



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

SEDE DI VICENZA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

TESI DI LAUREA di PRIMO LIVELLO

**MICROESTRUSIONE IDROSTATICA: RICERCA DI UN
MODELLO MEDIANTE SIMULAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI E
CONFRONTO DEI RISULTATI CON GLI STUDI SPERIMENTALI
SUL RAME**

RELATORE: PROF. GUIDO BERTI

CORRELATORE: DR. ING. MANUEL MONTI

LAUREANDO: NICOLO' DAL CORSO

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

INDICE:

INTRODUZIONE.....pag.3

OBIETTIVO DELLA TESI.....pag.6

CAPITOLO 1: Micro formatura e Micro estrusione idrostatica

1.1.La micro formatura

1.1.1.Limiti degli utensili da micro formatura.....pag.8

1.1.2.Il comportamento dei materiali.....pag.8

1.1.3.Tribologia.....pag.11

1.1.3.1.L'attrito.....pag.11

1.1.3.2.Double cup-extrusion.....pag.14

1.1.3.3.Open and closed lubricant pockets.....pag.17

1.1.3.4.Riscaldamento dovuto all'attrito.....pag.19

1.1.3.5.Lubrificazione.....pag.19

1.1.3.6.Modello meccanico reologico.....pag.20

1.2.Estrusione

1.2.1.Meccanica dell'estrusione.....pag.23

1.2.2.Effetto dell'angolo di entrata.....pag.25

1.2.3.Flusso di materiale durante l'estrusione.....pag.26

1.2.4.Difetti di estrusione.....pag.27

1.2.5.Estrusione idrostatica.....pag.28

1.2.5.1.Apparato per l'estrusione idrostatica.....pag.29

1.2.5.2.Andamento della pressione (stick-slip).....pag.30

1.2.5.3.Estrusione idrostatica dei materiali fragili.....pag.32

1.2.6.Micromondo-Microestrusione.....pag.33

1.2.6.1.Effetto scala.....pag.33

1.2.6.2.Micro estrusione idrostatica.....pag.34

CAPITOLO 2: Micro estrusione idrostatica e dati sperimentali

2.1.Prova di micro estrusione idrostatica.....pag.37

2.3.1.Apparato strumentale.....pag.37

2.3.2.Risultati sperimentali.....pag.39

CAPITOLO 3: Modello FEM

3.1. Messa a punto del modello FEM per la simulazione numerica del processo di estrusione idrostatica

<u>3.1.1. Prima fase</u>	pag. 45
<u>3.1.2. Seconda fase</u>	pag. 46
<u>3.1.3. Terza fase</u>	pag. 48
<u>3.1.4. Perfezionamento del modello: fase finale</u>	pag. 50
<u>3.1.4.1. Ulteriori considerazioni</u>	pag. 50

3.2. Modello definitivo

<u>3.2.1. Parametri tecnici del modello per simufact</u>	pag. 53
--	---------

CAPITOLO 4: Raccolta dati

4.1. Simulazioni software con differenti attriti

<u>4.1.1 Simulazione con attrito $\mu=0,157$ e 230 MPa</u>	pag. 63
<u>4.1.2 Simulazione con attrito $\mu=0,1157$ e 222.5 MPa</u>	pag. 65

CAPITOLO 5: Analisi dei risultati e conclusioni

5.1. Confronto tra dati sperimentali e FEM	pag. 67
---	---------

5.2. Conclusioni	pag. 71
-------------------------------	---------

5.3. Considerazioni

<u>5.3.1. Steady State</u>	pag. 72
<u>5.3.2. Pressione idrostatica</u>	pag. 74
<u>5.3.3. Attrito</u>	pag. 75

→ Appendice A: la prova di trazione	pag. 76
--	---------

→ Appendice B: olio usato in estrusione	pag. 77
--	---------

BIBLIOGRAFIA	pag. 78
---------------------------	---------

SITOGRAFIA	pag. 79
-------------------------	---------

Introduzione:

Peculiarità di un'economia incernierata sul modello economico capitalistico è la propensione della ricerca scientifica ad essere promossa prevalentemente dai grandi interessi economico-industriali. Non a caso, infatti, negli ultimi vent'anni grande attenzione è stata mirata verso il mondo delle micro-tecnologie.

