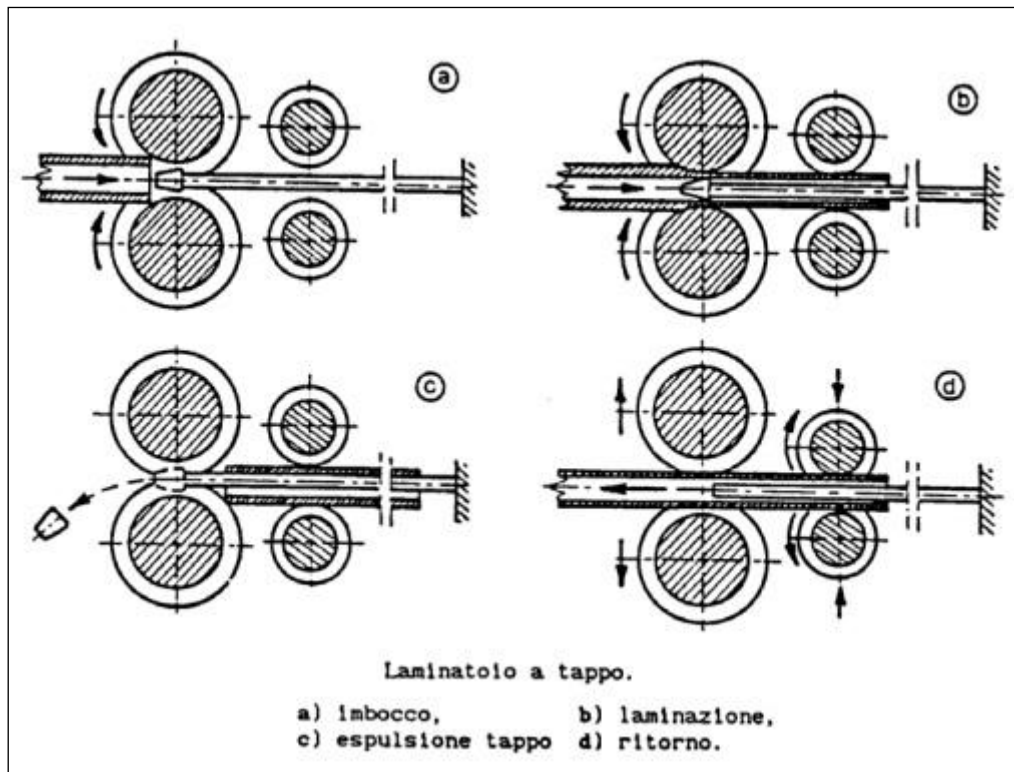


fig. 15 - Raffigurazione laminatoio a tappo

Il range di dimensioni che è in grado di coprire questa tecnologia è:

- OD = 120 ÷ 400 mm;
- L < 18m.

LAMINATOIO CONTINUO

Consiste in una sequenza di 8-9 gabbie con assi disposti a 90° in sequenza che svolgono le funzioni di sbozzatura, laminazione e finitura.

Il diametro esterno viene progressivamente ridotto, mentre l'interno viene calibrato su un mandrino a sezione costante.

Come effetto della variazione di sezione abbiamo un andamento variabile della velocità in direzione assiale progredendo lungo il laminatoio.

I rulli sono sincronizzati con la velocità del tubo nella regione nella quale si trovano a lavorare.

Di seguito delle raffigurazioni che rappresentano il processo di laminazione continua.

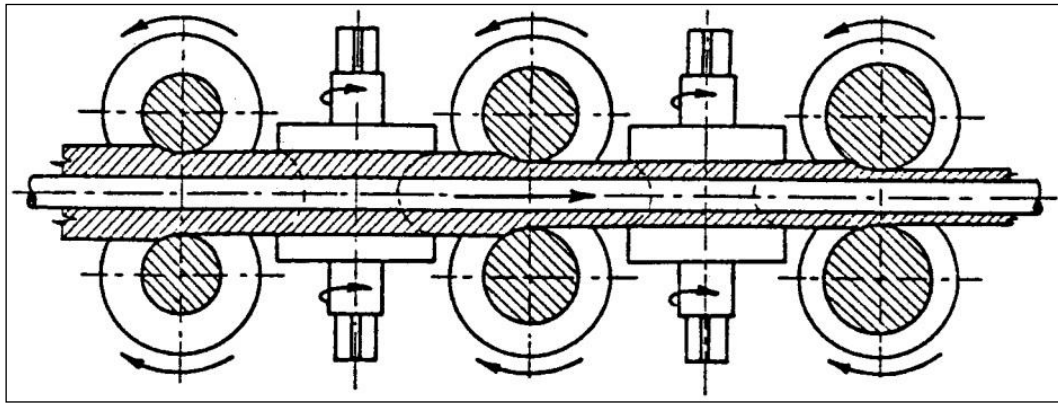


fig. 16 - Schema impianto di laminazione continua

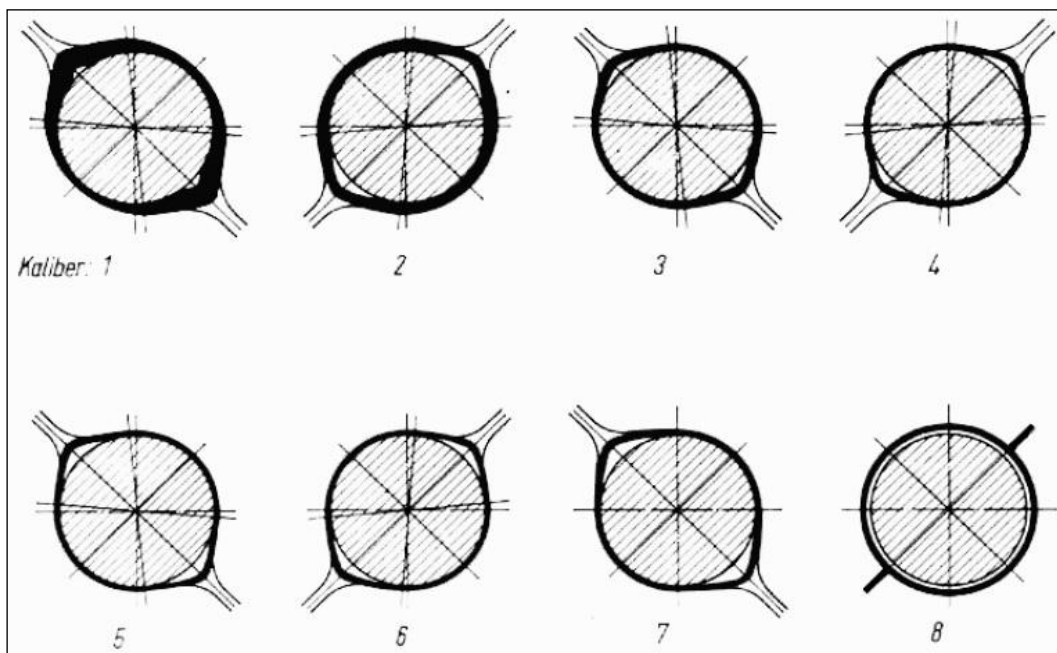


fig. 17 - Schema rappresentativo dei calibri per laminazione in continua

Nello schema raffigurato in fig.17, è evidente come lo spessore del tubo progredendo all'interno del laminatoio venga ridotto fino alla misura nominale.

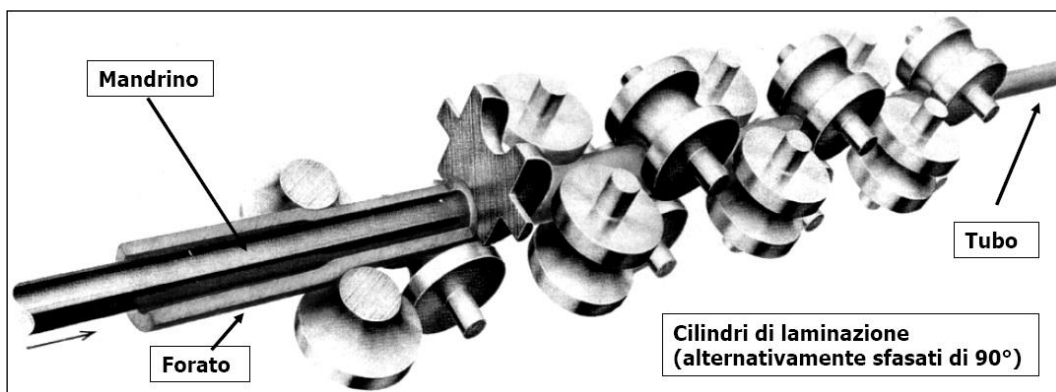


fig. 18 - Rappresentazione impianto di laminazione continua

LAMINATOIO A SPINTA

Nei laminatoi a spinta il moto di avanzamento è garantito dall'anima calibrata centrale.

Il semilavorato deve permettere l'appoggio del mandrino interno su un riscontro, quindi la testa deve essere chiusa.

Questo tipo di semilavorato viene definito "forato a bicchiere".

Questi tipi di laminatoi si distinguono ulteriormente in due categorie:

- Laminatoio obliquo a spalla;
- Treno di laminazione.

Il *laminatoio obliquo a spalla* è principalmente costituito da due o tre cilindri con assi sghembi.

Ogni cilindro presenta un gradino conico, cosiddetta "spalla", che ha la funzione di laminazione.

Questo tipo di lavorazione può avvenire anche senza fondello.

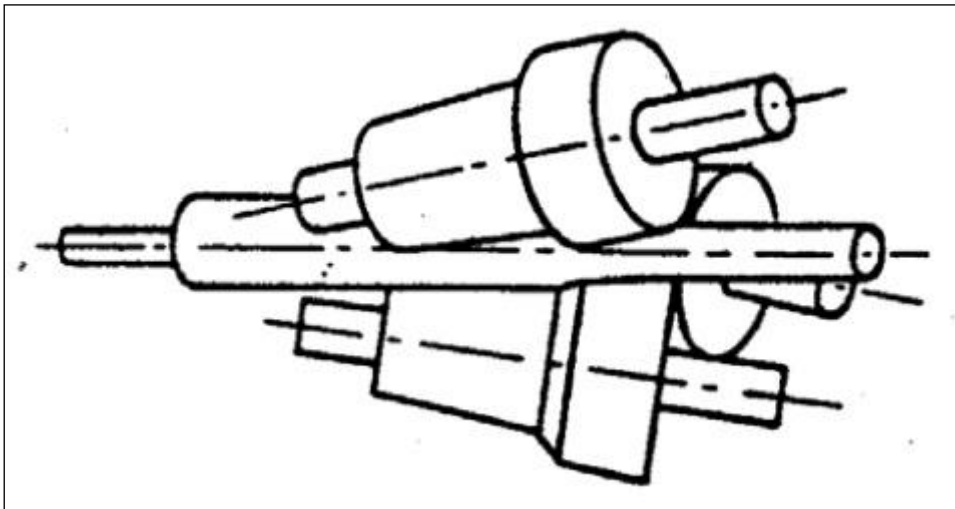


fig. 19 - Raffigurazione laminatoio obliquo a spalla

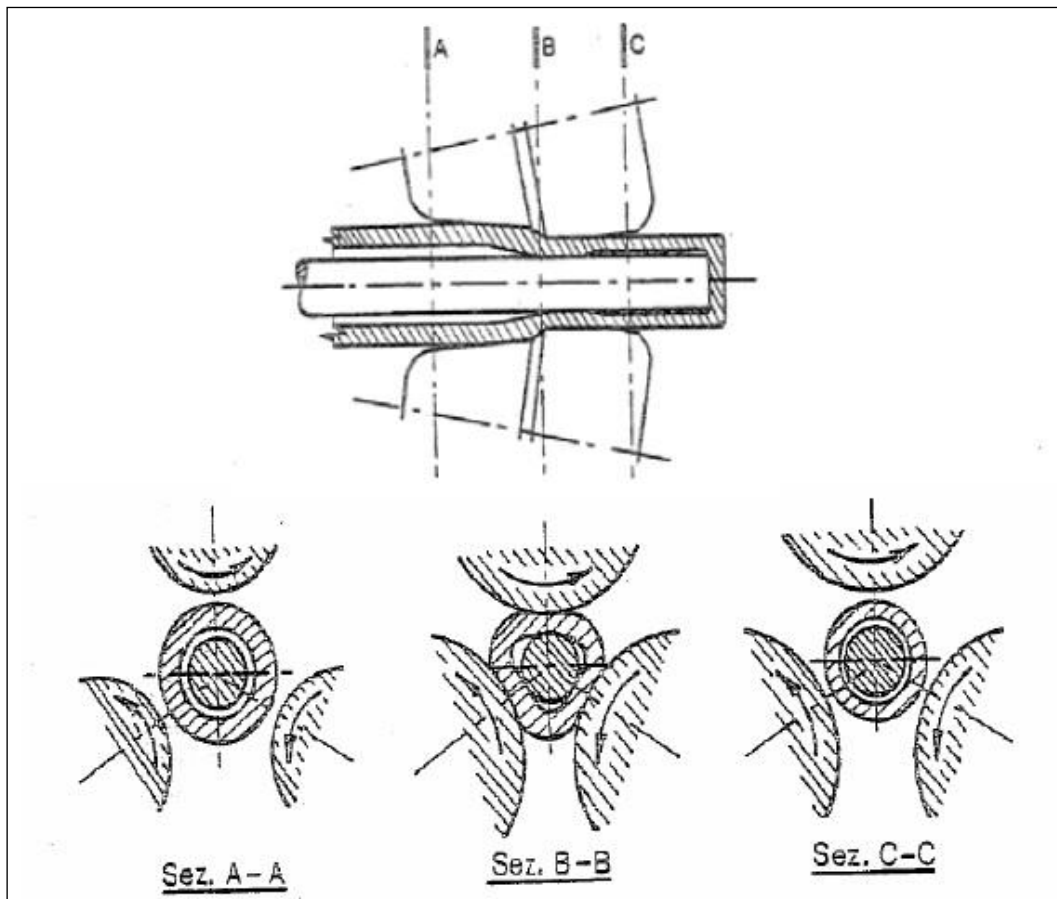


fig. 20 - Schema di lavoro laminatoio obliquo a sballa

Per quanto riguarda il *treno di laminazione* (fig.21), questo è composto al massimo da 15 gabbie, ognuna delle quali è composta da tre rulli folli posizionati a 120°.

È necessario per permettere l'estrazione del pezzo lavorato un passaggio finale in una gabbia con laminazione obliqua.

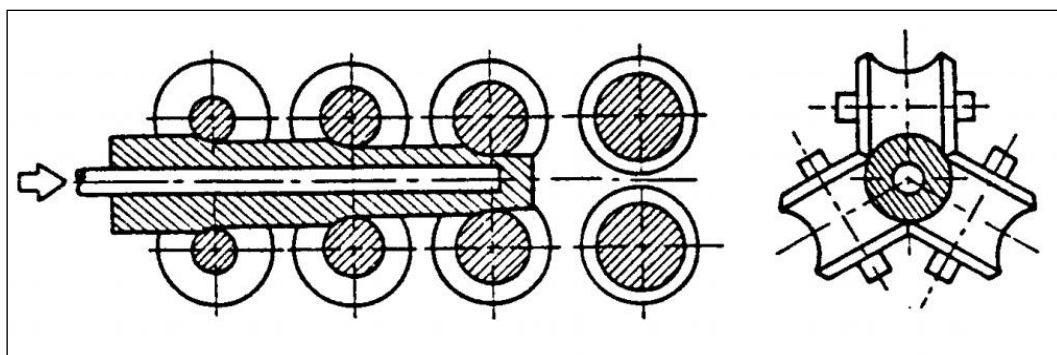


fig. 21 - Treno di laminazione

Dobbiamo inoltre considerare che, essendo il tubo spinto lungo la linea per mezzo di un mandrino questo al termine della lavorazione deve essere riportato in posizione zero.

Deve essere prevista quindi un'apposita linea di movimentazione del mandrino, come possiamo vedere in fig.22.

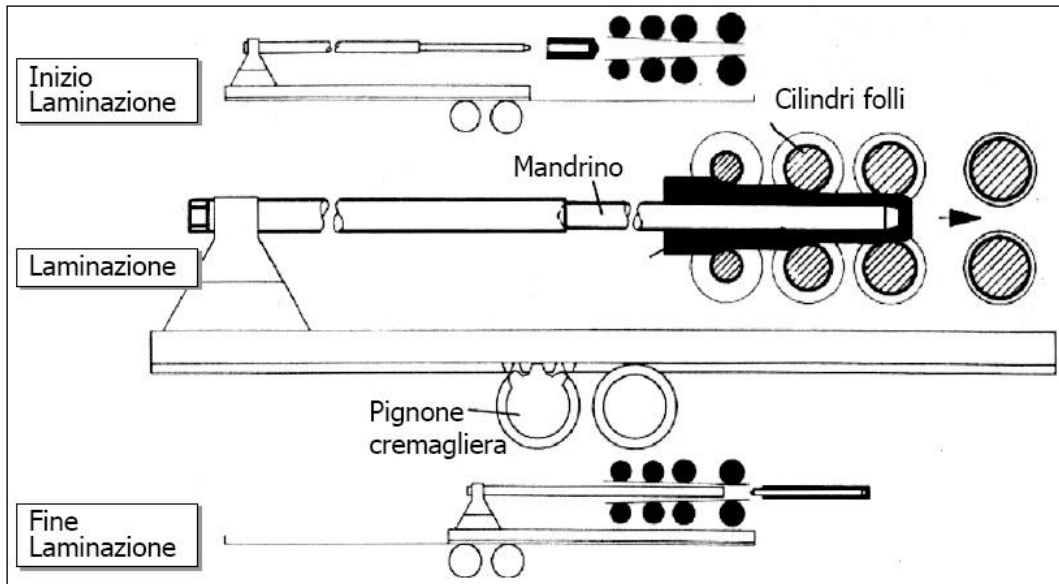


fig. 22 - Banco di spinta, treno di laminazione

Il range di tubi lavorati in questo tipo di linee hanno le seguenti caratteristiche:

- OD < 150 mm;
- L < 18 m.

LAMINATOIO RIDUTTORE STIRATORE

Il *laminatoio riduttore-stiratore* è architettonicamente molto simile ad un treno di laminazione, ma presenta una differenza molto importante ovvero l'assenza dell'anima calibratrice interna.

Questo è possibile grazie al fatto che la successione delle gabbie non presenta solo una sollecitazione progressiva di compressione del forato come avviene nel treno di laminazione, ma bensì anche un progressivo stato di trazione.

L'andamento di diametro interno e spessore del tubo varia dunque in funzione della gabbia attraversata e dello stato di avanzamento della laminazione.

Nelle prime gabbie abbiamo una compressione del diametro esterno con aumento dello spessore.

Procedendo lungo la linea il contributo di trazione dei rulli successivi diventa sempre più alto fino a che non fa sì che lo spessore cominci ad assottigliarsi.

In questo tipo di lavorazione generalmente la porzione iniziale e finale del tubo rappresenta lo sfrido, in quanto il diametro interno non è calibrato come quello del tubo lavorato.

Le gabbie nel laminatoio riduttore stiratore possono essere composte da due o tre rulli, posti rispettivamente a 180° o 120°.

Gabbie adiacenti sono tra di loro sfasate ancora di 90° o 60° a seconda che le stesse siano a due o tre rulli.

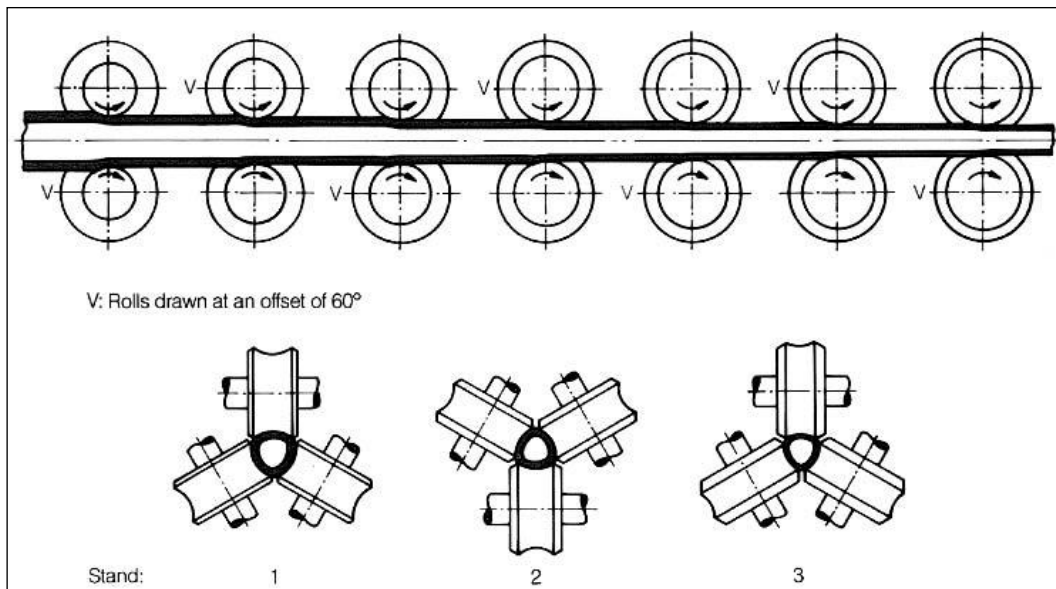


fig. 23 – Laminatoio riduttore-stiratore a 3 rulli

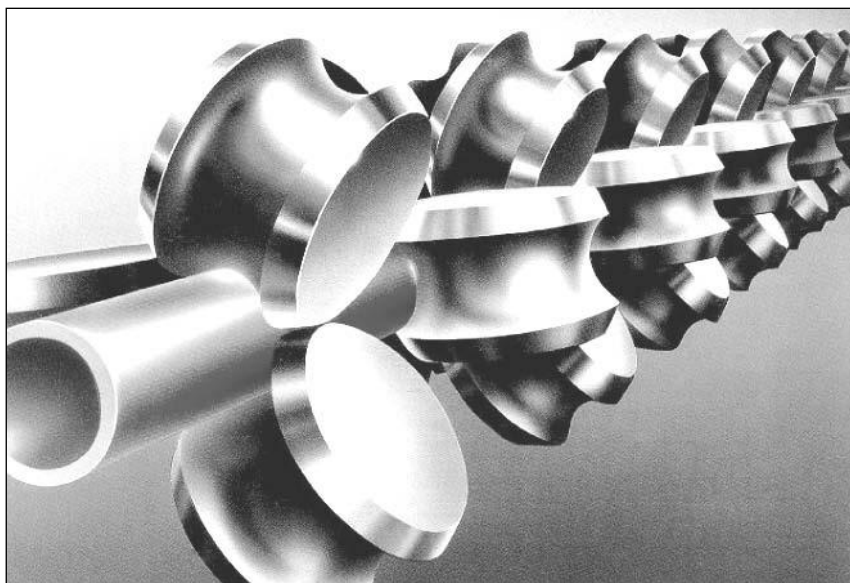


fig. 24 - Raffigurazione laminatoio riduttore-stiratore a 3 rulli

1.2 – Tubo Welded

A differenza del tubo seamless, ottenuto per deformazione dal pieno, il tubo welded, ovvero saldato, è ottenuto dalla piegatura su se stesso di un nastro del quale vengono saldati assieme i lembi.

Da quando si sono resi disponibili sul mercato i nastri si è sempre provato ad utilizzarli per la produzione di tubi.

Nel tempo si svilupparono diversi tipi di processi, più o meno efficienti e che garantivano al tubo prestazioni diverse.

Si è passati dalla saldatura dei lembi attraverso una fornace saldatrice, a quella per effetto joule (ovvero riscaldamento ottenuto attraverso un flusso di elettroni nel materiale), fino ad arrivare alla seconda guerra mondiale con la messa a punto della saldatura ad arco con argon.

I tubi saldati possono presentare un cordone di saldatura longitudinale o a spirale.

Le dimensioni entro le quali si può produrre un tubo con questa tecnologia sono:

- $D = 6 \div 2500$ mm;
- $t = 0.5 \div 40$ mm.

Le caratteristiche fisiche e la finitura superficiale sono le stesse dei nastri di partenza.

Se fossero richieste specifiche diverse sarebbe necessario aggiungere a valle del processo le attrezzature necessarie ad ottenerle.

Tutti i metodi di saldatura utilizzati possono essere classificati all'interno di due famiglie:

- Processi di saldatura a pressione;
- Processi di saldatura a fusione.

I metodi più utilizzati per la produzione di tubo saldato sono:

- Processo Fretz-Moon (saldatura a pressione);
- Induzione ad alta frequenza, HFI (saldatura a pressione);
- Ad arco sommerso (saldatura a fusione);

- Processo con gas di protezione per l'acciaio inossidabile (saldatura a fusione).

Descriviamo di seguito i metodi sopra citati.

1.2.1 – Processi di saldatura a pressione

PROCESSO FRETZ-MOON

Nel processo Fretz-Moon il nastro viene scaldato per la saldatura nella linea di formatura.

Si ottiene quindi un nastro ad alta temperatura dove le estremità risultano più calde di 100/150°C rispetto il centro.

Il nastro viene a questo punto rullato per fargli ottenere la forma cilindrica e successivamente attraverso l'uso di rulli vengono pressati gli spigoli assieme e saldati. È una tecnica di forgiatura-saldatura.

Si possono ottenere tubi da 40 a 114 mm di diametro esterno con velocità di processo rispettivamente di 200 e 100 m/min.

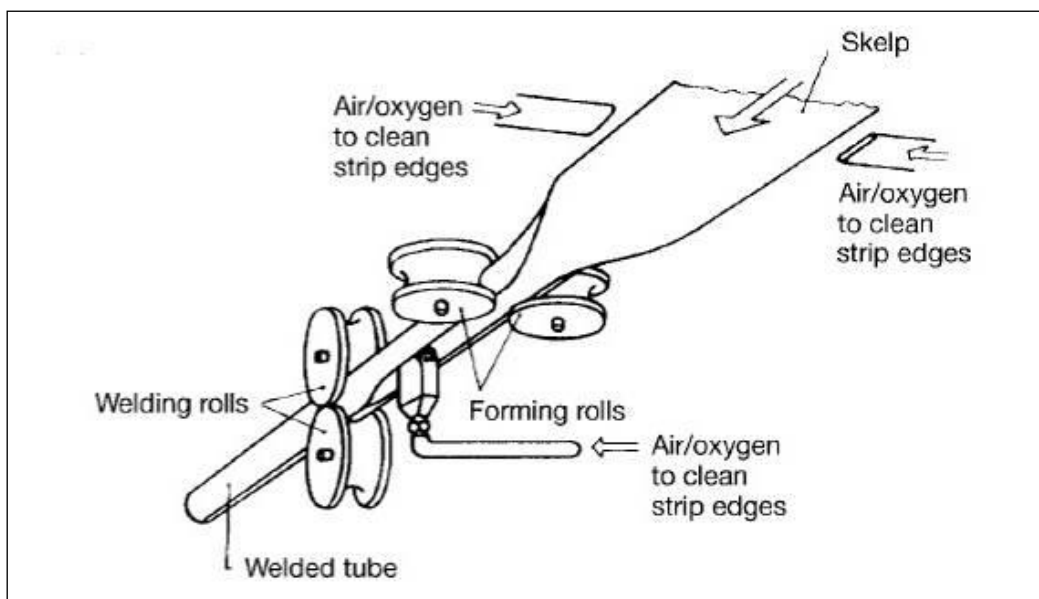


fig. 25 - Processo di Fretz-Moon

INDUZIONE AD ALTA FREQUENZA

Questo processo nasce negli anni '60 come evoluzione del processo di saldatura per induzione a bassa frequenza.

Il principio si basa sull'applicazione di una corrente alternata ad alta frequenza, circa 200 ÷ 500 kHz.

La linea è formata da rulli che progressivamente formano il tubo e che in un secondo momento impartiscono ai lembi del nastro la pressione necessaria a permetterne la saldatura senza l'utilizzo di materiale da apporto.

Utilizzando per la saldatura una corrente ad alta frequenza questo ci porta un notevole vantaggio in quanto si verifica nel tubo l' "effetto pelle", ovvero la corrente indotta dal campo magnetico tende a concentrarsi sul bordo della sezione del tubo assicurandoci una concentrazione di potere calorifero nei lembi da saldare.

La corrente può essere introdotta nel tubo in lavorazione attraverso due metodi:

- Per *conduzione*, attraverso due elettrodi a contatto con i lembi del tubo (High Frequency Conduction Welding, HFC);
- Per *induzione*, utilizzando il campo magnetico generato da una bobina avvolta attorno al tubo (High Frequency Induction Welding, HFI).

Si possono ottenere tubi da 20 a 609 mm di diametro esterno, spessori da 0.5 a 16 mm con velocità di processo da 10 e 120 m/min.

I nastri vengono solitamente forniti in bobine, che vengono saldate tra di loro per avere una produzione continua.

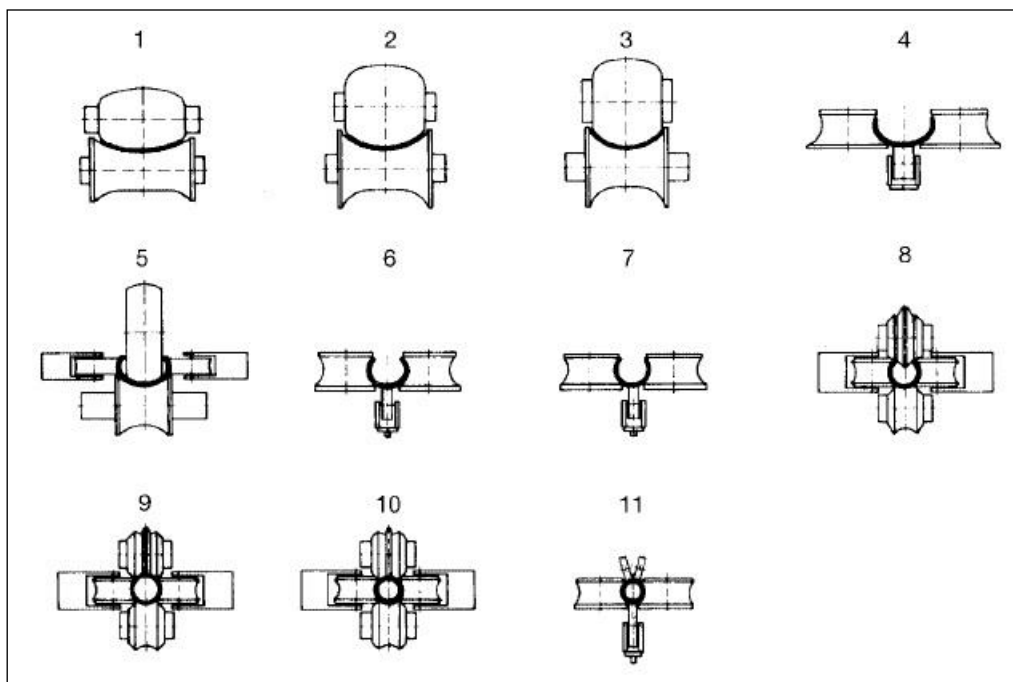


fig. 26 - Sequenza HFI

In fig.26 è riportata la sequenza di rulli che permettono di sagomare il tubo al nastro ed infine saldarlo.

Generalmente la linea è composta da 8 a 10 gruppi di rulli.

In figura i rulli da 1 a 7 formano il profilo del tubo, mentre i rulli da 8 a 10 guidano il tubo prima dell'ingresso nella zona di saldatura, 11.

In questo processo è fondamentale che i rulli siano perfettamente calibrati al fine di ottenere il diametro esterno desiderato.

Per ottenere tubi di grande diametro si utilizza una linea tipo quella rappresentata in fig. 27.

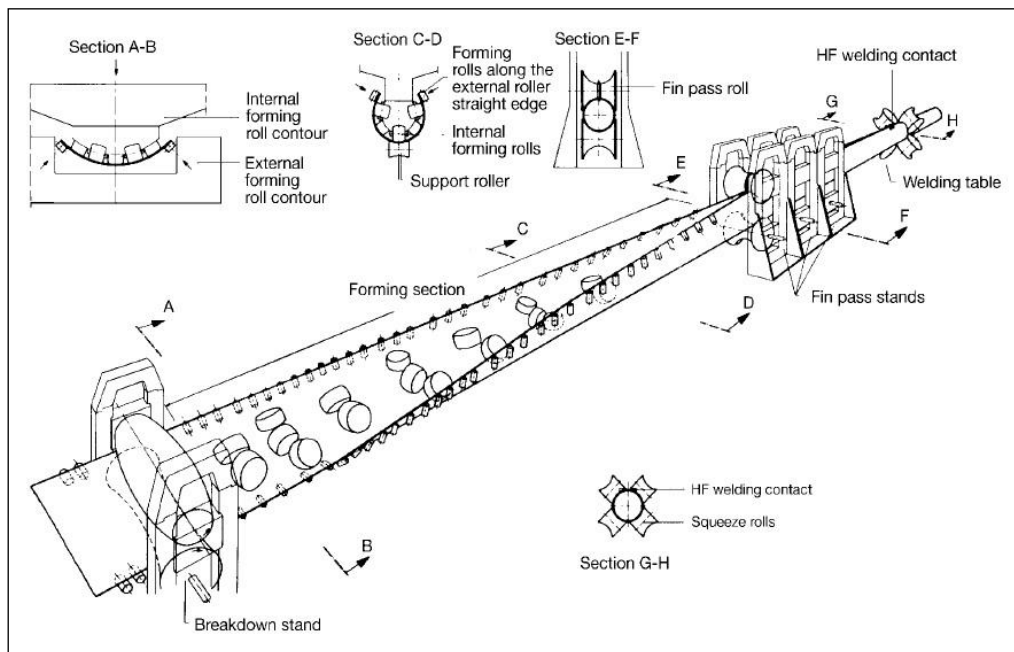


fig. 27 – Sequenza HFI per grandi diametri

Caratteristica di questo sistema è la presenza di rulli non guidati sia sulla superficie interna che sulla superficie esterna del nastro.

Sono i due stands che hanno funzione di guidare il processo.

In figura sono inoltre rappresentati i gradi di deformazione del nastro in diversi punti della linea.

In questi tipo di linea, per abbattere i costi dovuti all'attrezzaggio si è sviluppato un metodo computerizzato per la regolazione dei rulli folli al fine di ottenere diametri dei tubo finito diversi.

I rulli guida presenti dopo la linea dei rulli formatori mi permettono di arrivare col tubo nella zona di saldatura avendo in controllo della geometria della zona di saldatura, o meglio del gap e dell'angolo.

I lembi così posizionati vengono spinti verso dei rulli di compressione che tendono a pressarli tra di loro.

Prima di arrivare ai questi rulli troviamo la zona di riscaldamento, che come accennato prima può essere ad induzione o per conduzione, di seguito verranno riportati entrambi gli schemi.

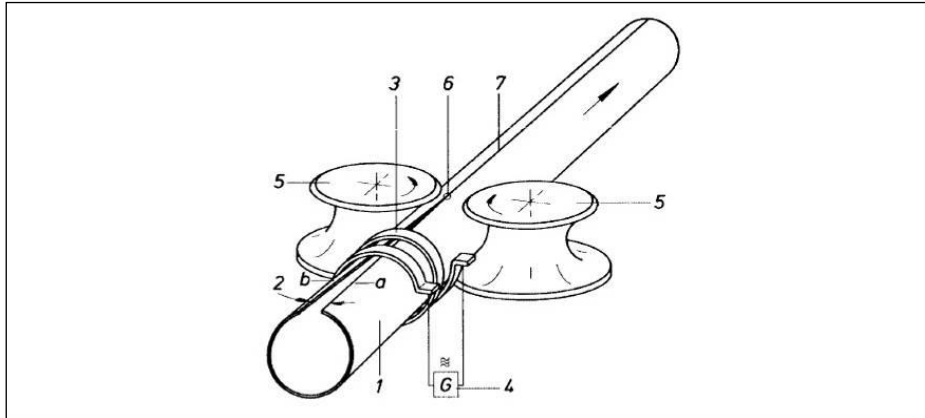


fig. 28 - Schema saldatura HFI

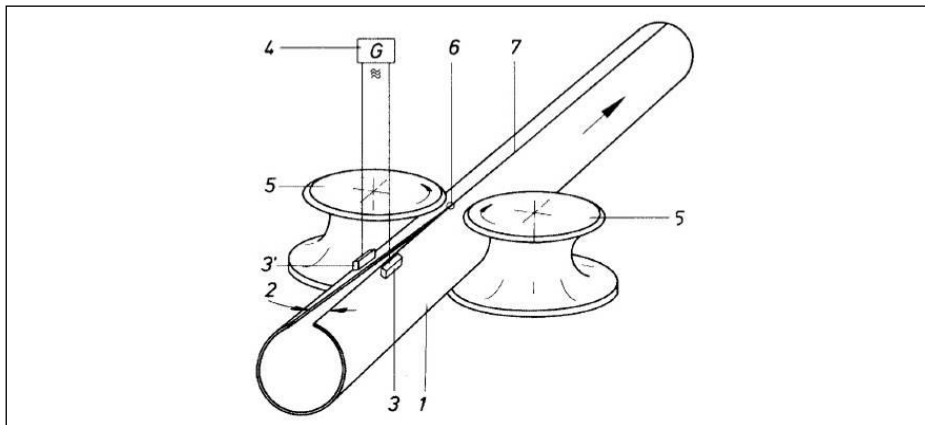


fig. 29 - Schema saldatura HFC

Nelle immagini possiamo distinguere:

1. Tubo in arrivo dalla linea di rullatura;
2. Angolo con il quale i lembi si presentano nella zona di riscaldamento;
3. Medium del riscaldamento:
 - a. HFI: induttore;
 - b. HFC: contatti striscianti;
4. Generatore per la saldatura;
5. Rulli di compressione
6. Punto di saldatura;
7. Saldatura.

A questo punto, si procede con la scordonatura della saldatura sulla superficie esterna ed interna del tubo a materiale ancora caldo.

Il tubo viene così calibrato in una successiva linea di raddrizzatura.

Vengono a questo punto effettuate delle prove non distruttive sul cordone di saldatura.

A seconda del tipo di applicazione a cui sono destinati questi tubi può essere o meno previsto un trattamento termico del tubo al fine di normalizzare la zona influenzata dalla saldatura.

Di seguito si possono mettere a confronto i cordoni di saldatura del tubo, non avendo eseguito il successivo trattamento termico (fig. 30a), e trattato termicamente (fig. 30b).

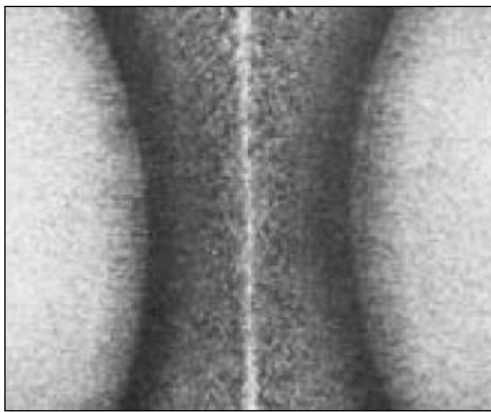


fig. 30a - Cordone non trattato

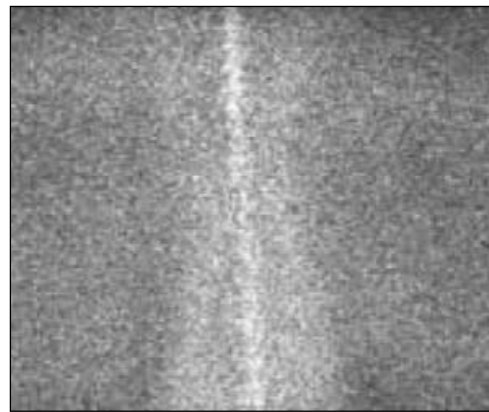


fig. 30b - Cordone trattato

A questo punto il tubo viene raddrizzato definitivamente ed è pronto per essere spedito al cliente.

Di seguito un'immagine riepilogativa della filiera per la produzione di tubo saldato.

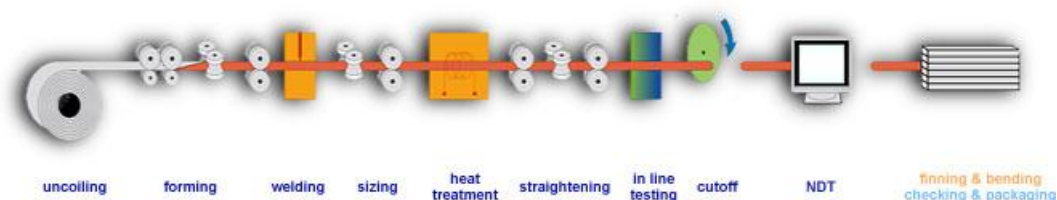


fig. 31 - Linea produzione tubo saldato

1.2.2 – Processi di saldatura a fusione

I processi di saldatura di tubi a fusione sono ai giorni nostri estremamente utilizzati per la produzione di tubi di diametro superiore a 457,2 mm (18”).

La prima fase di questo processo rimane la formatura della lamiera o del nastro per fargli assumere la forma con le dimensioni desiderate.

A questo scopo esistono diverse tecnologie:

- Calandratura per lamiere, a caldo o a freddo;
- Pressa a “C”, per la lavorazione di lamiera;
- Deformazione a “U” e “O” per lamiere;
- Formazione a spirale per nastri o lamiere.

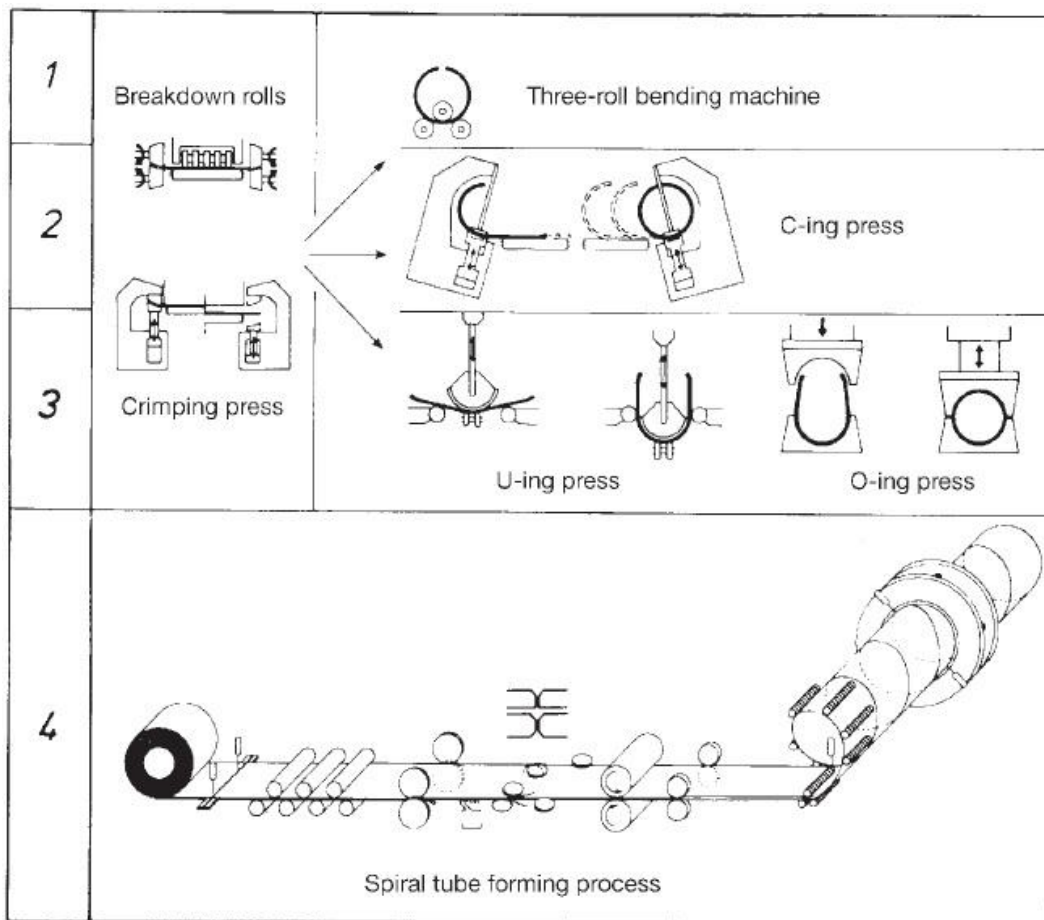


fig. 32 - Tabella riepilogativa processi formatura

Una volta formato il tubo, per la saldatura vengono utilizzati principalmente i seguenti metodi:

- Saldatura ad arco;
- Una combinazione di saldatura con gas protettivo ed a seguire una ad arco sommerso.

SALDATURA AD ARCO SOMMERSO

La tecnologia di saldatura ad arco sommerso, rispetto alle altre, si distingue per la caratteristica che l'arco è sommerso da un manto.

Il materiale di apporto viene alimentato nella zona di lavoro attraverso dei rulli che ne regolano l'avanzamento.

Di seguito uno schema esemplificativo di un impianto di saldatura ad arco sommerso.

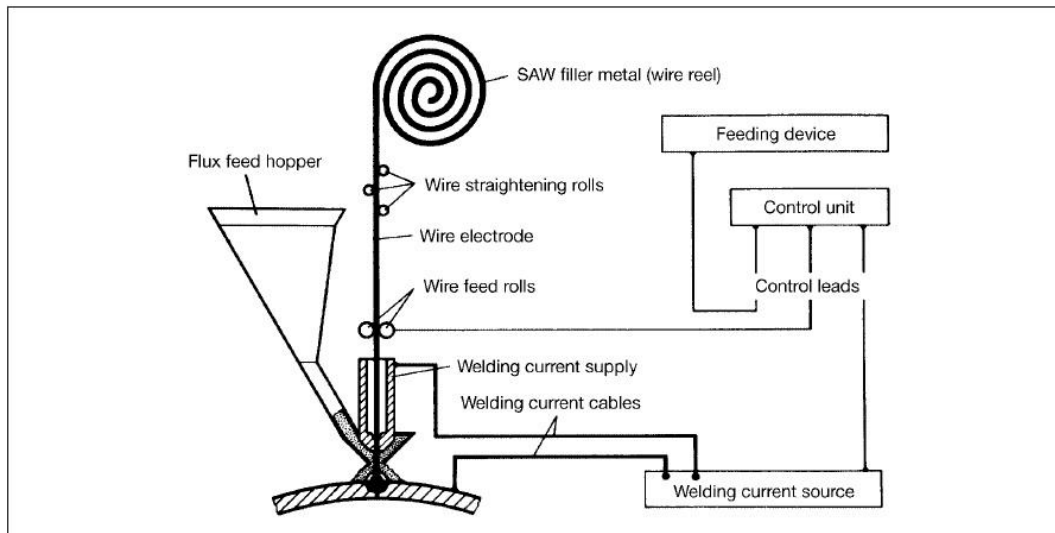


fig. 33 - Schema saldatura ad arco sommerso

L'arco che si genera tra il filo e i bordi provoca la fusione anche di una parte dei lembi e del materiale di protezione, che si deposita sul pelo libero del bagno di saldatura proteggendolo dall'ambiente.

La parte di polvere non utilizzata dal processo viene raccolta da un sistema di aspirazione e resa disponibile in futuro.

Una volta raffreddata la zona di saldatura è possibile rimuovere la scoria.

Solitamente con questo tipo di saldatura è necessario fare due passate, una dall'interno e successivamente una dall'esterno avendo cura di avere sovrapposizione tra le due (fig. 33).

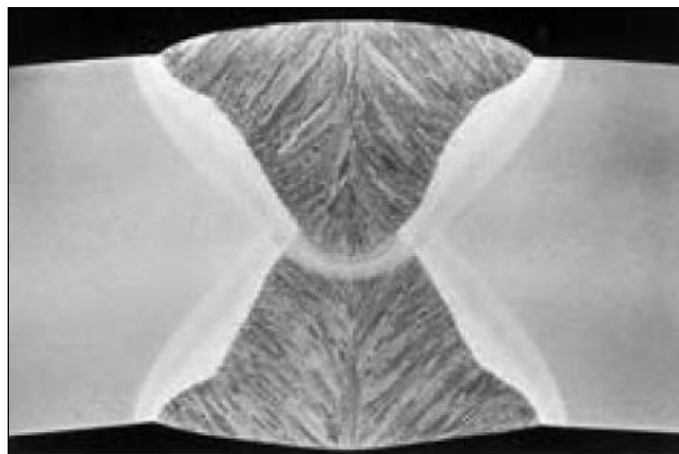


fig. 34 - Doppia passata per saldatura ad arco sommerso

Questo tipo di saldatura può anche essere effettuato utilizzando più fili contemporaneamente per la saldatura.

Per saldare spessore fino a 20 mm si usano tre fili contemporaneamente, per spessori superiori si utilizzano quattro fili nell'ottica di mantenere una produttività sufficientemente elevata.

Una volta terminata la saldatura solitamente non sono necessarie successive lavorazioni per conformare il prodotto agli standard qualitativi richiesti.

La velocità di questo tipo di lavorazione si mantiene intorno ad $1 \div 2,5$ m/min, ma è funzione di diversi parametri quali:

- Processo di saldatura;
- Spessore del tubo;
- Tipo di sabbia utilizzata.

PROCESSO DI SALDATURA CON GAS DI PROTEZIONE

In questo tipo di processo a differenza del precedente l'arco che si instaura tra elettrodo e pezzo è visibile durante la fase di lavoro.

Il bagno di saldatura è protetto da una continua alimentazione di gas inerte o attivo nella zona di saldatura.

Esistono diverse tipologie di saldatura con gas di protezione e queste vengono classificate in base a tipo di elettrodo e al gas di protezione utilizzato.

Una prima classificazione viene fatta sul tipo di elettrodo utilizzato e successivamente sul gas di protezione:

- Elettrodo in tungsteno:
 - Saldatura con gas inerte, TIG;
 - Saldatura al plasma, TP;
 - Saldatura con idrogeno, THG;
- Elettrodo metallico:
 - Saldatura con gas inerte, MIG;
 - Saldatura con gas attivo, MAG.

I processi maggiormente utilizzati per la saldatura di tubi e condotti sono TIG, MIG e MAG.

Il gas di protezione utilizzato in MIG è un gas inerte, solitamente Helio, Argon o una miscela dei due.

Per quanto riguarda il MAG il gas è attivo, viene utilizzata in genere anidride carbonica o una miscela di anidride carbonica, ossigeno e argon.

Il MAG trova un forte impiego nella saldatura a spirale dei tubi seguito da una saldatura ad arco sommerso.

Fondamentale importanza per ottenere una buona saldatura sia dal punto di vista metallurgico che dal punto di vista tecnologico del processo è la preparazione dei lembi, generalmente preparati a doppia-V.

1.3 – Formatura a freddo

Una grande parte dei tubi seamless e welded prodotti con le tecnologie precedentemente descritte subiscono una lavorazione di formatura a freddo.

Questo processo ha le seguenti funzioni:

- tolleranze più strette per il diametro esterno e per lo spessore;
- miglioramento della finitura superficiale;
- miglioramento delle proprietà meccaniche del tubo;
- permette di raggiungere delle dimensioni (diametro esterno e spessore) tali che le altre tecnologie non permettono di ottenere.

Durante la formatura a freddo, a differenza dei processi visti fino a questo momento che erano effettuati a caldo, il materiale è soggetto ad incrudimento, questo ne aumenta le caratteristiche meccaniche quali punto di snervamento e rottura, ma ne diminuisce la duttilità.

Può rendersi necessario effettuare un trattamento termico al fine di migliorarne la duttilità.

Nella formatura a freddo, si distinguono principalmente due tecnologie produttive, caratterizzate da elevati volumi produttivi, queste sono:

- trafilatura a freddo;
- trafilatura a freddo a passo di pellegrino.

1.3.1 – Trafilatura a freddo

Le tolleranze minime dei tubi seamless sono stabilite dalla normativa DIN 2391 per diametri da 4 a 120 mm e spessori da 0.5 a 10 mm.

Nonostante questo possono essere ottenuti per trafilatura tubi con diametro fino a 380 mm e spessore fino a 35 mm.

Ad oggi sono quattro i processi alternativi tra i quali si può scegliere per realizzare una trafilatura a freddo del tubo, ovvero:

- Trafilatura a vuoto;
- Trafilatura con anima stazionaria;
- Trafilatura con anima flottante;
- Trafilatura con mandrino.

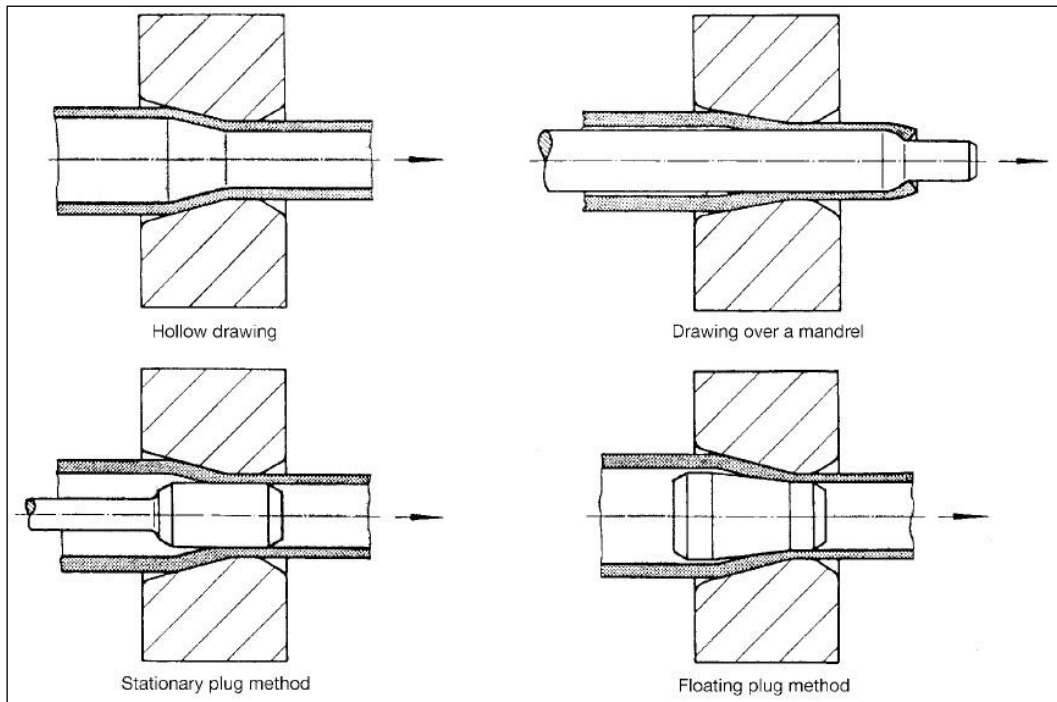


fig. 35 - Tipi di trafilatura

TRAFILATURA A VUOTO

La caratteristica principale che contraddistingue questa tipologia da tutte le altre è l'assenza di un'anima interna.

Questa fa sì che durante lo schiacciamento del diametro esterno lo spessore non subisce variazioni apprezzabili, si può quindi considerare all'interno delle tolleranze.

Otteniamo invece un diametro esterno ben calibrato e con un'ottima finitura superficiale.

TRAFILATURA CON ANIMA STAZIONARIA

In questo tipo di trafilatura l'anima è fissata su un mandrino che ne mantiene la posizione.

L'anima viene posizionata in modo da formare con la matrice esterna una sezione di passaggio circolare all'interno della quale viene forzato a passare il tubo durante la lavorazione.

Essendo presenti un riscontro sulla superficie esterna, ed uno sulla superficie interna, si ottengono delle ottime tolleranze dimensionali e finitura superficiale sia per il diametro esterno che per quello interno.

In genere la trafilatura con anima stazionaria viene utilizzata per avere una riduzione di area fino al 45% per passata.

TRAFILATURA CON ANIMA FLOTTANTE

Questo tipo di processo è molto simile a quello con anima stazionaria.

La particolarità è che l'anima non è fissata ad un mandrino, viene vincolata dal processo stesso durante il lavoro a causa del particolare profilo con la quale è stata sagomata.

Questo processo viene preferito a quello stazionario per i tubi di piccolo diametro o molto lunghi.

Diventa infine obbligatorio utilizzare questo metodo quando si vuole calibrare un tubo avvolto in una bobina.

TRAFILATURA CON MANDRINO

Nella trafilatura con mandrino il tubo è spinto all'interno della matrice grazie all'ausilio del mandrino.

Si verifica una riduzione di tutti i parametri geometrici della sezione del tubo (diametro esterno, spessore e diametro interno).

La riduzione che possiamo ottenere con questo processo è superiore a quella ottenibile con gli altri metodi con anima, ma la lunghezza del tubo è limitata alla lunghezza del mandrino.

Questo processo viene utilizzato particolarmente per la produzione di tubi di dimensioni standard.

Bisogna infine considerare a valle della linea un sistema per espandere leggermente il tubo lavorato in modo da permettere l'estrazione del mandrino.

1.3.2 – Trafilatura a freddo a passo di pellegrino

Il processo di trafilatura a freddo a passaggio di pellegrino è molto simile all'omonimo processo che abbiamo descritto precedentemente, se non che questa volta lavoriamo sotto alla temperatura di ricristallizzazione del materiale, ovvero il processo produttivo è a freddo e non a caldo.

Questo implica che le deformazioni che otterremo con questo processo sono di molto inferiori a quelle ottenibili con lo stesso processo a caldo.

Il tubo ottenuto utilizzando questa tecnologia ottiene un elevatissima finitura superficiale con una modesta riduzione dimensionale.

Data le piccole deformazioni con la quale lavora questo processo è preferibile rispetto per la trafilatura a freddo di materiale a bassa duttilità.

TUBI ALETTATI

2.1 - Generalità

La termo-fluidodinamica studia il flusso termico tra due fluidi che generalmente si trovano in due sistemi chiusi distinti ma non isolati tra di loro.

In altri termini i fluidi vengono tenuti separati attraverso da una parete (all'occorrenza i due fluidi potrebbero scorrere uno all'interno di un tubo ed uno al suo esterno, contenuto a sua volta da un mantello), che permette loro di scambiare calore sfruttando la conduttività termica del materiale tra loro interposto.

L'obiettivo principale che si pone questa disciplina è quello di avere un rapido ed efficiente scambio termico tra i due fluidi.

Una delle leve utilizzate per migliorare questo aspetto, se non la principale, è quello di modificare la geometria della superficie di scambio termico.

La superficie prima di essere modificata viene detta *superficie primaria*.

A seguito delle modifiche geometriche, comunemente chiamata *alette*, la superficie prende il nome di *superficie estesa*.

Nel mercato esistono infinite tipologie di superfici alettate, nate dalla combinazione di diversi profili dell'aletta e diversa direzione di sviluppo dell'aletta.

Di seguito alcuni esempi delle superfici estese studiate in letteratura:

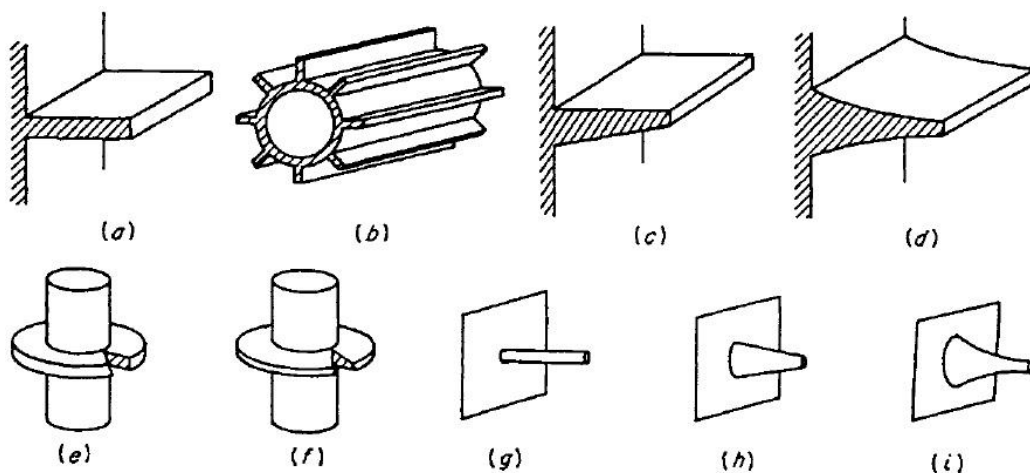


fig. 36 - Rappresentazioni superfici estese

Come si può osservare si sono studiate modifiche della superficie sia su superfici piane che su superfici curve, quest'ultimo è il caso di nostro interesse.

Si possono classificare le alette secondo diversi parametri, tra i quali:

- Geometria dell'aletta;
- Direzione di sviluppo dell'aletta.

Possiamo quindi identificare in fig.1 le seguenti tipologie di alettatura:

- Distinzione per geometria:
 - Alette a profilo rettangolare: *(a)*, *(b)*, *(e)*, *(g)*;
 - Alette a profilo trapezoidale: *(c)*, *(f)*, *(h)*;
 - Alette a profilo parabolico: *(d)*, *(i)*.
- Distinzione per sviluppo:
 - Sviluppo longitudinale: *(a)*, *(b)*, *(c)*, *(d)*;
 - Sviluppo trasversale (o radiale): *(e)*, *(f)*;
 - Spine: *(g)*, *(h)*, *(i)*.

In questa trattazione ci concentreremo sulle modifiche che si possono apportare alla superficie del tubo per migliorarne le prestazioni.

Queste modifiche sono molto comuni sulla superficie esterna del tubo, ma in settori di nicchia, possono essere richieste anche sulla superficie interna.

Di seguito alcune fotografie dei tubi alettati:

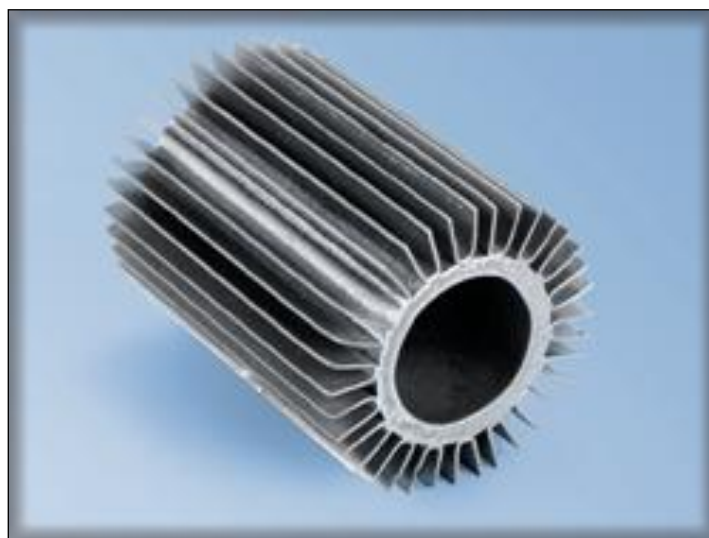


fig. 37 – Alette longitudinali



fig. 38 – Aletta alta “L-Finned”



fig. 39a - "LowFin" taglio a 60°



fig. 39b - "LowFin"



fig. 40 – LowFin with Inner Groove

Descriviamo più nel dettaglio alcune tipologie di tubo alettato, in particolare tubi alettati ad aletta alta (vedi fig.3), tubi alettati ad aletta integrale (vedi fig.4).

Di questa ultima tipologia andremo poi a descrivere le varianti geometriche che vengono proposte al fine di migliorarne le prestazioni in scambiatori con funzioni particolari quali evaporatori e condensatori.

2.2 – Tubi ad aletta alta

Questa tipologia di tubi alettati viene ampiamente utilizzata per trattamenti di riscaldamento, raffreddamento e deumidificazione di aria e gas in genere. Questa tipologia di tubi vengono utilizzati generalmente con gas caldo che lambisce la superficie esterna del tubo, mentre all'interno del tubo scorre un flusso di acqua o vapore.

Le applicazioni dove possono essere utilizzati questi tubi sono torri di evaporazione, bobine per il condizionamento dell'aria, inceneritori, refrigeratori a gas per reattori nucleari e ventilconvettori per uso domestico.

La materia prima principale per la produzione di questa tipologia di tubi è:

- Nastro o tubo rettilineo, per la formazione dell'aletta;
- Tubo rettilineo di base.



fig. 41 - Nastro in alluminio



fig. 42 - Tubo rettilineo di base

A seconda della tecnologia utilizzata per produrre il tubo, l'alettatura e il tubo vergine possono essere o meno dello stesso materiale.

Questi tubi possono essere prodotti con diverse tecnologie:

- Saldatura del nastro sul tubo vergine (high frequency welded finned tube);
- Riporto del nastro sulla superficie esterna del tubo;

- Estrusione dell'aletta mediante la lavorazione di un tubo inserito all'esterno del tubo di base.

Per la realizzazione di HFW finned tube, il materiale che compone l'aletta può anche non essere lo stesso che compone il tubo.

Per la realizzazione di questa tipologia di tubo il nastro che andrà a formare l'aletta viene tensionato ed incastrato sul tubo di base prima di essere saldato.

Ad esempio per in questo settore spesso il tubo interno viene richiesto in acciaio al carbonio in quanto presenta una buona resistenza al fluido caldo che scorre al suo interno, mentre l'aletta è generalmente in alluminio, materiale le cui caratteristiche rappresentano un compromesso ottimale tra conducibilità termica, comportamento durante la lavorazione (ovvero tensionamento ed avvolgimento) e costo.

Per unire metallurgicamente il nastro di alluminio con il tubo in acciaio al carbonio, come materiale di apporto viene impiegato lo zinco.

Nel caso in cui il tubo e il nastro siano dello stesso materiale, per i passi più ampi viene utilizzata una saldatura ad arco, mentre per i passi più fini, per esigenza di ingombri, il nastro viene saldato a resistenza elettrica sul tubo.

Caratteristica molto importante di questa tipologia di tubi è il collegamento metallurgico tra nastro e tubo, che quindi presenta una resistenza termica di interfaccia trascurabile.

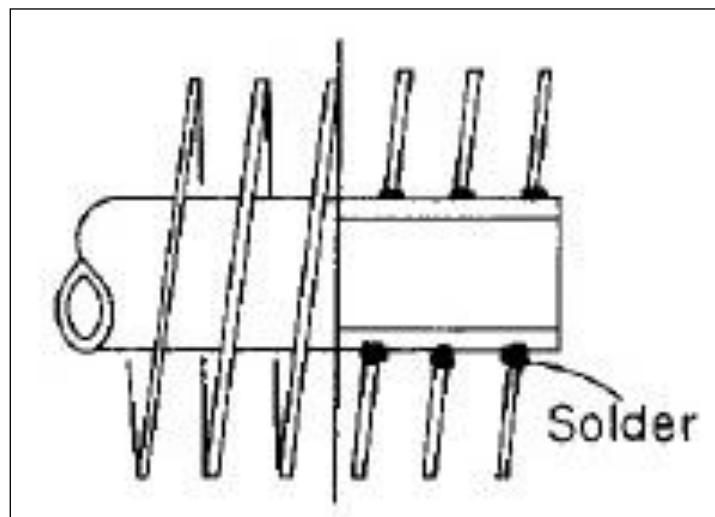


fig. 43a - HFW finned tube



fig. 43b - HFW steel finned tube

Altre tecniche produttive prevedono che il nastro aderisca sulla superficie del tubo solamente grazie alle tensioni che si generano all'interno del nastro quando viene avvolto.

In questo caso non abbiamo chiaramente un'unione metallurgica delle parti, ma solamente meccanica.

Di seguito alcuni esempi:

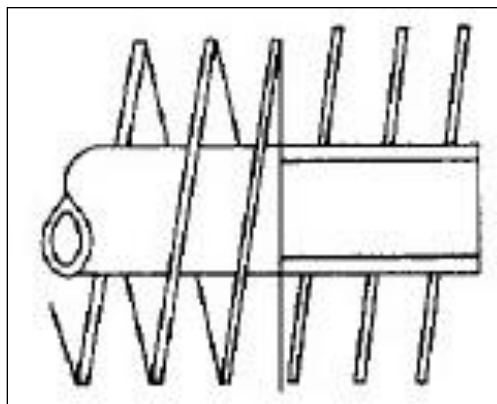


fig. 44 - Tension wound

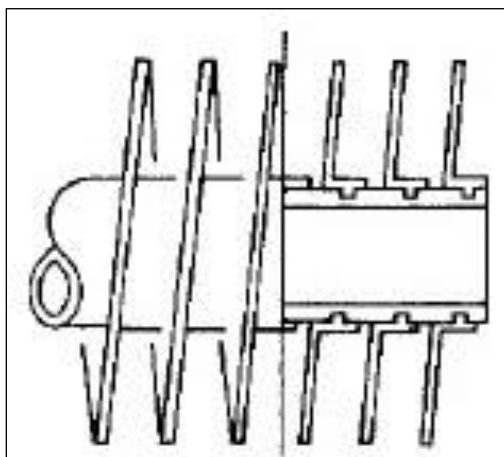


fig. 45 - "L footed", embedded, tension wound

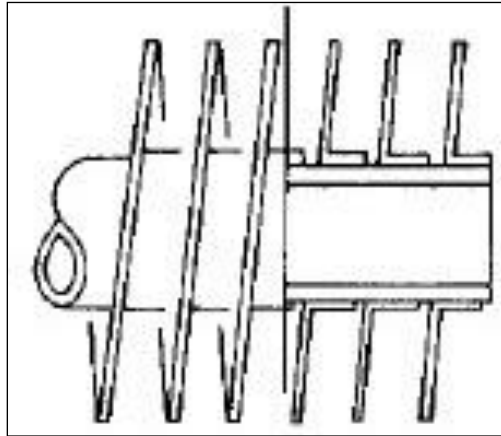


fig. 46 - "L-footed" tension wound

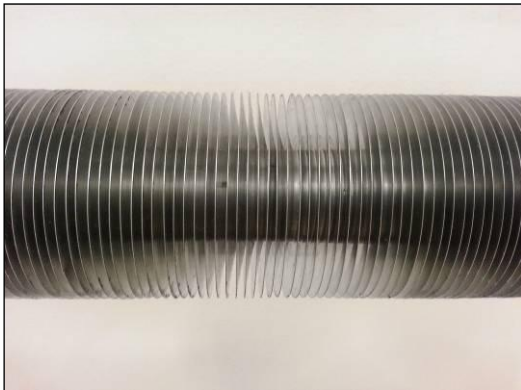


fig. 47a - Foto "L footed"



fig. 47b- Foto estremità "L footed"

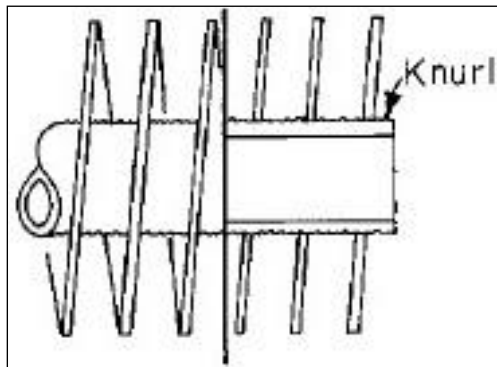


fig. 48 - Tension wound on knurled surface



fig. 49a - Foto knurled surface



fig. 49b – Foto estremità knurled surface

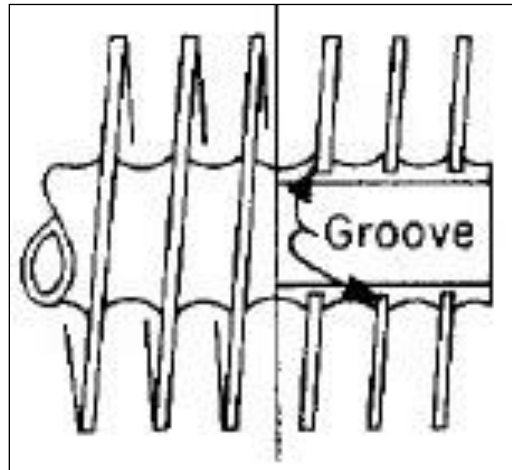


fig. 50 - Grooved tube, tension wound fin



fig. 51a - Foto grooved tube



fig. 51b - Foto estremità grooved tube

Un'ultima tecnologia che permette di ottenere tubi ad aletta alta consiste nell'estrusione in direzione radiale di un tubo che può essere in alluminio, o comunque un materiale che permette un'elevata deformazione, su un tubo utilizzato come riscontro per l'estrusione.

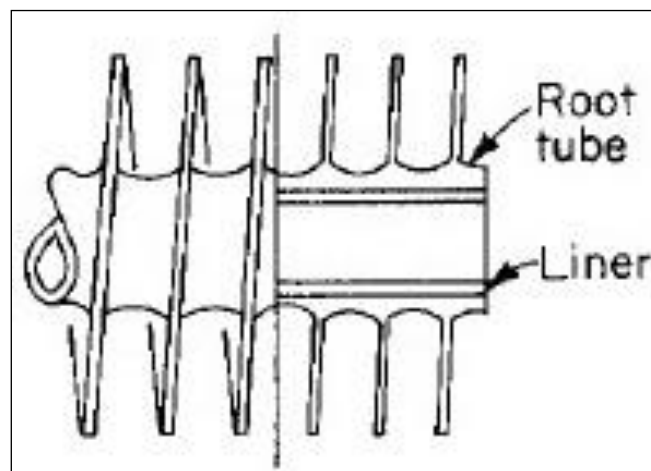


fig. 52 - Integral fin extruded from tube

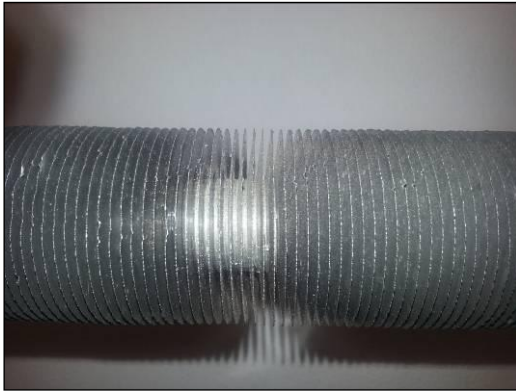


fig. 53a - Foto Integral fin extruded

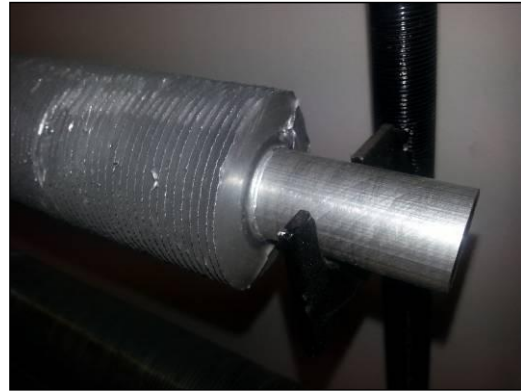


fig. 53b - Foto Integral fin extruded

2.3 – Tubi ad aletta integrale

Si passa ora a parlare di tubi alettati LowFin, ovvero tubi ad aletta integrale, dove l'aletta viene ricavata direttamente dal materiale del tubo liscio di partenza attraverso un processo di rullatura.

Di seguito uno schema raffigurante il tubo in oggetto:

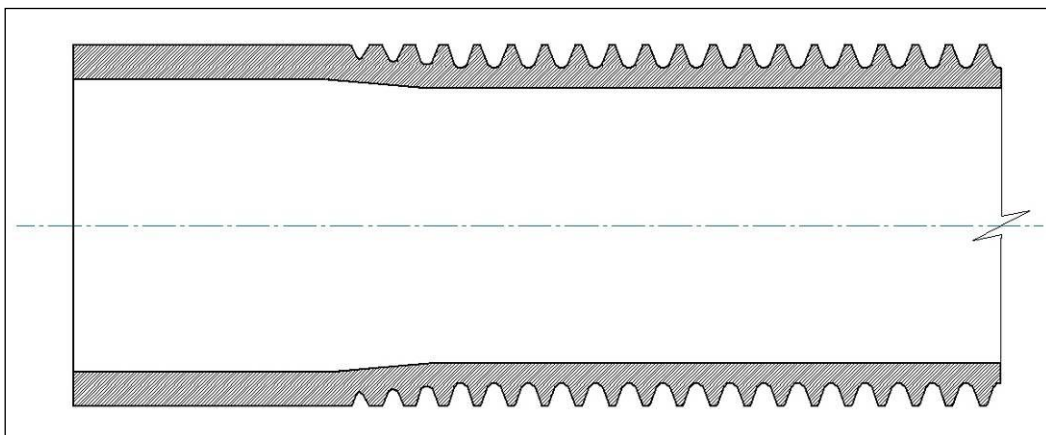


fig. 54 - LowFin



fig. 55a - Tubo LowFin taglio 60°



fig. 5656b - Tubo LowFin

Si può utilizzare una vasta gamma di materiali per la produzione di questa tipologia di tubo.

I più frequenti sono rame DHP, leghe di rame, acciaio al carbonio e acciaio inossidabile.

I tubi ad aletta integrale sono utilizzati quando lato mantello abbiamo un gas o un liquido con un basso coefficiente di trasmissione del calore.

Trovano la loro principale applicazione all'interno di scambiatori di calore ad acqua e condensatori (si verifica sulla superficie esterna il passaggio di fase: da vapore a liquido) ed evaporatori (da liquido a vapore) per idrocarburi.

Per quanto riguarda l'utilizzo all'interno di condensatori, si verifica un fenomeno di allagamento delle cave.

Il fluido che condensa si trova all'esterno del tubo, in particolare il liquido tende a concentrarsi tra le alette nella parte inferiore del tubo creando un vero e proprio allagamento di questa zona.

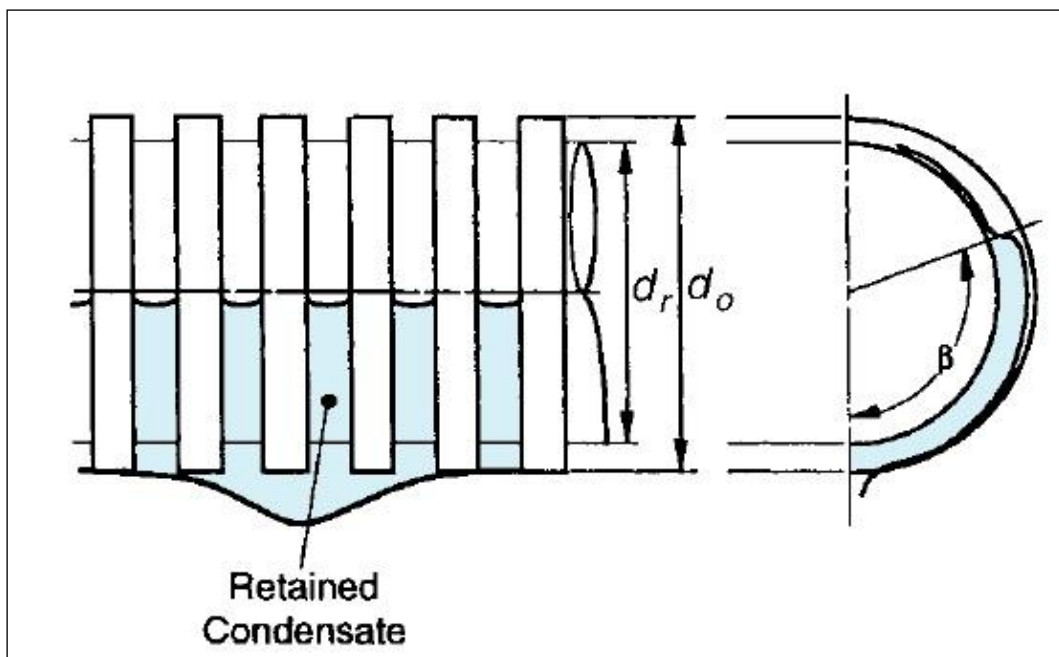


fig. 57 – Zona di allagamento

Questo fenomeno provoca un degrado delle prestazioni del tubo, che si troverà a lavorare con una frazione di superficie utile rispetto a quella totale.

Questo fenomeno in alcuni casi potrebbe risultare critico.

Sono state studiate quindi delle possibili soluzioni, tra le quali si può citare l'utilizzo di nastri porosi, che posti nella parte inferiore del tubo, per capillarità drenano le cave tra le alette dal fluido condensato.

Questi tubi, apportando opportune modifiche al profilo dell'aletta ed alla superficie interna, possono essere utilizzati anche come condensatori ed evaporatori in genere.

La superficie interna si può lavorare per ottenere delle striature o una godronatura al fine di favorire il moto turbolento all'interno del tubo, aumentandone così il coefficiente di scambio termico.



fig. 58 - Striature interne

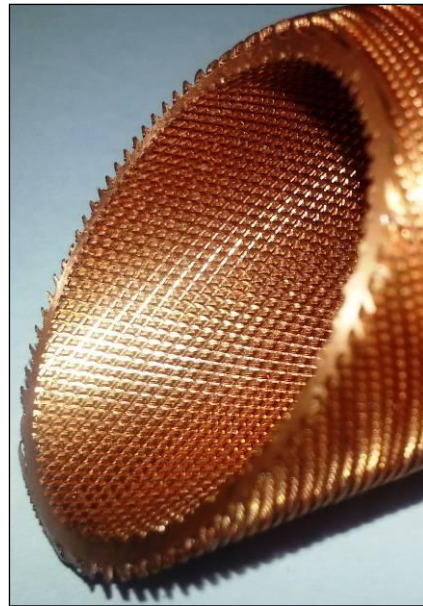


fig. 59 - Godronatura interna

Di seguito un'immagine rappresentativa della differenza di regime del flusso che si viene a creare all'interno di un tubo liscio e di un tubo striato internamente.

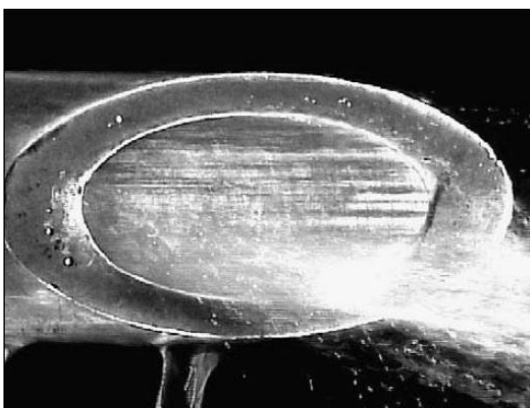


fig. 60 - Flusso in tubo liscio con taglio a 60°



fig. 61 - Flusso in tubo con elica interna

Si può notare la differenza di regime del flusso che si instaura nelle due diverse architetture, in particolare il flusso nel tubo con elica interna ha una turbolenza più accentuata.

Bisogna tenere in considerazione spesso la resistenza termica superiore si ha nell'interfaccia esterna del tubo (come nelle applicazioni che esternamente prevedono aria), quindi anche incrementando l'efficienza dello scambio termico di quella interna si potrebbero ottenere miglioramenti limitati.

Per quanto riguarda le modifiche che si possono apportare sul profilo dell'aletta al fine di migliorare sensibilmente le prestazioni di scambio termico a seconda del campo di impiego in cui andranno a lavorare si fanno scelte geometriche differenti.

Per quanto riguarda le modifiche da effettuare in tubi destinati ad essere installati su evaporatori, consistono nella creazione di microcamere (vedi fig.28 & fig.29) tra le alette per favorire la creazione di bolle di vapore (pto.2).

Queste bolle aumentano di volume fino a che non cominciano ad uscire dalla camera (pto.4).

Si arriva ad uno stadio in cui la bolla è completamente formata e comincia ad uscire dalla microcamera, si crea quindi una depressione all'interno della zona che favorisce l'inserimento di liquido (pto.5).

Il ciclo termina con l'espulsione della bolla, a cui seguirà la formazione di una nuova bolla di vapore.

Di seguito sono riportate delle raffigurazioni utili per meglio interpretare il fenomeno.

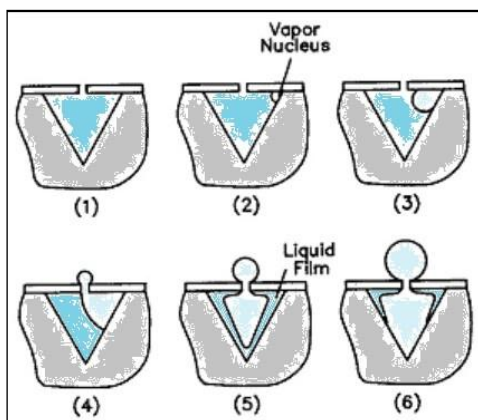


fig. 62 - Microcanali triangolari

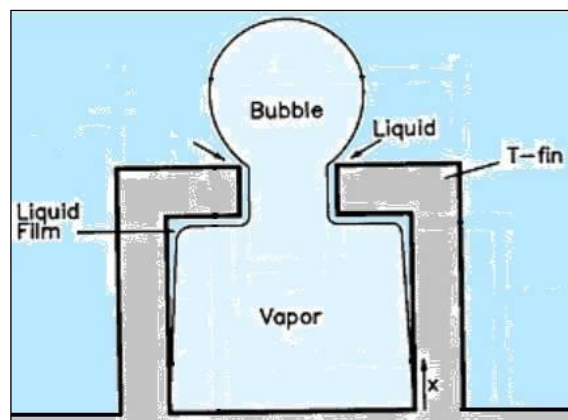


fig. 63 - Microcanale rettangolari

Di seguito è possibile vedere qualche fotografia di questa geometria realizzata su un tubo alettato ad aletta integrale realizzati con tubi lega di rame/nickel e passi dell'alettatura differenti.



fig. 64a - "T-FIN" CuNi90/10 42FPI



fig. 64b - "T-FIN" CuNi70/30 26FPI

Per quanto riguarda invece l'applicazioni all'interno di condensatori la geometria cambia, diventando più spigolosa.

Di seguito qualche foto rappresentativa delle geometrie utilizzate.



fig. 65a - "Y-FIN" Copper

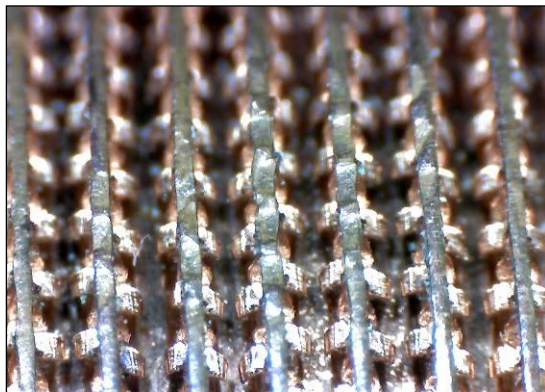


fig. 65b – Particolare forma aletta

2.4 – Tubi internamente rigati

Esiste in commercio una categoria di tubi alettati solo internamente, mentre la superficie esterna risulta essere liscia.

La superficie esterna viene lasciata in questo stato per permettere in un secondo momento l'assemblaggio con alette riportate.

Questi tubi vengono utilizzati prevalentemente per il condizionamento, all'interno di evaporatori e condensatori operanti con fluidi frigoriferi quali ad esempio l'R-22.

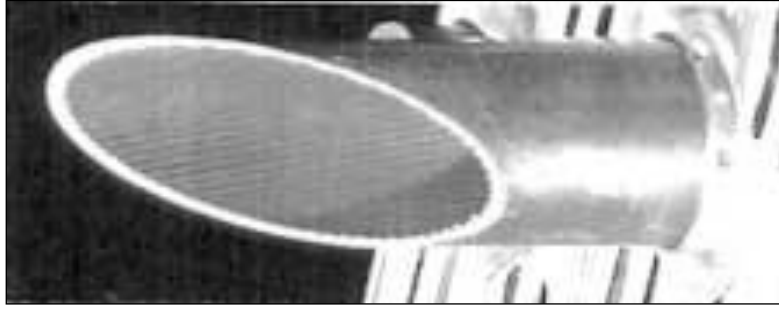


fig. 66 - Tubo di rame rigato internamente

In questo settore, nel corso delle ultime decadi sono stati seguiti diversi studi al fine di migliorarne lo scambio termico sviluppando diversi profili dell'aletta interna.

Si è osservato che con una rigatura più snella si ottengono sensibili miglioramenti delle prestazioni:

- Scambio termico inalterato;
- Riduzione della caduta di pressione;
- Riduzione della massa del tubo.

Di seguito delle immagini che mostrano in sezione lo sviluppo delle rigature interne.



fig. 67 - Evoluzione profilo rigatura interna

2.5 – Tubi corrugati

Infine facciamo un cenno anche sui cosiddetti tubi corrugati.

Questi tubi vengono impiegati in settori come l'alimentare, nei quali è di fondamentale importanza garantire il ricircolo continuo di tutto il fluido che viene a contatto con il tubo.

Non devono presentarsi quindi zone di ristagno, che potrebbero far sì che il fluido che rimane intrappolato possa degradare.

Questi tubi presentano un ridotto incremento di superficie di scambio termico rispetto i tubi fino ad ora trattati.

La lavorazione alla quale questi tubi sono sottoposti consiste in una rullatura con passi molto ampi (nell'ordine delle decine di millimetri) basse profondità di penetrazione nel materiale e soprattutto assenza di spigoli.

Questo tipo di lavorazione, se viene effettuata su tubi di basso spessore si rende efficace anche sulla superficie interna del tubo.

Di seguito un paio di immagini rappresentative di un tubo corrugato.



fig. 68a - Estremità tubo corrugato



fig. 68b - Tubo corrugato

SCAMBIATORI DI CALORE: CENNI

Gli scambiatori di calore sono quei dispositivi utilizzati nella pratica per scambiare calore tra due fluidi.

Questi vengono progettati secondo le regole dettate dalle norme TEMA.

Frequentemente per avere performance superiori si frutta il cambio di fase di uno dei due fluidi.

In questo caso se un fluido condensa avremo un condensatore o un riscaldatore, a seconda che lo scopo per il quale è richiesto lo scambiatore sia di condensare un fluido o scaldarlo.

Se un fluido evapora avremo un evaporatore o un refrigeratore.

Generalmente il fluido caldo fluisce all'interno del tubo, mentre il fluido freddo risiede all'esterno.

Possiamo fare un'ulteriore classificazione a seconda dell'architettura con la quale viene progettato lo scambiatore.

Si possono avere:

- Scambiatori dove uno dei fluidi scorre all'interno di un tubo, mentre all'esterno il fluido è libero:
 - Scambiatori a pioggia;
 - Scambiatori a serpentino.
- Scambiatori dove sia il fluido interno che il fluido esterno sono guidati:
 - Scambiatori tubo in tubo;
 - Scambiatori a fascio tubiero.

Gli scambiatori a cui si fa generalmente riferimento in questo elaborato sono gli scambiatori a fascio tubiero.

3.1 – Generalità

Questo tipo di scambiatori sono molto impiegati nell'industria moderna.

Sono costituiti da un fascio tubiero formato da un grande numero di tubi, da qualche centinaia per i più piccoli fino a migliaia per quelli più grandi, generalmente di piccolo diametro.

Di seguito fotografie che mostrano scambiatori di calore assemblati con i tubi prodotti da Be.Ca. Engineering.



fig. 69 - Fascio tubiero tubi BIM: ASTM A213-TP316/B111-C715



fig. 70 - Scambiatore di calore tubi BIM: ASTM B111-C706/A179

Come si può vedere da fig. 69/70 il fascio tubiero è avvolto all'interno di una camicia metallica detta *mantello*.

Gli scambiatori di calore sono classificati secondo tre lettere:

- La prima identificativa del tipo di testata anteriore;
- La seconda il tipo di mantello;
- La terza il tipo di testata posteriore.

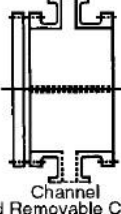
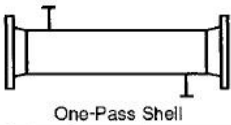
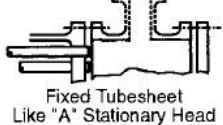
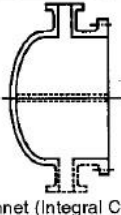
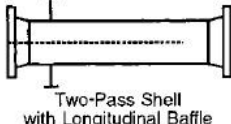
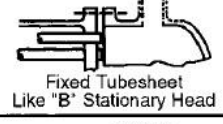
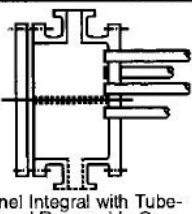
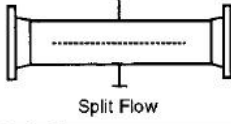
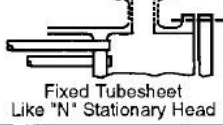
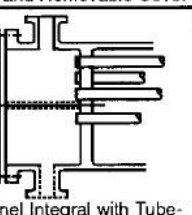
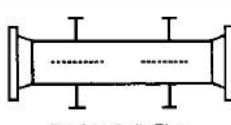
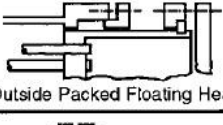
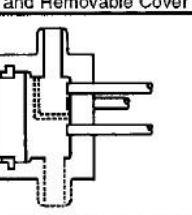
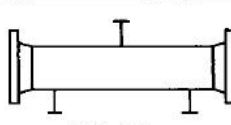
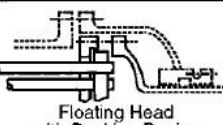
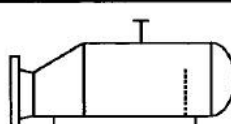
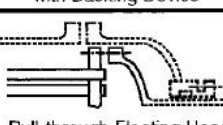
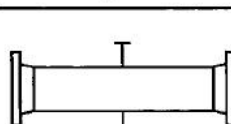
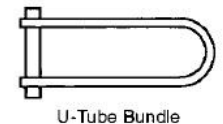
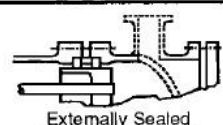
	Front-End Stationary Head Types		Shell Types		Rear-End Head Types
A	 Channel and Removable Cover	E	 One-Pass Shell	L	 Fixed Tubesheet Like "A" Stationary Head
B	 Bonnet (Integral Cover)	F	 Two-Pass Shell with Longitudinal Baffle	M	 Fixed Tubesheet Like "B" Stationary Head
C	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	G	 Split Flow	N	 Fixed Tubesheet Like "N" Stationary Head
N	 Channel Integral with Tube-Sheet and Removable Cover	H	 Double Split Flow	P	 Outside Packed Floating Head
D	 Special High-Pressure Closure	J	 Divided Flow	S	 Floating Head with Backing Device
		K	 Kettle Type Reboiler	T	 Pull-through Floating Head
		X	 Crossflow	U	 U-Tube Bundle
				W	 Externally Sealed Floating Tubesheet

fig. 71 - Tipi di teste e mantelli per scambiatori a fascio tubiero, classificazione TEMA

Il flusso all'interno dello scambiatore, sia lato tubi che lato mantello, può essere deviato mediante l'utilizzo di setti divisori opportunamente posizionati.

Di seguito è riportata una rappresentazione schematica di quelli che sono i principali componenti costituenti uno scambiatore di calore a fascio tubiero. Andremo poi ad esaminarli singolarmente.

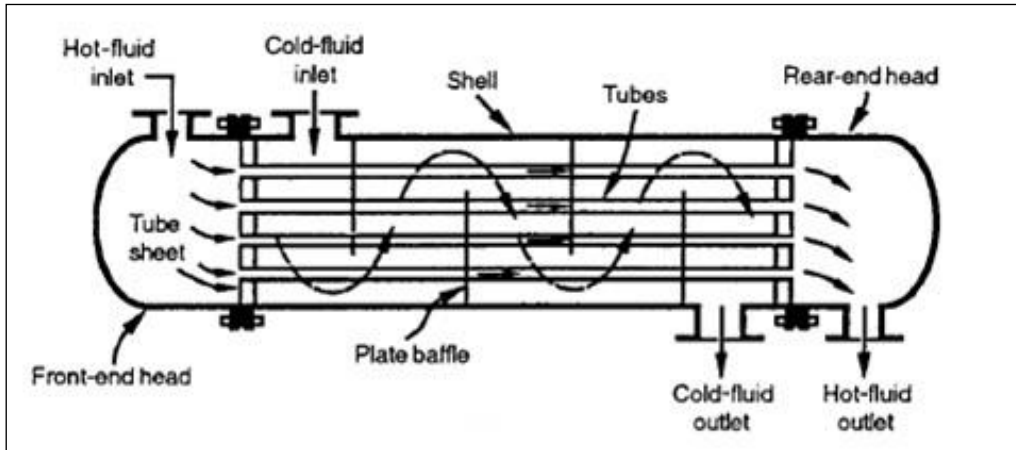


fig. 72 - Rappresentazione schematica scambiatore di calore a fascio tubiero

Partendo dalla parte sinistra dell'immagine si individuano i seguenti componenti:

- *Front-end head* - Testata anteriore;
- *Hot-fluid inlet* – Bocca di ammissione fluido caldo;
- *Tube sheet* – Piastra tubiera;
- *Cold-fluid inlet* – Bocca di ammissione fluido;
- *Plate baffle* – Diaframma;
- *Shell* – Mantello;
- *Tubes* – Tubi;
- *Cold-fluid outlet* – Bocca di sfogo fluido freddo;
- *Rear-end head* – Testata posteriore;
- *Hot-fluid outlet* – Bocca di sfogo fluido caldo.

A corredo di questa descrizione sono state inserite alcune fotografie che mostrano alcuni dettagli.



fig. 73 - Bocca mantello

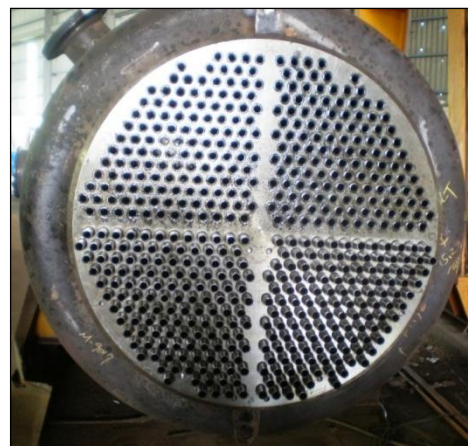


fig. 74 - Piastra tubiera

3.2 – Fascio tubiero

I parametri che vanno tenuti in considerazione per la progettazione del fascio tubiero sono i seguenti:

- Pressione dei fluidi che lavorano uno all'interno ed uno all'esterno dei tubi;
- Temperature di esercizio dei fluidi;
- Stress termici dovuti all'espansione termica differenziale tra mantello e fascio tubiero;
- Fenomeni corrosivi.

I valori tipi di diametro utilizzati sono 19.05 mm (3/4") e 25,4 mm (1"), in quanto provocano perdite di carico accettabili ed una facile pulizia del tubo. Nei fasci tubieri realizzati con tubi curvati ad "U" si deve tenere in considerazione che il minimo raggio di curvatura è circa 1.5 – 2 volte il diametro del tubo e che nella zona curvata abbiamo una riduzione dello spessore del tubo fino al 20 – 25%.

I parametri principali che identificano geometricamente un fascio tubiero sono:

- *Pitch ratio* (p/d) – rapporto tra passo tra i centri di tubi adiacenti e il diametro degli stessi;
- *Layout angle* – disposizione dei tubi nel fascio rispetto alla direzione del flusso.

Le geometrie utilizzate sono le seguenti:

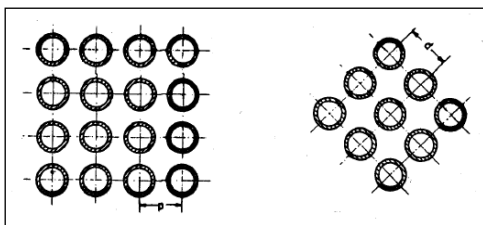


fig. 75 - Reticolo a maglia quadrata

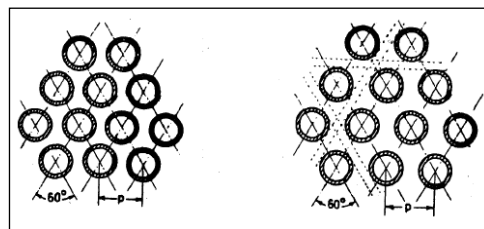


fig. 76 - Reticolo a maglia triangolare

In fig. 76, l'immagine a destra rappresenta l'alternativa che permette la pulizia della superficie esterna dei tubi.