Nel corso degli anni '90 si era cominciato ad osservare che il mercato mondiale dei prodotti legati alle micro tecnologie era aumentato con incrementi crescenti fino a raggiungere nel 2000 un volume stimabile in 25 miliardi di dollari. Una cifra significativa originata principalmente dai sistemi periferici (per esempio le più

moderne stampanti) dell'Information Technologies e dal settore medico/biomedicale. Nel medio-breve periodo, cioè fino al 2004-2005, questa crescita è proseguita con incrementi medi dell'ordine del 20% all'anno, con punte settoriali però anche di oltre il 40 per cento. I settori con il mercato più grande in assoluto rimangono le periferiche e il medico/biomedicale, ma si prevede che cresceranno più rapidamente le telecomunicazioni, il monitoraggio ambientale e la micro-meccatronica dell'industria dell'automazione e dell'autotrasporto e la micro-formatura.

Ciò ha spinto molte industrie a dirigere la loro attenzione su nuove tecnologie di produzione di micro-elementi, tra queste la micro-estrusione idrostatica vista come evoluzione delle attuali tecniche di micro-formatura.

Malgrado esista quindi ancora un largo spazio per le micro tecnologie, la tecnologia attuale è altresì l'estremo limite del percorso storico dell'industria manifatturiera tradizionale che si dovrà arrestare nel suo sviluppo verso l'infinitamente piccolo davanti ai limiti imposti dalle leggi fisiche. Per

esempio l'Associazione industriale americana dei semiconduttori predisse nel 2000 che se si voleva rispettare la legge di Moore, secondo cui ogni 18 mesi, raddoppia il numero di transistor inseriti in un microchip, entro il 2003-2004 le dimensioni dei circuiti integrati sarebbero arrivate a 0,1 micron, dove non è più sfruttabile la tradizionale tecnica fotochimica della litografia, poiché 0,1 micron corrispondono ai limiti estremi di sfruttamento delle lunghezze d'onda della radiazione attualmente usata per l'incisione litografica, che è alla base della tecnologia dei Mems. Quindi nel mondo industrializzato è iniziato un formidabile sforzo di ricerca nell'ambito di un



secondo livello, quello della nano-scala dell'ordine di 0,1-0,001 micron, cioè di miliardesimi di metro, per creare nuovi nano-materiali e macchine molecolari, cioè sistemi intelligenti dell'ordine di alcune centinaia o migliaia di atomi. Ciò richiede un approccio alla progettazione completamente rovesciato rispetto ai MemS. Infatti, invece di forzare le lavorazioni tradizionali verso il microscopico per ottenere sistemi sempre più piccoli, le nano-tecnologie partono da atomi e molecole, cioè dai mattoni fondamentali della nano-scala, per ottenere strutture ordinate.

Rimanendo nell'ambito del micro, e focalizzando l'attenzione nel particolare dell'industria europea è utile ricordare le parole dell'amministratrice dell'Ivam, (Interessengemeinschaft zur Verbreitung von Anwendungen der Mikrostrukturtechniken: gruppo d'interessi per la diffusione di applicazioni della micro tecnologia), la quale vede nella tendenza alla miniaturizzazione una mega-tendenza destinata ad assumere un valore tecnologico d'importanza crescente. Ad affascinare, e dunque a spingere l'orientamento intrapreso, sono qualità molto apprezzate quali minor peso, materiale ed energia e dunque costi inferiori. Ad essere richiesto è inoltre un requisito importante soprattutto per l'utenza del comparto dell'industria automobilistica ed elettrotecnica: più funzioni e volumi sempre più ridotti.

Nella fattispecie della produzione di fili ad uso industriale, prodotti per micro formatura, ed in particolare tramite micro-estrusione idrostatica; l'altra faccia della medaglia vede un aumento dei costi da sostenere per la produzione dei componenti legato all'acquisto di nuovi impianti dedicati, alla ricerca e sviluppo (necessaria per raggiungere l'ulteriore miniaturizzazione e la produzione industriale di massa dei nuovi prodotti), all'esigenza di un filo di partenza di qualità superiore (più puro e con un'accuratezza superficiale e dimensionale migliore) e di personale più qualificato.

Proprio al fine di ridurre al minimo i costi totali di realizzazione diminuendo le spese di sperimentazione dei modelli è divenuto d'uso comune studiare i fenomeni legati al micro-mondo tramite analisi agli elementi finiti. Ulteriormente a valutazioni meramente economiche un altro elemento che spinge nella direzione della simulazione software è l'impossibilità fisica di misurare fisicamente le grandezze in gioco a causa delle elevatissime pressioni che si sviluppano e alle moltissime variabili da considerare.