3.3 – Diaframmi

I diaframmi (o setti) vengono inseriti all'interno dello scambiatore di calore al fine di aumentare la velocità del flusso e la turbolenza del fluido che opera lato mantello.

Questi fenomeni permettono all'atto pratico di aumentare i coefficienti di scambio termico e ridurre lo sporco dei tubi.

Hanno infine le funzioni strutturali di fissaggio dei tubi sulla carcassa dello scambiatore e di limitarne le vibrazioni durante l'impiego.

Di seguito sono rappresentate le diverse tipologie di setti utilizzati.

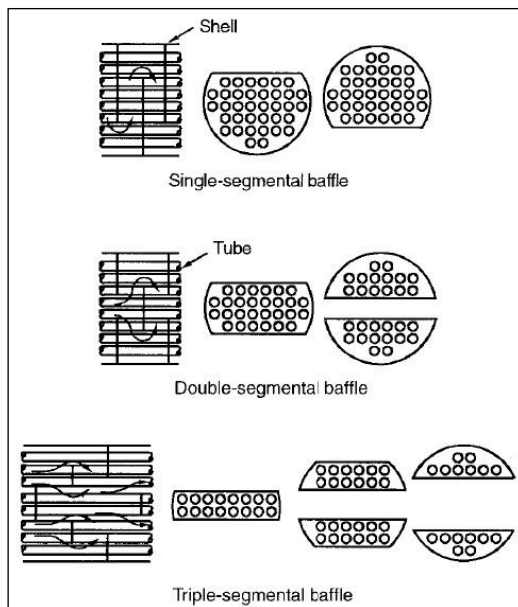


fig. 77 - Setti segmentati

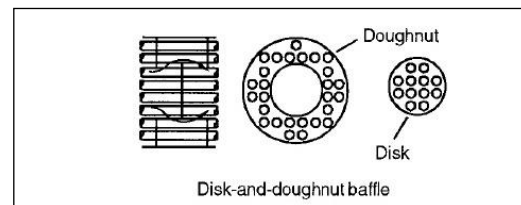


fig. 78 - Setti disco e corona

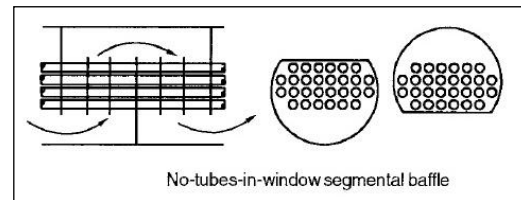


fig. 79 - Setti segmentati senza tubi nelle finestre

La distanza tra due setti adiacenti è:

- Non superiore al diametro interno del mantello;
- Non inferiore ad 1/5 del diametro interno del mantello.

3.4 – Piastre tubiere

Le piastre tubiere ricoprono un ruolo fondamentale all'interno dello scambiatore di calore, ovvero:

- Separare il fluido che si trova nelle testate da quello che si trova all'interno del mantello;
- Sono un sostegno per i tubi del fascio.

Devono avere inoltre le seguenti caratteristiche:

- Resistenti alla corrosione rispetto ad entrambi i fluidi operanti;
- Elettrochimicamente compatibili con il materiale con cui sono prodotti i tubi.

Solitamente sono costituite in acciaio al carbonio ricoperto da un film di leghe metalliche resistenti alla corrosione.

I tubi possono essere fissati alla piastra tubiera mediante due tecniche:

- *Mandrinatura*: il tubo viene espanso, tramite opportune attrezzature, all'interno del foro della piastra tubiera (vedi fig. 81);
- *Saldatura*.

In alcuni casi i tubi vengono prima mandrinati e successivamente saldati alla piastra tubiera.

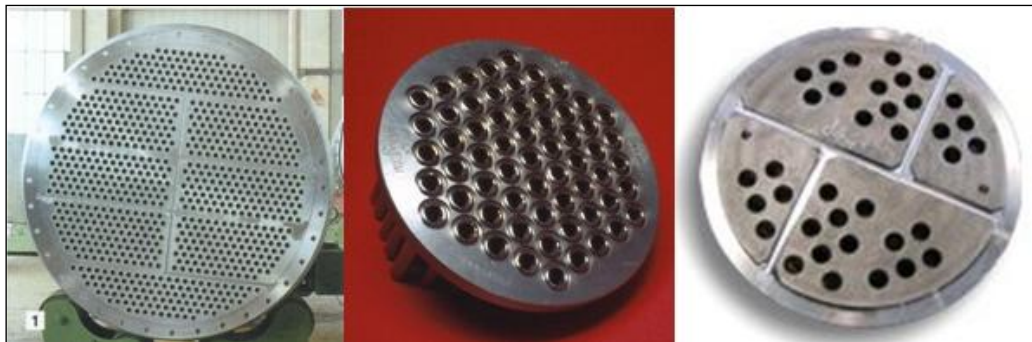


fig. 80 - Esempi di piastre tubiere

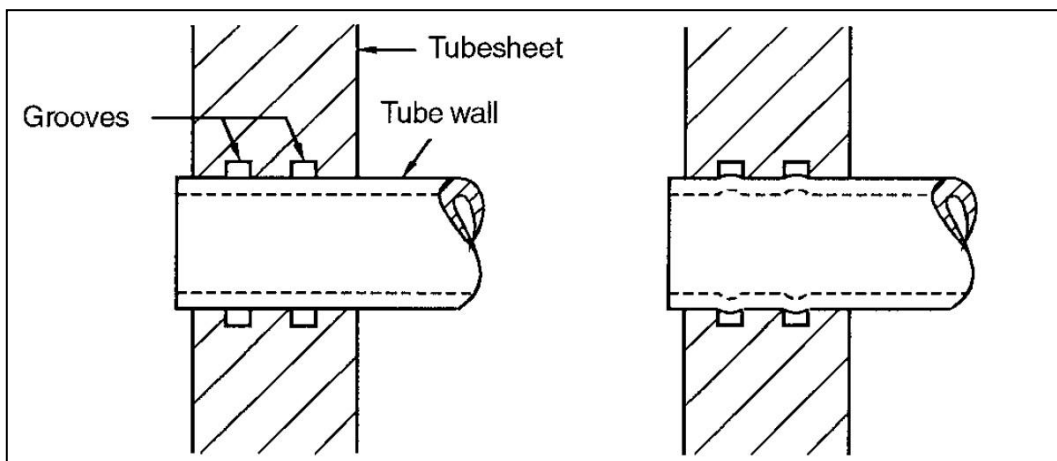


fig. 81 - Accoppiamento piastra tubiera/tubo prima e dopo mandrinatura

TUBI AD ALETTA INTEGRALE

In questo capitolo approfondiremo quelle che sono le principali caratteristiche del tubo alettato LowFin.

Questo tubo trova la sua principale applicazione in scambiatori di calore a fascio tubiero.

Come anticipato nei capitoli precedenti questa tipologia di tubo viene realizzata attraverso un processo di rullatura partendo da un tubo liscio.

I tubi utilizzati come materia prima sono generalmente tubi seamless, in quanto la presenza della saldatura, se pur al giorno d'oggi vengano realizzati tubi saldati con caratteristiche simili a quelli senza saldatura, introduce una disomogeneità che può portare ad una deformazione non uniforme del materiale o alla formazione di cricche.

I materiali più comunemente utilizzati sono rame, leghe gialle (leghe di rame) ed acciaio.

Di seguito una tabella che mostra i materiali utilizzati con il rispettivo riferimento normativo (ASTM, *American Society for Testing and Materials*).

Materiali		
ASTM B111-C122	Copper 99,9%	DHP - Phosphorized, high residual phosphorus
ASTM B111-C443	Copper Alloy	Admiralty Metals, B, C, and D
ASTM B111-C687	Copper Alloy	Aluminum Brass, B
ASTM B111-C706	Copper Alloy	90-10 Copper-Nickel
ASTM B111-C715	Copper Alloy	70-30 Copper-Nickel
ASTM A179	Carbon Steel	Seamless Cold-Drawn Low-Carbon Steel Tubes
ASTM A213-TP304	Stainless Steel	Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Tubes
ASTM A213-TP316	Stainless Steel	Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Tubes

tab. 1 - Materiale tubi

Le dimensioni del tubo liscio con le quali sono realizzati più comunemente tubi ad aletta integrale sono riportate di seguito:

OD	
12,70 mm	1/2 "
15,88 mm	5/8 "
19,05 mm	3/4 "
25,40 mm	1 "

tab. 2 - Diametri esterni tubo liscio più comuni

t	
1,245 mm	18 BWG
1,651 mm	16 BWG
2,108 mm	14 BWG
2,769 mm	12 BWG

tab. 3 - Spessori tubo liscio più comuni

Di seguito una rappresentazione schematica di un tubo alettato con indicati i principali parametri geometrici.

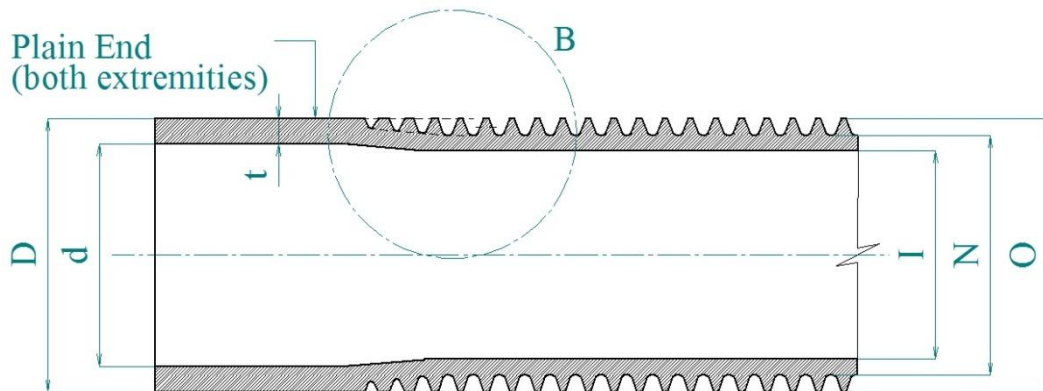


fig. 82 - Parametri geometrici tubo LowFin

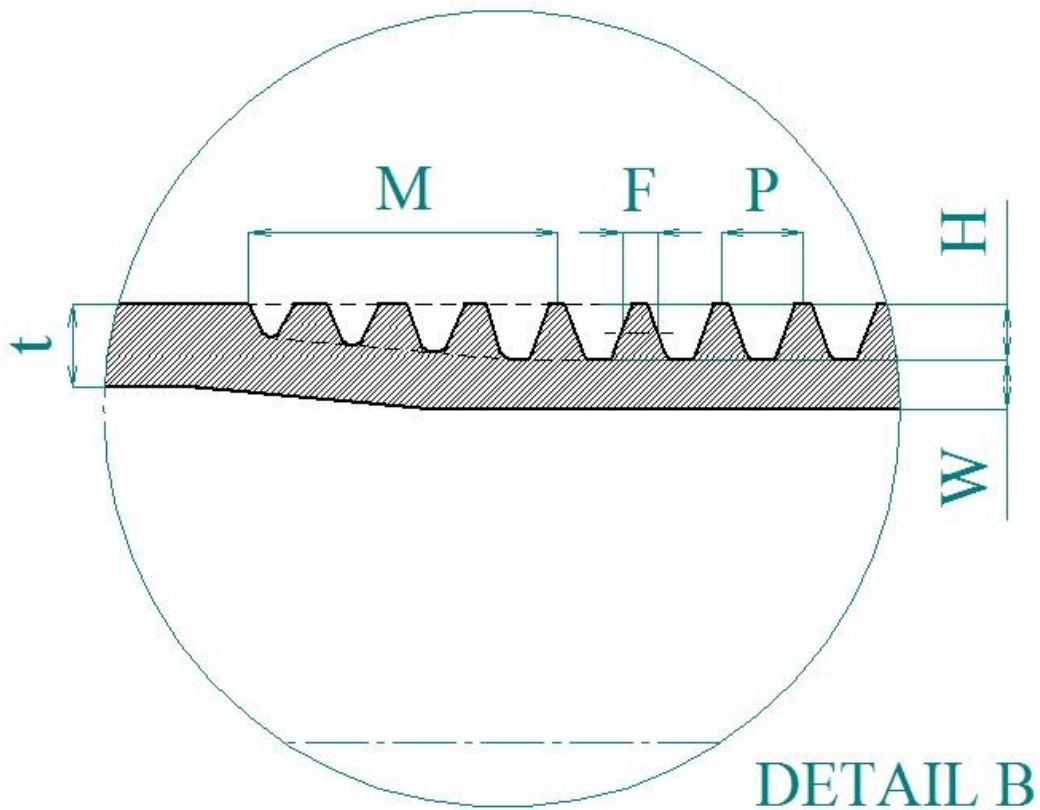


fig. 83 - Vista in dettaglio alettatura

Legenda:

- D : diametro esterno tubo liscio;
- t : spessore tubo liscio;
- d : diametro interno tubo liscio;
- O : diametro esterno tubo alettato;
- N : diametro di nocciolo tubo alettato;

- I : diametro interno tubo alettato;
- p : passo alettatura;
- H : altezza aletta;
- W : spessore sotto aletta;
- F : spessore medio aletta;
- M : transitorio di inizio/fine alettatura.

Il tubo può essere fornito con alettatura intermittente (fig. 84-85) nel caso si voglia mandrinare su diaframmi.

Questa operazione viene fatta sul tubo alettato per considerazioni di tipo strutturale dell'accoppiamento tubo-diaframma.

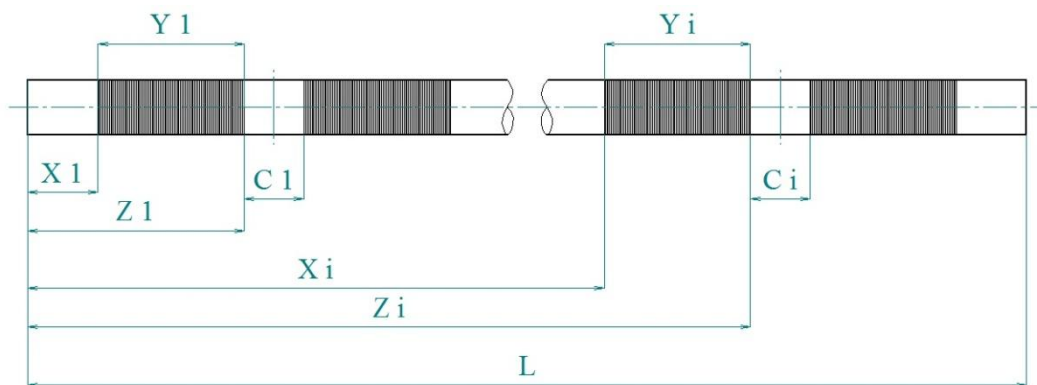


fig. 84 – Parametri di lunghezza con alettatura intermittente

Legenda:

- X_i : inizio i -esima parte alettata;
- Z_i : fine i -esima parte alettata;
- C_i : lunghezza i -esima parte liscia.
- L : lunghezza tubo alettato.



fig. 85 - Tubi LowFin con alettatura intermittente

Il tubo una volta alettato presenta delle differenze rispetto al tubo liscio di partenza che vanno tenute in considerazione (fig. 82):

- Diminuzione del diametro interno del tubo ($I < d$);
- Diminuzione dello spessore utile del tubo ($W < t$).

La variazione che si ottiene è funzione del tipo di alettatura che si desidera realizzare.

Con “*tipo di alettatura*” ci si riferisce in particolare al numero di alette per pollice (o alette per metro) dell’alettatura che si intende realizzare.

Generalmente per indicare questo parametro si utilizza l’acronimo *FPI*, ovvero *fins per inch*.

Ad ogni tipo di alettatura corrisponde quindi un certo passo dell’alettatura che si può ricavare dalla formula:

$$p \cong 25,4 / FPI$$

eq. 1

Le tipologie di alette più richieste sono:

- 19 *FPI* ($p = 1.337$ mm);
- 26 *FPI* ($p = 0.977$ mm), massimizza la superficie di scambio termico rispetto alle altre tipologie;
- 36 *FPI* ($p = 0.706$ mm), permette di lavorare anche tubi con spessore molto piccolo ($0.89 \div 1.00$ mm).

Riportiamo una tabella utile per la conversione del passo da alette per pollice (25,4 mm) ad alette per metro.

19 FPI	26 FPI	36 FPI
748 alette/metro	1023,6 alette/metro	1417,3 alette/metro

tab. 4 - Tabella di conversione *FPI* - alette/metro

Ad ogni tipo di alettatura sono associate delle dimensioni caratteristiche: queste sono il passo, lo spessore medio dell’aletta e l’altezza dell’aletta.

	19 FPI	26 FPI	36 FPI
P	1.337 mm	0.977 mm	0.706 mm
F	0.335 mm	0.330 mm	0.305 mm
H	1.350 mm	1.245 mm	0,660 mm

tab. 5 - Parametri caratteristici del tipo di alettatura

Di seguito sono riportate delle tabelle che danno un’indicazione di quelli che sono i parametri geometrici.

19 Fins/inch (P = 1,337 mm)

<i>Tube Liscio</i>				<i>Tube Alettato Low Fin</i>						
D		t		O	I	N	W	F	H	Area
[inch]	[mm]	[BWG]	[mm]							
1/2	12,700	18	1,245	12,700	8,222	10,000	0,889	0,335	1,350	0,103
1/2	12,700	16	1,651	12,700	7,866	10,000	1,067	0,335	1,350	0,103
5/8	15,875	18	1,245	15,875	11,397	13,175	0,889	0,335	1,350	0,131
5/8	15,875	16	1,651	15,875	11,041	13,175	1,067	0,335	1,350	0,131
5/8	15,875	14	2,108	15,875	10,229	13,175	1,473	0,335	1,350	0,131
3/4	19,050	18	1,245	19,050	14,572	16,350	0,889	0,335	1,350	0,153
3/4	19,050	16	1,651	19,050	14,216	16,350	1,067	0,335	1,350	0,153
3/4	19,050	14	2,108	19,050	13,404	16,350	1,473	0,335	1,350	0,153
3/4	19,050	12	2,769	19,050	12,134	16,350	2,108	0,335	1,350	0,153
1	25,400	16	1,651	25,400	20,210	22,700	1,245	0,335	1,350	0,211
1	25,400	14	2,108	25,400	19,754	22,700	1,473	0,335	1,350	0,211
1	25,400	12	2,769	25,400	18,484	22,700	2,108	0,335	1,350	0,211

tab. 6 - Dimensioni 19 FPI

26 Fins/inch (P = 0,977 mm)

<i>Tube Liscio</i>				<i>Tube Alettato Low Fin</i>						
D		t		O	I	N	W	F	H	Area
[inch]	[mm]	[BWG]	[mm]							
1/2	12,700	18	1,245	12,700	8,788	10,210	0,711	0,330	1,245	0,125
1/2	12,700	16	1,651	12,700	8,076	10,210	1,067	0,330	1,245	0,125
5/8	15,875	18	1,245	15,875	11,963	13,386	0,711	0,330	1,245	0,150
5/8	15,875	16	1,651	15,875	11,252	13,386	1,067	0,330	1,245	0,150
5/8	15,875	14	2,108	15,875	10,084	13,386	1,651	0,330	1,245	0,150
3/4	19,050	18	1,245	19,050	15,138	16,561	0,711	0,330	1,245	0,182
3/4	19,050	16	1,651	19,050	14,427	16,561	1,067	0,330	1,245	0,182
3/4	19,050	14	2,108	19,050	13,259	16,561	1,651	0,330	1,245	0,182
3/4	19,050	12	2,769	19,050	12,344	16,561	2,108	0,330	1,245	0,182
1	25,400	16	1,651	25,400	20,777	22,911	1,067	0,330	1,245	0,247
1	25,400	14	2,108	25,400	19,609	22,911	1,651	0,330	1,245	0,247
1	25,400	12	2,769	25,400	18,694	22,911	2,108	0,330	1,245	0,247

tab. 7 - Dimensioni 26 FPI

36 Fins/inch (P = 0,706 mm)

<i>Straight Tube Tube Liscio</i>				<i>Low Finned Tube Tube Alettato Low Fin</i>						
D		t		O	I	N	W	F	H	Area
[inch]	[mm]	[BWG]	[mm]							
1/2	12,700	18	1,245	12,700	9,957	11,379	0,711	0,305	0,660	0,100
1/2	12,700	16	1,651	12,700	9,245	11,379	1,067	0,305	0,660	0,100
5/8	15,875	18	1,245	15,875	13,132	14,554	0,711	0,305	0,660	0,125
5/8	15,875	16	1,651	15,875	12,776	14,554	0,889	0,305	0,660	0,125
5/8	15,875	14	2,108	15,875	12,064	14,554	1,245	0,305	0,660	0,125
3/4	19,050	18	1,245	19,050	16,307	17,729	0,711	0,305	0,660	0,152
3/4	19,050	16	1,651	19,050	15,951	17,729	0,889	0,305	0,660	0,152
3/4	19,050	14	2,108	19,050	15,595	17,729	1,067	0,305	0,660	0,152
3/4	19,050	12	2,769	19,050	15,239	17,729	1,245	0,305	0,660	0,152
1	25,400	16	1,651	25,400	22,301	24,079	0,889	0,305	0,660	0,205
1	25,400	14	2,108	25,400	21,945	24,079	1,067	0,305	0,660	0,205
1	25,400	12	2,769	25,400	21,589	24,079	1,245	0,305	0,660	0,205

tab. 8 - Dimensioni 36 FPI

Le dimensioni riportate sono indicative.

Tra le dimensioni presenti in tabella esistono delle relazioni che devono essere rispettate, di seguito le possiamo vedere elencate:

$$O = N + 2 \cdot H$$

eq. 2

$$I = N - 2 \cdot W$$

eq. 3

Inoltre deve essere rispettato:

$$O \leq D$$

eq. 4

Si pone questo vincolo in quanto il tubo generalmente deve essere infilato attraverso i fori della piastra tubiera.

Questi fori vengono calibrati per poter essere mandrinati sulla parte liscia del tubo, si pone questo vincolo al fine di limitare il gioco tra tubo e piastra. Per quello che riguarda la lunghezza massima alla quale possono essere realizzare questi tubi è solo funzione delle capacità della linea di produzione.

Attualmente in Be.Ca. Engineering si possono alettare tubi fino a 16 metri.

IL PROCESSO PRODUTTIVO

I tubi alettati ad aletta integrale vengono ottenuti eseguendo un processo di rullatura sul tubo liscio.

La rullatura è un processo tecnologico di deformazione a freddo.

Il processo viene eseguito da macchinari chiamati *rullatrici*.

Di seguito un'immagine che rappresenta una rullatrice simile a quelle utilizzate per la produzione di tubo alettato in Be.Ca. Engineering.



fig. 86 - Rullatrice

Queste macchine possono adempiere alla produzione di:

- Filettature;
- Alettatura.

I processi infatti sono molto simili, differenziano principalmente per la tipologia di utensili che devono essere utilizzati per ottenere i profili desiderati.

La deformazione sul tubo si ottiene dunque per effetto della rotazione dei mandrini posizionati frontalmente (vedi fig. 86) sui quali vengono calettati dei dischi opportunamente sagomati che costituiscono l'utensile principale della lavorazione.

È possibile effettuare anche una rigatura interna del tubo inserendo un'anima modellata all'interno del tubo, posizionata nella zona di lavoro. Di seguito verranno descritte alcune delle possibili configurazioni con le quali vengono progettate le macchine per la produzione di tubo alettato LowFin.

5.1 – I componenti

Il primo passo che si è fatto è stata un'analisi brevettuale e commerciale al fine di comprendere le diverse soluzioni che sono state studiate per sviluppare questo processo.

Per chiarire il concetto si faccia riferimento all'immagine sotto riportata.

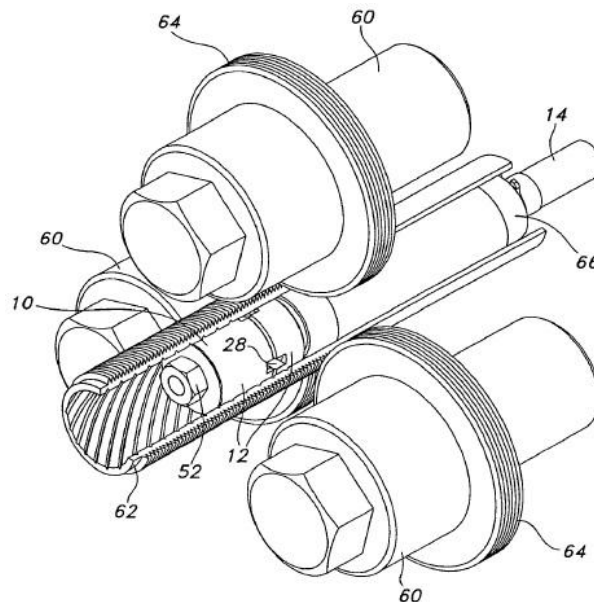


fig. 87 - Raffigurazione processo di rullatura



fig. 88 - Foto zona di lavoro rullatrice

In fig. 87 si possono identificare le parti principali per questo tipo di processo:

- p.to 62 – tubo in lavorazione;
- p.to 60 – mandrini rotanti;
- p.to 64 – utensili;
- p.to 66 – anima interna dotata di asta per il posizionamento (p.to 14).

Descriviamo di seguito le varie parti componenti il sistema.

MANDRINI ROTANTI

I mandrini hanno il compito di sostenere l’utensile durante la lavorazione e di trasferire ad esso tutte le componenti di moto di cui il processo necessita, ovvero:

- avanzamento verso il pezzo da lavorare;
- rotazione.

L’avanzamento può essere lineare o rotatorio.

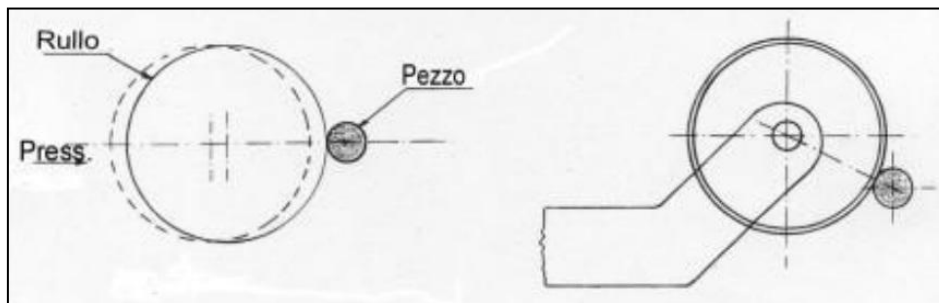


fig. 89 - A sinistra avanzamento lineare - A destra avanzamento rotatorio

I mandrini devono essere almeno due, ma in questo caso deve essere previsto un sostegno ausiliario per il tubo.

Frequentemente si trovano applicazioni a tre rulli, in quanto è la soluzione più stabile dal punto di vista del centraggio del tubo in lavorazione sugli utensili.

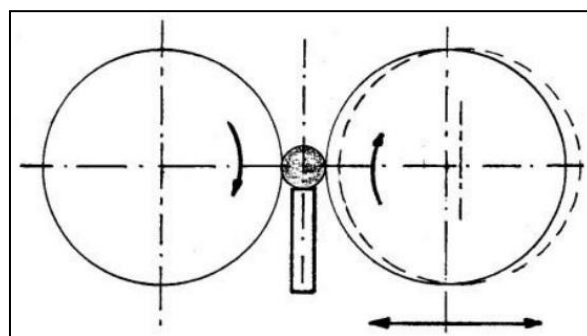


fig. 90 - Rullatura a 2 rulli

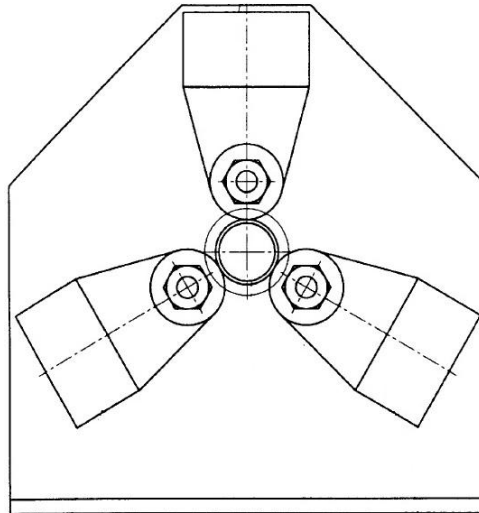


fig. 91 - Rullatura a 3 rulli

Sono comunque state studiate e realizzate anche architetture a più di tre rulli.

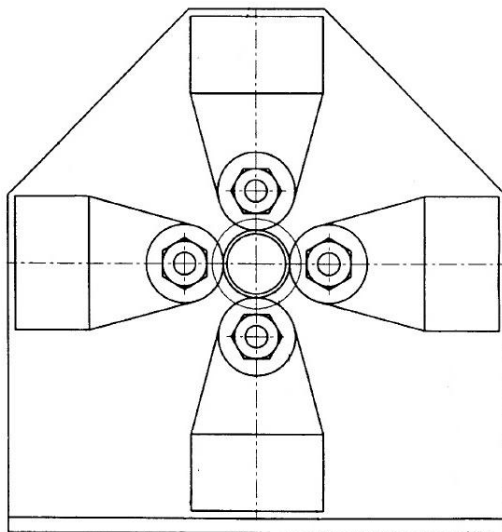


fig. 92 - Rullatura a 4 rulli

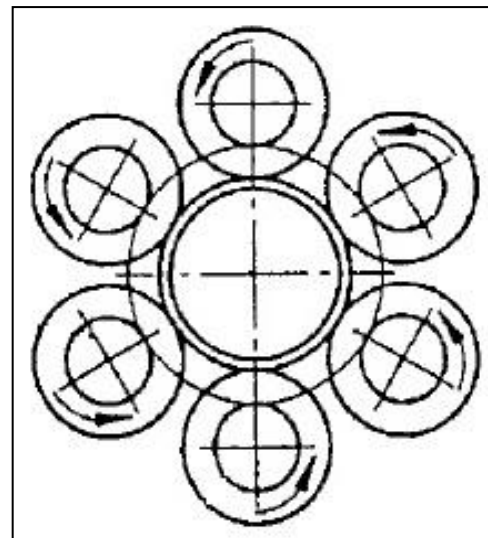


fig. 93 - Rullatura a 6 rulli

GLI UTENSILI

Gli utensili li possiamo trovare direttamente calettati sui mandrini, oppure pre-assemblati in un rocchetto.

Il materiale di cui sono costituiti è generalmente acciaio da utensili ed all'occorrenza si possono trovare anche rivestiti.

Si possono trovare in due configurazioni diverse:

- utensili lamellari (fig. 94/95);
- matrice sagomata:
 - assialsimmetrica (fig. 96);
 - elicoidale (fig. 97).



fig. 94 - Utensili lamellari

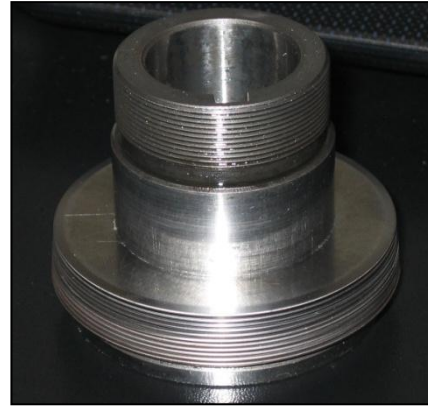


fig. 95 - Lamelle assemblate in rocchetto

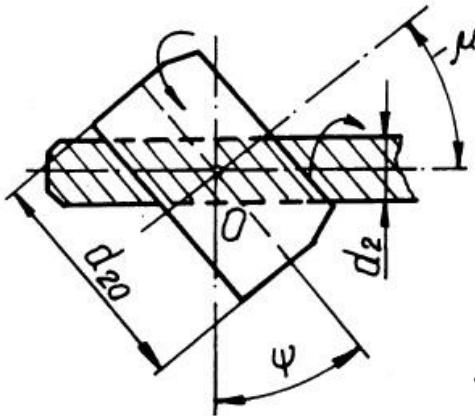


fig. 96 - Matrice assialsimmetrica

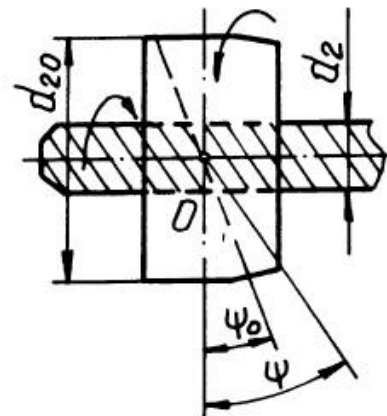


fig. 97 - Matrice elicoidale



fig. 98 - Matrici sagomate

Da queste raffigurazioni notiamo la grande differenza tra gli utensili lamellari e le matrici assialsimmetriche rispetto le matrici elicoidali.

Infatti i primi richiedono che i mandrini rotanti siano in grado di ruotare al fine di impartire al taglio degli utensili l'angolo d'elica che poi dovremo ottenere sul tubo in lavorazione.

Per quello che riguarda invece le matrici elicoidali queste possono essere sagomate in modo che sono sia necessario apportare modifiche all'angolazione dei mandrini.

Naturalmente i pacchi lamellari risultano essere i migliori dal punto di vista della flessibilità in fase di settaggio macchina in quanto si possono adattare attraverso la regolazione dell'angolo dei mandrini ad una vasta gamma di angoli d'elica.

Inoltre rispetto alle matrici assialsimmetriche permettono, in caso di rottura del filo di un tagliente, la sostituzione della lamella con il tagliente rovinato invece che l'intero blocco.

Inoltre è necessario tenere in considerazione che ogni pacco lamellare lavora un solo passo di tubo, quindi è necessario creare un magazzino utensili per tutti i passi che si vogliono produrre.

Infine va sottolineata l'importanza della verifica dello stato superficiale delle lamelle, infatti anche la presenza di piccole crepe possono compromettere la qualità del tubo in lavorazione, soprattutto con i materiali più duttili.

ANIMA

Durante la rullatura, se il tubo non ha uno spessore sufficiente, viene schiacciato eccessivamente dagli utensili senza ottenere l'altezza dell'altezza dell'aletta richiesta con un valore di diametro esterno dell'alettato troppo basso rispetto quello atteso.

In questo caso è necessario inserire un riscontro (*anima*) sulla superficie interna del tubo al fine di impedire lo schiacciamento del tubo.



fig. 99 - Anime

L'anima come rappresentata in fig. 99, presenta un foro centrale attraverso il quale passa l'asta di posizionamento che ne vincola la traslazione assiale ma lascia folle la rotazione.

Un'altra possibile configurazione di assemblaggio prevede che l'anima venga saldata sull'asta di posizionamento, vincolandone così anche la traslazione rispetto all'asta stessa, che dovrà essere libera di ruotare.

Nel caso in cui si voglia rigare la superficie interna del tubo bisognerebbe utilizzare un'anima opportunamente sagomata.

Di seguito alcuni esempi di anime sagomate per ottenere la modellazione della superficie interna.



fig. 100 - Anima a sagoma rettangolare



fig. 101 - Anima a sagoma triangolare

5.2 – Settaggio macchina

In questo paragrafo analizzeremo la procedura di settaggio dei macchinari posseduti da Be.Ca. Engineering.

Questi sono rullatrici a tre rulli con attuazione lineare dei rulli.

Il sistema inoltre è controllato da un PLC che riceve informazioni da encoders che rilevano la posizione dei tre martinetti idraulici che comandano la traslazione dei mandrini.

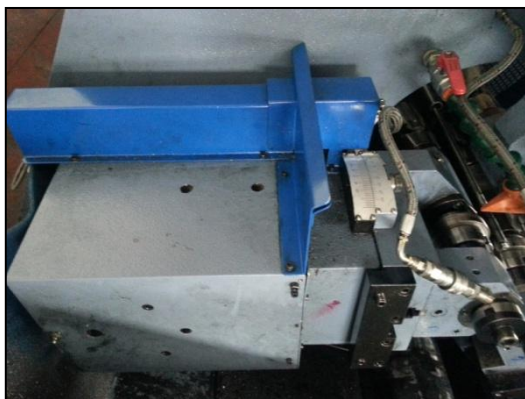


fig. 102 – Dettaglio encoder martinetto



fig. 103 – Dettaglio interfaccia PLC

Le verifiche da fare in via preliminare appena una macchina di questo tipo viene installata sono:

- verificare zero martinetti;
- allineamento linea di supporto tubo con macchina e p.to di lavoro.

Il punto di lavoro è il punto dove gli assi dei tre martinetti vanno ad incrociarsi.

Di seguito una rappresentazione della vista frontale della zona di lavoro.

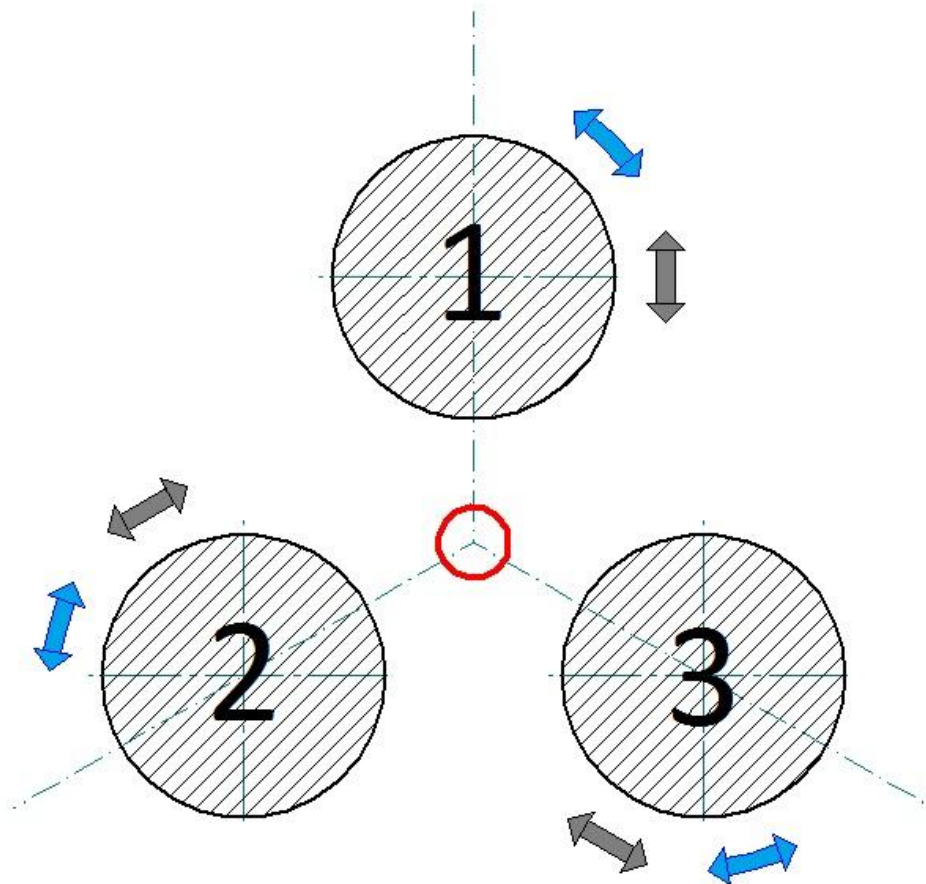


fig. 104 - Modello posizionamento utensili (nero) – tubo (rosso)



fig. 105 - Rullatrice, zona di lavoro



fig. 106 - Rullatrice, zona di lavoro

In fig.104 è schematizzata la zona di lavoro, si possono individuare:

- i tre mandrini/porta utensili (nero);
- la posizione centrale del tubo (rosso);

- *Avanti macchina*: traslazione lineare dei mandrini (grigio);
- rotazione mandrini (blu).

Come anticipato nel paragrafo precedente gli utensili (in Be.Ca. vengono utilizzati utensili lamellari) devono essere posizioni opportunamente per ottenere un'aletta pulita, ovvero senza imperfezioni.

Prendiamo in esame la generazione di un'alettatura ad un singolo principio. Dobbiamo innanzitutto fare delle considerazioni sulla geometria dell'elica per capire quali sono i parametri sensibili durante la fase di settaggio.

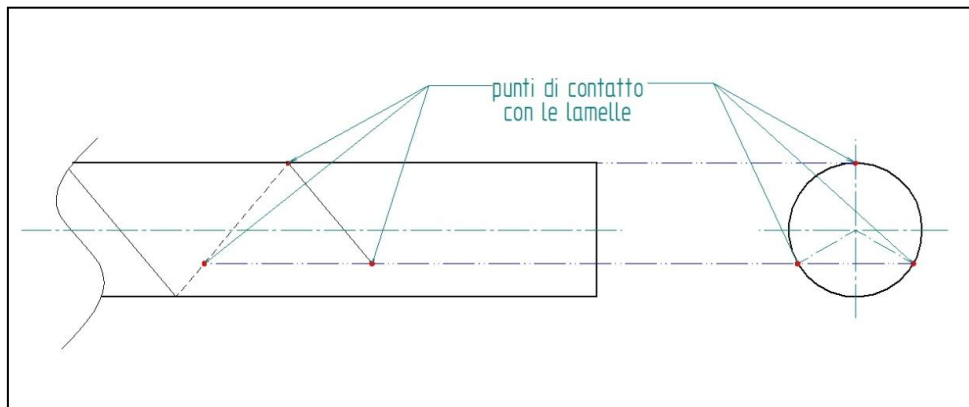


fig. 107 – Punti di contatto lamella/tubo 1 principio: vista di fianco e vista di fronte

Come rappresentato in fig. 107, il tubo viene a contatto con gli utensili in 3 punti posizionati rispettivamente a 120° .

Guardando la vista dal fianco si nota che i punti non stanno tutti sullo stesso piano, bensì sono posizionati come potevamo aspettarci lungo l'elica.

Si verifica quindi uno **sfasamento assiale** in direzione dell'asse dei mandrini tra i tre rocchetti per far sì che questi possano lavorare correttamente.

In fig. 108 è mostrato nel dettaglio questo fenomeno.

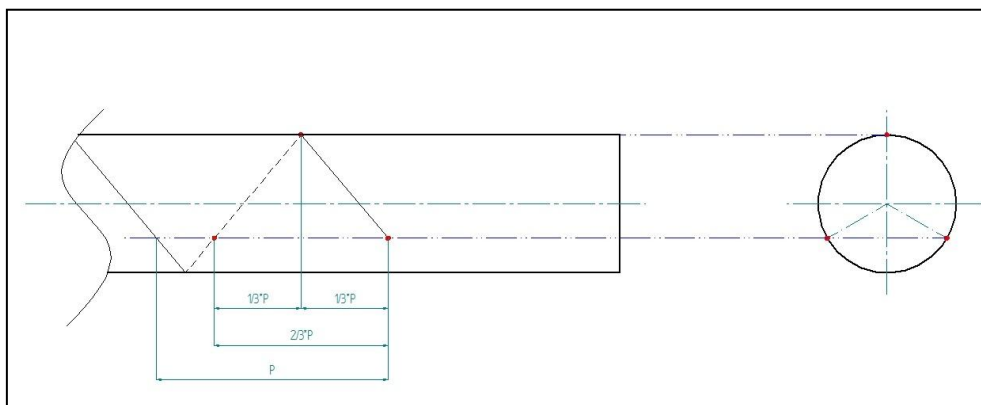


fig. 108 – Posizionamento assiale dei rocchetti

Prendendo il passo effettivo del tubo come dato in ingresso possiamo quindi affermare che lo sfasamento tra due rocchetti consecutivi (lungo l'elica) è di un terzo del passo.

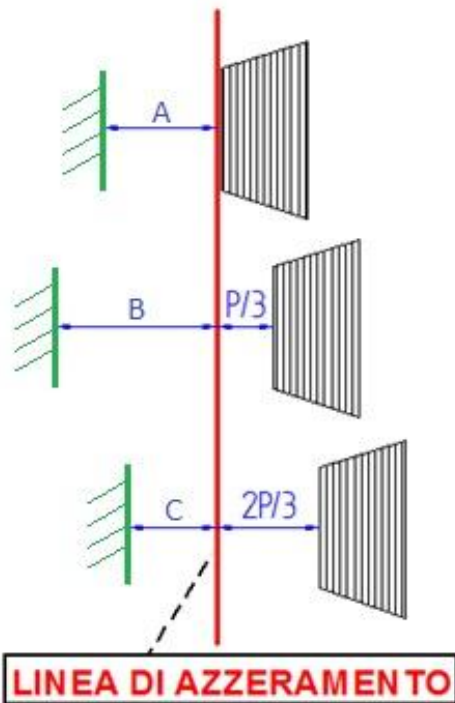


fig. 109 – Schematizzazione fasamento

In fig.109 in verde viene mostrata la battuta presente sull' mandrino, mentre i pacchi rigati sulla destra sono gli utensili.

Per fasare gli utensili è necessario innanzi tutto fare lo zero macchina definendo le quote A, B e C.

Ora siamo sulla linea di azzeramento, definiamo gli incrementi da sommare a B e C per ottenere la dimensione dei distanziali che occorrono per ottenere l'elica a meno di una costante additiva.

Dobbiamo ora a definire l'angolo d'elica da imporre ai mandrini.

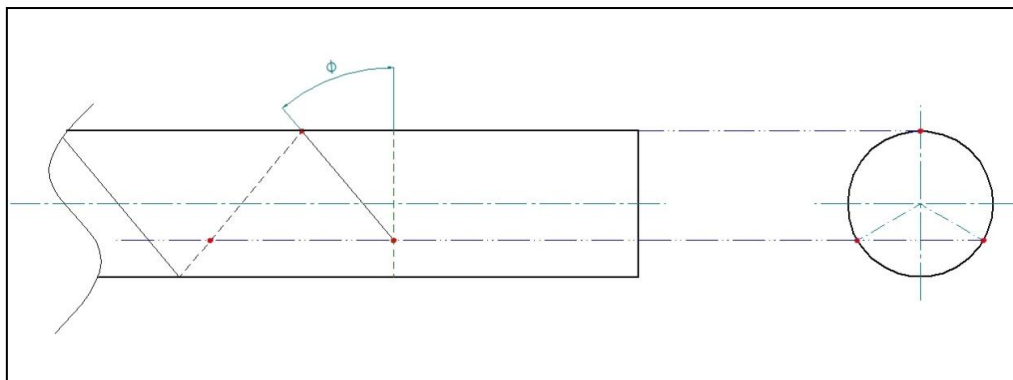


fig. 110 – Posizionamento angolare dei rocchetti

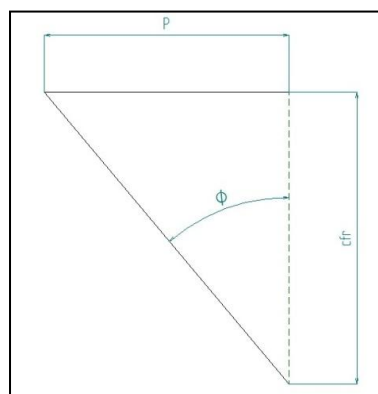


fig. 111 – Schematizzazione aletta sviluppata sul piano e angolo d'elica

Prendiamo una singola elica e facciamone lo sviluppo (fig. 111).

Possiamo definire l'angolo d'elica utilizzando la relazione seguente:

$$\tan \Phi = \frac{P}{cfr} = \frac{P}{\pi N}$$

eq. 5

Per definire l'angolo al quale impostare i mandrini si poteva scegliere tra:

- D – diametro esterno del tubo;
- N – diametro di nocciolo del tubo.

Si è scelto di utilizzare il diametro di nocciolo “ N ” per la definizione dell'angolo in quanto abbiamo bisogno della massima precisione sul taglio dell'utensile, quindi la quota identificata dal diametro di nocciolo.

Di seguito è riportata una fotografia del goniometro installato sulle teste che movimentano i mandrini.

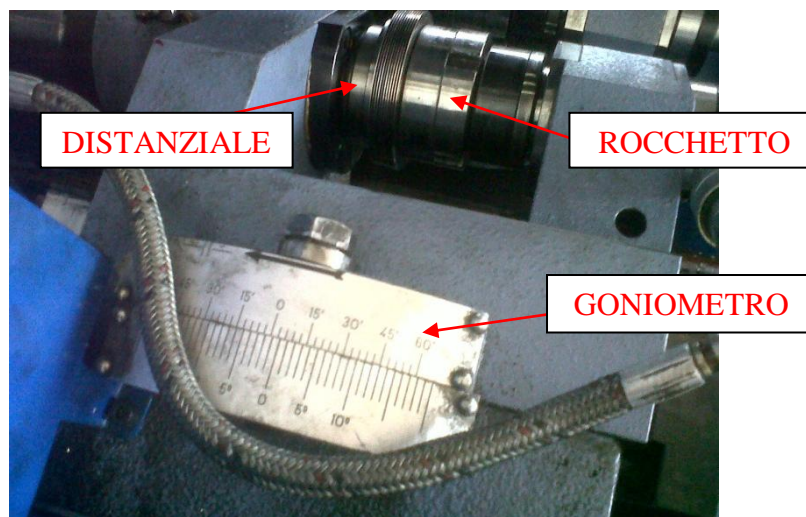


fig. 112 - Goniometro testa

A questo punto possiamo accendere la macchina per verificare la qualità del elica che produciamo.

La qualità dell'elica si definisce attraverso due osservazioni:

- Definizione alettatura nella fase di ingresso delle lamelle (fig. 113/114);
- Presenza di filamenti metallici nelle cave dell'alettatura (fig. 115/116).

Nel caso che qualcuna si verifichi una di queste condizioni è sintomo che il lavoro di settaggio della macchina deve essere rivisto in quanto non è stato sufficientemente accurato.



fig. 113 – Ingresso non corretto (confuso)



fig. 114 – Ingresso regolare

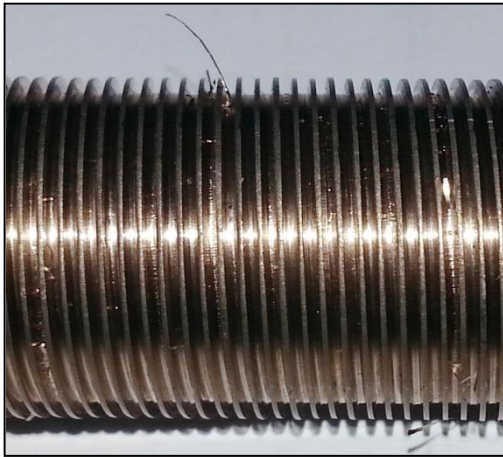


fig. 115 - Presenza di filamenti metallici

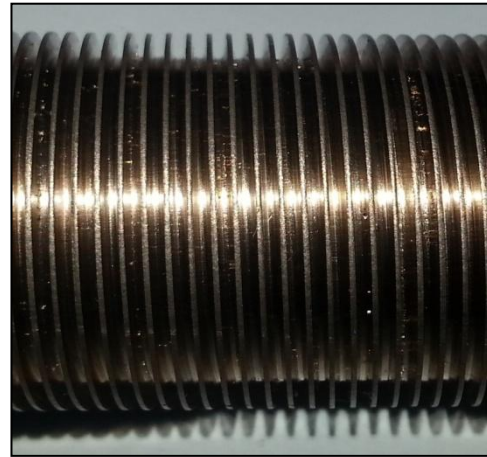


fig. 116 - Tubo pulito

Adesso dobbiamo formare l'aletta, posizioniamo quindi il tubo nella zona di lavoro, avviamo la rotazione degli utensili ed impostando il valore di "Avanti" sul PLC facciamo una prima prova di incisione sul tubo.

Ripetiamo questa procedura fino a quando non raggiungiamo l'altezza dell'aletta e il diametro esterno desiderati.

Se si nota che il diametro esterno del tubo si stabilizza attorno ad un valore non accettabile in quanto troppo basso rispetto il valore atteso si deve inserire un'anima all'interno del tubo.

La dimensione dell'anima verrà scelta in base alle stime del diametro interno riportate nelle tabelle recanti le dimensioni indicative del tubo alettato (vedi tab.6 / tab.7 / tab.8).

A questo punto il procedimento precedentemente descritto viene ripetuto ed all'occorrenza vengono apportate modifiche alla dimensione dell'anima.

Bisogna evidenziare come per le dimensioni ed i materiali generalmente utilizzati l'anima risulta essere quasi sempre presente.

Si lavorano generalmente senza anima tubi in acciaio con spessore superiore a 2.108 mm.

Di seguito è riportata un'immagine di un tubo in lavorazione.

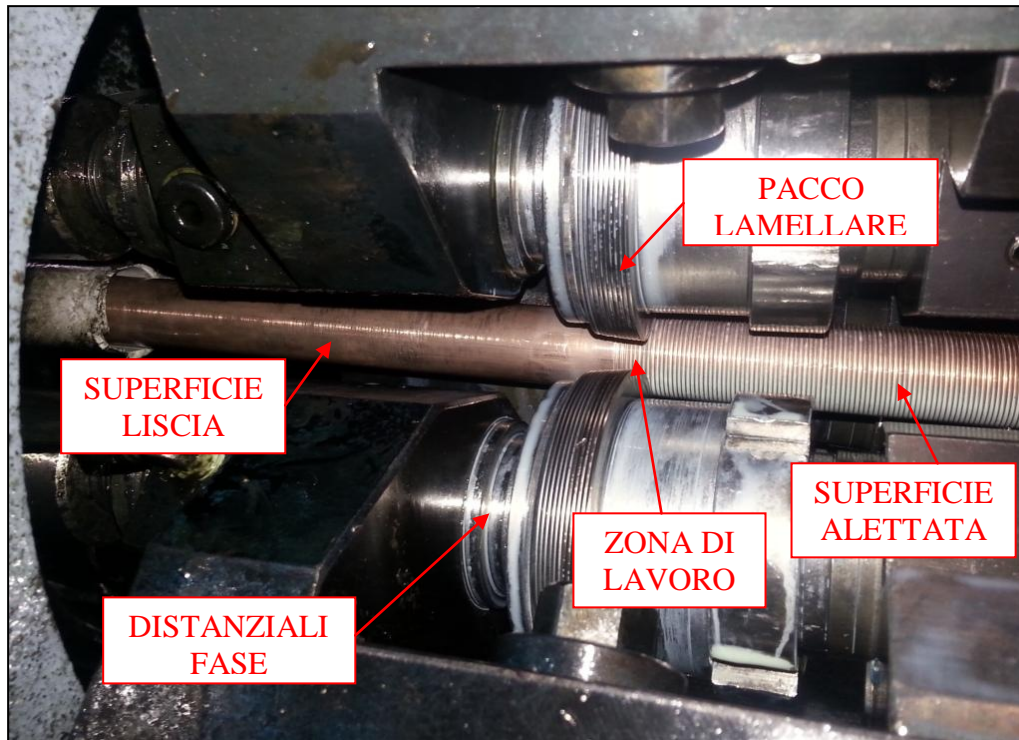


fig. 117 - Fotografia tubo in lavorazione

Si è descritta la metodologia per impostare la lavorazione su un principio.

È possibile impostare il numero di principi sul tubo attraverso delle combinazioni di angoli e distanziali.

Molto utilizzata è la configurazione a tre principi in quanto permette di ottenere un avanzamento triplo del tubo a parità di velocità di rotazione.

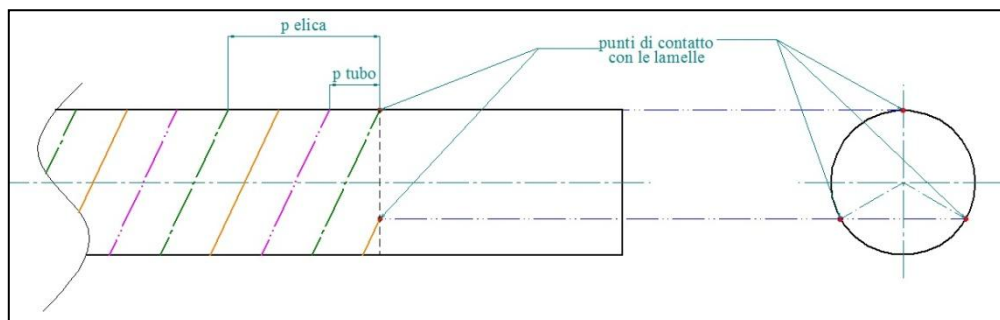


fig. 118 - - Punti di contatto lamella/tubo 3 principi: vista di fianco e vista di fronte

I tre principi sono schematizzati utilizzando tre diversi colori associati a tre diversi tipi di tratteggio.

Si può notare come a differenza del tubo ad un principio gli utensili non più sfasati di $1/3$ del passo, ma vengono posizionati sulla stessa sezione.

Abbiamo una variazione di quello che è l'angolo d'elica e di conseguenza il passo d'elica, infatti:

- 1 principio: passo d'elica = passo tubo;
- 3 principi: passo d'elica = $3 \cdot$ passo tubo.

Si suppone che il passo tubo rimane invariato tra le due configurazioni (questo è dettato dal tipo di utensili utilizzati), otterremo allora dall'eq. 5 un angolo d'elica quasi triplicato rispetto al caso con 1 principio.

5.3 – Problematiche dell'alettatura

In questo paragrafo analizzeremo come le problematiche che si possono verificare durante il processo di rullatura possano influenzare la qualità del prodotto finito.

Le non conformità che si possono osservare su un tubo alettato sono le seguenti:

- Presenza di filamenti metallici nelle cave tra le alette;
- Curvatura dell'asse del tubo;
- Progressiva riduzione di diametro esterno e altezza dell'aletta;
- Taglio dell'aletta nella parte iniziale del tubo;
- Cricche;
- Sezione non circolare del tubo dopo la rullatura.

Di seguito analizzeremo singolarmente le diverse problematiche.

FILAMENTI METALLICI

Il problema principale di questo tipo di alettatura è la formazione di filamenti metallici nelle cave dell'alettatura (vedi fig.115).

Le cause che causano questo tipo di problema sono molteplici, tra queste si possono evidenziare:

- Settaggio non ottimale del gruppo utensili, ovvero distanziali e angoli (vedi fig. 113);
- Usura o rottura di alcune lamelle (fig. 119);

- Linea di supporto del tubo non centrata con la zona di lavoro.

A seconda di quanto si verifica il problema si può identificare una o l'altra causa.

Infatti per quello che riguarda il settaggio della macchine e della linea, producono questi filamenti fin dai primi metri di tubo prodotto.

Per quanto riguarda l'usura delle lamelle, se queste sono in buono stato quando viene montato il rocchetto, cominceranno a dare questo tipo di problema nel tempo.

Di seguito l'immagine che riporta il danneggiamento di una lamella e il conseguente effetto sulla finitura del tubo.

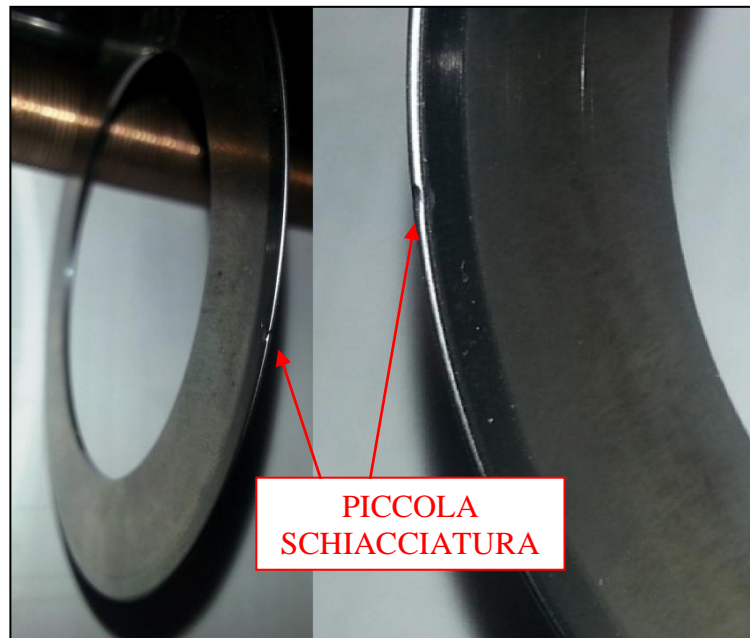


fig. 119 - Danneggiamento lamella

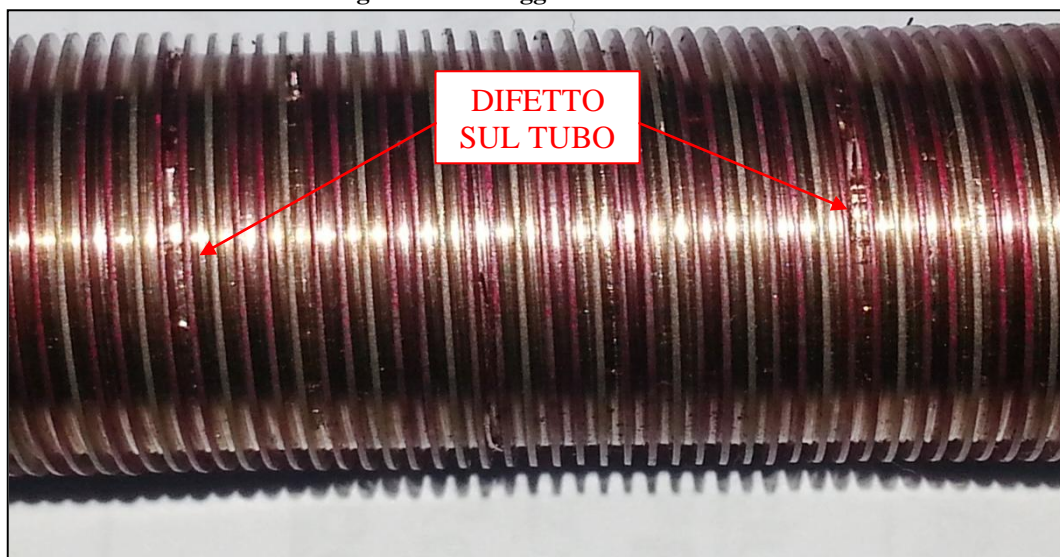


fig. 120 - Effetto del danneggiamento della lamella sul tubo

Osservando fig. 120 possiamo affermare si tratti di un difetto causato dalla lamella rovinata in quanto:

- Risulta essere all'interno della stessa elica, per verificare questa affermazione si è evidenziata l'elica danneggiata;
- L'aspetto dei due filamenti è molto simile.

CURVATURA ASSE TUBO

Si può affermare che il processo di rullatura introduce nel tubo una certa curvatura.

Questa però deve essere contenuta in modo da non creare problemi nella fasi successive di lavorazione.

Cause principali di questo fenomeno sono:

- Disallineamento della macchina con la linea di produzione;
- Nel caso si lavori con più principi, l'utilizzo di poche lamelle può provocare un'accentuamento di questo fenomeno.



fig. 121 - Due viste tubi curvati durante la rullatura

PROGRESSIVA RIDUZIONE DI DIAMETRO E ALTEZZA ALETTA

Durante una produzione può avvenire che il diametro esterno e l'altezza dell'aletta diminuiscano gradualmente.

Questo fenomeno si verifica quando durante la lavorazione si utilizza un'anima interna e questa si consuma.

La soluzione al problema consiste nel sostituire l'anima con una nuova calibrata per l'applicazione in corso.

Una soluzione momentanea consiste nell'aumentare la penetrazione dell'utensile nello spessore del tubo al fine di ristabilire i parametri geometrici desiderati.

Non bisogna però eccedere con l'usura dell'anima in quanto se non è stata posizionata esattamente l'usura potrebbe provocare dei sottosquadri con il diametro interno del tubo rischiando di far grippare il sistema anima-tubo.

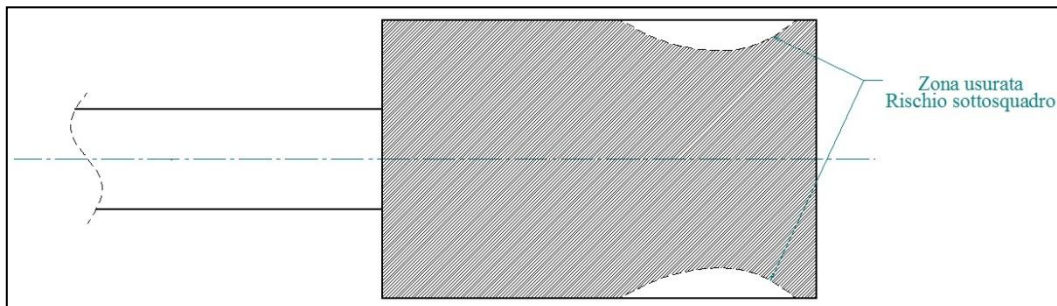


fig. 122 - Rappresentazione usura anima

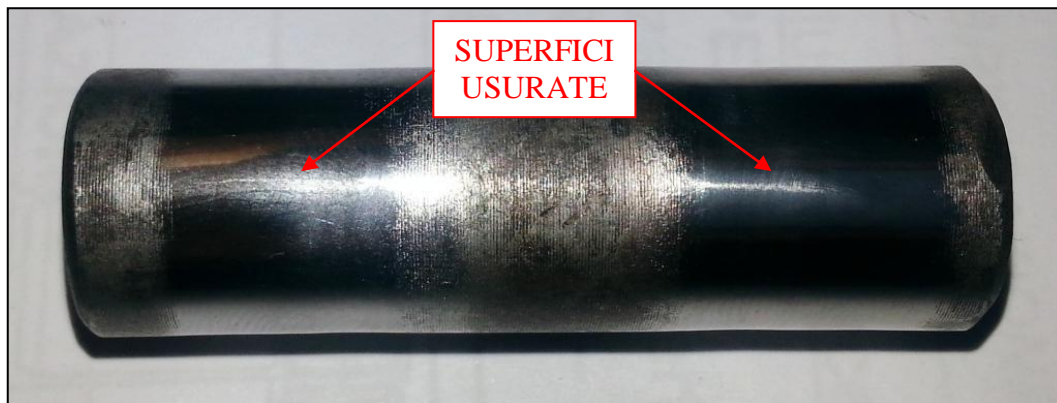


fig. 123 - Anima usurata su entrambi i lati

TAGLI DELL'ALETTA NELLA PARTE INIZIALE DELL'ALETTATURA

Questo tipo di problema si verifica quando si lavora su più principi.

Questa problematica si verifica nella parte iniziale dell'alettatura, probabilmente quando si verifica il contatto tra superficie interna del tubo e anima.

Si suppone che in questo frangente il tubo viene frenato dall'interno mentre gli utensili lo trascinano in avanti.

Se l'aletta non ha la resistenza sufficiente, si verifica il sormonto della stessa da parte degli utensili.

Gli effetti possono essere due:

- Si passa da un'alettatura a tre principi ad un'alettatura a singolo principio;
- Il tubo parte poi si blocca e ruota su se stesso.

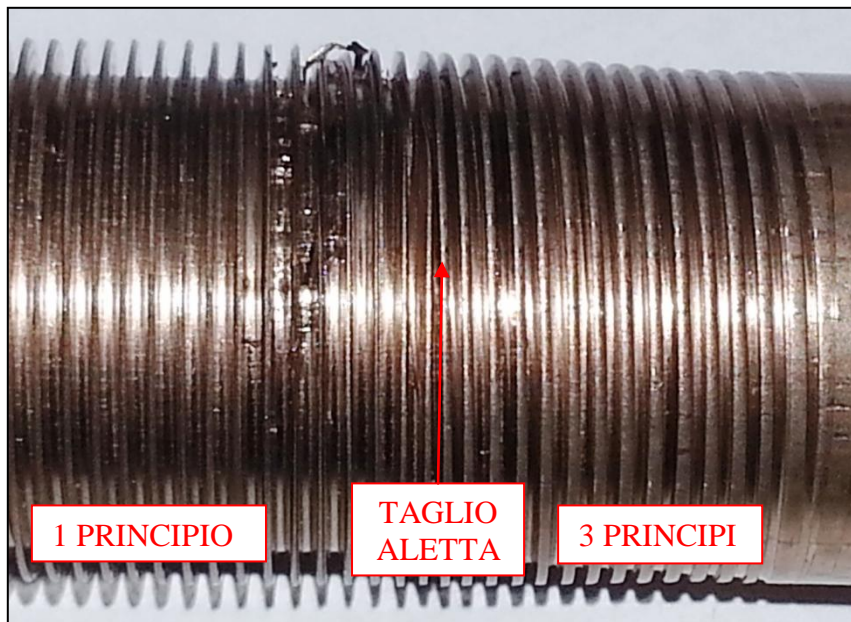


fig. 124 - Passaggio 3 principi ad 1 principio

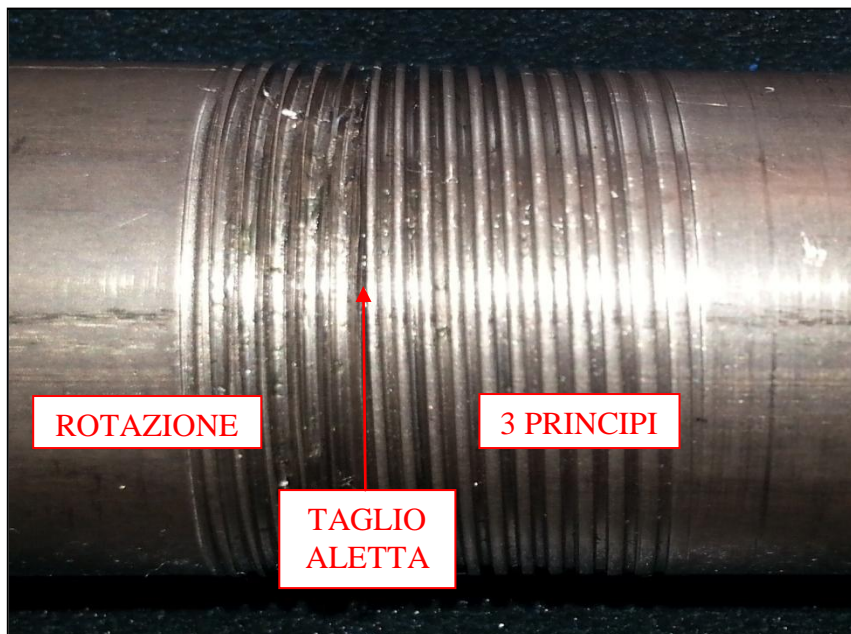


fig. 125 - Passaggio 3 principi a rotazione su se stesso

CRICCHE

Durante la rullatura è possibile si verificano cricche sulla cresta dell'aletta.

Possono essere causate:

- Materiale con allungamento a rottura troppo basso, generalmente si corregge aumentando la dimensione dei grani del materiale, ovvero ricuocendo il materiale;
- Presenza di graffiature sulla superficie esterna del tubo liscio di partenza che rimangono sulla cresta dell'aletta dopo la deformazione.
- Nei tubi saldati è possibile che si verifichino delle cricche lungo il cordone di saldatura dopo la rullatura.

SEZIONE NON CIRCOLARE DEL TUBO DOPO ALETTATURA

Questo problema è tipico del tubo alettato realizzato da un tubo liscio saldato.

In generale se il diametro esterno è conforme secondo il vincolo posto con l'eq. 4, ovvero minore del diametro esterno del tubo liscio, anche se è presente quest'anomalia il tubo viene considerato adeguato.

SPERIMENTAZIONE

Dopo aver descritto nel capitolo precedente il processo produttivo, gli utensili ed i parametri di processo, si eseguirà ora un'analisi degli effetti che si ottengono dall'alettatura di un tubo.

È stata quindi pianificata una campagna sperimentale al fine di osservarne il comportamento.

Lo scopo ultimo è quello di definire una famiglia di equazioni che descrivano il comportamento dei principali parametri geometrici del tubo al variare dei parametri di processi.

6.1 – Pianificazione

I parametri geometrici (fig.82 –fig.83) che vogliamo monitorare sono i seguenti:

- O – diametro esterno;
- N – diametro di nocciolo;
- I – diametro interno;
- H – altezza dell'aletta;
- W – spessore sotto aletta;
- p – passo dell'alettatura;
- $\Delta L\%$ – allungamento percentuale del tubo;
- ψ – torsione del tubo.

È necessario specificare infatti che durante la rullatura il tubo in lavorazione subisce sia un allungamento in direzione assiale che una torsione attorno al suo asse.

In figura è riportata una rappresentazione di questo fenomeno.

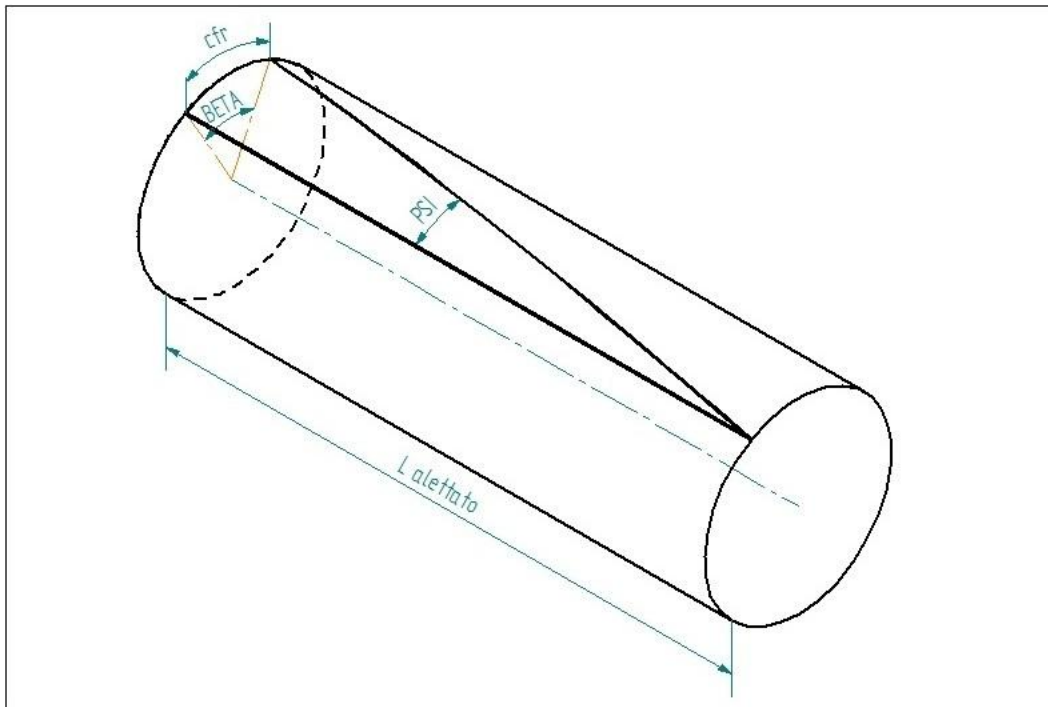


fig. 126 - Rappresentazione torsione nel tubo alettato e principali parametri

Definiamo l'angolo di torsione ψ positivo se questo è concorde alla all'alettatura, negativo se discorde.

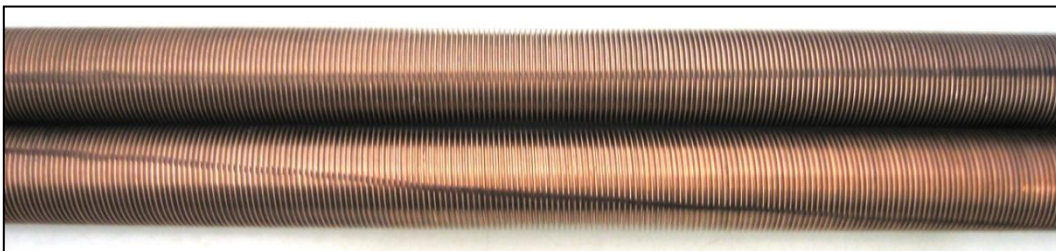


fig. 127 - Torsione del tubo

Per rilevare questa torsione il tubo viene marcato con un linea rettilinea per tutta la lunghezza, successivamente è così possibile ottenere la torsione che il tubo ha subito durante la lavorazione.

In figura 127 è possibile distinguere:

- tubo in alto: lieve torsione negativa;
- tubo in basso: accentuata torsione positiva.

La sperimentazione corrente verrà eseguita avendo fissato il passo di dell'elica, in particolare i parametri nominali dell'alettatura saranno:

- 27 alette per pollice;
- 1 principio.

Un altro parametro che vincoliamo nella nostra analisi sono le dimensioni di sezione del tubo liscio di partenza.

Verranno utilizzati campioni con le seguenti dimensioni medie:

- $D = 19,050$ mm;
- $t = 1,651$ mm.

I parametri che andremo invece a modificare sono i seguenti:

- materiale dei tubi campione;
- inserimento degli utensili lamellari all'interno del tubo;
- dimensione dell'anima interna di riscontro.

MATERIALI

Sulla scelta dei materiali da utilizzare per la sperimentazione si è voluto utilizzare quelli che risultano essere i maggiormente richiesti dal mercato.

Di seguito una tabella riepilogativa di quelli che sono i materiali che saranno utilizzati e delle proprietà meccaniche minime da normativa.

Materiali		
ASTM B111/C122	Copper 99,9%	DHP - Phosphorized, high residual phosphorus
ASTM B111/C687	Copper Alloy	Aluminum Brass, B
ASTM B111/C715	Copper Alloy	70-30 Copper-Nickel
ASTM A179	Carbon Steel	Seamless Cold-Drawn Low-Carbon Steel Tubes

tab. 9 – Tabella materiali

MATERIALI	E [Gpa]	ν	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A% [%]
C12200 (H55)	123	0,33	205	250	-
C68700 (O61)	110	0,33	125	345	-
C71500 (O61)	152	0,33	125	360	-
A179	202	-	180	325	35,0

tab. 10 - Proprietà meccaniche medie da letteratura

Significato delle sigle presente in tabella:

- H55: Trafilatura leggera;
- O61: Ricotto.

I materiali che sono più frequentemente richiesto eseguire questo tipo di lavorazione sono A179 e C68700.

Per tubi di questi materiali sono disponibili anche le curve σ - ϵ ottenute dall'esecuzione di prove di trazione presso i laboratori dell'Università di Bologna.

Di seguito sono riportati i grafici ottenuti per i due materiali.

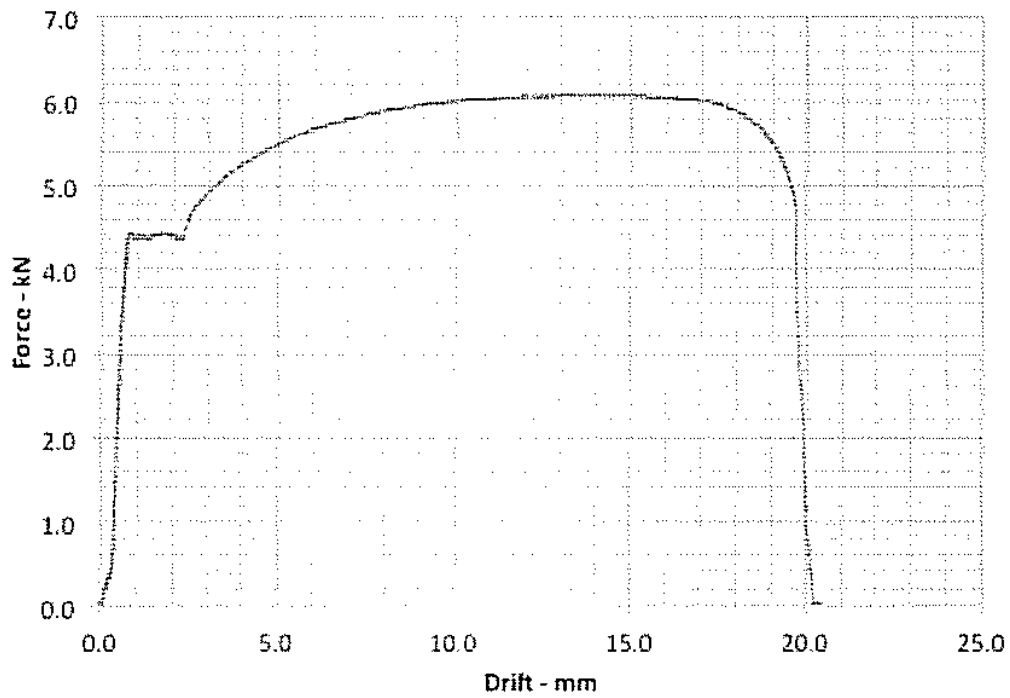


fig. 128 – Grafico forza-allungamento ottenuto per un tubo in A179

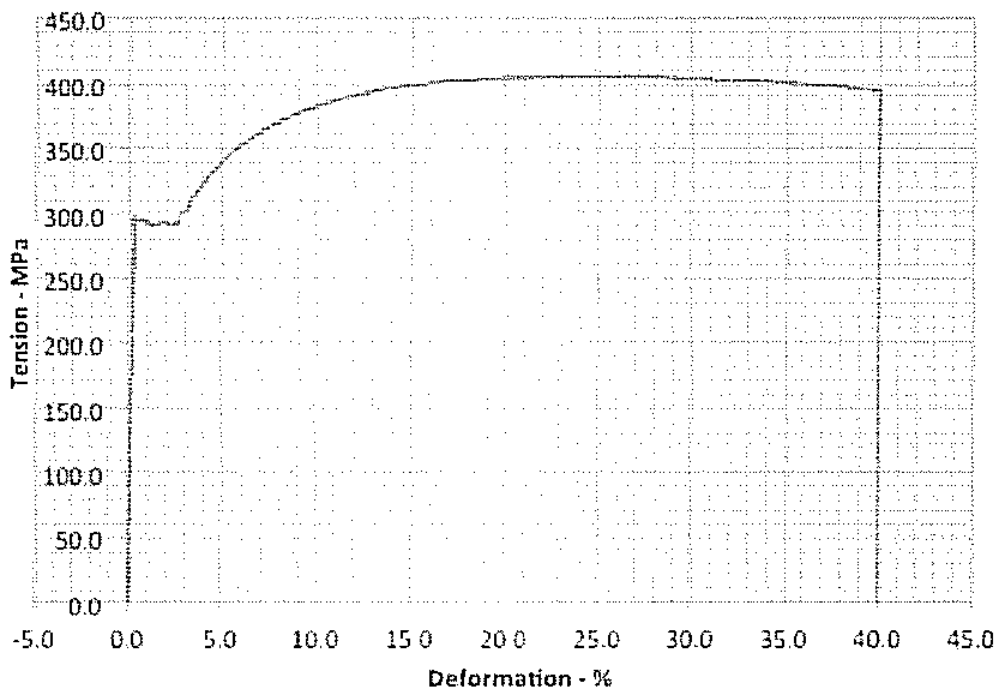


fig. 129 – Grafico σ - ϵ ottenuto per un tubo in A179

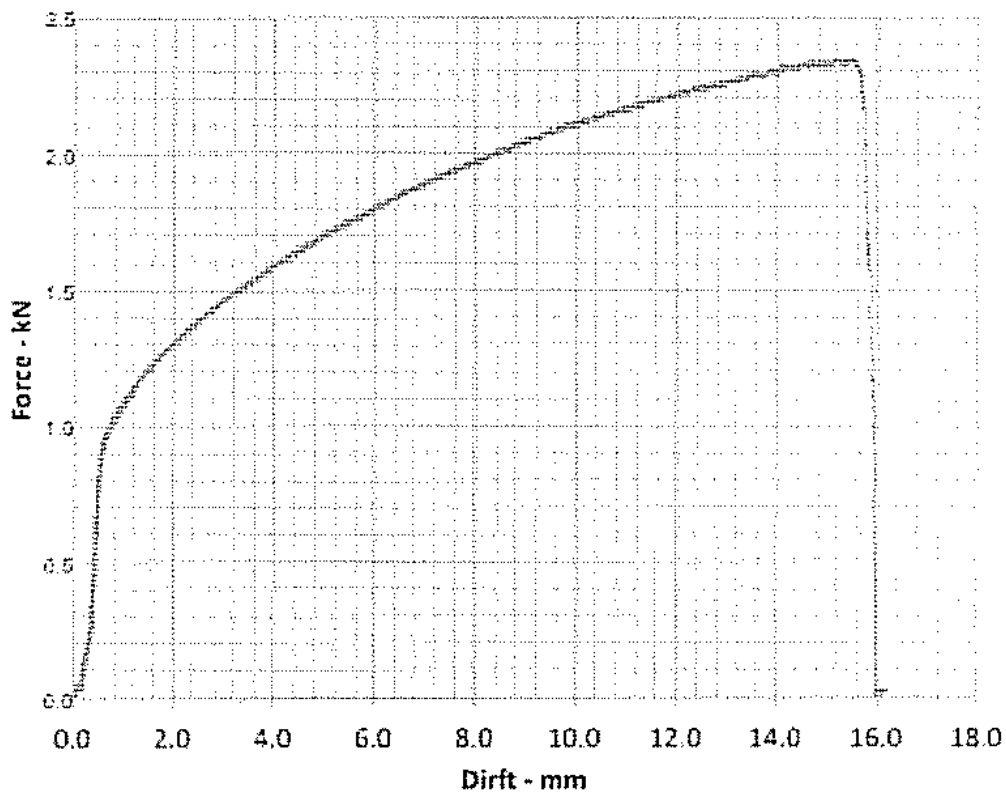


fig. 130 – Grafico forza-allungamento ottenuto per un tubo in C68700

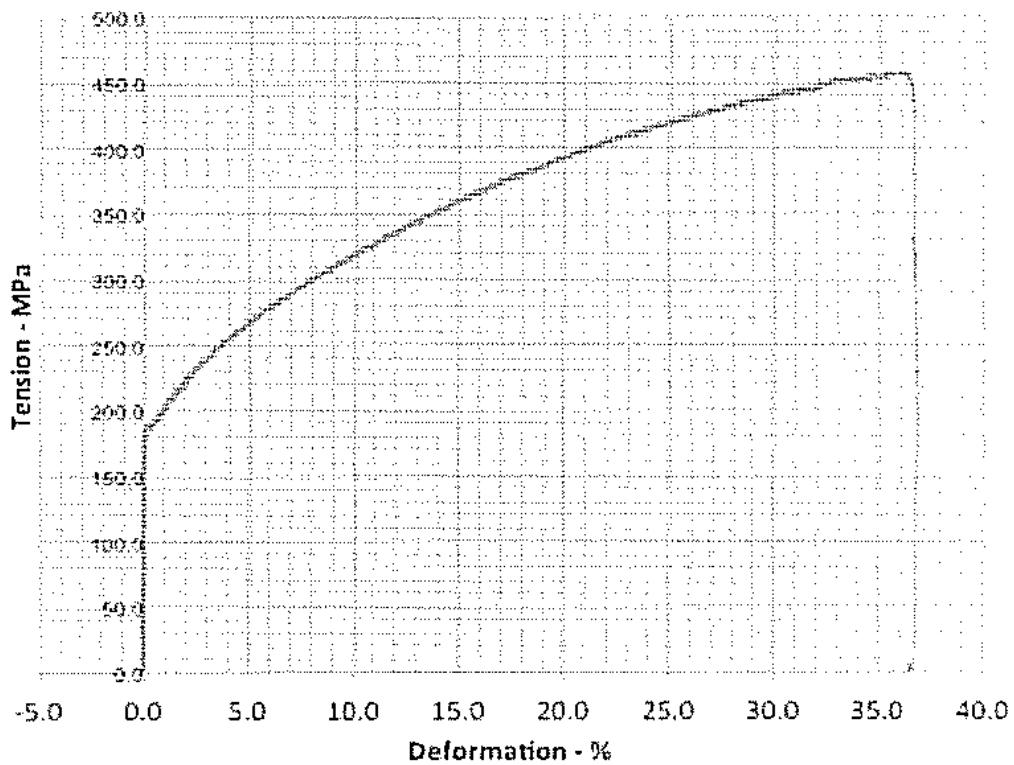


fig. 131 – Grafico σ - ϵ ottenuto per un tubo in C68700

Da questi andamenti è possibile definire le caratteristiche meccaniche dei materiali analizzati, che vengono riassunte in *tab.11*.

	MATERIALE	
	A179	C68700
Forza allo snervamento [kN]	4,43	0,91
Forza massima [kN]	6,09	2,34
Allungamento max [mm]	19,63	15,47
Tensione di snervamento [MPa]	305,2	177,7
Tensione massima [MPa]	417,7	459,0
Deformazione max [%]	37,25	37

tab. 11 – Caratteristiche meccaniche campioni caratterizzati alla prova di trazione
 Osservando le immagini relative agli andamenti (*fig.129, fig.131*) è possibile osservare le differenze che ci sono tra questi due materiali analizzati:

- Nel grafico dell’A179 si può identificare il caratteristico andamento a dente di sega al punto di snervamento;
- Andamento del tratto plastico quasi costante per l’A179, mentre per il C68700 si verifica una pendenza non trascurabile;
- Carico di snervamento più basso per il campione in C68700 rispetto a quello relativo al campione in A179;
- Per l’A179 è visibile la formazione della strizione nel provino;
- Tensione massima rilevabile per l’A179 non corrisponde alla tensione di rottura in quanto si verifica la strizione, questo non accade invece per il C68700 in cui coincidono.

In *tab.12* sono infine riportate le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati durante la nostra sperimentazione ottenute dai certificati del materiale dei produttori di tubo.

MATERIALI	Dimensioni	Sy [MPa]	Su [MPa]	A% [%]
B111/C12200	19,05 x 1,65	247,54	-	54,33
B111/C68700	19,05 x 1,65	172 - 192	407 - 426	-
B111/C71500	19,05 x 1,65	161	425	46,4
A179	19,05 x 1,65	300	400	47

tab. 12 - Proprietà meccaniche materiali

Nota: per il B111/C687 i campioni utilizzati sono ricavati da spezzoni di tubi appartenenti a colate diverse.

È stato quindi inserito a tabella il range di valore indicati nel certificato.

DIMENSIONI DELL'ANIMA

Come da tab.7, per le dimensioni del tubo liscio definite, dovremmo ottenere un diametro interno del tubo alettato di circa 14,427 mm.

Essendo lo scopo della sperimentazione definire quali siano gli effetti della rullatura sul tubo alettato, non ci interessa in questo momento ottenere un tubo con le dimensioni da catalogo, arrotondiamo quindi il valore dell'anima a 14,50 mm.

Volendo inoltre osservare come si comportano i parametri geometrici del tubo variando la dimensione dell'anima abbiamo definito altri due valori:

- in difetto di 0.50 mm, ovvero 14,00mm;
- in eccesso di 0.50 mm, ovvero 15,00mm.

Definiamo quindi:

- Anima 1: diametro esterno da 14.00 mm;
- Anima 2: diametro esterno da 14.50 mm;
- Anima 3: diametro esterno da 15.00 mm.

Si vuole ricordare che le tolleranze generalmente utilizzate sono dell'ordine dei 0.15/0.20 mm: una variazione di 0.50 mm sul diametro dell'anima non è quindi da considerarsi di modesta entità.

INSERIMENTO UTENSILI

Infine per definire gli avanzamenti da utilizzare durante la sperimentazione sono state fatte alcune prove preliminari.

Si desiderava lavorare in un range di valori di inserimento in cui l'aletta sia tra il 25% ed il 125% dell'altezza nominale da catalogo, ovvero tra 0.311 mm e 1.556 mm.

È sono stati utilizzati per questa prova dei campioni in C68700, iniziando a rullare utilizzando l'anima 2, in quanto tra quelle disponibili si avvicina di più al valore nominale del diametro interno del tubo.

È stata così costruita la seguente tabella sulla base del quale sono stati definiti gli "Avanti" macchina che saranno utilizzati per la sperimentazione.

#	Avanti	ANIMA		
		14,00	14,50	15,00
1	9,50			
2	9,60			25%
3	9,70			
4	9,80		25%	
5	9,90			
6	10,00	25%		
7	10,10			50%
8	10,20			
9	10,30		50%	
10	10,40			75%
11	10,50	50%		
12	10,60		75%	
13	10,70			100%
14	10,80	75%		
15	10,90		100%	
16	11,00			
17	11,10	100%		
18	11,20			
19	11,30			

LEGENDA

Approssimazione
Verificato
Rottura

tab. 13 – Tabella preliminare avanti macchina

In *tab.13* si possono distinguere 19 righe, ognuna di queste corrisponde ad un avanti macchina, riportati nella tabella in millimetri.

Le percentuali sulla destra sono riferite all'altezza dell'aletta del tubo alettato rispetto all'altezza dell'aletta nominale.

Si possono ora distinguere due tipi di celle:

- Sfondo verde: dimensioni verificate;
- Sfondo rosso: rottura del tubo a causa dell'eccessivo avanzamento.

Si può dedurre quindi come le percentuali riportate su sfondo bianco siano frutto di un'approssimazione fatta sulla base della linearità emersa tra l'avanti con il quale si ottiene un'altezza dell'aletta pari al 100% del suo valore nominale e la rottura del tubo con l'anima 2 e quanto è stato verificato con l'anima 1.

È stato così definito il range di *Avanti* macchina: 9.50 ÷ 11.30.

Questo è stato poi suddiviso in passi distanziati di 0.15 mm, e sono state fatte le seguenti associazioni:

ANIMA		
14,00	14,50	15,00
		9,50
		9,65
	9,80	9,80
	9,95	9,95
10,10	10,10	10,10
10,25	10,25	10,25
10,40	10,40	10,40
10,55	10,55	10,55
10,70	10,70	10,70
10,85	10,85	
11,00	11,00	
11,15		
11,30		

tab. 14 - Avanti sperimentazione

Si sono infine definiti gli *Avanti* che saranno utilizzati per le diverse dimensioni di anima durante la sperimentazione.

6.2 – Preparazione dei campioni

Come accennato in precedenza i campioni saranno realizzati utilizzando 4 materiali: rame, aluminum-brass (C68700), CuproNickel 70/30 (C71500) ed acciaio al carbonio.

I campioni dovranno avere una lunghezza di 500 mm, eccezione fatta per il rame che sono stati tagliati a 300 mm.

Si sono così verificate le dimensioni reali dei tubi, in quanto le dimensioni nominali sono soggette a tolleranze che non possono essere trascurate in questo tipo di sperimentazione.

Di seguito una tabella che riporta i valori effettivi ricavati dalla misura dei campioni.

CODICE	Materiale	D [mm]	d [mm]	s [mm]	L ₀ [mm]
RIF. DIMENSIONI		19,05	15,75	1,65	-
A 1	C12200-soft	19,04	15,73	1,66	302
A 2	C12200-soft	19,04	15,74	1,65	302
A 3	C12200-soft	19,04	15,73	1,66	302
A 4	C12200-soft	19,04	15,73	1,66	302
B 1	A179	19,07	15,48	1,80	502
B 2	A179	19,07	15,47	1,80	502
B 3	A179	19,07	15,48	1,80	502
B 4	A179	19,07	15,48	1,80	502
C 1	C68700-O61	19,03	15,54	1,75	502
C 2	C68700-O61	19,06	15,57	1,75	502
C 3	C68700-O61	19,04	15,52	1,76	502
C 4	C68700-O61	19,08	15,56	1,76	502
X 1	C68700-O61	19,05	15,52	1,77	502
X 2	C68700-O61	19,06	15,54	1,76	502
X 3	C68700-O61	19,05	15,56	1,75	502
X 4	C68700-O61	19,05	15,54	1,76	502
D 1	C71500-O61	19,02	15,57	1,73	502
D 2	C71500-O61	19,00	15,57	1,72	502
D 3	C71500-O61	19,02	15,58	1,72	502
D 4	C71500-O61	18,99	15,57	1,71	502

tab. 15 - Dimensioni iniziali tubi lisci

Avendo disponibilità limitata di campioni in C12200 e C71500, si è deciso di dividere la sperimentazioni in due:

	Sperimentazione 1	Sperimentazione 2
Materiali	C12200 A179 C68700 C71500	A179 C68700
Anime	14,50 mm	14,00 mm 15,00 mm

tab. 16 - Sperimentazioni

Le due sperimentazioni avranno scopi distinti ovvero:

- Sperimentazione 1: valutare le variazioni dei parametri geometrici che si possono ottenere utilizzando materiali diversi;
- Sperimentazione 2: valutare le variazioni dei parametri geometrici che si possono ottenere variando l'anima interna.

Si è definito così il numero minimo di campioni necessario per effettuare le prove richieste.

	n° campioni
POS1	1
POS2	1
POS3	1
POS4	2
POS5	2
POS6	2
POS7	2
POS8	2
POS9	2

tab. 17 - Numero di campioni per tipologia di prova

Si è definito di utilizzare un solo campione per le prime tre posizioni, in quanto l'altezza dell'aletta è molto bassa, mentre si è considerato un numero di due campioni dalla terza alla nona posizione, per un totale di quindici campioni per prova.

Considerando le prove sopra citate si ottengono i seguenti quantitativi per i diversi materiali:

- Rame, C12200: 15 campioni;
- Acciaio al carbonio, A179: 45 campioni;
- Aluminum Brass, C68700: 45 campioni;
- CuNi 70/30, C71500: 15 campioni.

Alla luce di questi dati si consideri un totale di circa 120 campioni.

A questo punto si è provveduto alla marcatura dei campioni tracciando una riga longitudinale per tutta la lunghezza del campione al fine di identificare la deformazione di torsione del tubo in lavorazione.

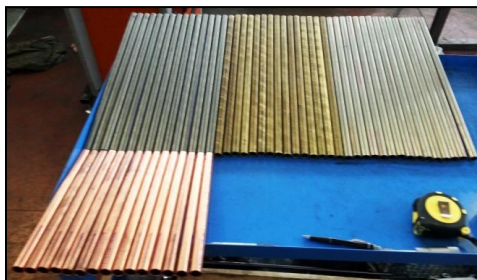


fig. 132 – Campioni per sperimentazione 1

Sono stati così lavorati e si sono ottenuti i tubi alettati campione che saranno poi sottoposti alla misurazione.



fig. 133 - Campioni C68700



fig. 134 - Campioni C71500

Durante la rullatura è stata superato il limite di resistenza di alcuni campioni in C68700 provocandone la rottura.



fig. 135 - Rottura



fig. 136 - Rotture

6.3 – Procedura di misurazione

Per ottenere i valori dei parametri che successivamente verranno elaborati si è seguita una procedura di misurazione al fine di limitare gli errori di misura.

Sono stati utilizzati diversi strumenti per la misurazione dei parametri.

Di seguito è riportata una tabella riassuntiva degli strumenti utilizzati.

Metro	Lunghezza tubo liscio Lunghezza tubo alettato Lunghezza alettatura Torsione del tubo
Micrometro da esterno	Diametro esterno tubo liscio
Micrometro da interno	Diametro interno tubo liscio Diametro interno tubo alettato
Proiettore di profili	Diametro esterno tubo alettato Diametro di nocciolo tubo alettato Altezza dell'aletta Passo dell'alettatura

tab. 18 – Strumentazione utilizzata

Di seguito descriviamo brevemente i vari strumenti utilizzati.

METRO

Il metro utilizzato durante la sperimentazione possiede le seguenti caratteristiche:

- Fondo scala: 5.000 mm;
- Risoluzione: 1 mm.

Questo strumento è stato utilizzato per misurare la lunghezza del tubo liscio, quella del tubo alettato e la lunghezza della parte alettata al fine di determinare l'allungamento del tubo durante il processo.



fig. 137 - Metro

MICROMETRO DA ESTERNO

Il micrometro da esterno utilizzato per la misura del diametro esterno del tubo liscio possiede le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura: 0.000 – 25.000 mm;
- Risoluzione: 0.001 mm.

Si è scelto questo strumento in quanto permette di misurare con grande precisione il diametro esterno riducendo al minimo l'errore di misura.