Il metodo degli elementi finiti si basa sul concetto di descrivere lo stato di deformazione di un sistema continuo mediante funzioni di spostamento o "funzioni di forma", definite in piccole regioni del "continuum". In quest'ottica le soluzioni sono formulate per ciascuna unità e combinate per ottenere la soluzione del corpo o della struttura originale. I vantaggi di un'analisi agli elementi finiti consistono nella possibilità di trattare problemi di campo relativi a:

- geometrie complesse, e ciò rappresenta il cuore e la potenza dei metodi FEM
- una larga varietà di problemi ingegneristici (di meccanica dei solidi, dei fluidi, del calore, di elettrostatica, ecc.)
- complesse condizioni di vincolo
- complesse condizioni di carico

Altresì gli svantaggi dell'analisi consistono:

- *nella impossibilità di generare una soluzione in forma chiusa e parametrizzabile del problema*
- *nelle approssimazioni della soluzione inerenti all'approccio ad elementi finiti utilizzato quali:*
- *errori di discretizzazione del dominio di forma non regolare mediante l'assemblaggio di elementi finiti di forma molto regolare (triangolare o rettangolare nel caso di problemi piani)*
- *errori di interpolazione della soluzione all'interno dei singoli elementi finiti mediante semplici funzioni polinomiali*
- *l'uso di procedure numeriche approssimate per il calcolo di quantità integrali sul dominio degli elementi (quadratura di Gauss, per esempio)*
- *negli errori connessi alle procedure di calcolo utilizzate:*
- *errori di calcolo inerenti al numero limitato di cifre significative con cui lavora un computer ed ai conseguenti troncamenti decimali delle quantità numeriche utilizzate*
- *per lo stesso motivo, la difficoltà numerica di operare per il computer con numeri estremamente grandi ed estremamente piccoli*
- *nei facili errori di modellazione cui l'utente è soggetto*

Nel complesso, ai fini dell'approfondimento delle conoscenze sulle dinamiche intrinseche del processo di micro-estrusione in esame, ed in particolare sullo studio dei fenomeni di attrito coinvolti, il ricorso all'analisi agli elementi finiti risultata essere la scelta più indicata nell'ambito della ricerca universitaria, che non dispone di fondi adeguati all'acquisto di strumentazioni costose ad alta precisione.

Obiettivo della tesi:

Scopo primario dell'analisi agli elementi finiti è quello di riprodurre il più fedelmente possibile processi reali al simulatore. Nella fattispecie, al fine di sviluppare elaboratori in grado di simulare la realtà con un'elevata precisione, è necessario elaborare un modello che permetta di riprodurre tutte le condizioni al contorno di una prova sperimentale. Non è strettamente necessario riprodurre al simulatore gli stessi elementi utilizzati in laboratorio, ma altresì risulta fondamentale ricreare gli stessi vincoli in gioco durante il processo; nella fattispecie durante un processo di micro-estrusione idrostatica.

Obiettivo di questa attività sperimentale è quello di realizzare un modello reologico tribologico assial simmetrico adatto ad essere utilizzato in ambiente Simufact mediante confronto con una prova sperimentale di micro-estrusione idrostatica di rame, di cui si conoscono le condizioni al contorno, al fine di estrapolare il coefficiente di attrito del rame a contatto con la matrice di estrusione di modo da poter verificare le teorie sull'effetto scala che coinvolge l'aumento dell'attrito efficace nel micro mondo.

Il modello deve essere in grado di riprodurre una pressione costante distribuita su tutta la superficie libera di una billetta prima dell'ingresso nella matrice e inoltre deve estrudere, previo l'inserimento di un apposito coefficiente di attrito, la stessa quantità di materia estrusa sperimentalmente.

CAPITOLO 1

Micro formatura e Micro estrusione idrostatica

1.1.La Micro formatura

Con il termine micro formatura s'intende la produzione di parti o strutture con almeno due dimensioni significative caratterizzate da lunghezza inferiore al millimetro.

L'interesse per le micro-lavorazioni, in particolare di micro-formatura, ha visto nell'ultimo decennio un notevole sviluppo. La realizzazione di sistemi di dimensioni estremamente ridotte consente non soltanto grandi vantaggi d'ingombro, ma in alcuni casi il raggiungimento di prestazioni altrimenti impossibili da ottenere. Tali sistemi trovano impiego in molteplici settori: dalla micro-meccanica, all'elettronica, alla biomedica. Negli anni novanta iniziò l'interesse per la produzione di micro-componenti, che venivano realizzati soprattutto per tornitura o fresatura e non per micro formatura in quanto le conoscenze sulle tecnologie di formatura non possono essere trasferite al micro-mondo.