Si è preferito utilizzare uno strumento meccanico invece che elettronico per evitare il possibile errore di conversione del segnale sull'interfaccia utente.



fig. 138 - Micrometro da esterno

MICROMETRO DA INTERNO

Il micrometro da interno utilizzato per la misura del diametro interno del tubo liscio ed alettato possiede le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura: 12.000 – 16.000 mm;
- Risoluzione: 0.005 mm.

Si è scelto questo strumento in quanto permette di misurare con grande precisione tutti i diametri interni che stiamo andremmo a misurare.

Possiamo fare questa affermazione in quanto:

- Diametro massimo definite dalle dimensioni del tubo liscio (diametro interno circa di 15.75 mm);
- Diametro minimo definito dall'anima più piccola (14,00 mm).



fig. 139 - Micrometro da interno

PROIETTORE DI PROFILI

Tra tutti gli strumenti utilizzati il proiettore di profili è sicuramente quello più interessante.



fig. 140 - Proiettore di profili

Questo strumento proietta una porzione del profilo del componente da misurare all'interno di un video.

Dalla proiezione del profilo si ottiene un ingrandimento X10.

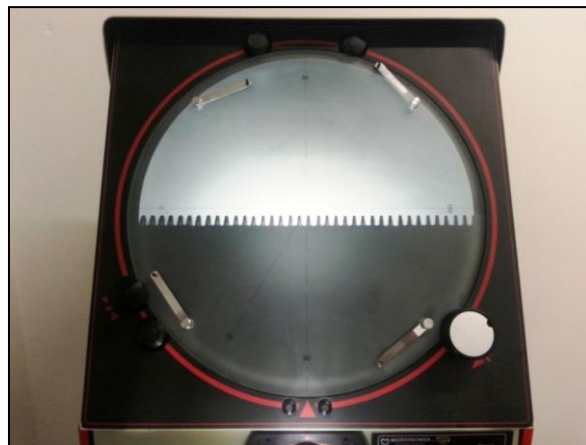


fig. 141 - Monitor proiettore

Il componente viene posizionato in una morsa che può essere traslata longitudinalmente ed in altezza.

Sono consentite inoltre due rotazioni della morsa:

- La prima con asse verticale;
- La seconda con asse parallelo alla direzione di presa della morsa.

Tutte le movimentazioni sono permesse dalla movimentazione di manovelle dedicate.



fig. 142 - Morsa e guide

Questo strumento permette grazie ad encoder elettronici posizionati sulle slitte e sul monitor di quantificare:

- Traslazione orizzontale della slitta;
- Traslazione verticale;
- Rotazione del piano di visualizzazione (monitor).

Le misure sono effettuate grazie alla presenza sul monitor di linee fisse che fungono da riferimento.

Le misure effettuate sono riportate su un piccolo display laterale.

A questo componente è associata anche la funzione di impostare lo zero dei diversi assi di misura.



fig. 143 - Display di controllo

PROCEDURA DI MISURAZIONE

Come si è accennato in precedenza, a campione si sono verificate le dimensioni del tubo liscio di partenza, ovvero:

- Diametro esterno;
- Diametro interno;
- Lunghezza.

Essendo i campioni di C12200, A179 e C71500 ricavati dallo stesso tubo si è ritenuto sufficiente verificare le misure su quattro dei campioni prodotti.

Per quanto riguarda i campioni in C68700, sono stati ottenuti da tubi appartenenti a colate diverse, si è preferito avere la verifica delle dimensioni di partenza su per un numero più elevato di campioni.

Si sono così lavorati i campioni.

Sono state così rilevate le lunghezze:

- Lunghezza totale del tubo;
- Lunghezza della parte alettata: sono state prese come riferimento la prima e l'ultima incisione sul tubo.

Inoltre è stata rilevata la torsione del tubo misurando il parametro “*cfr*” (si veda *fig.126*) sfruttando le incisioni fatte preliminarmente sul tubo.

Si è poi passati al proiettore di profili dove sono state misurate:

- Diametro esterno del tubo alettato;
- Diametro di nocciolo;
- Altezza dell'aletta;
- Passo.

Al proiettore sono stati effettuati due set di misure per ogni campione prodotto:

- Una prima misura a circa $1/3$ della lunghezza della parte alettata;
- Una seconda misura a circa $2/3$ della lunghezza della parte alettata.

Inoltre per quanto riguarda l'altezza dell'aletta questa è stata misurata due volte per ogni set di misura.

Per quanto riguarda il passo dell'alettatura, per ottenere un valore non influenzato da deformazioni locali della cresta dell'aletta, è stata riportata la distanza tra dieci alette consecutive.

Si è in un secondo momento ricavato il valore del passo medio nel tratto analizzato dividendo la misura ottenuta per il numero di alette considerate.

Si è infine ricavato il valore di diametro interno del tubo alettato utilizzando un micrometro da interno.

Anche questa misura è stata effettuata due volte per ogni campione realizzato al fine di verificare la ripetibilità dei valori ricavati.

Si è ottenuta così una matrice di valori misurati, in particolare:

- Diametro esterno: $n^{\circ}2$ misure per campione;
- Diametro di nocciolo: $n^{\circ}2$ misure per campione;
- Diametro interno: $n^{\circ}2$ misure per campione;
- Altezza dell'aletta: $n^{\circ}4$ misure per campione;
- Passo: $n^{\circ}2$ misure per campione.

Di queste misure è stata in una fase successiva effettuata una media, ottenendo un valore di riferimento per ogni campione prodotto.

È stato infine verificato che i valori medi introdotti non siano tali da camuffare la rappresentatività dei valori misurati.

Si è constatato che le variazioni tra le misure appartenenti ad uno stesso campione differiscono di pochi centesimi di millimetro, variazione che potrebbe essere imputata anche ad un errore di misura, quindi i valori medi ottenuti possono essere considerati rappresentativi del processo.

6.4 – Rappresentazione parametri

Come primo passo si è rappresentata la variazione dei parametri geometrici del tubo al variare dell'avanti macchina e dell'inserimento degli utensili all'interno del tubo.

L'*Avanti* viene definito come il parametro macchina (ovvero associato alla rullatrice) che definisce la posizione degli utensili nel pezzo in lavorazione rispetto allo zero macchina.

Viene definito l'inserimento come:

$$\text{inserimento} = (D - N)/2$$

eq. 6

A differenza dell'*Avanti*, l'*inserimento* fa riferimento a parametri geometrici del tubo, viene infatti definito sulla base del valore di diametro esterno del tubo liscio e diametro di nocciolo del tubo alettato.

Utilizzando questi parametri sono stati realizzati i seguenti grafici dalle sperimentazioni effettuate:

1. andamento dei parametri che caratterizzano la sezione del tubo (O, N, I);
2. andamento del passo e dell'angolo di torsione nel tubo;
3. andamento ΔL , altezza dell'aletta e spessore sotto aletta;
4. variazione dei parametri indicati ai p.ti 1/2/3 al variare della dimensione dell'anima.

6.4.1 – Diametro esterno, di nocciolo ed interno

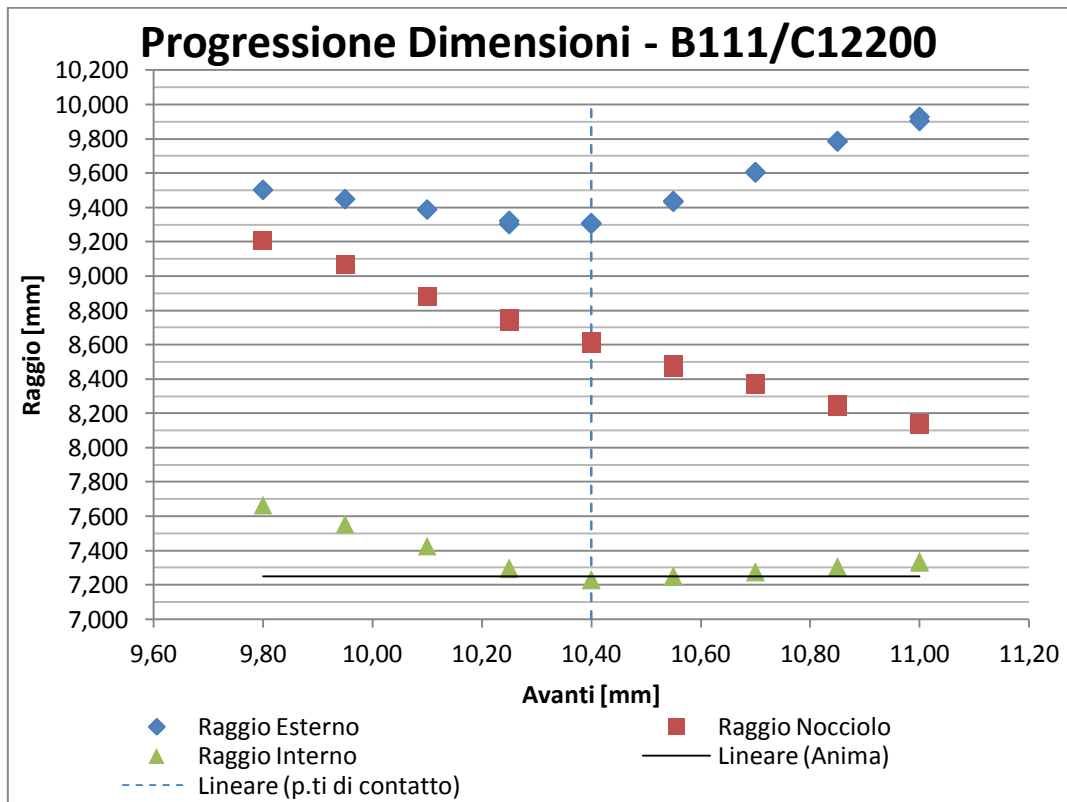


Grafico 1 – Parametri sezione C12200 al variare dell'avanti

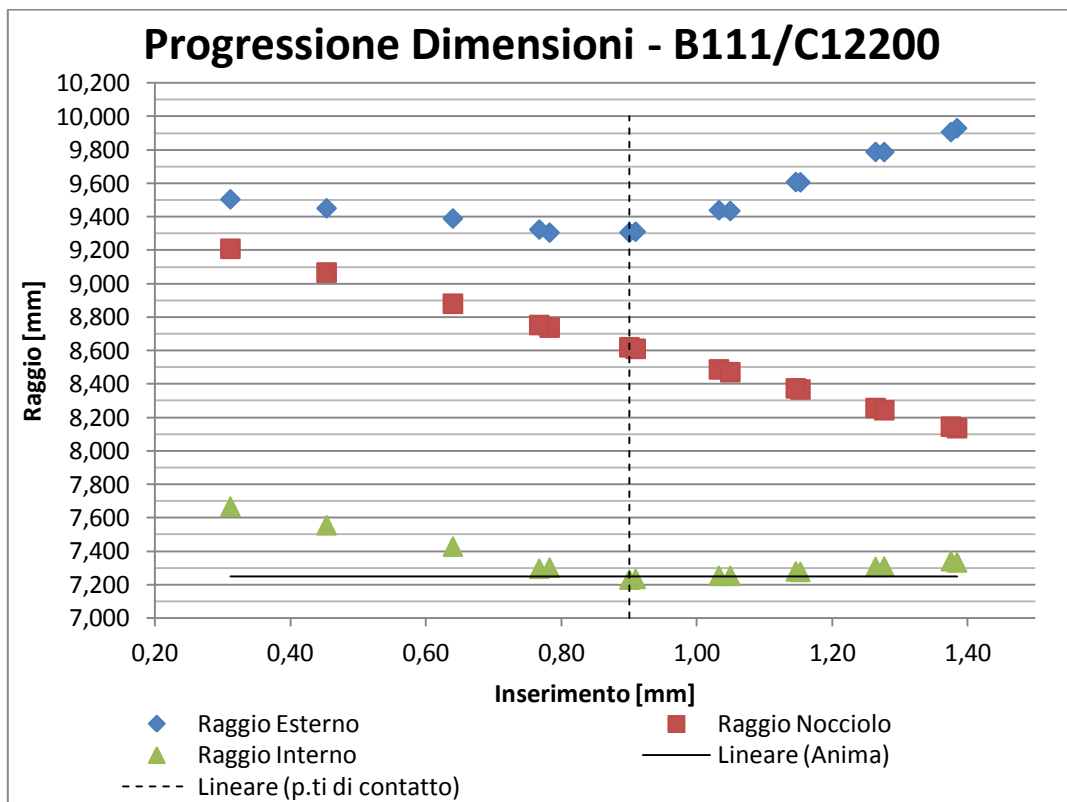


Grafico 2 – Parametri sezione C12200 al variare dell'inserimento

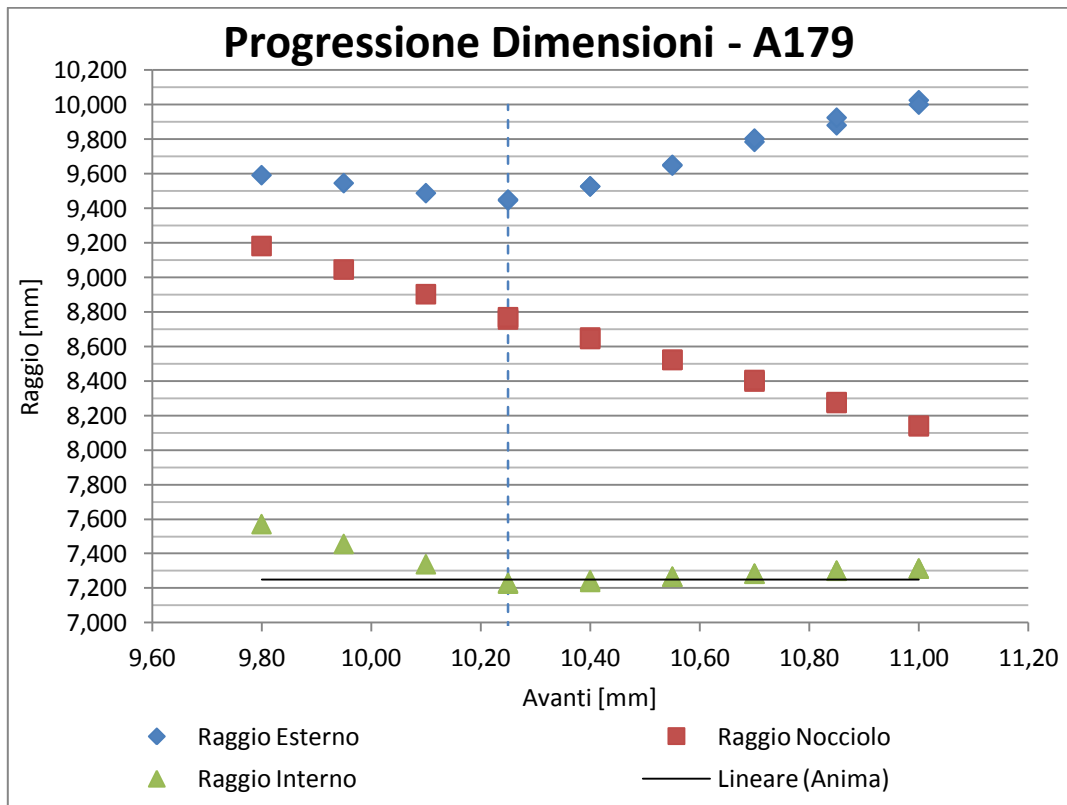


Grafico 3 - Parametri sezione A179 al variare dell'avanti

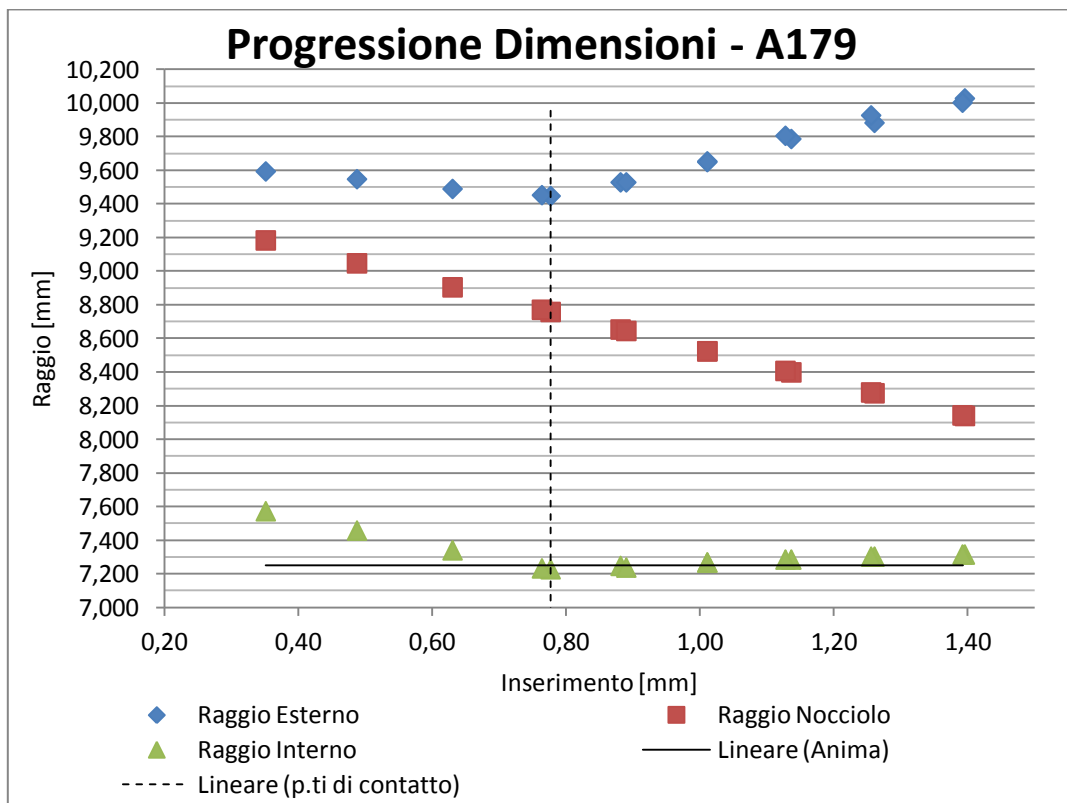


Grafico 4 - Parametri sezione A179 al variare dell'inserimento

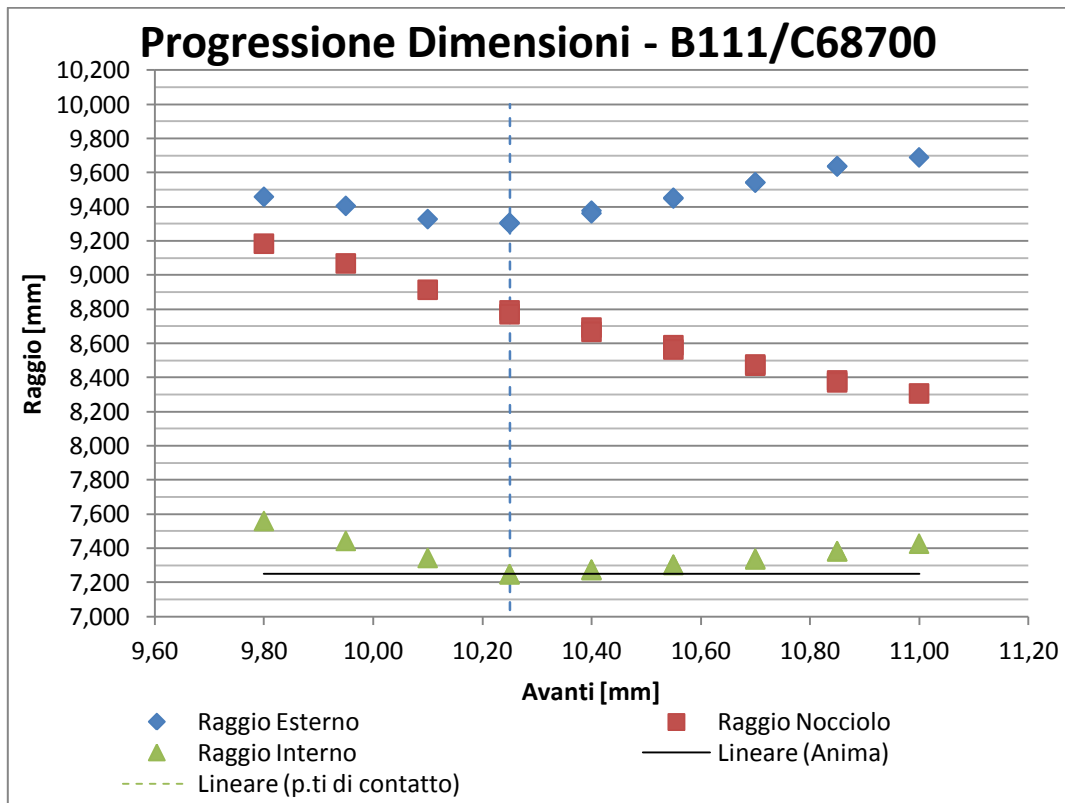


Grafico 5 - Parametri sezione C68700 al variare dell'avanti

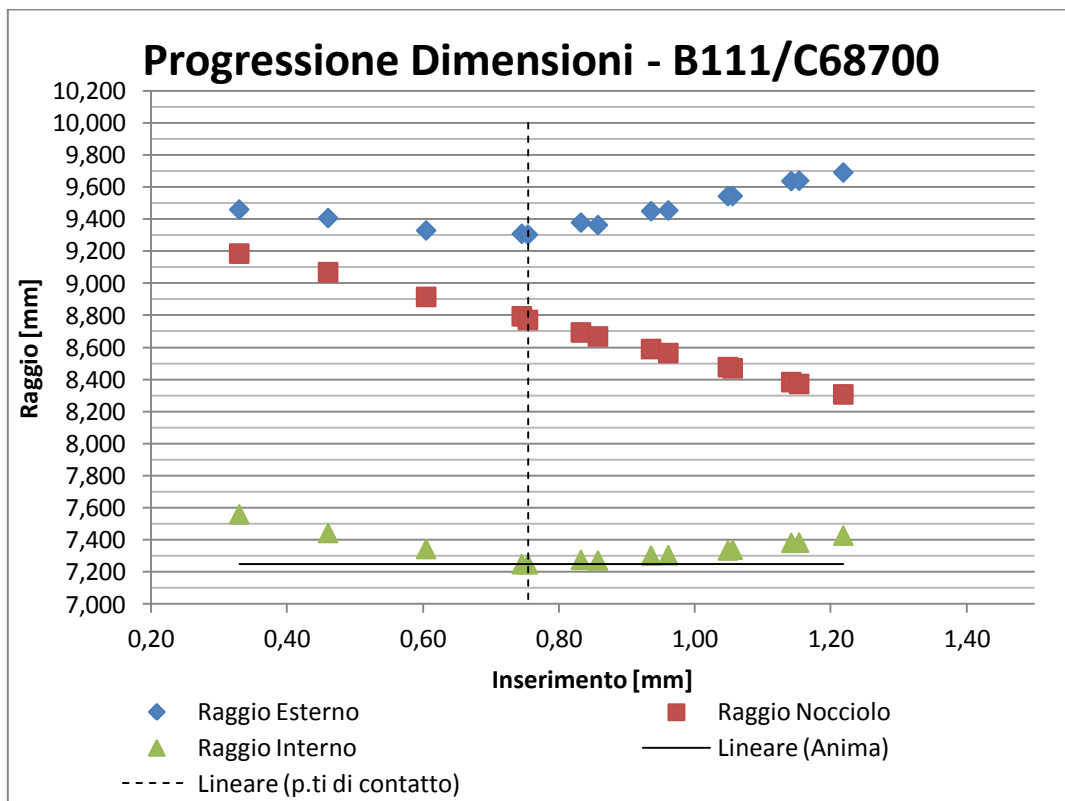


Grafico 6 - Dimensioni sezione C68700 al variare dell'inserimento

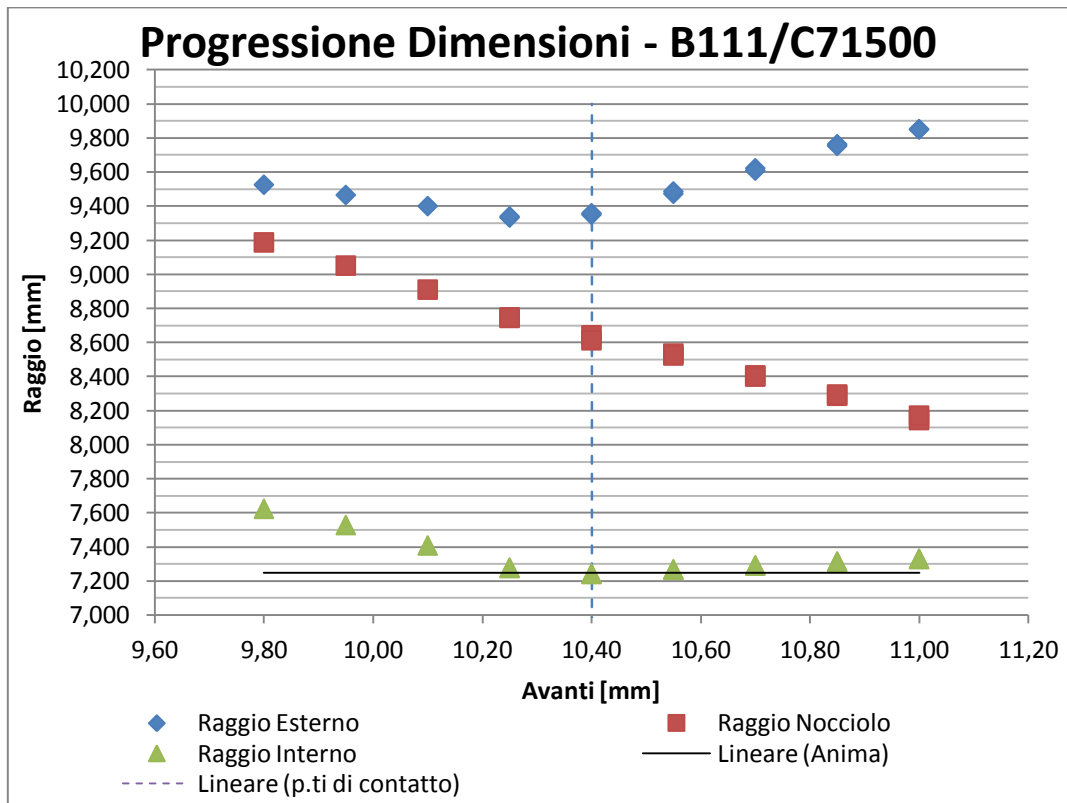


Grafico 7 - Dimensioni sezione C71500 al variare dell'avanti

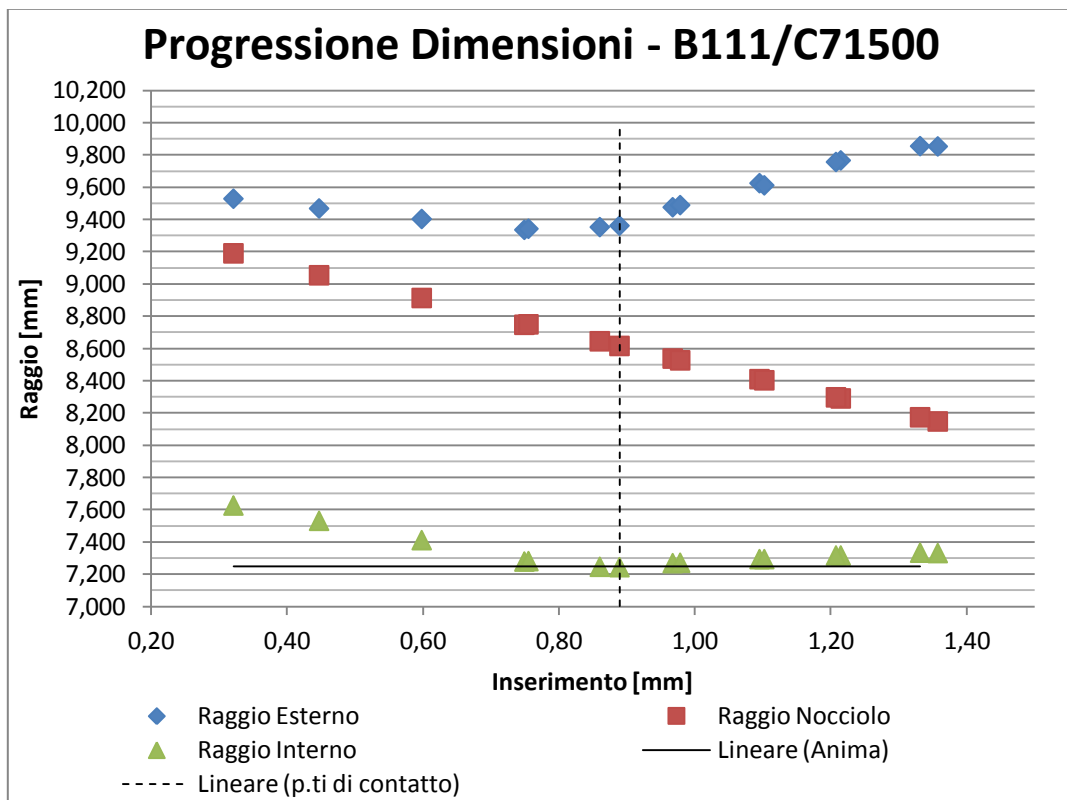


Grafico 8 - Dimensioni sezione C71500 al variare dell'inserimento

Questi grafici visti singolarmente mostrano un comportamento molto simile gli uni agli altri.

Si possono distinguere due zone, delimitate dalla linea di contatto della superficie interna del tubo con l'anima.

Nella zona a sinistra, prima del contatto con l'anima, si può notare un decremento dei tre diametri (esterno, nocciolo ed interno).

Nella zona a destra, dopo il contatto con l'anima, si verifica:

- Piccolo aumento del diametro interno;
- Decremento continuo del diametro di nocciolo;
- Rapido incremento del diametro esterno del tubo.

Proviamo a sovrapporre entrambe le tipologie di grafico per valutarne le differenze.

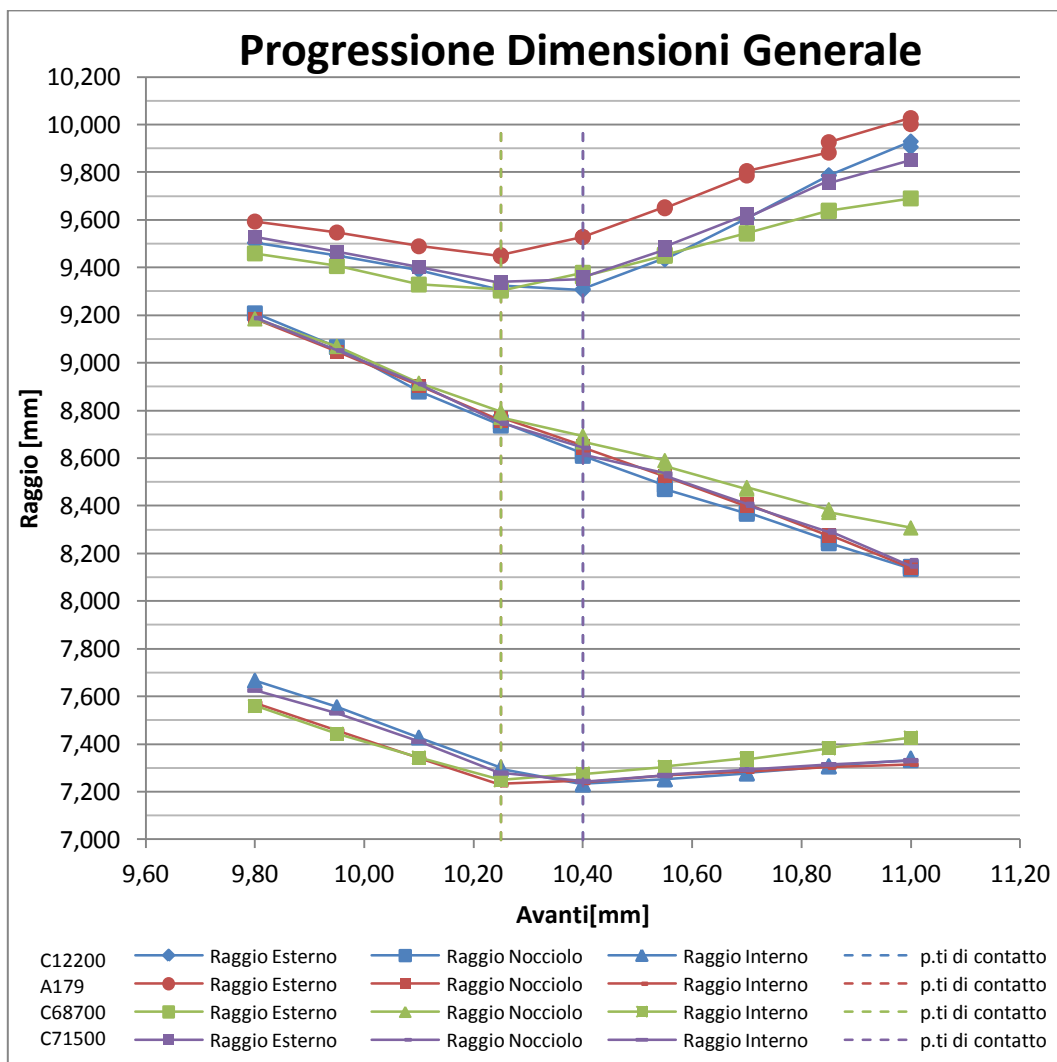


Grafico 9 - Confronto dimensioni in relazione all'avanti macchina

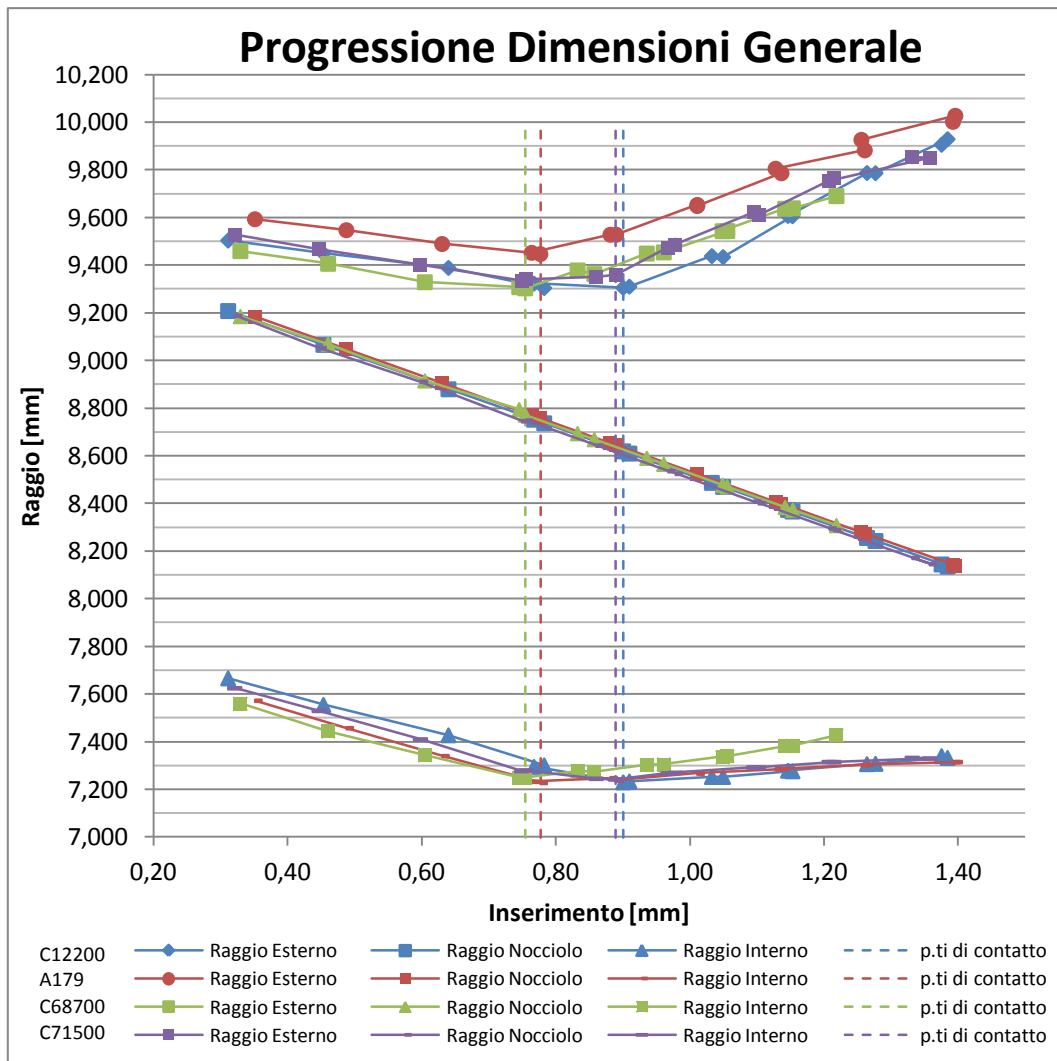


Grafico 10 - Confronto dimensioni in relazione all'inserimento

OSSERVAZIONI:

- P.TI DI CONTATTO: nel grafico9 si possono distinguere due p.ti di contatto, uno per A179 e C68700, l'altro per C12200 e C71500;
- NOCCILOLO: nel grafico10, l'andamento del nocciolo è lineare e coincide per i diversi materiali utilizzati, mentre nel grafico9 si ha sovrapposizione fino al punto di contatto con l'anima, il C68700 da questo punto comincia a divergere dal fascio;
- INTERNO: si può notare in entrambi i grafici come l'inclinazione delle rette che approssimano il diametro interno prima del p.to di contatto sia simile. Questo è vero anche per le rette presenti nella seconda zona a meno di quella che identifica il C68700 che più ripida;

- ESTERNO: questo andamento è estremamente influenzato dal valore di spessore del tubo, si può distinguere facilmente l'andamento dell'A179 in quanto era il tubo con lo spessore superiore tra i campioni utilizzati.

6.4.2 – Passo e angolo di torsione

Allo stesso modo andiamo a rappresentare gli andamenti del passo e della torsione del tubo.

Si può notare come anche in questo caso gli andamenti sono abbastanza definiti, con una relativamente bassa dispersione dei dati.

Per aiutare la comprensione si è aggiunta una linea di tendenza.

La curva che meglio approssima i dati rilevati è una polinomiale, in particolare abbiamo utilizzato:

- Per il passo: una polinomiale di 2° grado;
- Per la torsione: una polinomiale di 4° o 5° grado.

Anche in questo caso è stata riportata la linea che rappresenta il p.to di contatto con l'anima in quanto la si considera significativa per una maggiore comprensione dei dati.

Nei grafici sotto riportati, emergono le seguenti osservazioni:

- PASSO: segue un andamento pressoché costante prima del contatto con l'anima, dopo di che aumenta esponenzialmente;
- TORSIONE: è indubbiamente il parametro con l'andamento più complesso che caratterizza il tubo alettato. Come per il passo prima che il tubo venga a contatto con l'anima si riscontra un andamento pressoché costante con qualche piccola oscillazione imputata ad errori di misura. Dopo il contatto si verifica un leggero incremento positivo di questo parametro che crolla rapidamente a valori negativi anche rilevanti.