Si è notato che la semplice riduzione nelle dimensioni dei pezzi da lavorare non porta ad un ridimensionamento corretto, in quanto le interazioni tra materiale, lubrificanti e strumenti di deformazione massiva sono complesse e differiscono dalla macro estrusione; pertanto i modelli nel mondo macroscopico non possono essere direttamente trasferiti al mondo microscopico e devono essere opportunamente modificati ed ottimizzati.

Un sistema di micro formatura può essere suddiviso in quattro gruppi:

- il materiale;
- gli strumenti;
- il processo;
- i macchinari e l'attrezzatura.

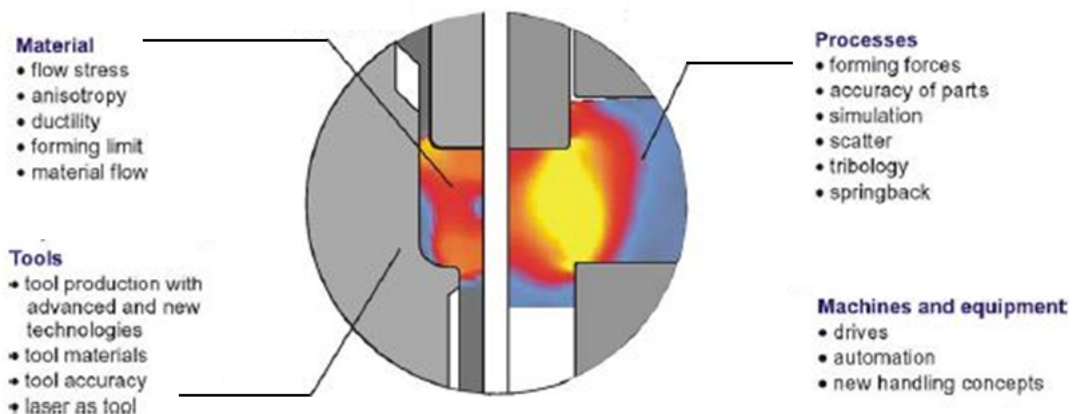


Figura 1.1: La Micro formatura

Il comportamento del materiale non è lineare poiché soggetto a size effects che si presentano durante il ridimensionamento. La tensione di flusso, la duttilità, il limite di formabilità e di conseguenza il flusso del materiale dipendono dal nuovo rapporto tra le dimensioni del campione e la sua microstruttura.

1.1.1.Limiti degli utensili da micro formatura

I problemi concernenti gli strumenti si riferiscono alla difficoltà di realizzare utensili di dimensioni ridotte, ma precisi.

Particolarmente difficoltosa risulta essere la realizzazione delle complesse forme interne nelle matrici di estrusione con tolleranze ristrette ed una finitura superficiale soddisfacente.

Un lato interessante della miniaturizzazione degli utensili è la possibilità di realizzare gli stessi con materiali di qualità superiore, in quanto le limitate dimensioni permettono di mantenere sotto controllo i costi.

Il problema principale per i macchinari e gli strumenti sono la precisione unita all'elevata velocità. Le difficoltà sono amplificate dal fatto che la superficie dove afferrare il micro componente risulta estremamente piccola; inoltre il peso esiguo di queste parti mette in luce problemi di distacco tra pezzo e attrezzatura causati dall'importanza che vengono ad assumere le forze di adesione.

Il processo dipende in buona percentuale dal materiale, e gli effetti sul materiale dipendono dal processo, anche se ci sono ulteriori fattori di disturbo quali le forze, gli elementi della tribologia e l'accuratezza dei pezzi ottenuti.

Molti studi hanno rivelato la natura e il meccanismo degli size effects i quali sono dovuti a due particolari fattori quali le tensioni sul materiale e l'attrito.

1.1.2.Il comportamento del materiale

Nella formatura massiva, il comportamento del materiale cambia con il ridimensionamento delle grandezze, dovuto ai cosiddetti size effects, cioè effetti dimensionali. I size effects influenzano le tensioni di flusso, l'anisotropia e la duttilità, impedendo l'applicazione del know-how relativo ai processi tradizionali su micro-scala.

Altri parametri, quali la microstruttura del materiale e la topografia, restano costanti nella micro formatura.

Al fine di analizzare il comportamento del materiale al presentarsi dei size effects è possibile creare:

un campione sul quale viene effettuato un trattamento termico in modo da aumentarle dimensioni della grana mantenendo costanti le dimensioni della geometria (grain size scaling);

un campione in cui la dimensione della grana rimane costante al variare delle dimensioni della geometria del campione (specimen size scaling)

Prendendo in esame campioni miniaturizzati usati per rilevare il comportamento del materiale sottoposto a tensione, si notano size effects diversi: diminuendo le dimensioni del campione si nota una riduzione delle tensioni di flusso.