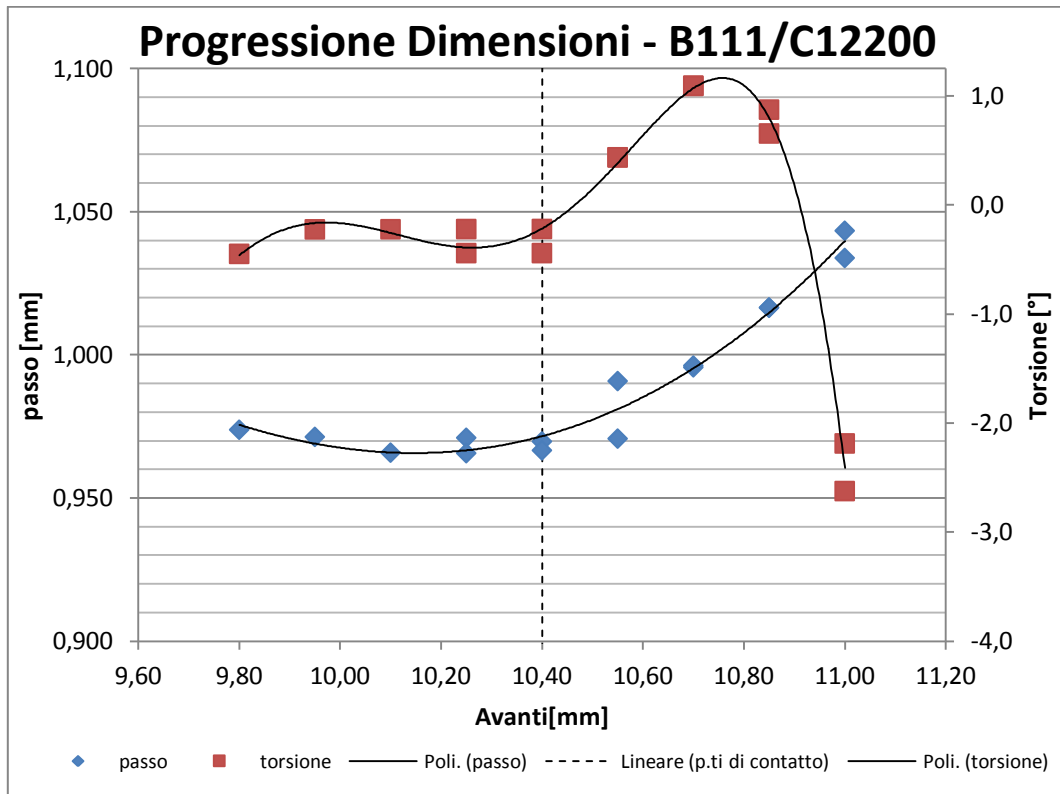


Grafico 11 – Passo e torsione per B12200 al variare dell'avanti macchina

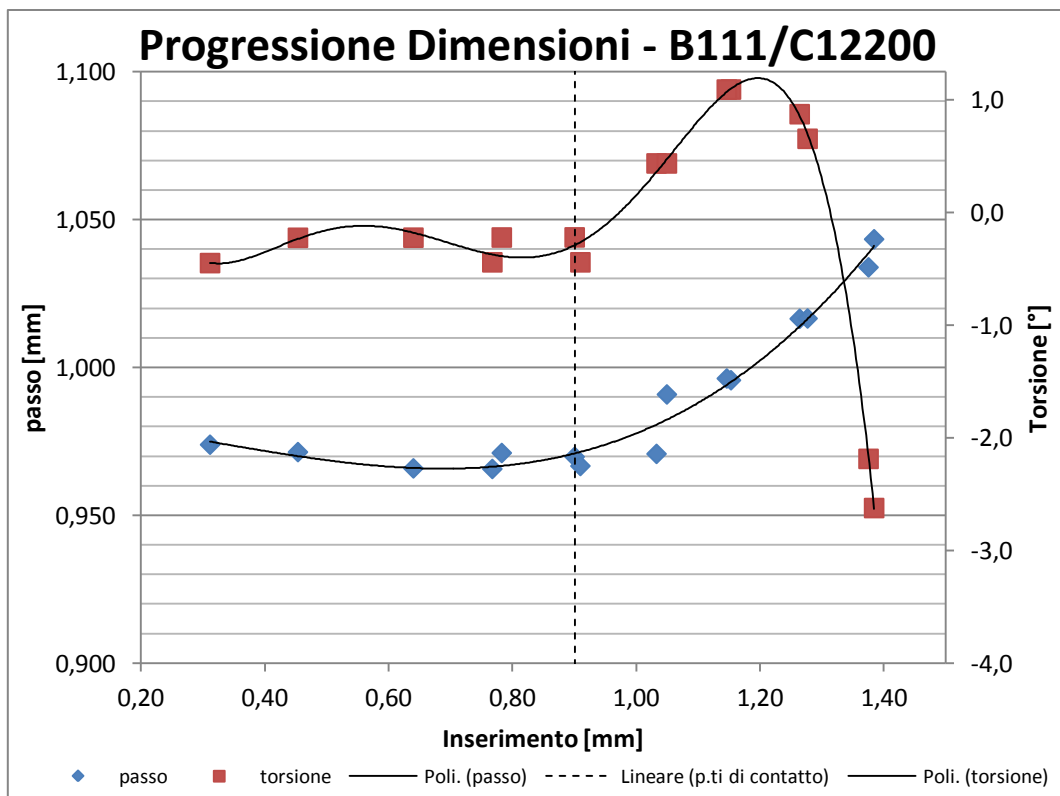


Grafico 12 – Passo e torsione per B12200 al variare dell'inserimento

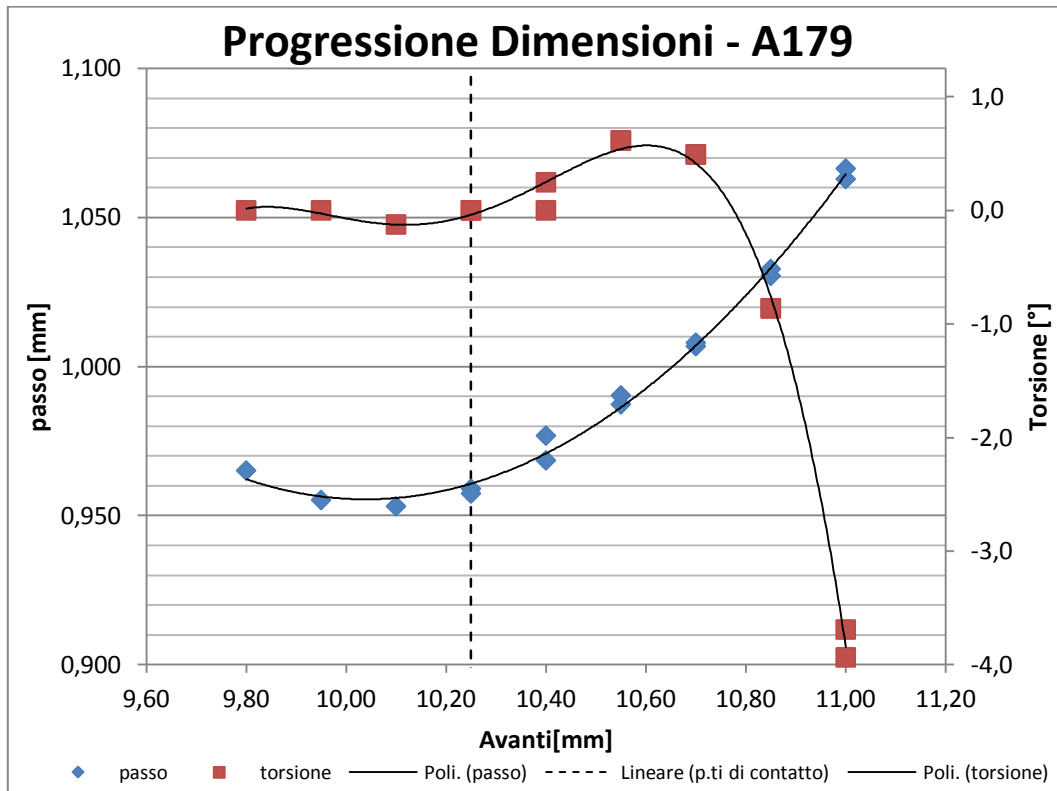


Grafico 13 – Passo e torsione per A179 al variare dell'avanti macchina

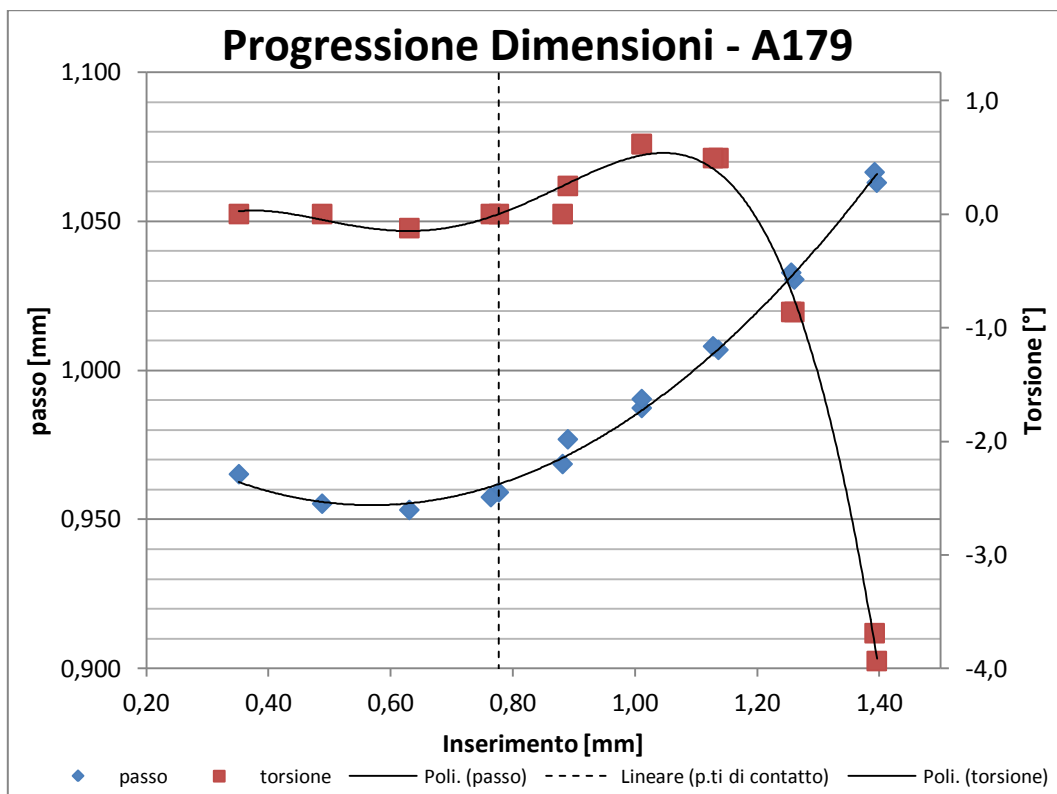


Grafico 14 – Passo e torsione per A179 al variare dell'inserimento

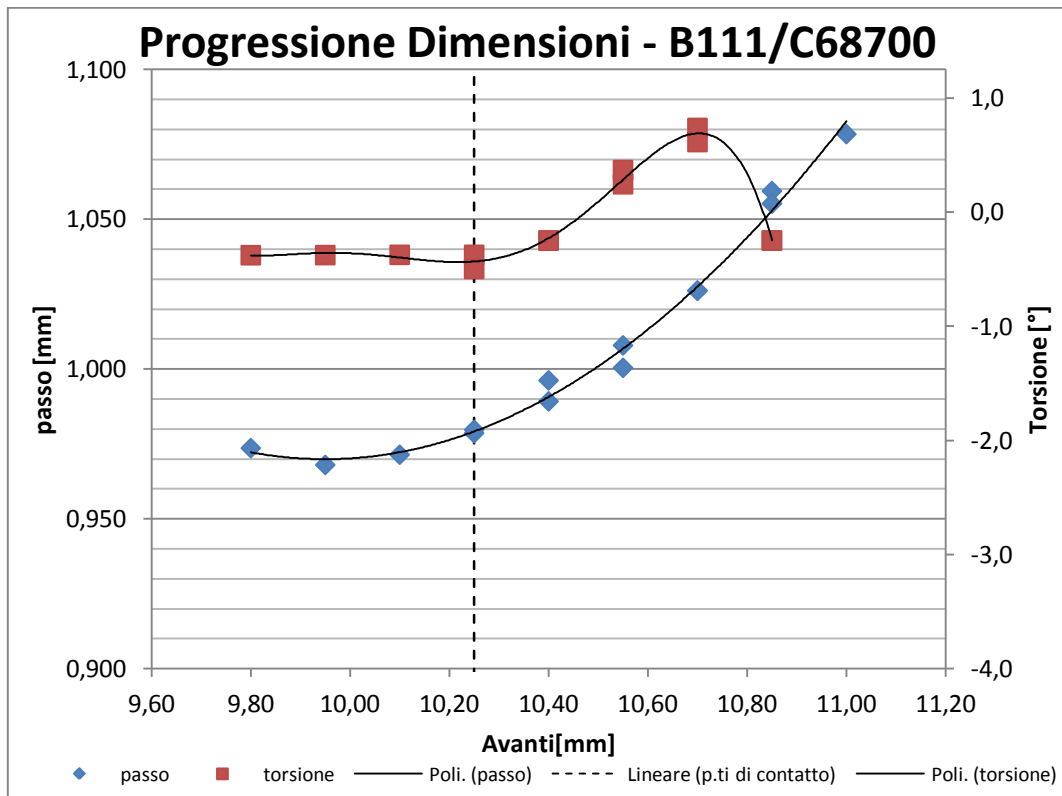


Grafico 15 – Passo e torsione per C68700 al variare dell'avanti macchina

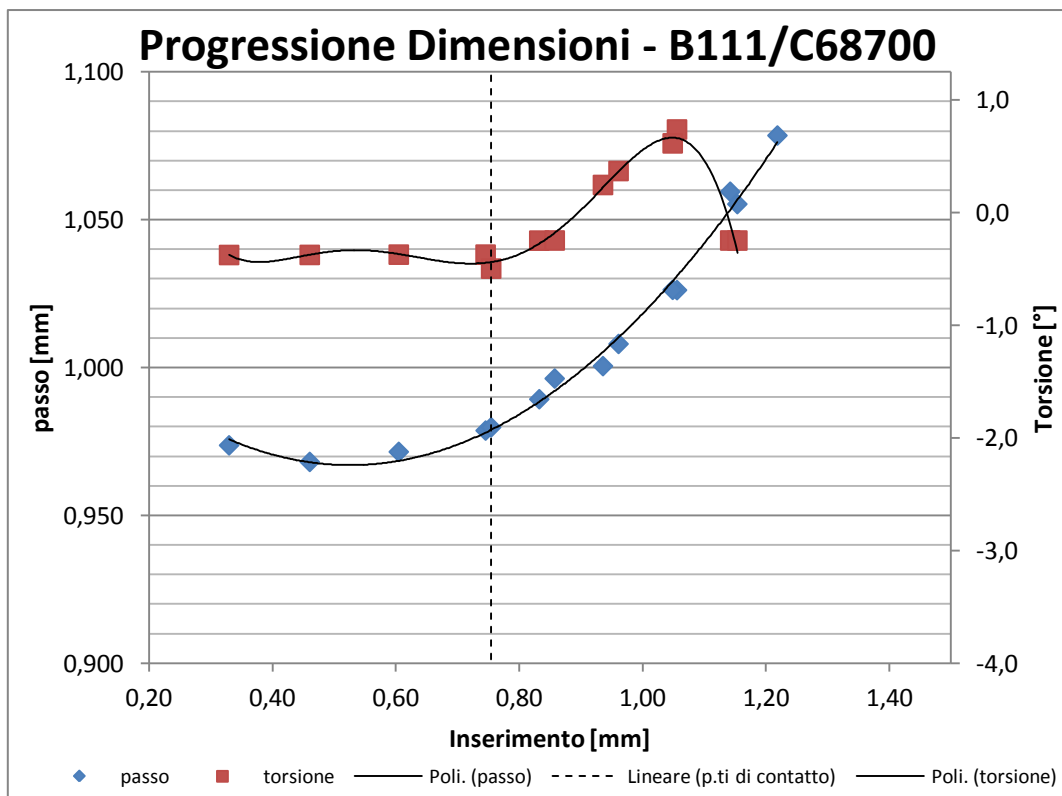


Grafico 16 – Passo e torsione per C68700 al variare dell'inserimento

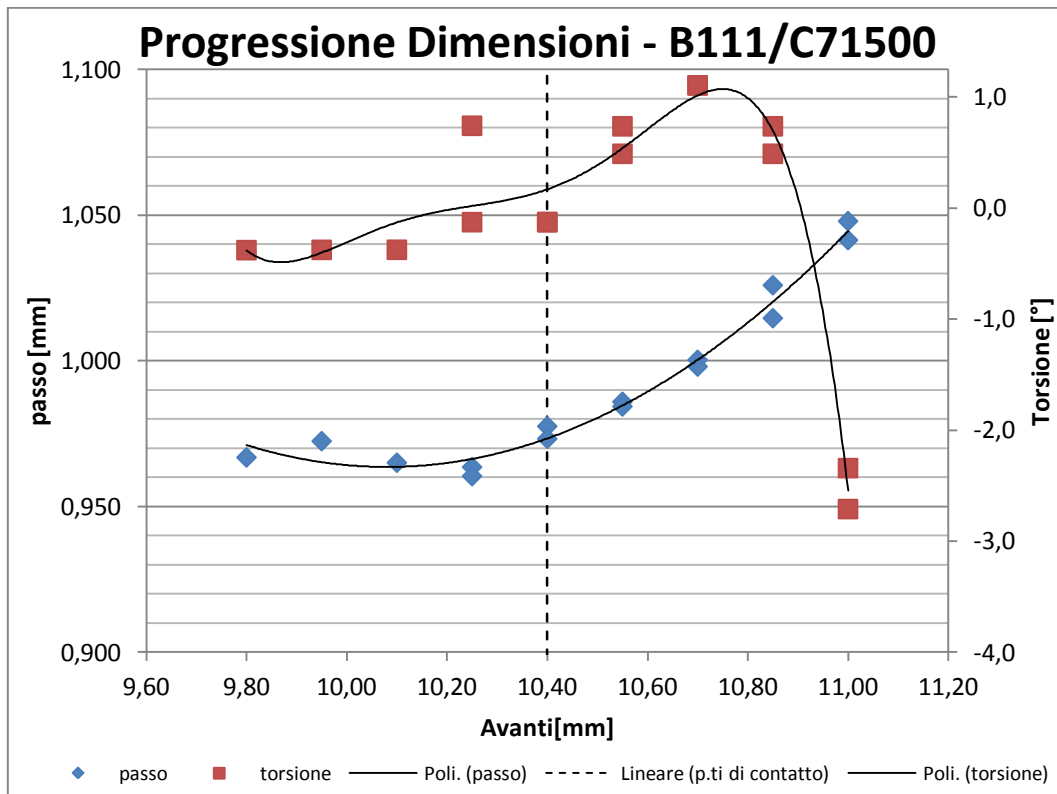


Grafico 17 – Passo e torsione per C71500 al variare dell'avanti macchina

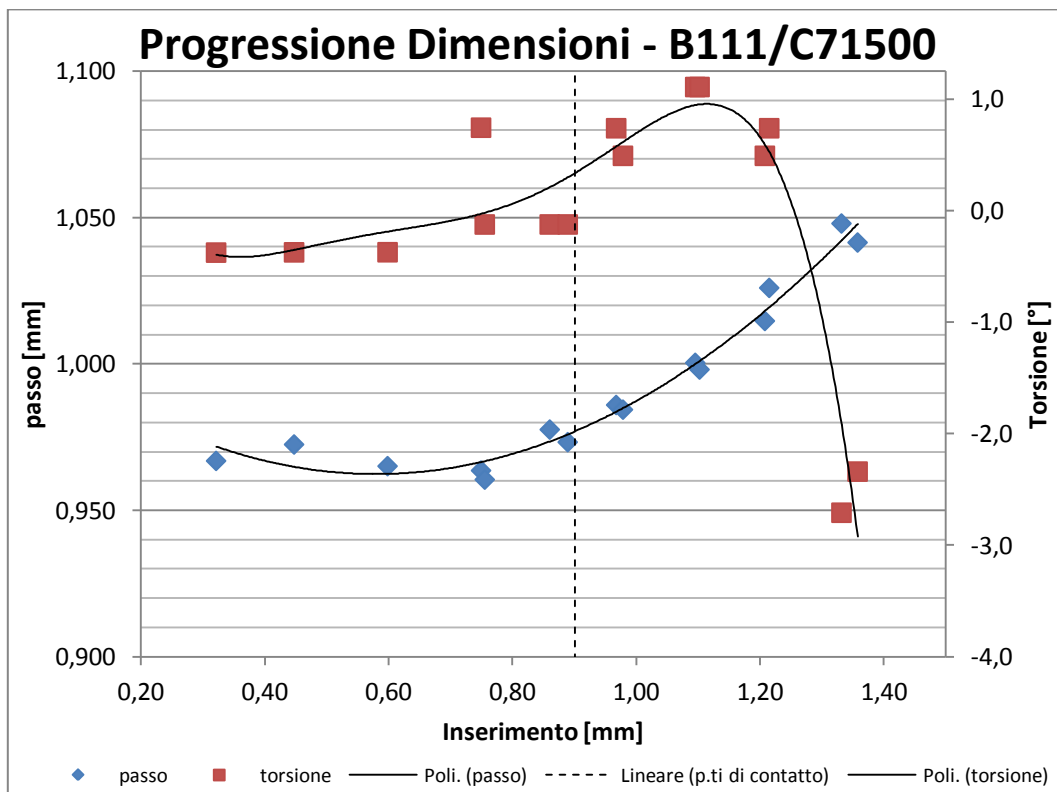


Grafico 18 – Passo e torsione per C71500 al variare dell'inserimento

Riportiamo anche in questo caso i grafici omologhi relativi ai diversi materiali sovrapposti.

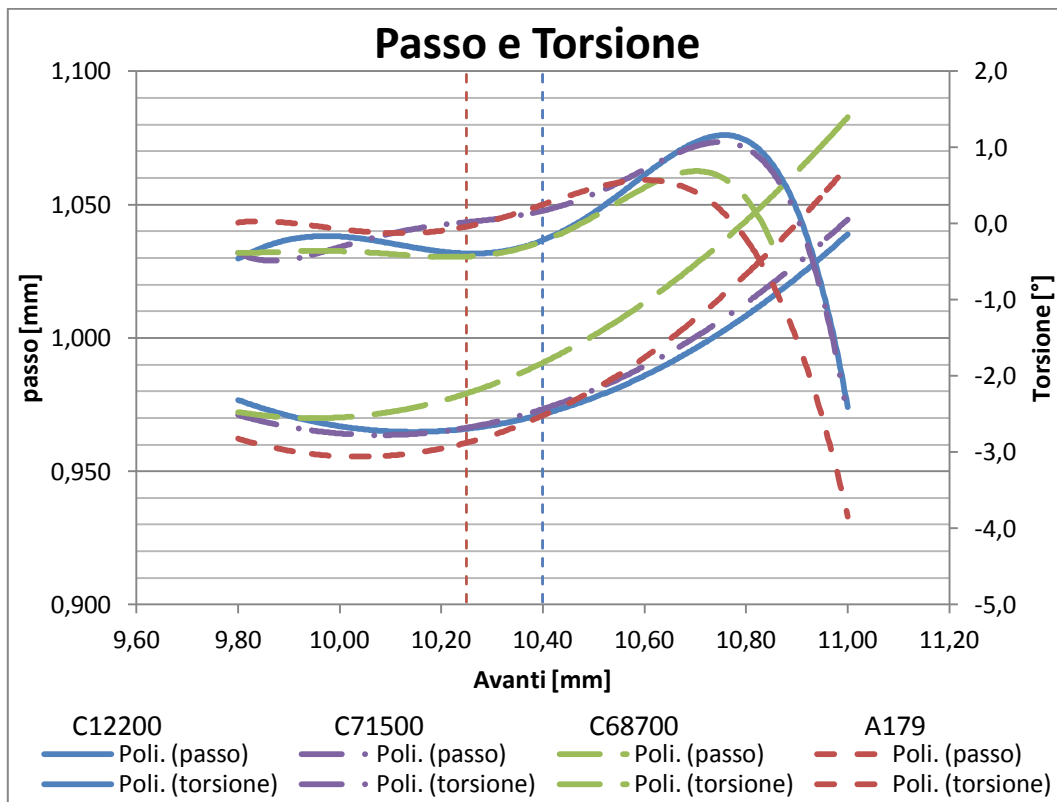


Grafico 19 – Confronto passo e torsione in relazione all'avanti

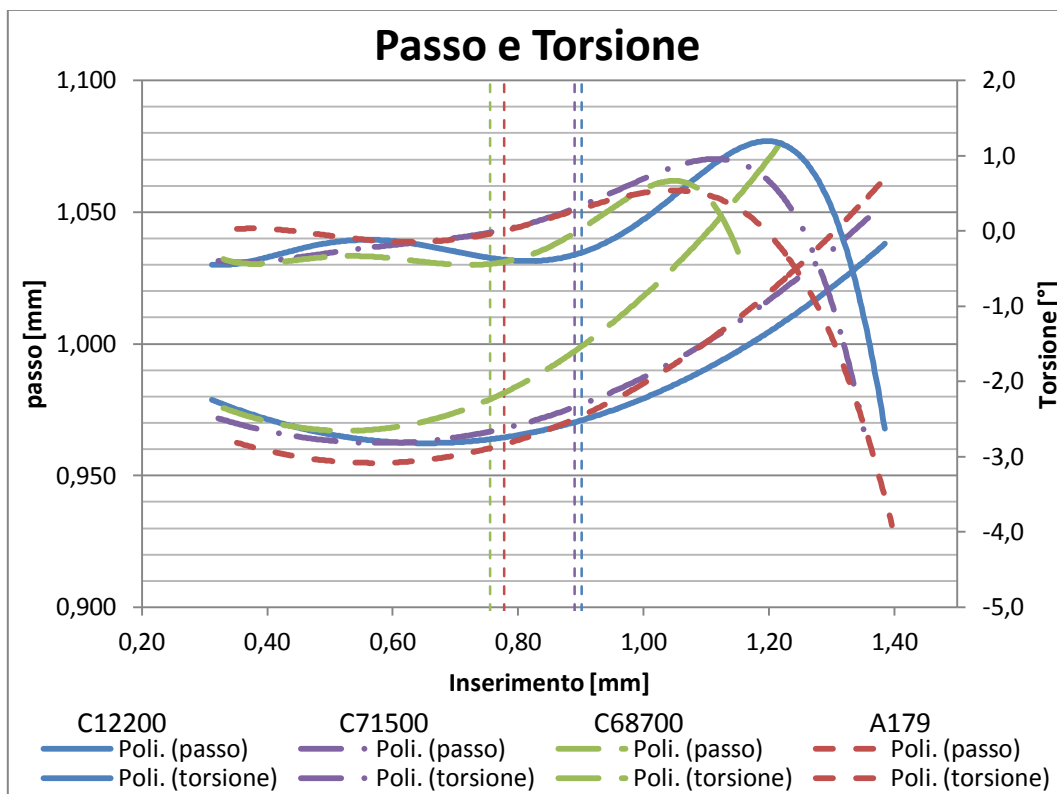


Grafico 20 – Confronto passo e torsione in relazione all'inserimento

Osservazioni:

- Andamenti più uniformi se graficati in funzione dell'avanti.

6.4.3 – ΔL , altezza dell'aletta e spessore sotto aletta

Di seguito saranno riportati i grafici relativi all'allungamento percentuale del tubo durante la lavorazione (grafico21 & grafico22), ed i grafici di come si evolvono l'altezza dell'aletta (grafico23 & grafico24) e lo spessore sotto aletta (grafico25 & grafico26).

ALLUNGAMENTO PERCENTUALE

Osservazioni:

- Gli andamenti di entrambi i grafici sono esponenziali, anche in questo caso si può osservare un incremento della pendenza dopo il contatto con l'anima;
- I valori riportati in funzione dell'avanti convergono maggiormente rispetto quelli riportati in funzione dell'inserimento;
- Le differenze tra i materiali diventano più evidenti dopo il contatto con l'anima.

ALTEZZA DELL'ALETTA

Osservazioni:

- Andamento monotono crescente con incremento di pendenza dopo il contatto con l'anima;
- Rappresentazione più uniforme rispetto all'inserimento.

SPESSORE SOTTO ALETTA

Osservazioni:

- Andamento monotono decrescente con incremento di pendenza dopo il contatto con l'anima;
- Rappresentazione più uniforme rispetto all'avanti;
- Valori estremamente precisi tra i diversi materiali dopo il contatto con l'anima.

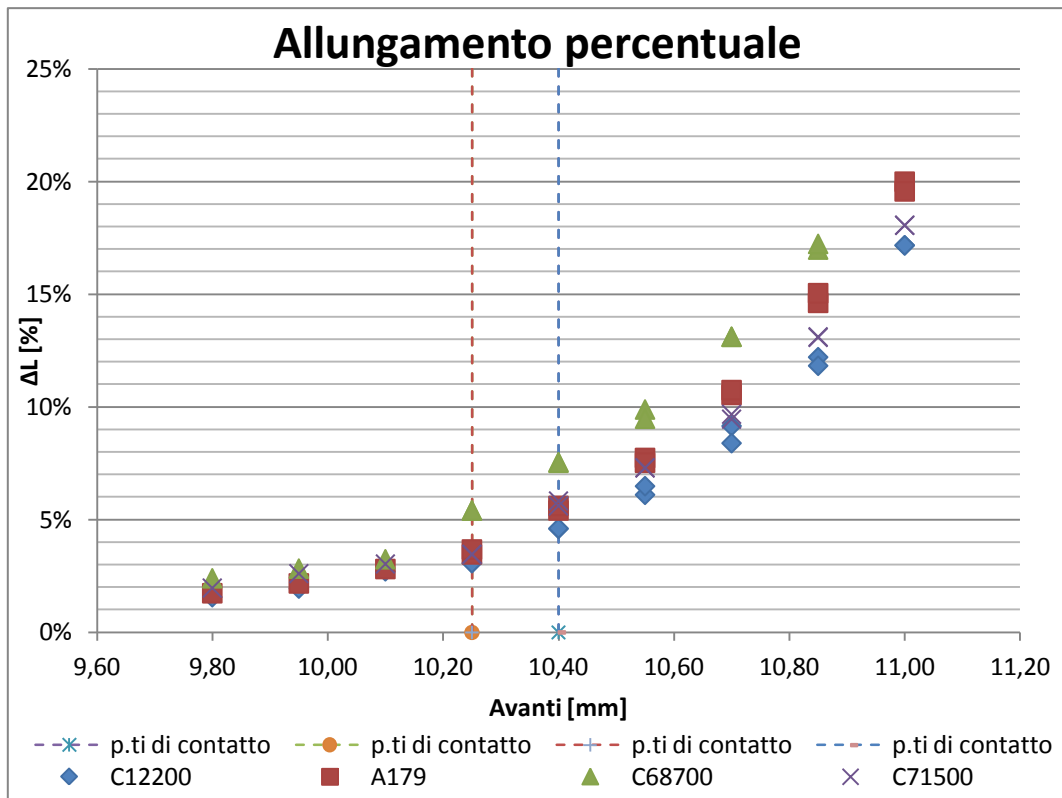


Grafico 21 – Confronto ΔL in relazione all'avanti

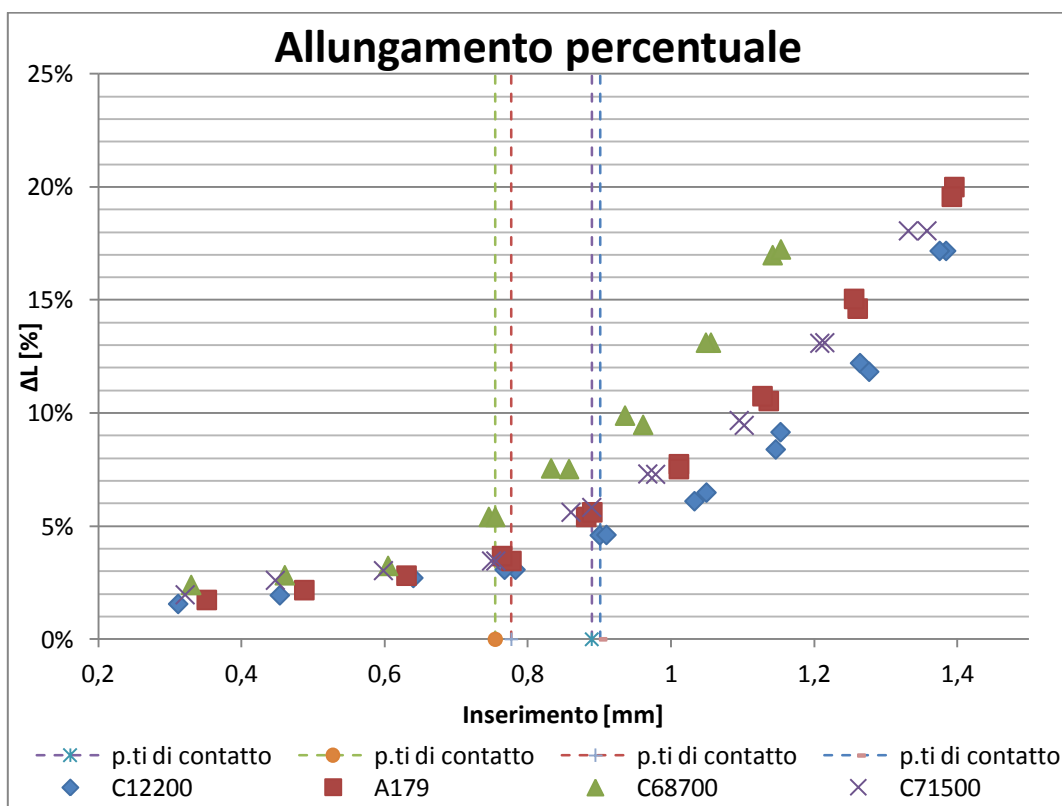


Grafico 22 – Confronto ΔL in relazione all'inserimento

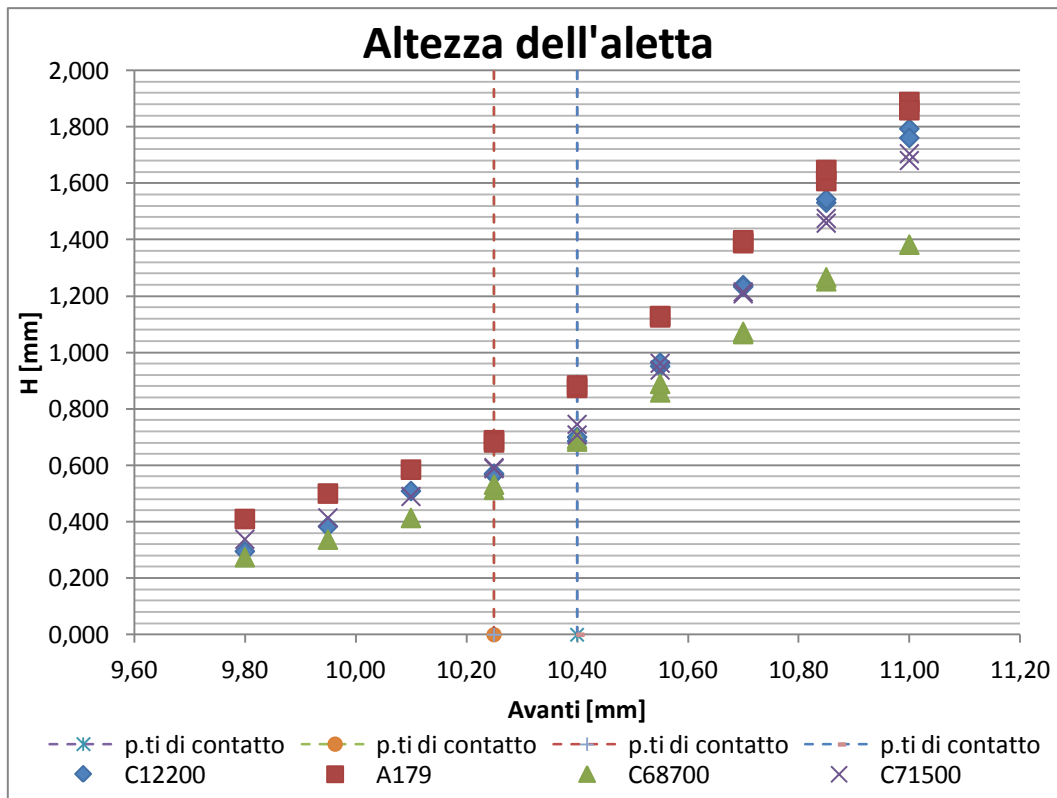


Grafico 23 – Confronto altezza dell'aletta in relazione all'avanti

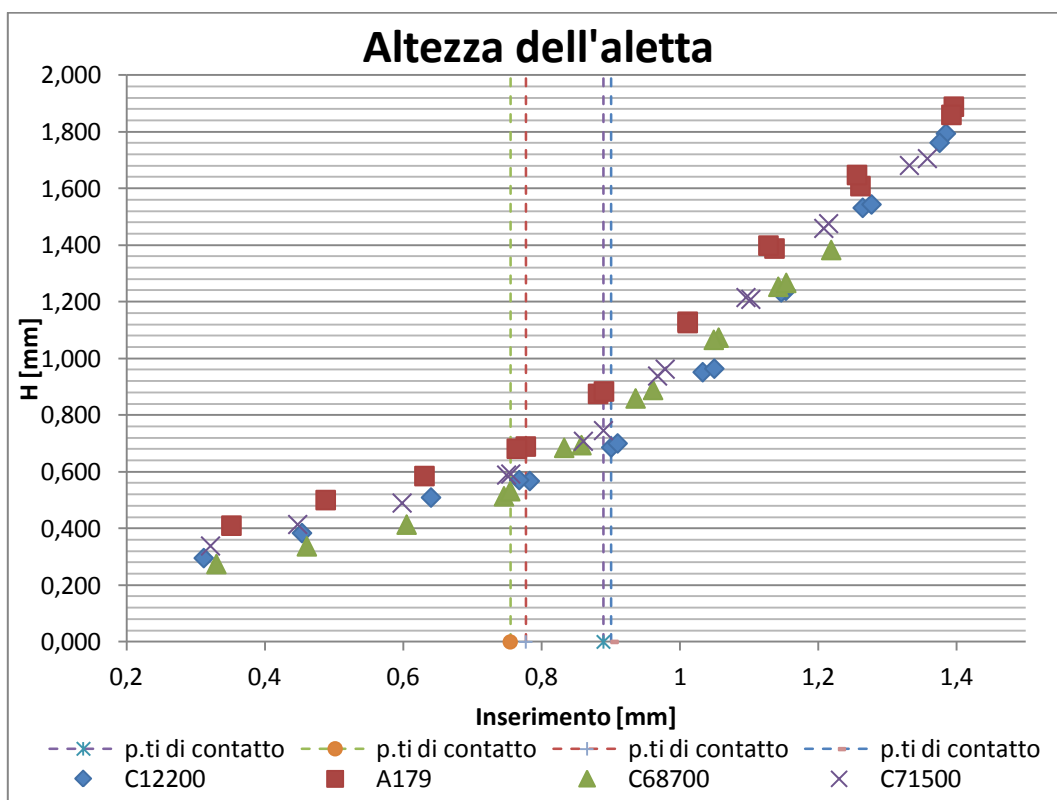


Grafico 24 – Confronto altezza dell'aletta in relazione all'inserimento

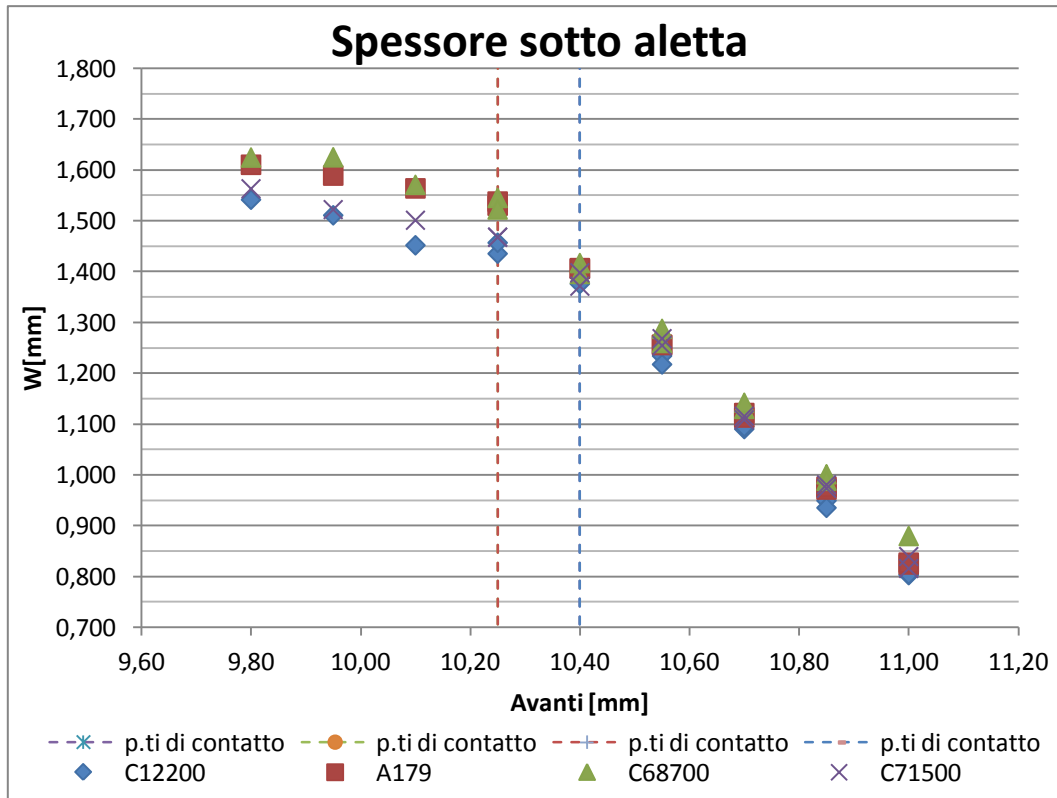


Grafico 25 – Confronto spessore sotto aletta in relazione all’inserimento

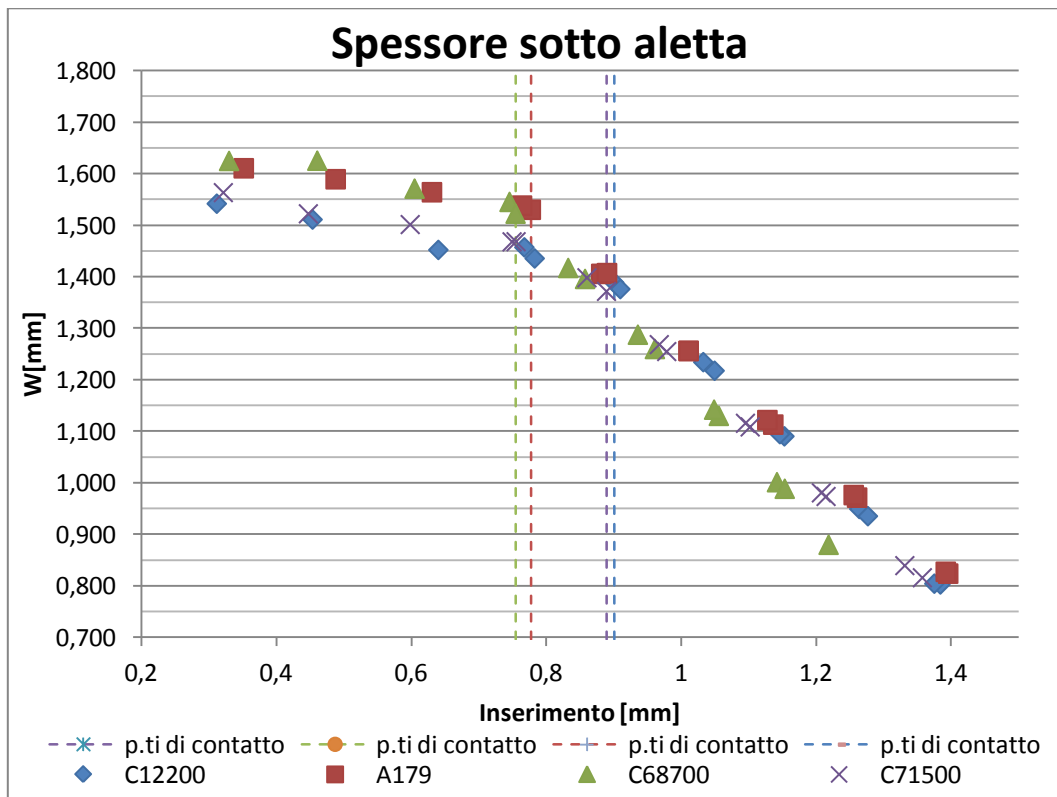


Grafico 26 – Confronto spessore sotto aletta in relazione all’avanti

6.4.4 – Variazione dei parametri al variare della dimensione dell'anima

In questo paragrafo verranno illustrati i risultati ottenuti misurando dei campioni ottenuti dalla seconda sperimentazione, ovvero cambiano l'anima di riscontro interna.

Per quello che riguarda il C68700 con questa prova siamo sempre arrivati alla rottura del campione, ovvero al limite del materiale.

I grafici, dal 27 al 34 di seguito riportati, sono stati raggruppati per tipo di misura rilevata. Tali rappresentazioni sono state eseguite sia in funzione dell'avanti, che in funzione dell'inserimento nel materiale.

OSSERVAZIONI:

- L'andamento qualitativo dei diversi parametri rimane invariato utilizzando anime di diversa dimensione;
- Il punto di contatto con l'anima viene traslato verso valori di avanti (o inserimento) più alti al diminuire del diametro dell'anima;
- Per i diversi parametri che stiamo studiando si ottengono le variazioni riportate nella tabella sottostante:

Diametro anima ↑	Diametro esterno ↑
	Diametro di nocciolo ≅
	Diametro interno ↑
	Altezza dell'aletta ↑
	Spessore sotto aletta ↓
	Passo alettatura ↑
	Torsione del tubo ↑
	Allungamento % ↑

tab. 19 – Andamento qualitativo parametri tubo alettato in funzione del diametro anima

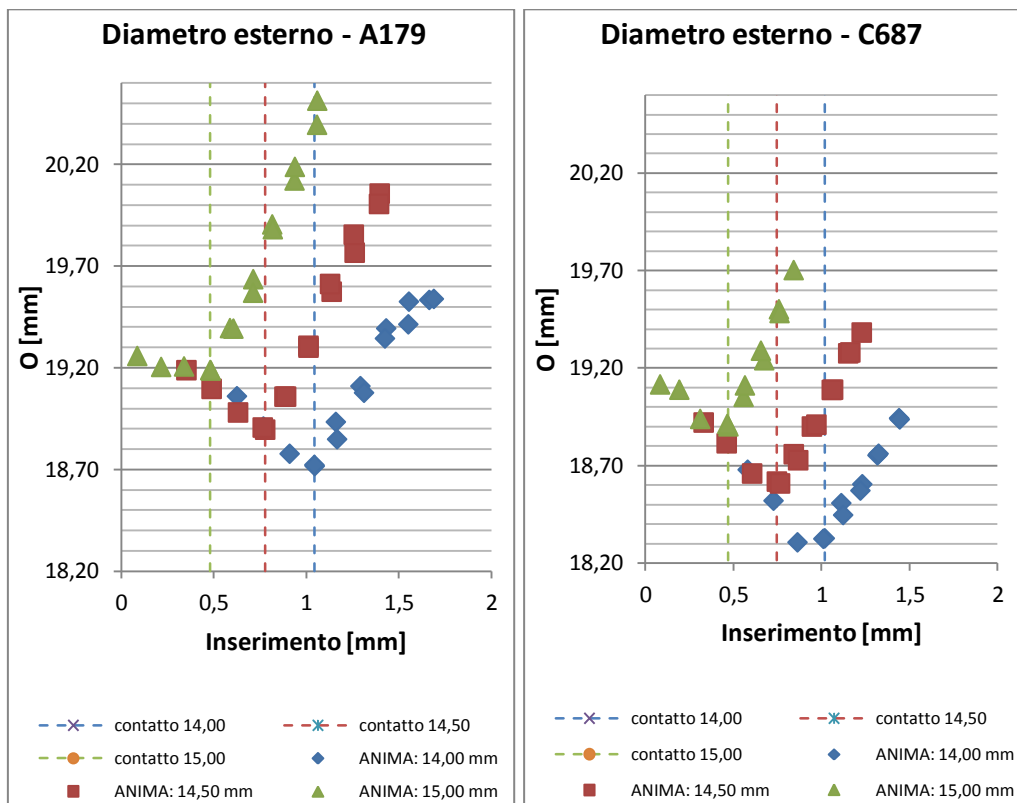
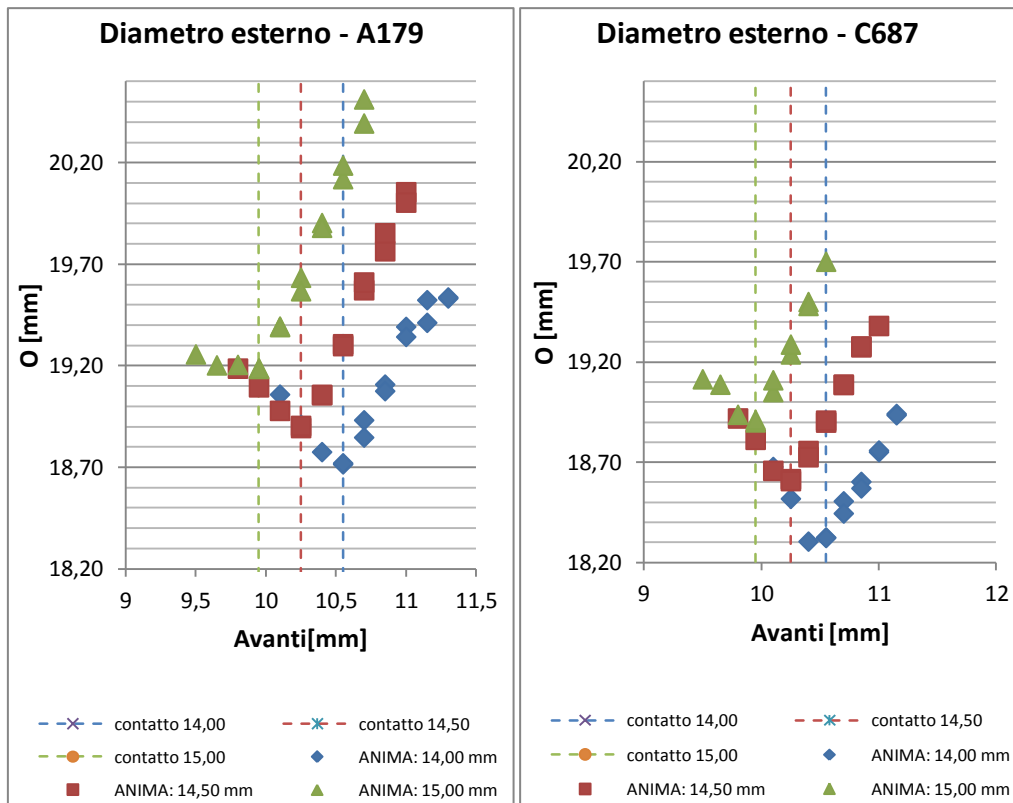


Grafico 27 – Andamento diametro esterno in funzione della dimensione dell'anima
 All'aumentare della dimensione dell'anima a parità di avanti (o inserimento) otteniamo un incremento del diametro esterno.

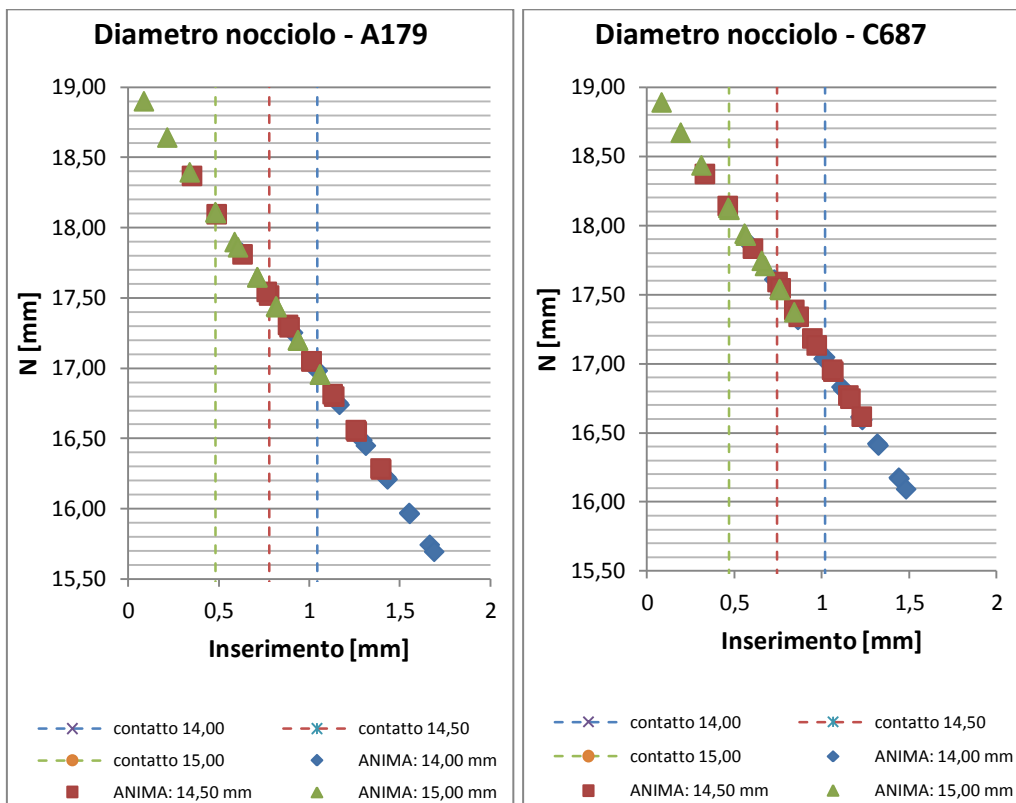
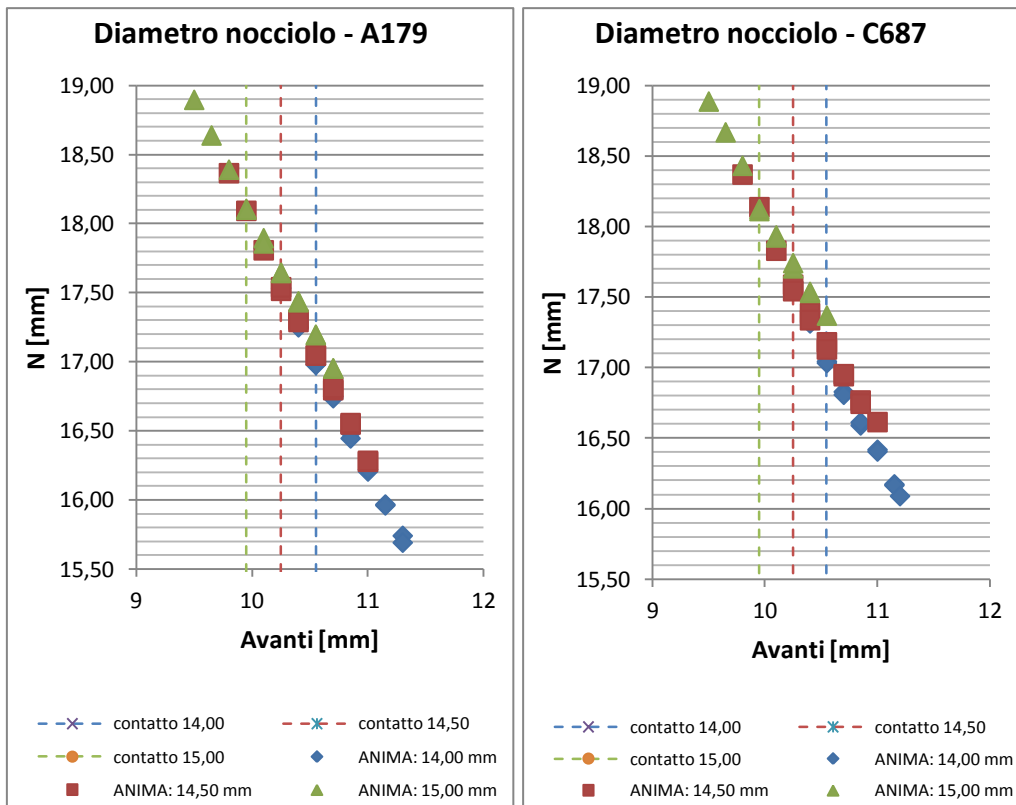


Grafico 28 - Andamento diametro di nocciolo in funzione della dimensione dell'anima

Al variare della dimensione dell'anima non otteniamo variazioni significative del diametro di nocciolo.

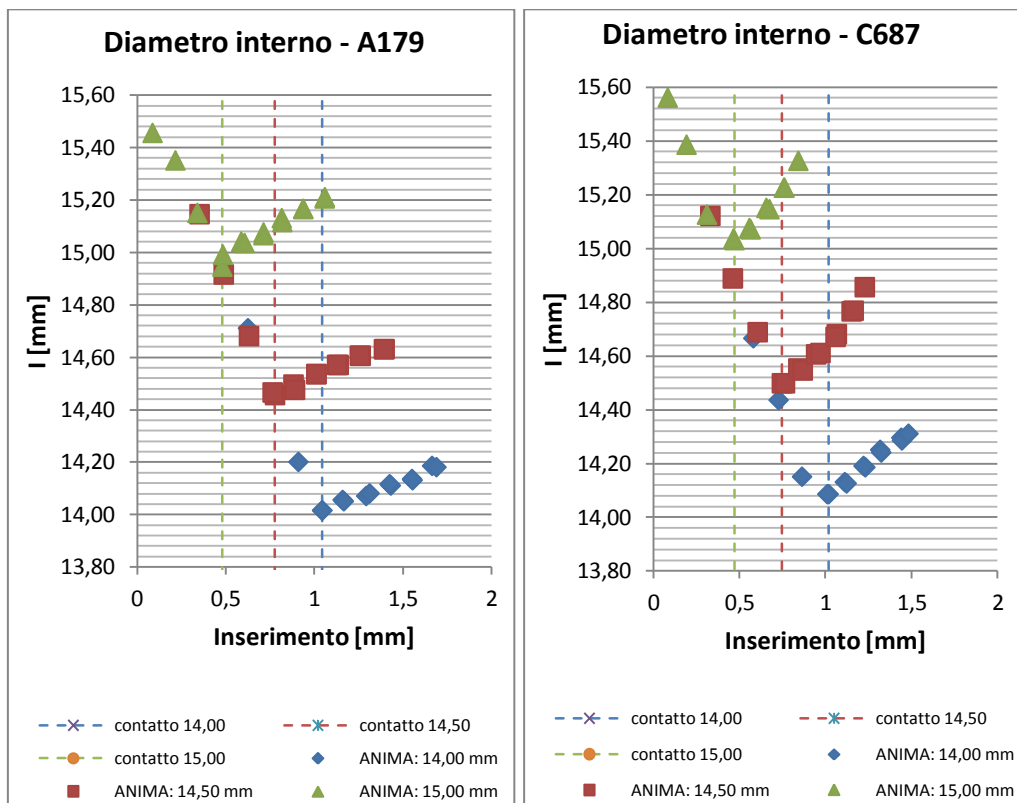
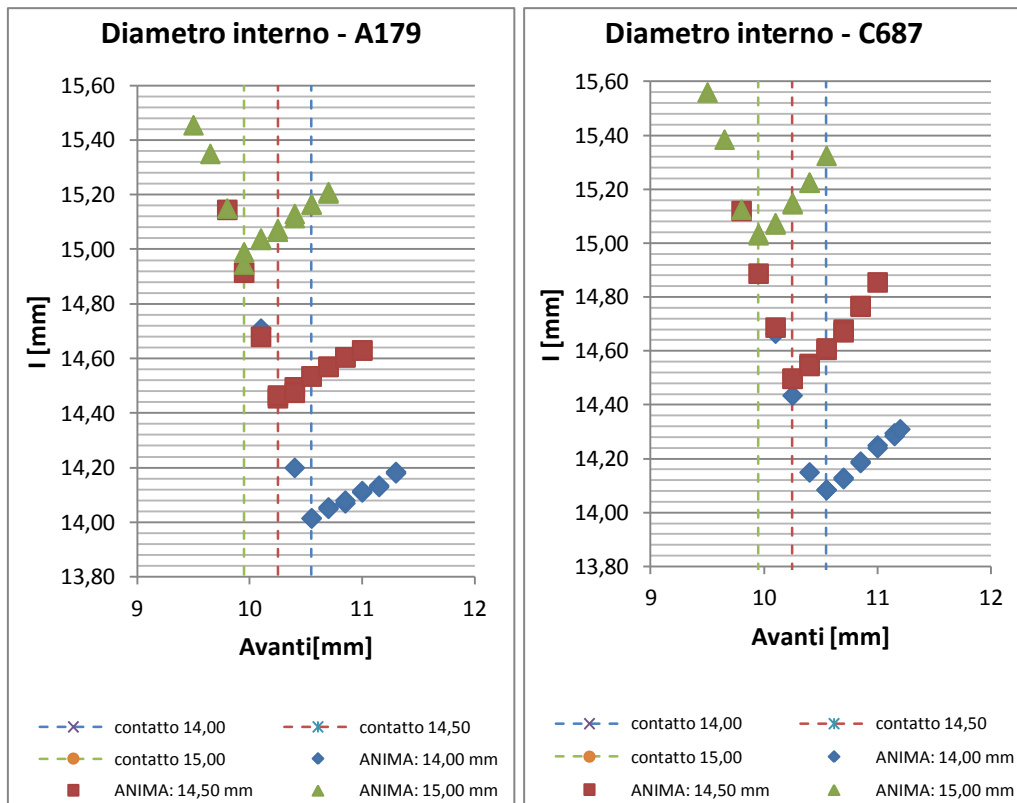


Grafico 29 - Andamento diametro interno in funzione della dimensione dell'anima

Diminuendo il valore di diametro esterno dell'anima si ottiene un pari decremento del diametro interno del tubo.

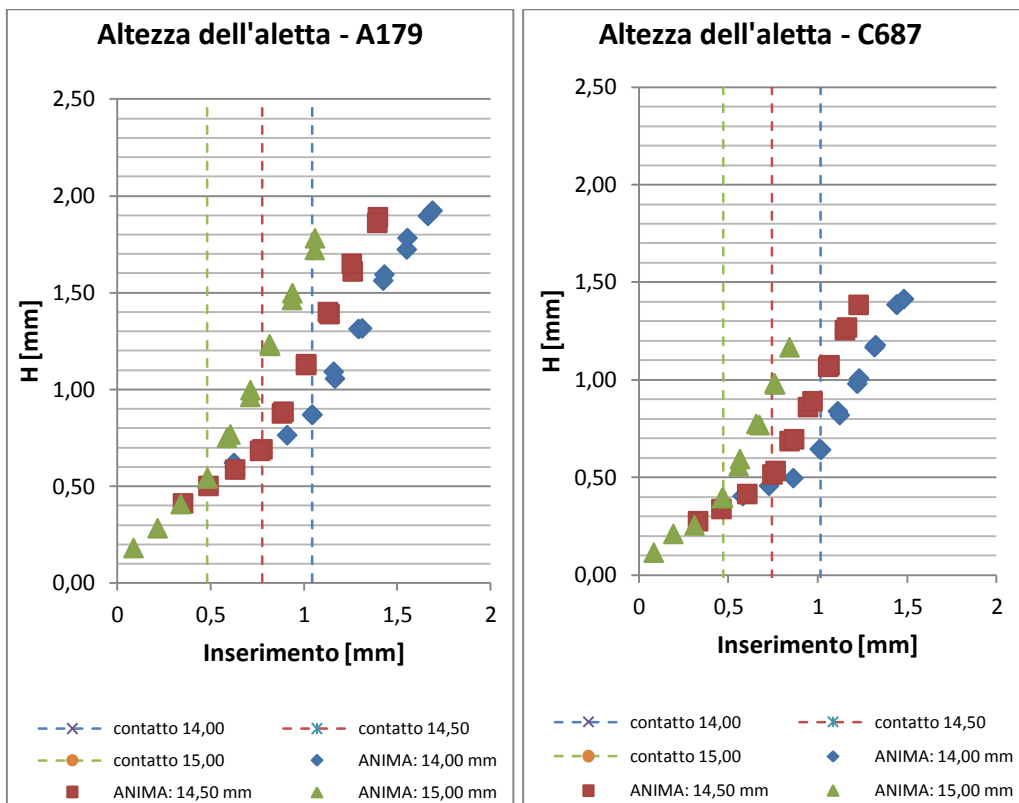
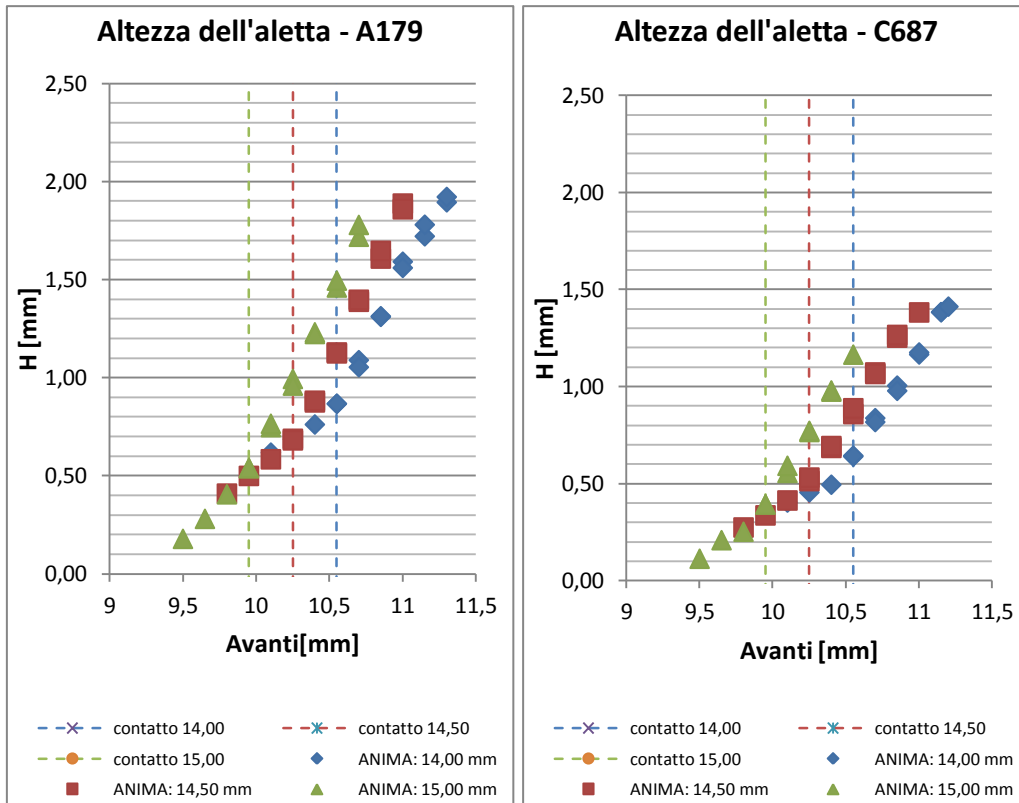


Grafico 30 – Andamento altezza aletta in funzione della dimensione dell’anima

Notare come nel punto di contatto l’altezza dell’aletta è superiore per i campione realizzati con diametro dell’anima più piccolo.

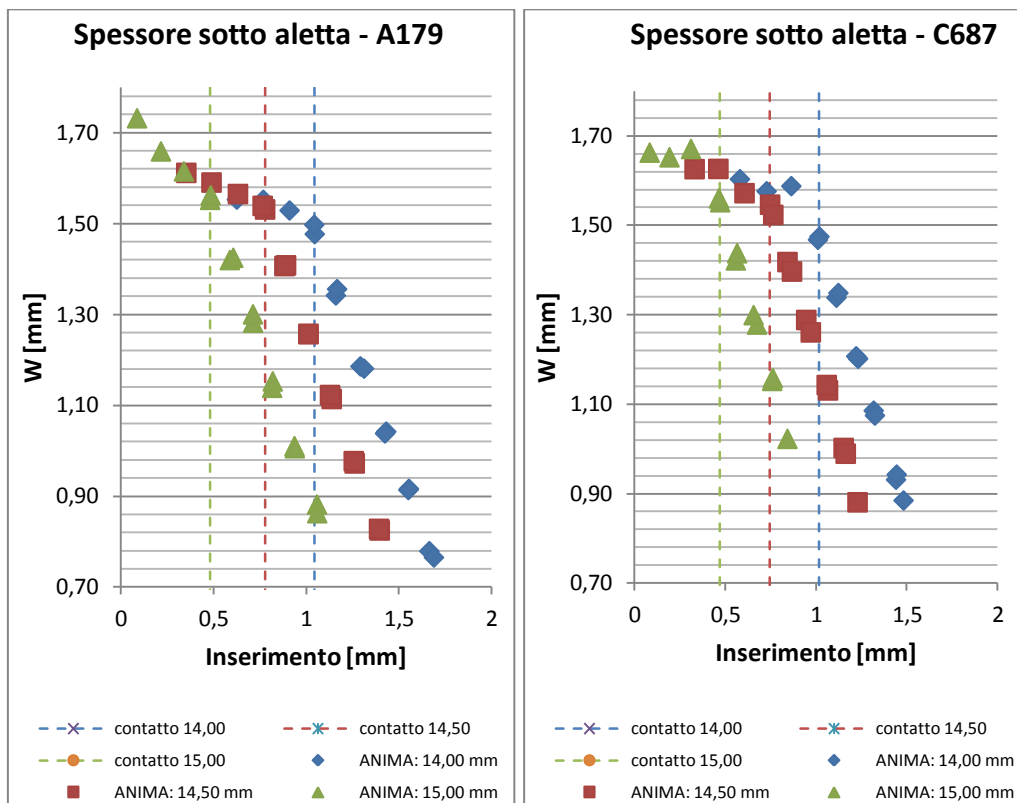
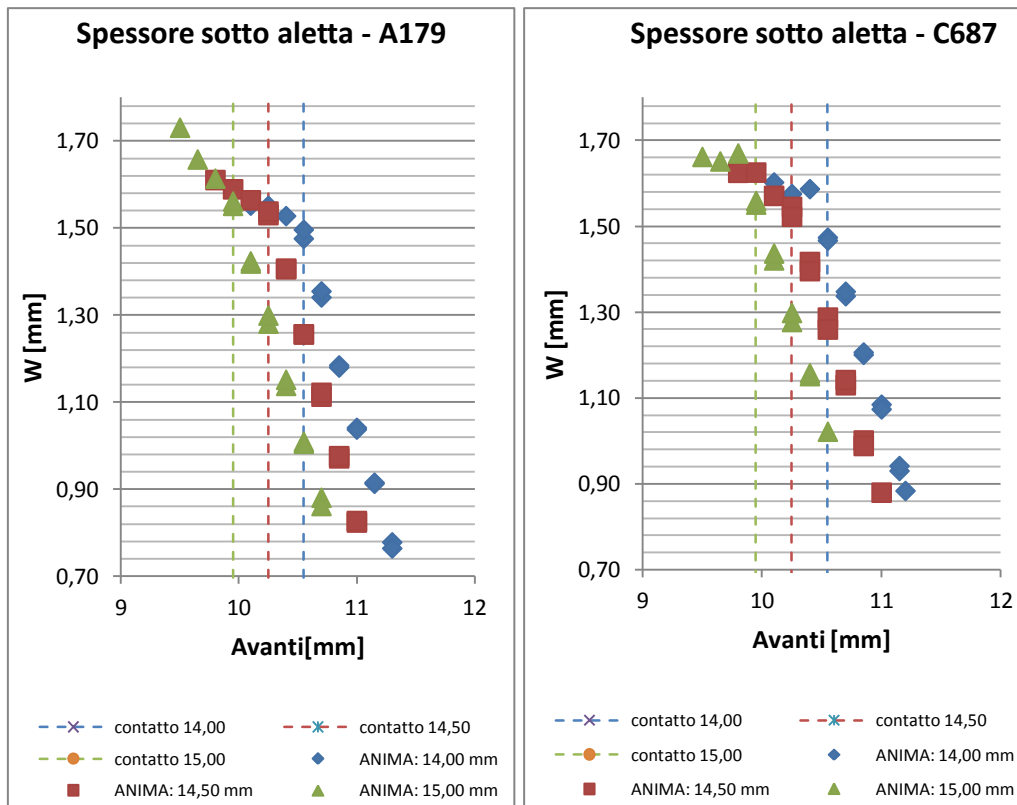


Grafico 31 – Andamento spessore dell’aletta in funzione della dimensione dell’anima

Al contatto abbiamo indicativamente lo stesso valore di spessore sotto aletta. Diminuendo la dimensione dell’anima aumenta lo spessore a parità di inserimento.

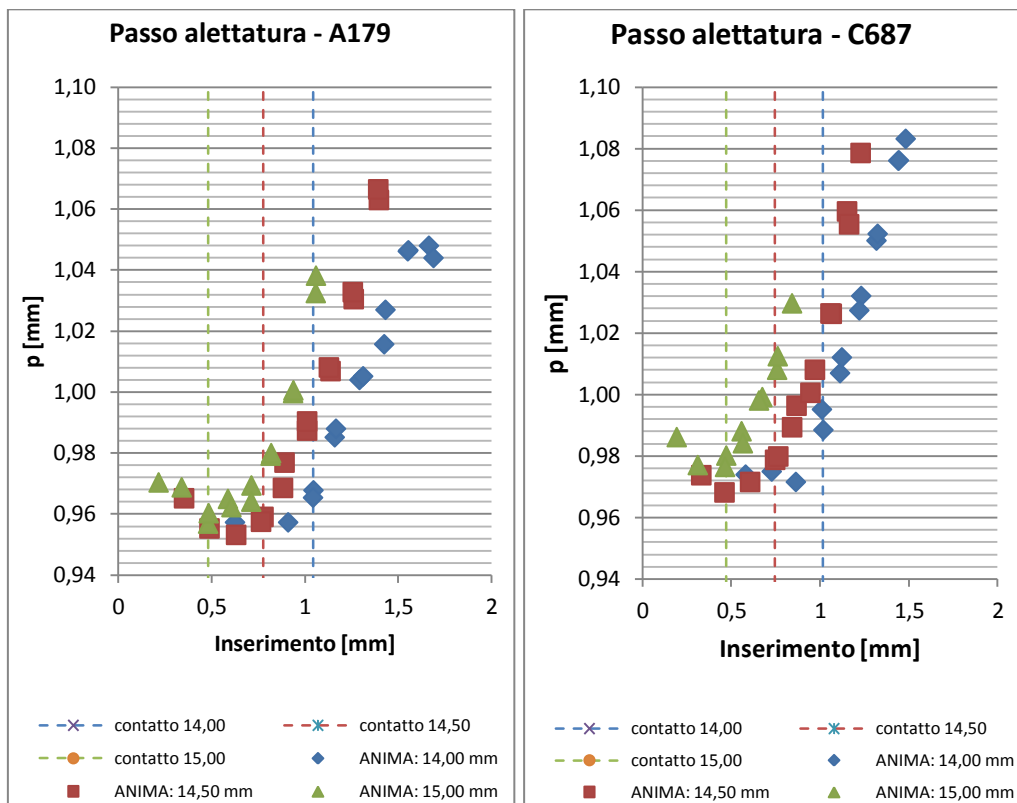
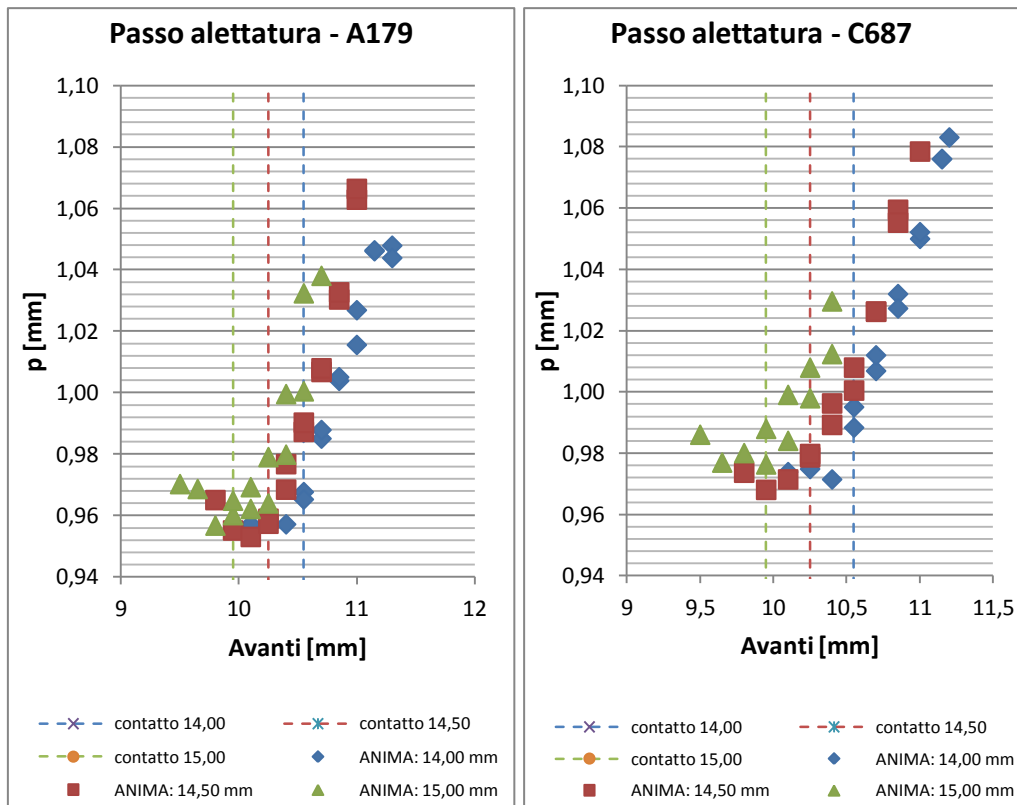


Grafico 32 - Andamento passo alettatura in funzione della dimensione dell'anima

Il passo nel punto di contatto è presso che invariato.

Viene riscontrato un incremento del passo all'aumentare della dimensione dell'anima.

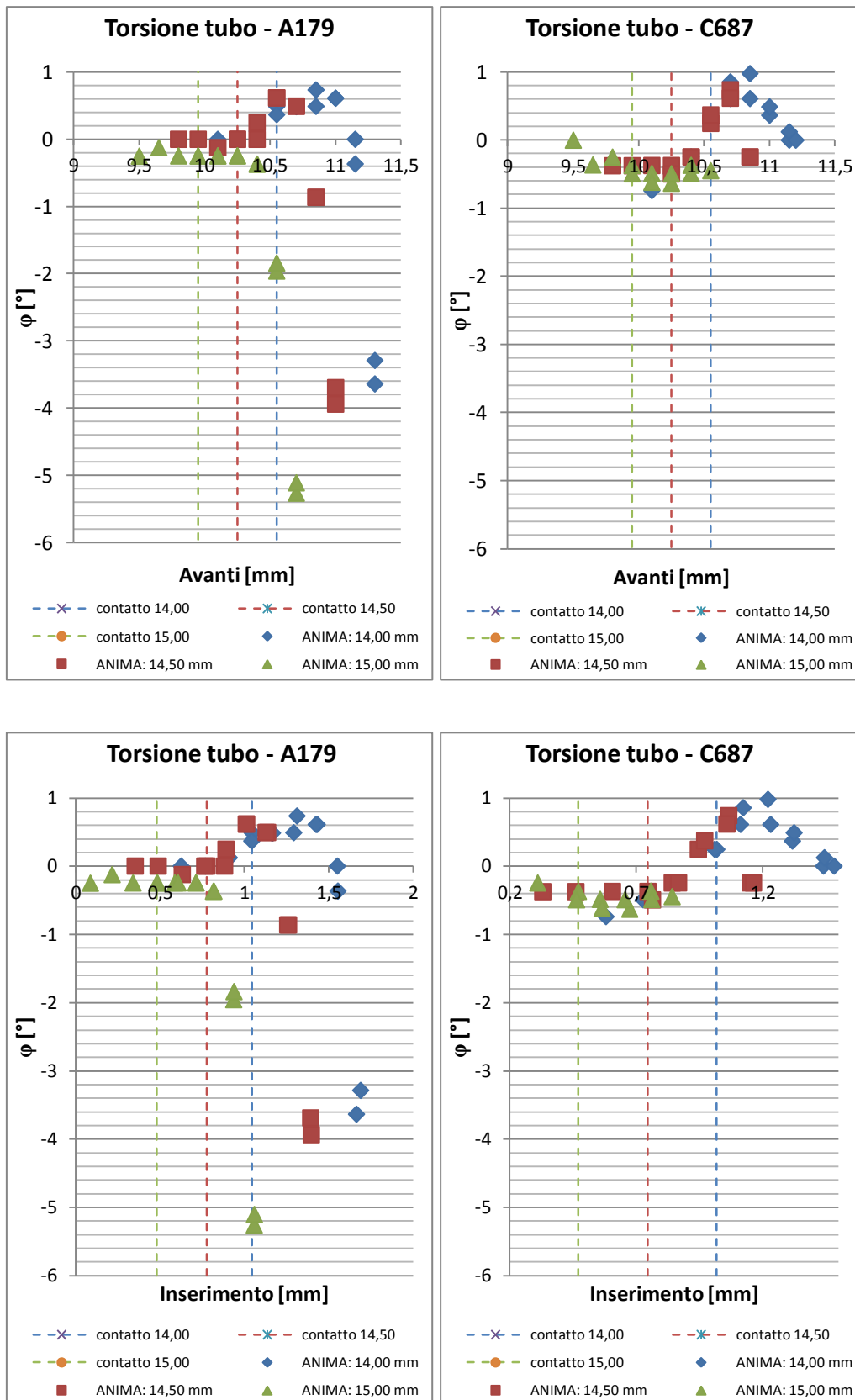


Grafico 33 – Andamento torsione del tubo in funzione della dimensione dell'anima

I campioni di C68700 sono arrivati a rottura prima che si verificasse la torsione del tubo. I grafici del A179 evidenziano un progressivo decremento

della porzione di torsione positiva successiva al contatto con l'anima ed un incremento di quella negativa.

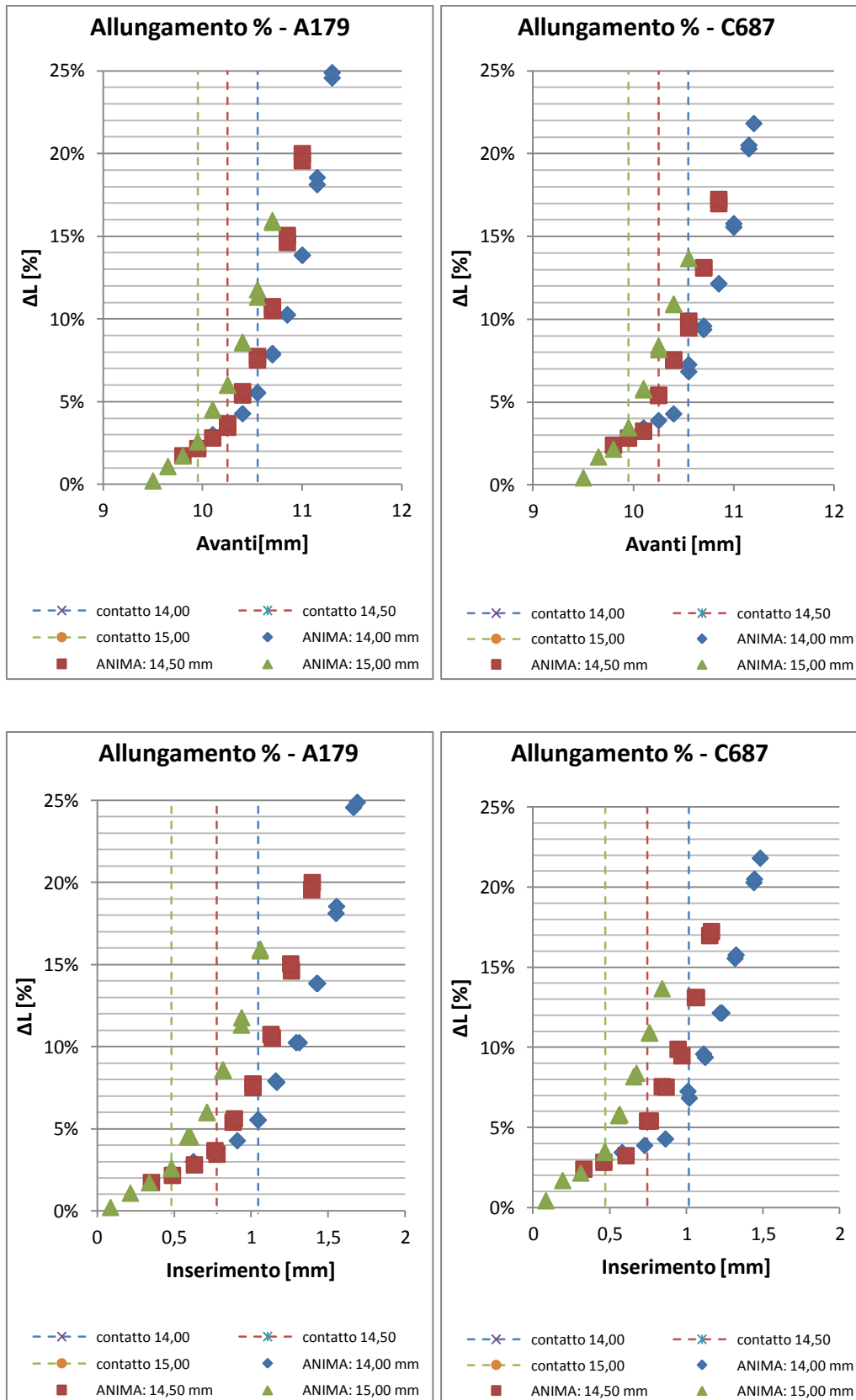


Grafico 34 - Andamento allungamento percentuale in funzione della dimensione dell'anima
 Il tubo subisce un allungamento maggiore con un anima più grande.

ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI

Nel capitolo precedente abbiamo mostrato i risultati ottenuti dalla raccolta dei dati sperimentali.

Tutti i parametri esaminati presentano una variazione del loro andamento al verificarsi del contatto con l'anima.

I parametri sui quali ci interessa soffermarci maggiormente sono quelli relativi alla sezione del tubo, ovvero:

- Diametro esterno;
- Diametro di nocciolo;
- Diametro interno;
- Spessore sotto aletta;
- Altezza dell'aletta.

Dalle prove sperimentali che abbiamo descritto possiamo fare due tipi di considerazioni:

- Analizzare gli andamenti di uno stesso materiale al variare della dimensione dell'anima;
- Analizzare gli andamenti dei diversi materiali con diametro dell'anima costante.

Osservando gli andamenti di questi parametri (da *grafico.27* a *grafico.31*) si può supporre che gli andamenti nei due tratti (prima e dopo il contatto con l'anima) visti separatamente possono essere approssimati con delle rette.

7.1 – Elaborazione degli andamenti al variare dell'anima

In prima istanza andiamo ad elaborare i dati ottenuti lavorando campioni dello stesso materiale con anime di diametro diverso.

Approssimiamo i dati raccolti dalle diverse sperimentazioni con due rette: la prima definita dallo sfioramento del tubo fino al contatto con l'anima, la seconda dal contatto con l'anima in avanti.

Alle rette che andremo a sviluppare sarà associato un coefficiente di determinazione R^2 .

Questo termine viene utilizzato in statistica e rappresenta la variabilità dei dati in relazione al modello utilizzato.

Questo è definito come:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

eq. 7

dove:

\hat{y}_i = dati stimati dal modello \bar{y}

\bar{y} = media dei dati osservati

y_i = dati osservati

Il parametro R^2 varia tra 0 e 1:

- $R^2 = 0$, il modello non rappresenta i dati;
- $R^2 = 1$, il modello rappresenta perfettamente i dati.

Fatta questa rapida premessa sulla funzione del coefficiente di determinazione passiamo a rappresentare gli andamenti in funzione dell'inserimento (A179: *grafico35*, *grafico36*; C68700: *grafico37*, *grafico38*).

Alle sigle comunemente utilizzate sono stati associati due pedici:

- Il primo relativo al tipo di anima utilizzata:
 1. Diametro anima: 14.00 mm;
 2. Diametro anima: 14.50 mm;
 3. Diametro anima: 15.00 mm.
- Il secondo relativo al tipo di regione:
 1. Regione1, prima del contatto con l'anima;
 2. Regione2, dopo il contatto con l'anima.

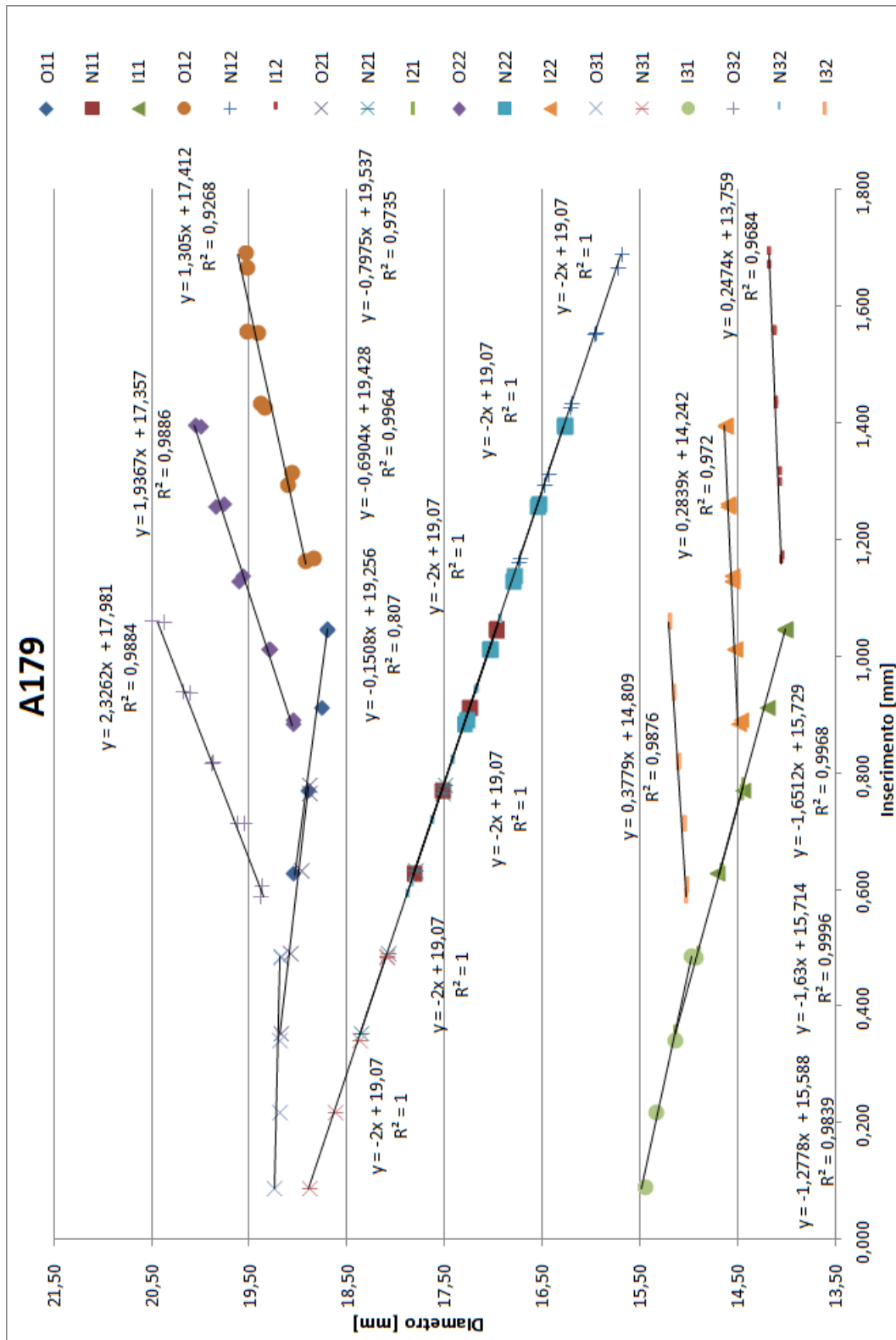


Grafico 35 – App. lineare O, N, I in funzione dell’inserimento e dell’anima (A179)

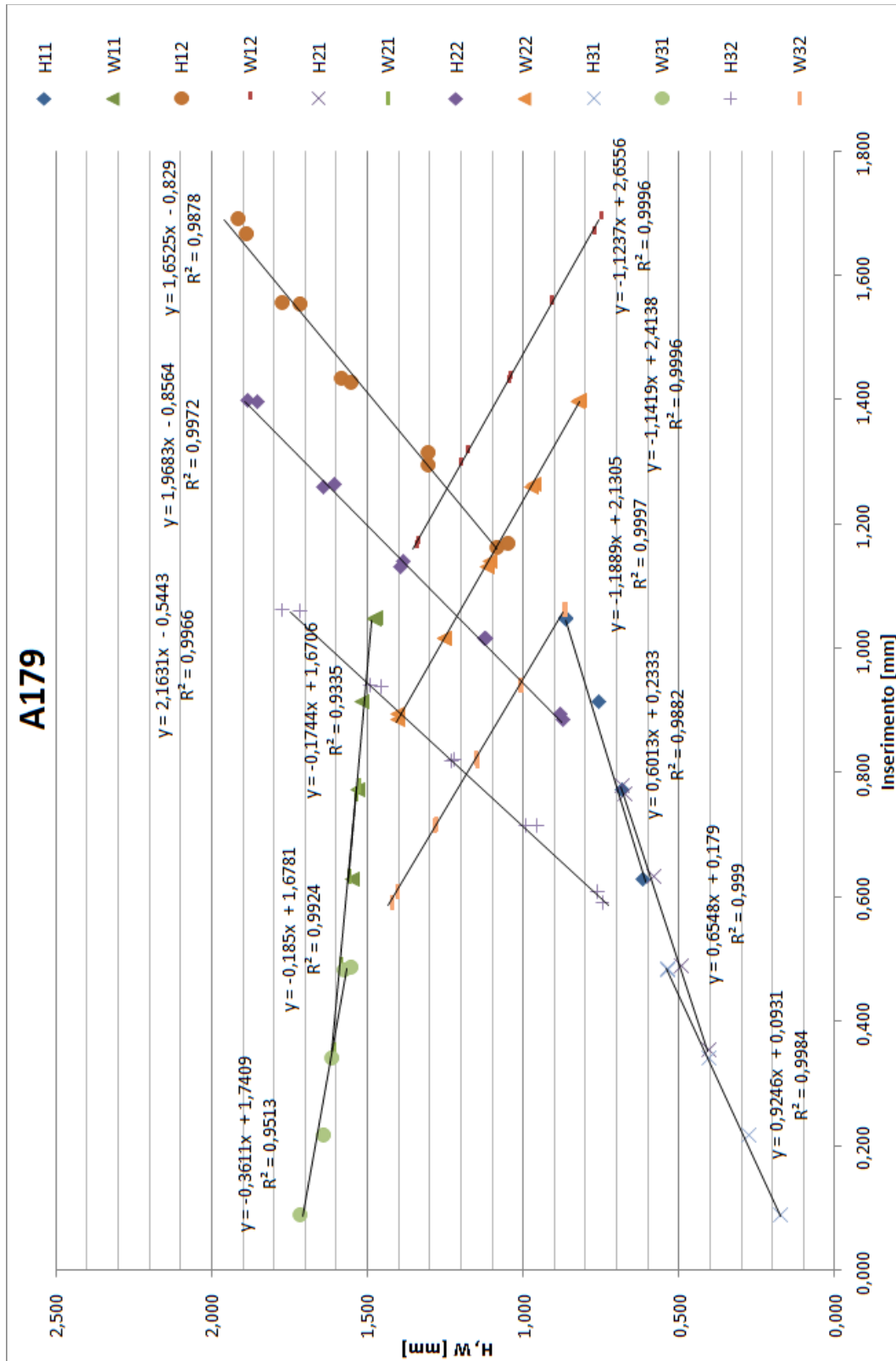


Grafico 36 – App. lineare H, W in funzione dell’inserimento e dell’anima (A179)

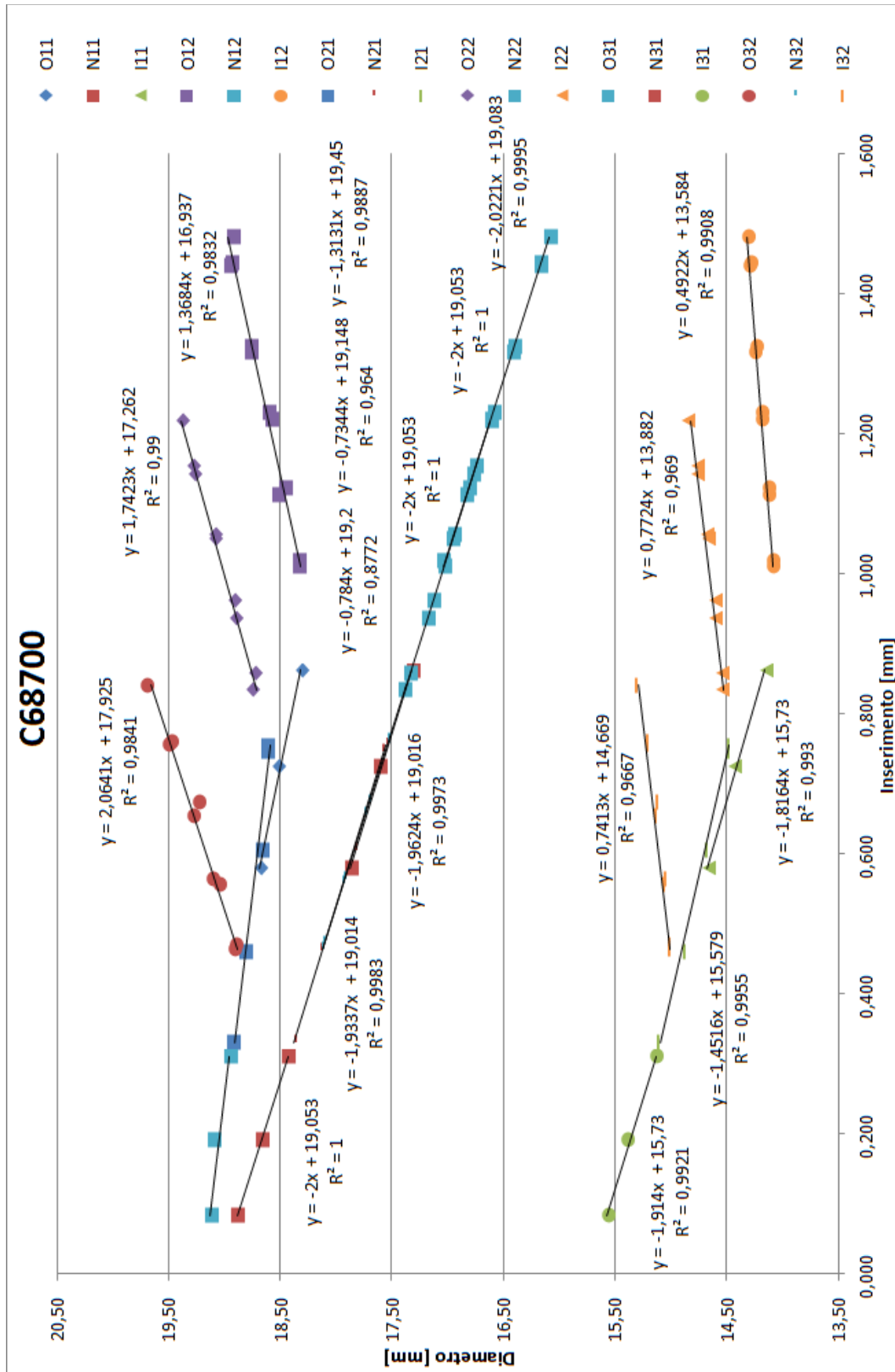


Grafico 37 – App. lineare O, N, I in funzione dell’inserimento e dell’anima (C68700)

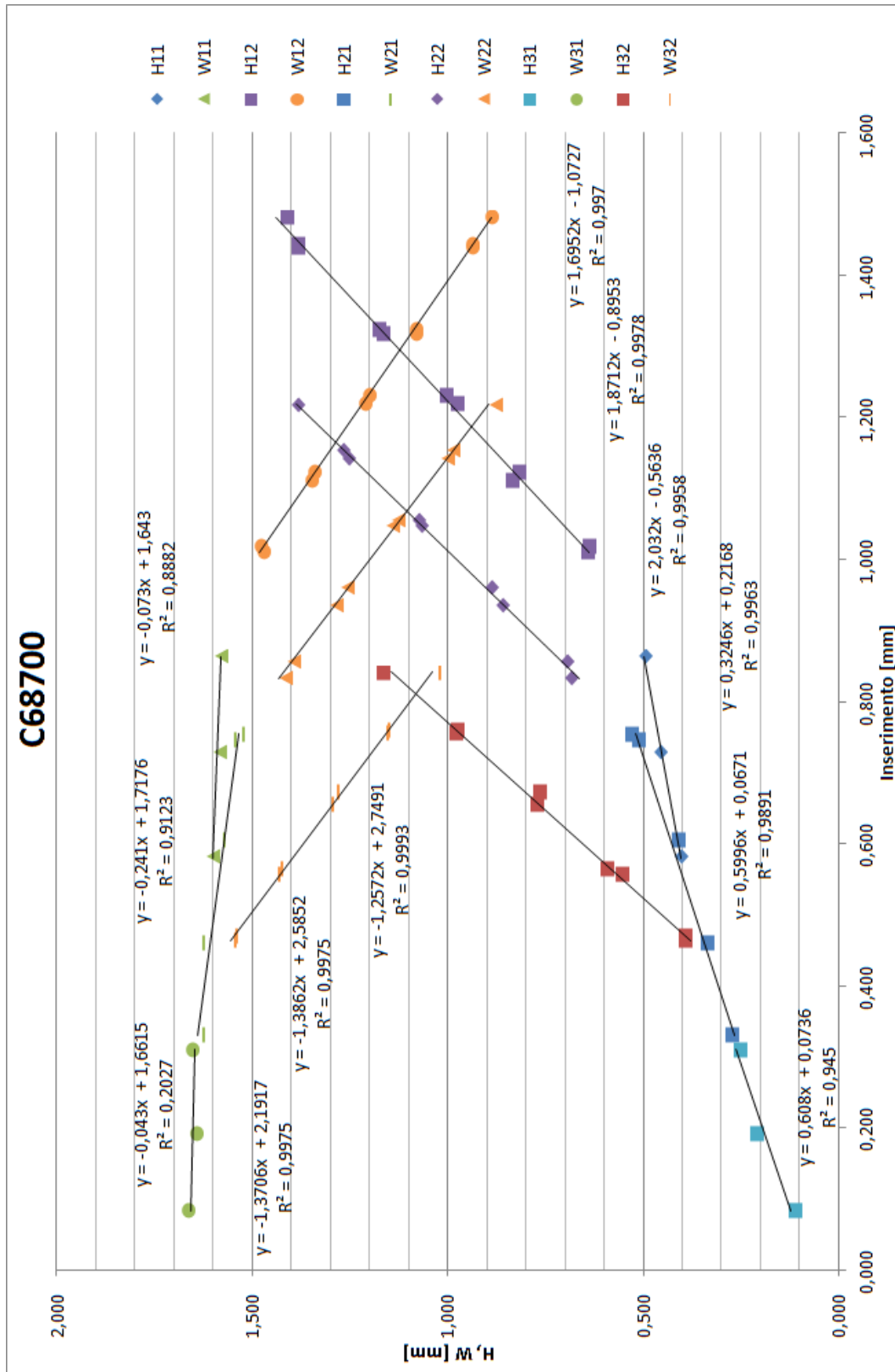


Grafico 38 – App. lineare H, W in funzione dell'inserimento e dell'anima (C68700)

Da questi grafici si può osservare come gli andamenti prima del contatto con l'anima siano uniformi, quindi rappresentabili da un'unica retta.

Per quanto riguarda gli andamenti delle rette dopo il contatto con l'anima si può osservare come i coefficienti angolari delle rette tendano ad aumentare al crescere della dimensione dell'anima.

Utilizzando le equazioni ricavate da questa elaborazione è possibile ricavarsi l'errore che viene introdotto utilizzando queste rette come modello.

Verrà sia definito l'errore assoluto (e) sia l'errore relativo ($e\%$):

$$e_i = \hat{y}_i - y_i \quad \text{eq. 8} \qquad e_i \% = \frac{\hat{y}_i - y_i}{\hat{y}_i} \quad \text{eq. 9}$$

Per il significato dei simboli si faccia riferimento all'eq. 7.

In *tab.20* sono riportati i valori massimi (maggiori di zero) e minimi (minori di zero) di errore.

ATTENZIONE: gli errori sotto riportati sono definiti su tutta la matrice di dati raccolti, potrebbe verificarsi che l'errore assoluto non sia riferito allo stesso campione dell'errore relativo associato in tabella.

		O		N		I		H		W	
		e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%
A179	MIN	-0,11	-0,58%	0,00	0,00%	-0,04	-0,24%	-0,06	-3,99%	-0,01	-0,93%
	MAX	0,09	0,45%	0,00	0,00%	0,03	0,19%	0,04	3,92%	0,02	1,11%
C68700	MIN	-0,05	-0,26%	-0,02	-0,11%	-0,03	-0,21%	-0,03	-10,16%	-0,02	-1,18%
	MAX	0,08	0,40%	0,01	0,08%	0,02	0,15%	0,04	8,09%	0,02	1,76%

tab. 20 – Errori assoluti e relativi con app. lineare

Si consideri che dalle misure preliminari fatte sui campioni liscio di questi materiali (esame eseguito su cinque campioni effettuando due misure per ogni campione) si registravano le seguenti variazioni di diametro esterno e diametro interno rispetto il valore medio.

		D		d	
		e [mm]	e%	e [mm]	e%
A179	MIN	-0,03	-0,13%	-0,02	-0,10%
	MAX	0,02	0,13%	0,01	0,10%
C68700	MIN	-0,04	-0,19%	-0,03	-0,16%
	MAX	0,03	0,17%	0,02	0,10%

tab. 21 – Errori assoluti e relativi riferiti ai campioni di tubo liscio

Si consideri inoltre che in produzione solitamente vengono utilizzate le seguenti tolleranze dimensionali:

Tolleranze in produzione				
O	N	I	H	W
+/- 0,20 mm	+/- 0,20 mm	+/- 0,20 mm	+/- 10 %	+/- 10%

tab. 22 – Tolleranze di produzione

Possiamo allora affermare che l'incertezza introdotta dalla approssimazione lineare sui dati è accettabile in quanto ben al di sotto delle tolleranze dimensionali utilizzate in produzione.

Si può notare in *tab.20* la presenza di un errore pari al -10.16% per l'altezza dell'aletta, questo non ci preoccupa in quanto l'errore assoluto minimo registrato è -0.03 mm.

7.2 – Elaborazione degli andamenti al variare del materiale

Proviamo ad applicare lo stesso modello utilizzato nel paragrafo precedente anche ai valori ottenuti dalla prima sperimentazione, ovvero utilizzando una sola anima e variando il materiale.

Si ottengono ancora due grafici:

- *Grafico39*, raffigurante l'andamento di diametro esterno, diametro di nocciolo e diametro interno;
- *Grafico40*, raffigurante l'andamento di altezza dell'aletta e spessore sotto aletta.

grafico38).

Anche in questo caso utilizziamo dei pedici per identificare i tratti:

- Il primo relativo al materiale:
 1. B111/C12200, rame;
 2. A179, acciaio al carbonio;
 3. B111/C68700, aluminum brass;
 4. B111/C71500, CuNi 70/30.
- Il secondo relativo al tipo di regione:
 1. Regione1, prima del contatto con l'anima;
 2. Regione2, dopo il contatto con l'anima.

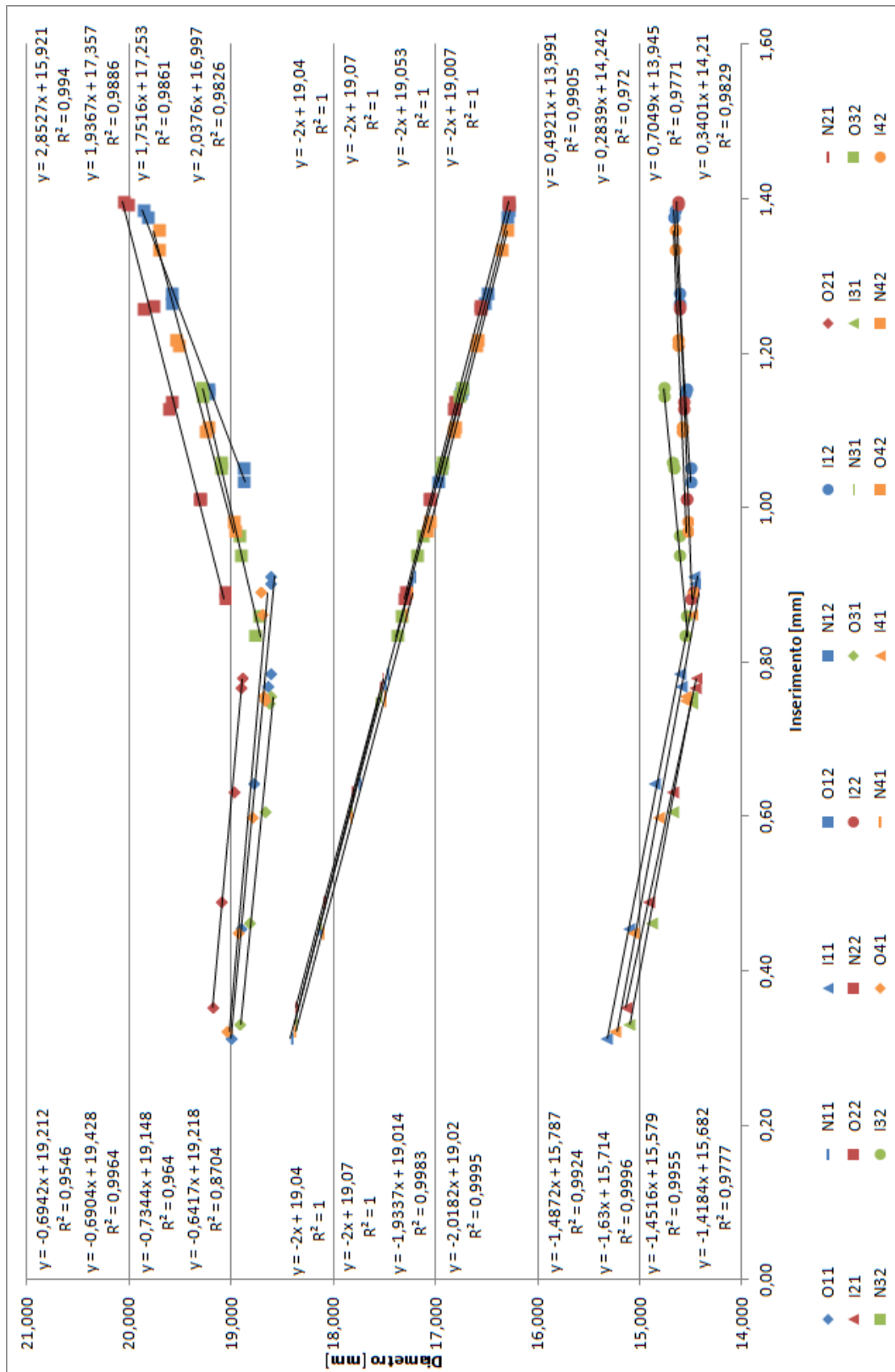


Grafico 39 – App. lineare O, N, I in funzione dell’inserimento e del materiale

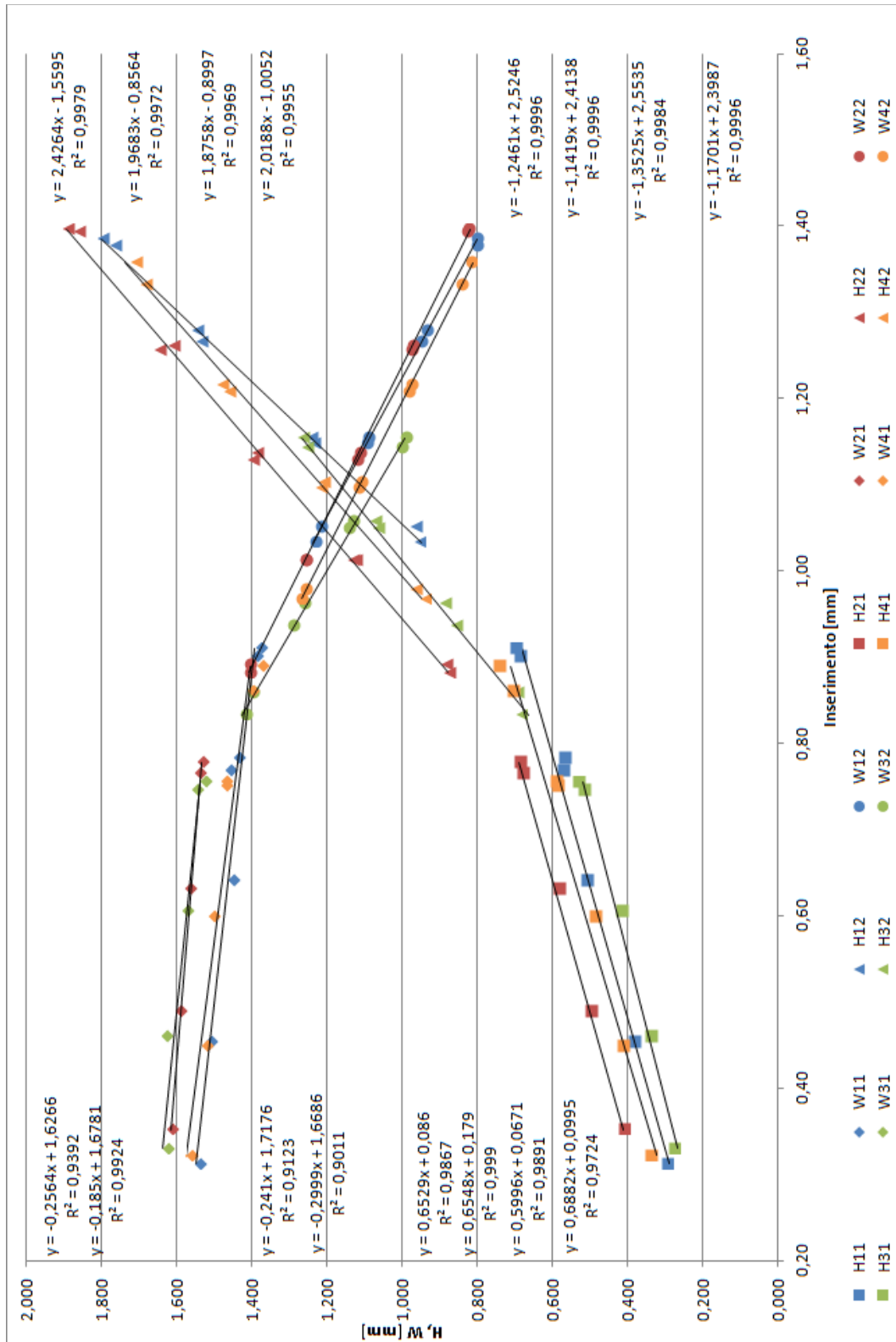


Grafico 40 – App. lineare H, W in funzione dell’inserimento e del materiale

Anche in questo caso i coefficienti di determinazione associati alle singole rette assumono valori molto elevati.

Andiamo ad analizzare l'errore assoluto e percentuale (eq.8, eq.9) anche per le rette che compongono questi grafici.

		O		N		I		H		W	
		e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%
C12200	MIN	-0,05	-0,24%	0,00	0,00%	-0,03	-0,23%	-0,02	-2,99%	-0,03	-1,92%
	MAX	0,06	0,32%	0,00	0,00%	0,06	0,38%	0,03	4,93%	0,02	1,22%
A179	MIN	-0,07	-0,36%	0,00	0,00%	-0,01	-0,05%	-0,03	-2,54%	-0,01	-0,72%
	MAX	0,05	0,25%	0,00	0,00%	0,02	0,14%	0,02	1,35%	0,00	0,33%
C68700	MIN	-0,05	-0,24%	-0,02	-0,09%	-0,02	-0,14%	-0,02	-3,69%	-0,02	-1,18%
	MAX	0,05	0,24%	0,01	0,08%	0,02	0,15%	0,02	3,69%	0,01	0,84%
C71500	MIN	-0,07	-0,39%	-0,01	-0,06%	-0,06	-0,45%	-0,03	-5,53%	-0,03	-1,82%
	MAX	0,07	0,37%	0,02	0,09%	0,06	0,44%	0,03	4,35%	0,03	2,15%

tab. 23 – App. lineare H, W in funzione dell'inserimento e del materiale

Come si può vedere da *tab.23* anche in questo caso gli errori che si ottengono approssimando gli andamenti con delle rette ci forniscono degli errori assolutamente accettabili per i nostri criteri di valutazione.

Osservando attentamente il *grafico39* e *grafico40*, si può notare come i punti ottenuti dalle diverse misurazioni formino un insieme abbastanza compatto.

A parità di inserimento si ottengono dai grafici delle variazioni limitate del parametro alle ordinate, in particolare:

- Diametro esterno, incertezza massima di circa 0.50 mm (+/- 0.25 mm);
- Diametro interno, incertezza ridotta rispetto al diametro esterno, ma sempre dell'ordine dei 0.30 mm (+/- 0.15 mm);
- Altezza dell'aletta, incertezza di circa 0.20 mm (+/- 0.10 mm);
- Spessore sotto aletta, incertezza di circa 0.10 mm (+/- 0.05 mm).

Si può pensare quindi di definire delle curve che approssimano l'andamento dei diversi parametri in entrambe le regioni.

Queste curve saranno valide quindi a parità di condizioni iniziali ed al contorno rispetto alla sperimentazione, ovvero:

- Condizioni iniziali:

- D, diametro esterno tubo liscio (19.05 mm);
- t, spessore del tubo liscio (1.65 mm).
- Condizioni al contorno:
 - Anima della medesima dimensione (14.50 mm).

Si può pensare di rappresentare l'andamento globale dei vari parametri in entrambe le regioni con delle curve.

Le funzioni che meglio approssimano i diversi andamenti sono delle polinomiali di ordine n (*grafico41*, *grafico42*).

Per definire l'ordine della polinomiale oltre che il coefficiente di determinazione R^2 si è osservata la tangente alla curva agli estremi.

In particolare si può notare:

- Diametro esterno (n=4): nella fase iniziale la sua tangente tende a zero in quanto partiamo da un tubo liscio;
- Diametro interno (n=3): nella fase iniziale assume una pendenza simile a quella del nocciolo, mentre nella fase terminale al tangente della curva tende lentamente a zero;
- Altezza dell'aletta (n=4);
- Spessore sotto aletta (n=2).

Di seguito sono riportati gli errori assoluti e relativi che si ottengono utilizzando le polinomiali proposte in *grafico41* e *grafico42*.

	O		N		I		H		W	
	e [mm]	e%	e	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%
MIN	-0,31	-1,58%	-0,04	-0,22%	-0,19	-1,32%	-0,14	-18,76%	-0,09	-9,46%
MAX	0,24	1,25%	0,05	0,29%	0,14	0,89%	0,12	17,85%	0,10	9,39%

tab. 24 – Errori con approssimazione polinomiale dei parametri

Alcuni errori che si ottengono sono al limite della tolleranza.

Bisogna però ricordare che questi valori rappresentano una stima preliminare, andrebbero poi confermati in produzione.

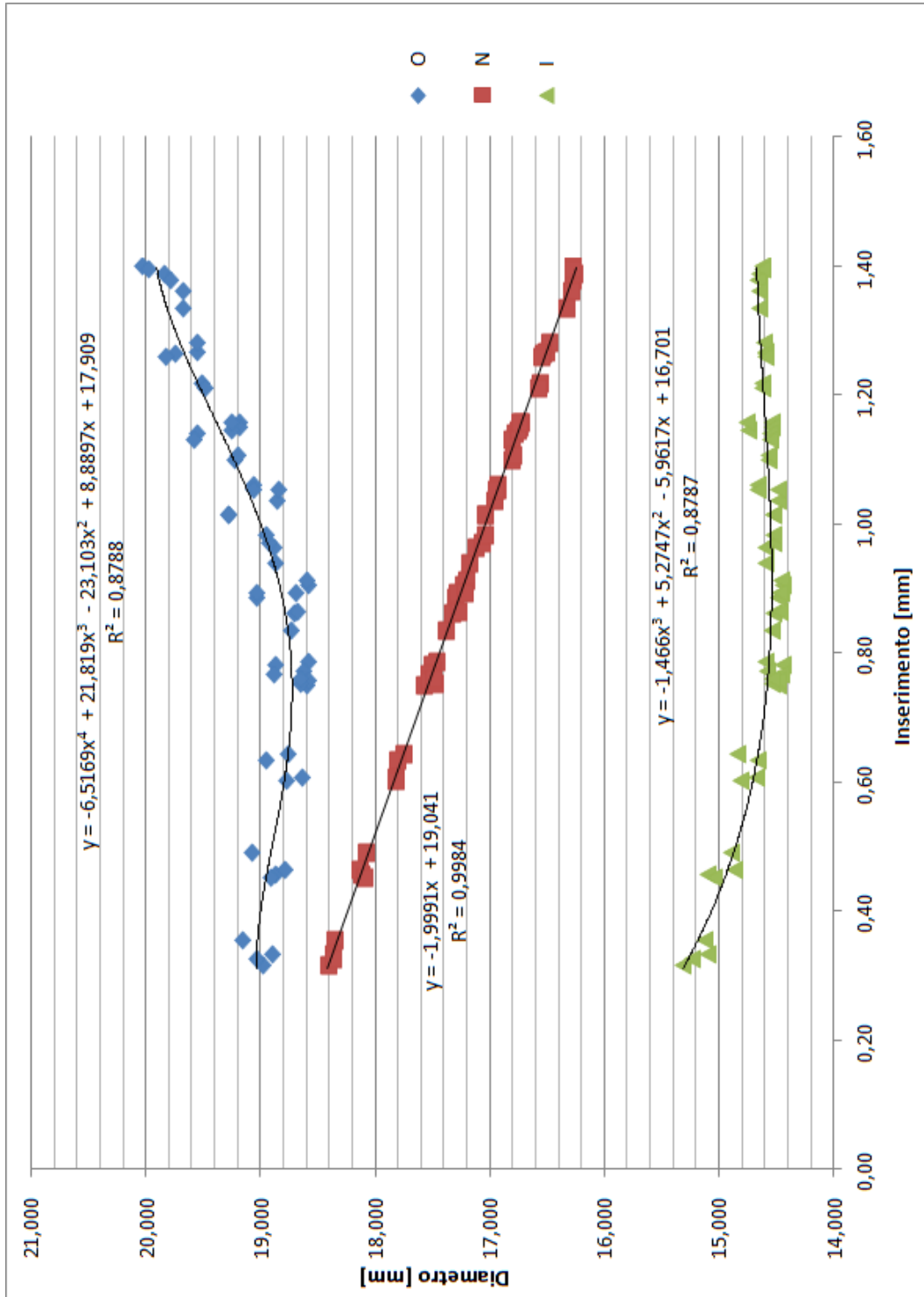


Grafico 41 – App. polinomiale O, N, I in funzione dell’inserimento uniformando i materiali

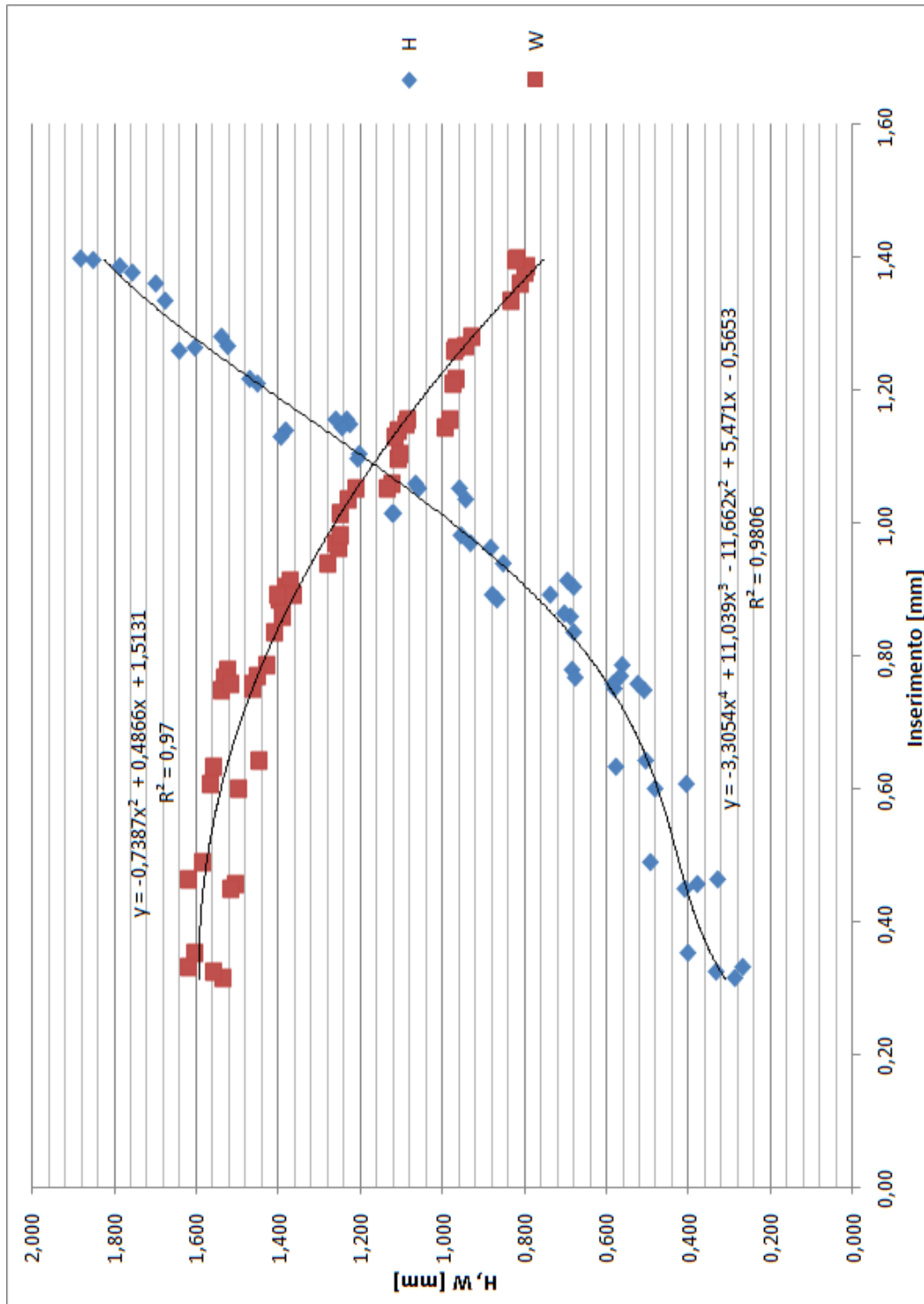


Grafico 42 – App. polinomiale H, W in funzione dell’inserimento uniformando i materiali

I risultati ottenuti con quest'ultima prova sono soddisfacenti dal punto di vista del risultato, ma risulta complicata la parametrizzazione per adattarla a condizioni operative diverse.

Si è preferito suddividere gli andamenti ottenuti dai dati di tutti i materiali in due regioni ed approssimare l'andamento di ognuna di queste con una retta.

Si ottengono così il *grafico43* ed il *grafico44*.

Si può osservare come gli R^2 non assumano valori soddisfacenti, in particolare per:

- Diametro esterno sia nella Regione1 che nella Regione2;
- Diametro interno nella Regione2;
- Altezza dell'aletta nella Regione1;
- Spessore sotto aletta nella Regione1.

Andiamo a verificare gli errori che si ottengono con questa approssimazione.

		O		N		I		H		W	
		e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%	e [mm]	e%
R1	MIN	-0,18	-0,98%	-0,04	-0,24%	-0,13	-0,84%	-0,08	-23,03%	-0,07	-4,82%
	MAX	0,17	0,92%	0,05	0,28%	0,11	0,73%	0,09	17,31%	0,07	4,11%
R2	MIN	-0,27	-1,40%	-0,03	-0,19%	-0,16	-1,11%	-0,12	-13,53%	-0,04	-4,11%
	MAX	0,31	1,61%	0,04	0,23%	0,08	0,52%	0,15	13,55%	0,08	7,18%

tab. 25 – Errori con approssimazione lineare dei parametri

I valori di errore che si ottengono con questo tipo di approssimazione sono paragonabili con quelli ottenibili con la formulazione precedente applicando delle polinomiali di ordine n .

Questo tipo di approssimazione può risultare più semplice da parametrizzare rispetto a quella ottenuta utilizzando delle funzioni polinomiali.

Essendo però i valori di errore stimati non sempre trascurabili, un modello basato su questo tipo di approssimazione ci potrebbe fornire delle stime non accurate.

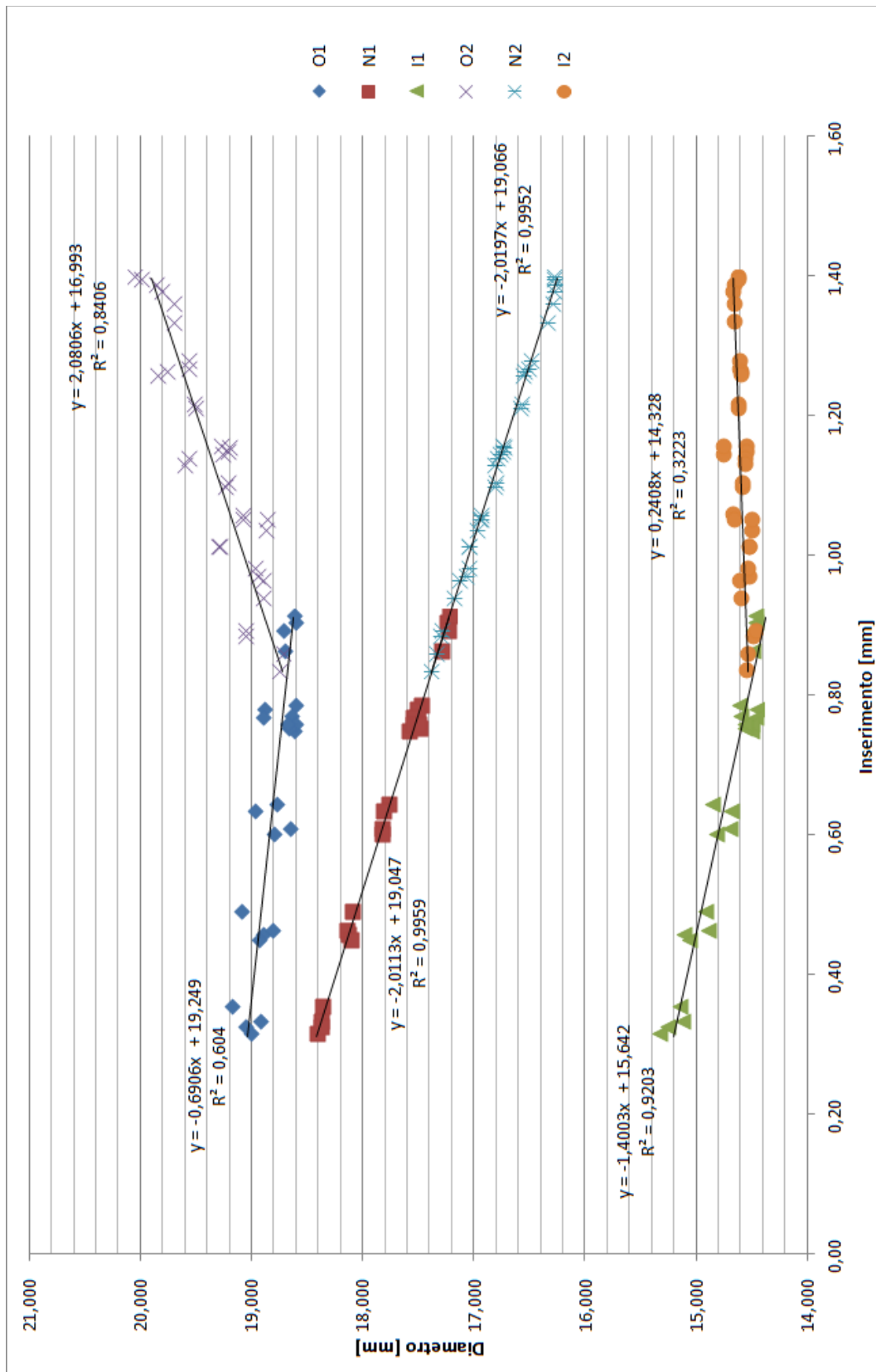


Grafico 43 – App. lineare O, N, I in funzione dell’inserimento uniformando i materiali

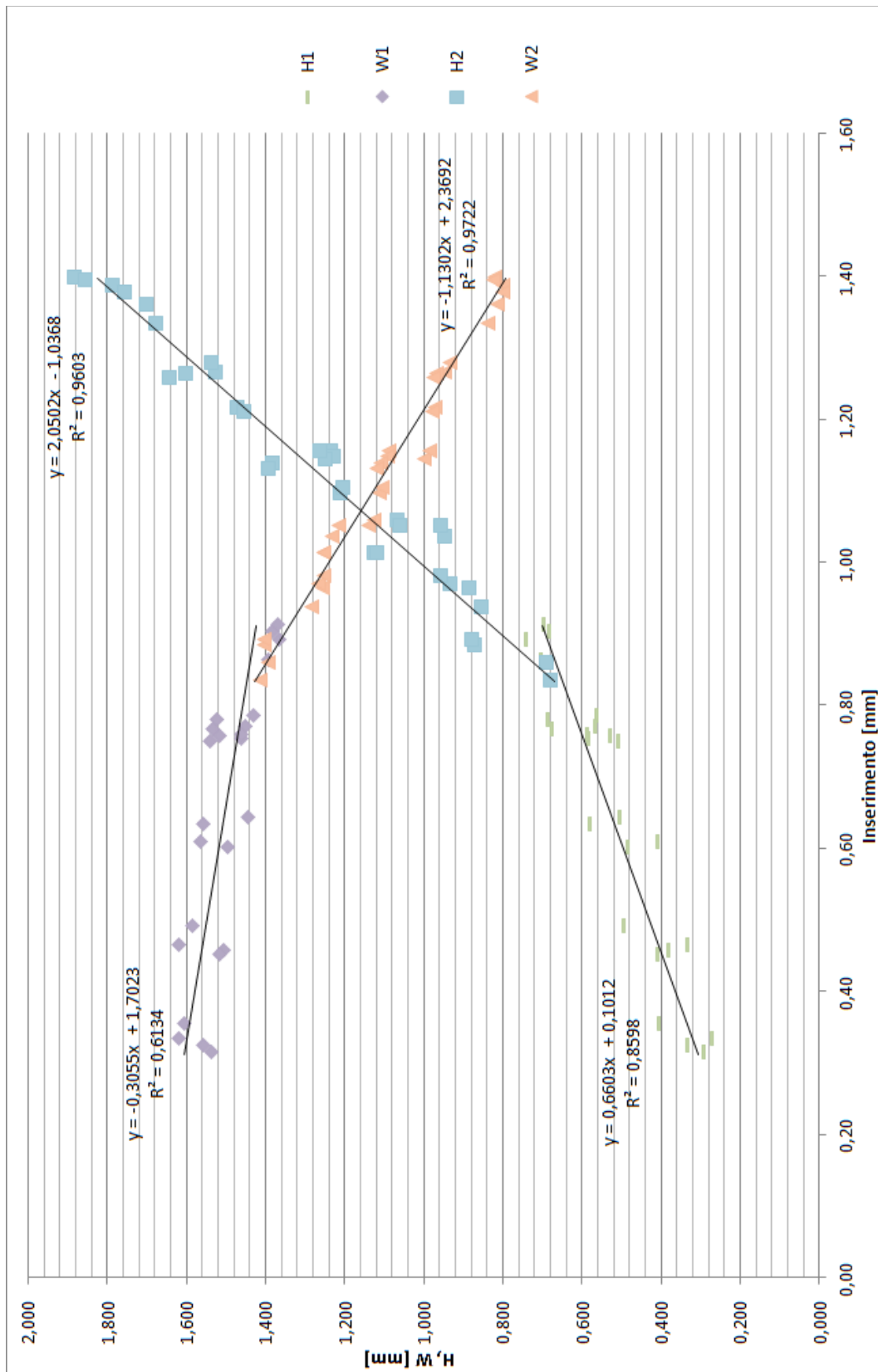


Grafico 44 – App. lineare H, W in funzione dell’inserimento uniformando i materiali

7.3 – Valutazione sull’allungamento

In questo paragrafo andremo a rappresentare il legame che c’è tra la variazione di passo dell’alettatura e la variazione di lunghezza del tubo alettato.

Dall’andamento del passo (*grafico45*) si può osservare:

- Per uno stesso materiale:
 - Andamento presso che costante prima del contatto con l’anima;
 - Rapido incremento di pendenza dopo il contatto con l’anima.
- Tra i diversi materiali:
 - L’andamento del materiale C68700 si distingue dagli altri per una pendenza più accentuata dopo il contatto con l’anima.

Dall’andamento dell’allungamento assiale del tubo in funzione dell’inserimento (*grafico46*) si può osservare:

- Incremento della lunghezza fino ad un valore di circa il 5% al contatto con l’anima;
- Dopo il contatto con l’anima si verifica un forte incremento di pendenza.

Da queste osservazioni, si può affermare che vi sia un collegamento tra l’andamento di passo e allungamento del tubo.

Al fine di osservare la relazione tra passo e allungamento definiamo l’incremento del passo rispetto ad un valore di riferimento.

Il valore di riferimento che utilizziamo è lo spessore della lamella (0.95 +/- 0.01mm), in quanto rappresenta il valore di passo tra le creste degli utensili che formano l’aletta sulla superficie del tubo.

$$P_{rif} = s_{lamella} / \cos \alpha = 0.95 / \cos 1 \cong 0.9501mm$$

eq. 10

Nell’*eq.10* è stato considerato anche l’angolo di inclinazione α degli utensili utilizzato durante la lavorazione (espresso in gradi sessagesimali). Questo non attribuisce un contributo significativo.

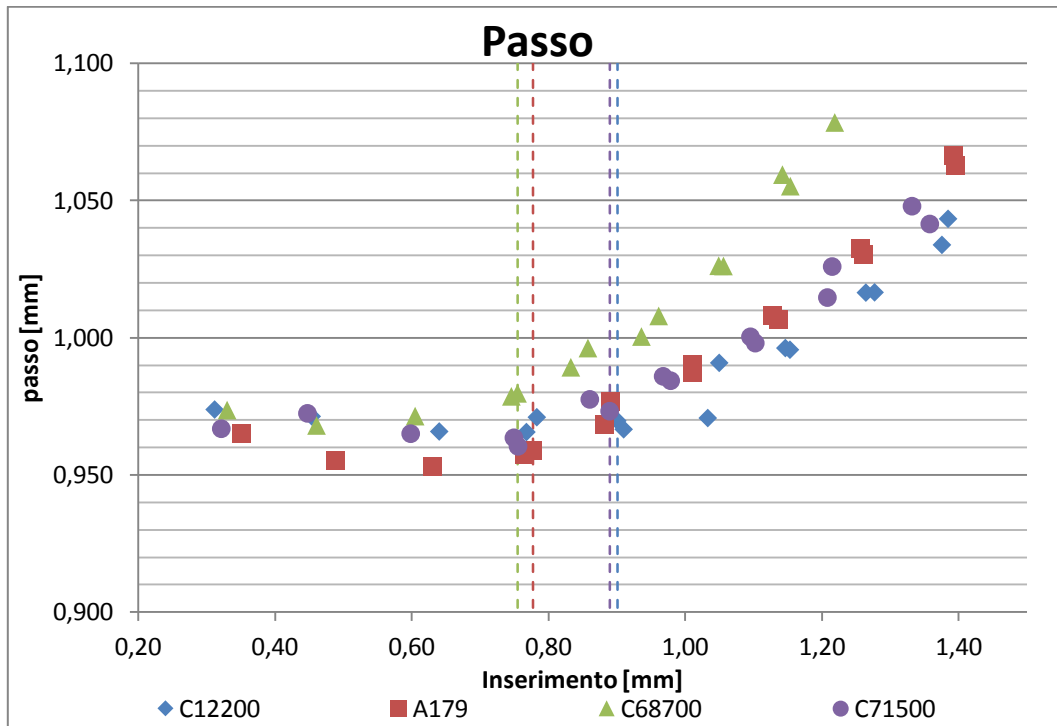


Grafico 45 – Andamento del passo in funzione dell’inserimento per diversi materiali

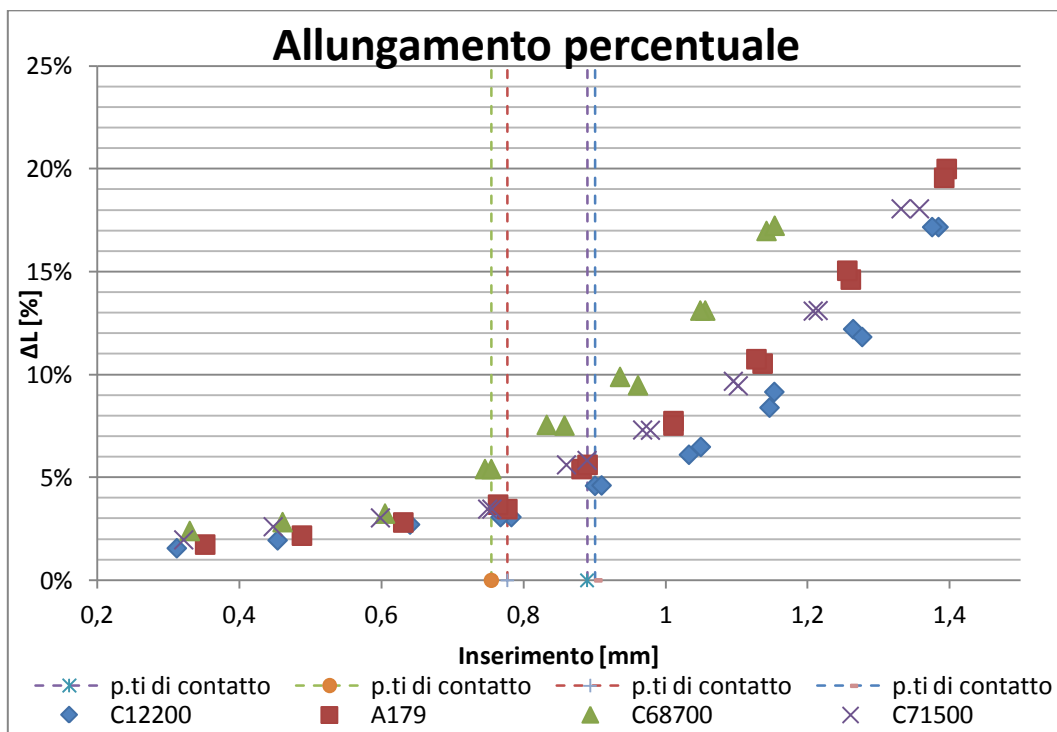


Grafico 46 – Andamento del ΔL% in funzione dell’inserimento per diversi materiali

Possiamo ora definire la variazione percentuale del passo come segue:

$$p\% = \frac{P - P_{rif}}{P_{rif}}$$

eq. 11

Analizziamo quindi il rapporto tra l'incremento del passo e l'incremento della lunghezza nel grafico47.

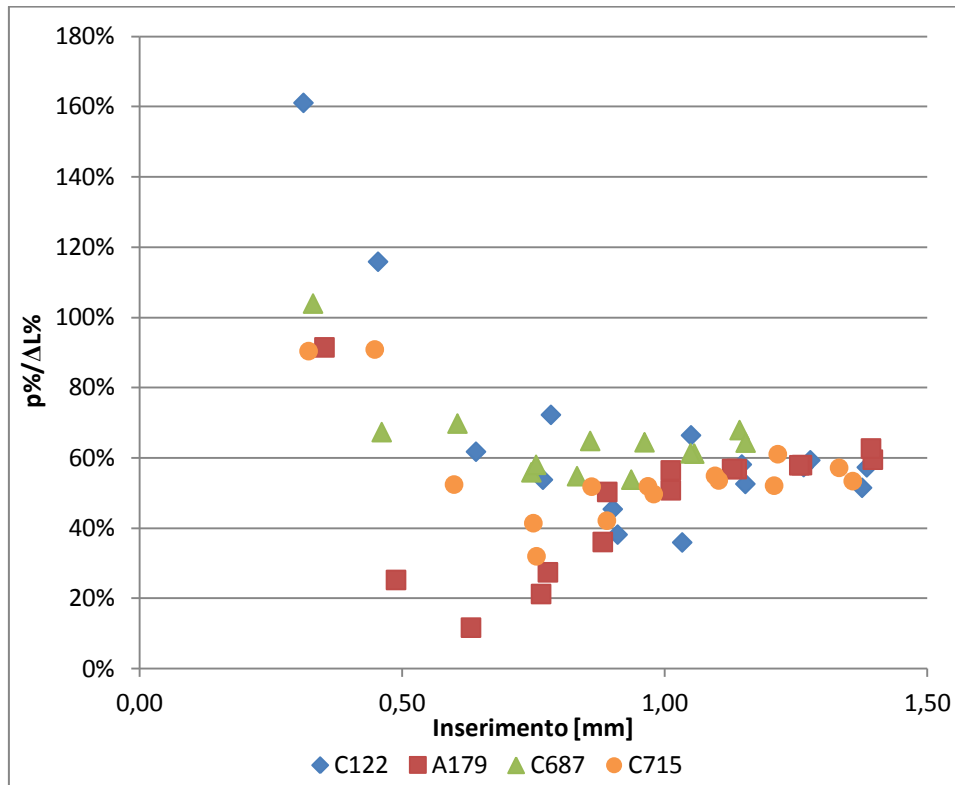


Grafico 47 – Andamento del p%/ΔL% in funzione dell'inserimento per diversi materiali

Si può osservare che l'andamento tende a stabilizzarsi su un valore costante di circa 50÷60% dopo una prima fase decrescente.

Inoltre:

- L'andamento si stabilizza a circa 0.80/1.00 dell'inserimento, valore che corrisponde al contatto con l'anima;
- Nella parte a sinistra del grafico si hanno valori della variazione di passo difficili da apprezzare con accuratezza con gli strumenti di misura utilizzati, questo fenomeno introduce un errore che non ci permette di fare valutazioni accurate nel primo tratto;

Dal *grafico47* si è ottenuto come l'allungamento totale che si verifica sul tubo dopo il contatto con l'anima sia proporzionale alla variazioni di passo dell'alettatura.

Fatto 100% l'allungamento che subisce il tubo per effetto della rullatura, il 50÷60% viene giustificato dalla variazione percentuale del passo dell'alettatura.

Il restante 40÷50% dell'allungamento non è motivabile attraverso la variazione del passo dell'alettatura.

Possiamo osservare cosa accade variando la dimensione dell'anima interna nel *grafico48*, realizzato dai dati raccolti nella seconda sperimentazione.

Nella legenda è stata inserito un pedice identificativo dell'anima utilizzata.

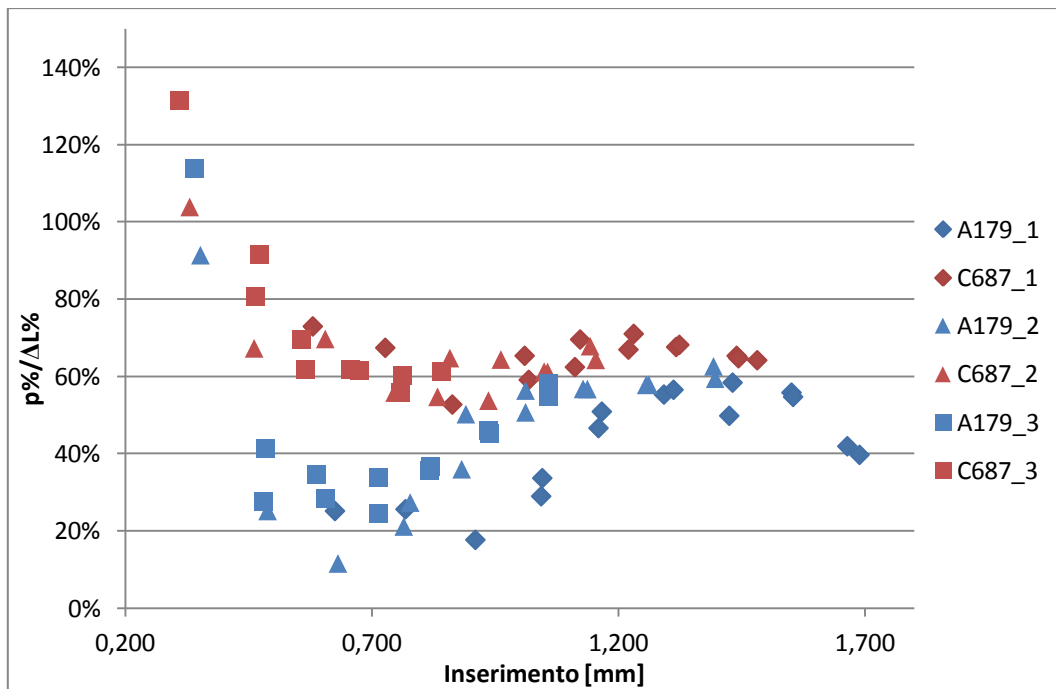


Grafico 48 – Andamento $p\%/\Delta L\%$ con anime diverse per A179 e C68700

In particolare:

- 1: Anima da 14,00 mm;
- 2: Anima da 14,50 mm;
- 3: Anima da 15,00 mm.

Sono stati riportati di colore diverso i risultati ottenuti con i due materiali.

Si può distinguere una leggera differenza a seconda del tipo di materiale utilizzato: dal *grafico48* si osserva come i dati relativi al C68700 tendano

ad assumere un range di valori tra il 50÷70%, mentre per l'A179 da 40÷60% circa.

Questa osservazione secondo il ragionamento precedente evidenzia come per l'A179 l'allungamento sul tubo è influenzato in maniera meno significativa dalla variazione di passo rispetto al C68700.

Per quanto riguarda l'utilizzo di anime di dimensione diversa non è possibile osservare nessuna variazione rilevante della dipendenza tra variazione di passo e allungamento del tubo.

CONCLUSIONI

Alla luce del lavoro svolto sono emerse alcune importanti considerazioni su quello che è il comportamento del tubo durante la lavorazione di rullatura per la formazione dell'aletta sulla superficie esterna.

Il primo importante risultato ottenuto è stato l'ottenimento di mappe relative alle dimensioni caratteristiche del tubo alettato.

Grazie a queste mappe sarà possibile, nel rispetto delle condizioni iniziali imposte, stimare quali saranno i valori dei parametri caratteristici del tubo alettato al variare dell'inserimento degli utensili del tubo.

Inoltre queste mappe, essendo rappresentate in funzione dell'inserimento permettono di avere una rappresentazione di quanto avviene nel tratto iniziale del tubo alettato, ovvero da quando gli utensili cominciano ad affondare nel materiale fino a quando raggiungono la posizione di lavoro.

In questo ambito si è fatta un'importante, osservazione relativamente all'andamento del diametro interno.

Si è individuato, dopo un primo tratto decrescente, un punto di minimo del diametro interno in corrispondenza del contatto con l'anima.

Avvenuto il contatto, aumentando l'inserimento degli utensili nel materiale il diametro interno tende infatti a crescere.

Si è osservato inoltre che gli andamenti dei parametri per ogni materiale analizzato sono divisibili in due regioni, all'interno delle quali sono approssimabili con delle rette.

Queste due regioni vengono delimitate dal valore di inserimento con il quale si verifica il contatto con l'anima.

Un'altra importante osservazione riguarda il coefficiente angolare delle rette definite dopo il contatto con l'anima, si può infatti osservare come variando la dimensione dell'anima, questi non rimangono costanti.

Da questa osservazione si può dedurre come il diametro esterno dell'anima sia un parametro rilevante al fine di determinare il gradiente con il quale viene a formarsi l'aletta.

Infine grazie ad un'analisi svolta sugli andamenti di passo e allungamento del tubo alettato si è potuto osservare come l'allungamento del tubo non sia completamente giustificato dalla variazione del passo.

SVILUPPI FUTURI

Con lo sviluppo di questa tesi è stato possibile osservare dei fenomeni che possono essere di spunto per ulteriori ricerche aventi come obiettivo un maggiore livello di comprensione degli stessi oppure una stima del comportamento dei parametri dimensionali caratteristici della lavorazione.

Tra questi emerge in particolare lo studio del flusso del materiale durante la lavorazione al fine di approfondire la comprensione sull'andamento della torsione nel tubo alettato e dei fenomeni che concorrono per ottenere l'allungamento del tubo.

Si potrebbero inoltre ottenere un modello matematico oppure delle mappe normalizzate rispetto ai parametri che rappresentano le condizioni iniziali del nostro processo, in quanto la sperimentazione svolta ci ha fornito importanti informazioni sull'influenza dei parametri di processo sulle caratteristiche finali del tubo alettato.

Questo studio avrebbe lo scopo di poter caratterizzare le dimensioni del tubo alettato ottenibili svincolandosi dalla produzione di campionature.

NOMENCLATURE

Avanti – parametro macchina che definisce la posizione degli utensili nel pezzo in lavorazione

Inserimento – parametro del tubo alettato, vedi eq.6

FPI – fins per inches (alette per pollice) parametro identificativo del tipo di alettatura

D – diametro esterno tubo liscio

t – spessore tubo liscio

d – diametro interno tubo liscio

O – diametro esterno tubo alettato

N – diametro di nocciolo tubo alettato

I – diametro interno tubo alettato

H – altezza dell'aletta

W – spessore sotto aletta

p – passo dell'alettatura

F – spessore medio dell'aletta

M – lunghezza di ingresso/uscita alettatura

$\Delta L\%$ - allungamento percentuale del tubo dovuto alla lavorazione di rullatura. Alcune volte definito anche solo ΔL

Ψ – angolo di torsione sulla superficie esterna del tubo

β – angolo di torsione dall'asse del tubo

cfr – arco di circonferenza che identifica la torsione del tubo sulla superficie esterna

X_i – lunghezza di inizio i-esimo tratto alettato

Y_i – lunghezza i-esimo tratto alettato

Z_i – lunghezza di fine i-esimo tratto alettato

C_i – lunghezza i-esimo tratto liscio

L – lunghezza totale tubo alettato

Anima – utensile che lavora internamente al tubo alettato per calibrarne il diametro interno

ASTM A179 – Normativa che definisce le specifiche di tubi senza saldatura trafilati a freddo in acciaio al carbonio per scambiatori di calore. Nel testo si fa riferimento ad *A179* come sigla identificativa del tubo in acciaio al carbonio

ASTM B111 - Normativa che definisce le specifiche di tubi senza saldatura in rame e lega di rame

C12200 – UNS No. identificativo del rame DHP (nel testo si fa riferimento all'abbreviativo *C122*)

C44300 – UNS No. identificativo degli Admiralty Metals, B, C, e D

C68700 – UNS No. identificativo dell'Aluminum Brass, B (nel testo si fa riferimento all'abbreviativo *C687*)

C71500 – UNS No. Identificativo del 70-30 Copper-Nickel (nel testo si fa riferimento all'abbreviativo *C715*)

S_y – tensione di snervamento

S_u – tensione a rottura

A% – allungamento percentuale a rottura

Regione1 – Regione del piano (avanti/inserimento;Y) compresa tra la fase iniziale di tubo liscio e il contatto con l'anima

Regione2 – Regione del piano (avanti/inserimento;Y) successiva al contatto con l'anima

BIBLIOGRAFIA

Testi

- [1] - “Sviluppo di un processo di fabbricazione innovativo di tubi alettati per scambiatori di calore a fascio tubiero”
Università di Bologna, Be.Ca. Engineering – Massimo Alvisi, Prof. Ing. Lorenzo Donati, Prof. Ing. Giampaolo Campana, Ing. Raffaele Caminati - 2011
- [2] - “Steel tube and pipe manufacturing processes”
Mannesmann & Vallourec
- [3] - “Laminazione dei tubi”
slides UniPV – Università degli studi di Pavia
- [4] - “Produzione dei tubi”
slides UniBG – Università degli studi di Bergamo
- [5] - “Tecnologia meccanica – Deformazione Plastica”
sildes LIUC – Università Carlo Cattaneo
- [6] - “Extended Surface Heat Transfer”
di Allan D.Kraus, Abdul Aziz, James Welty - John Wiley & Sons, INC – 2001
- [7] - “Engineering Data Book III – Chapter 9”
Wolverine Tube
- [8] - “Fundamentals of Heat Exchanger Design”
Ramesh K. Shah & Dusan P. Sekulic – John Wiley & Sons, Inc. - 2003

Pubblicazioni

- [9] - “Condensation inside and outside smooth and enhanced tubes”
di A.Cavallini, G.Censi, D. Del Col, L. Doretti, G.A. Longo, L.Rossetto, C. Zilio – International Journal of Refrigeration – 2003

- [10] - “High-performance, Lightweight “THERMOFIN” Tubes for Air Conditioners Using Alternative Refrigerants”
Mamoru Houfuku, Yoshio Suzuki, Kenichi Inui – Hitachi Cable Review No.20 (August 2001)
- [11] - “Rolling of long screws”
Velico Ivanov, Journal of Materials Processing Technology 82 - 1998

Brevetti

- [12] - “Retractable Finning Tool and Method of Using”
Patent No: US 7,284,325 B2 – Date: Oct. 23, 2007
- [13] - “Multiple Finned Tube and a Method for its Manufacture”
Patent No: 5,803,164 – Date: Sep. 8, 1998
- [14] - “Heat-transfer tubes and methods of fabrication thereof”
Patent No: 5’697’430 – Date: Dec.16, 1997;
- [15] - “Method of manufacture of a multiple finned tube”
Patent No: 5,761,807 – Date: Jun. 09, 1998;
- [16] - “Process for the production of an evaporator tube”
Patent No: 6’067’832 – Date: May 30, 2000;

Web sites

- [17] - Wikipedia: <http://it.wikipedia.org/wiki>
- [18] - Wolverine_Tube: <http://www.wlv.com>
- [19] - Key to Metals: <http://www.keytometals.com>
- [20] - Biciclando:
<http://www5.indire.it:8080/set/biciclando/contenut/venturi/design/dmannes.htm>
- [21] - Bianco_Gianfranco:
<http://www.biancogianfranco.com/Agg%20Area%20Italia/Cremagliere/Rullatura%20delle%20filettature%20esterne.pdf>

RINGRAZIAMENTI

Con questo lavoro si conclude un importante capitolo della mia vita cominciato 18 anni fa.

In questi anni ho incontrato molte persone e credo che ognuna di queste abbia contribuito a farmi crescere sia dal punto di vista personale che professionale.

Innanzitutto volevo ringraziare il Prof. Ing. Giampaolo Campana e l'Ing. Raffaele Caminati per avermi sostenuto durante lo sviluppo e la redazione di questo elaborato.

Un altro grande ringraziamento a tutti gli amici che ho incontrato in questi anni di università grazie ai quali sono riuscito a raggiungere questo traguardo.

Tra questi è doveroso evidenziare l'aiuto che mi hanno dato Romeo Macchini e Lucas Cecchini.

Voglio inoltre ringraziare la mia ragazza, i miei amici e la mia famiglia per avermi sempre supportato nelle scelte che ho fatto in questi anni e per essermi rimasti vicino anche nei momenti più difficili.

Infine, citando il mio amico Macco, voglio ringraziare me stesso per aver avuto la pazienza e la determinazione di proseguire lungo un percorso che non sempre è stato facile seguire.