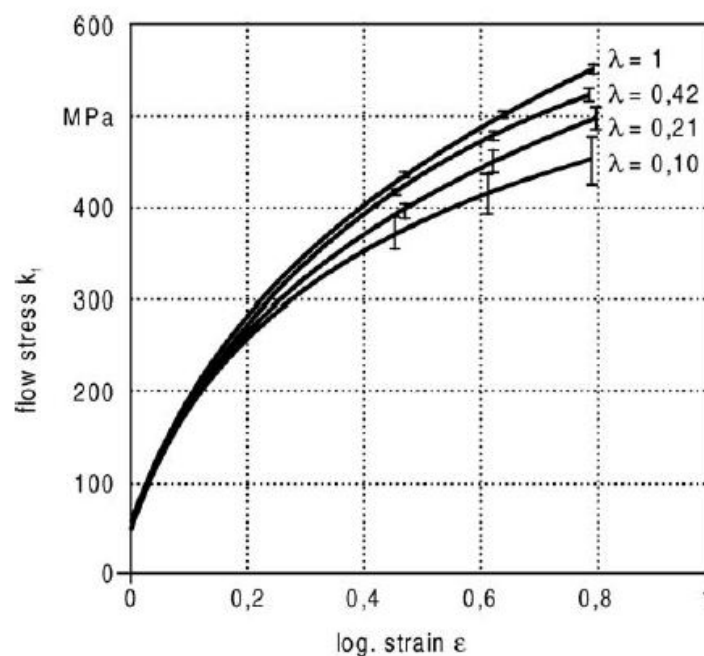


Figura 1.2: Andamento delle tensioni di flusso

Ciò è stato provato da Kals et al. nel campo delle leghe metalliche applicando delle prove di trazione a dei provini di CuZn_{15} e di $\text{CuNi}_{18}\text{Zn}_{20}$ per componenti elettronici. Kocanda et al. hanno studiato il comportamento usando provini solo di rame, Raulea et al. con l'alluminio, Picard e Micheal hanno realizzato delle prove di stampaggio con fogli di lega di rame di diversi spessori, mentre Geiger ha testato prove di ricalcatura e di trazione su provini di CuZn_{15} e CuSn_6 , riducendo le dimensioni del campione iniziale con la teoria della similarità, cioè moltiplicando le dimensioni del campione e i parametri dell'attrezzatura per il fattore di scala λ , mentre le forze di processo sono in relazione con λ^2 . Il decremento delle tensioni viene definito surface layer model.

I grani che si trovano sulla superficie di un campione sottoposto a trazione sono meno vincolati rispetto a quelli presenti nel cuore del provino. Le dislocazioni si muovono attraverso i grani durante la deformazione e si accumulano sui bordi grano, ma non nella superficie libera. Questo porta ad una minore tempratura e minore resistenza alla deformazione superficiale. Al diminuire delle dimensioni del campione, con le dimensioni della microstruttura invariate, aumenta il numero dei grani superficiali, perciò diminuiscono le curve di tensione di flusso.

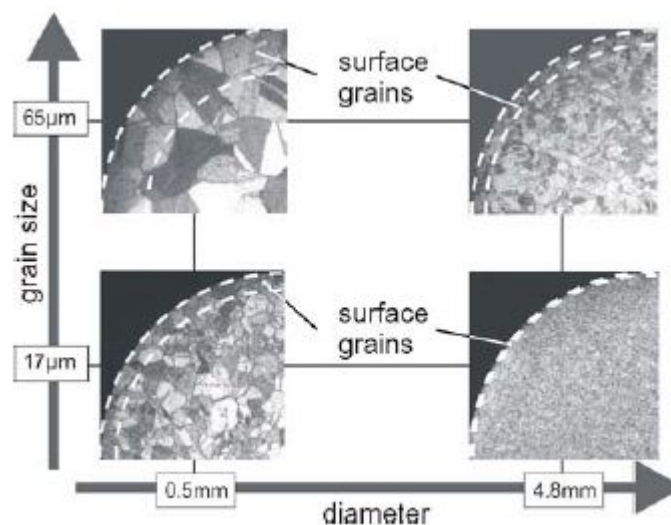


Figura 1.3: La superficie del grano

Si è inoltre notato che i *size effects* nei processi di deformazione plastica possono manifestarsi in due modi: (a) con differenze nella risposta del materiale e (b) con differenze nell'attrito superficiale. Per comprendere il fenomeno è quindi necessario utilizzare una tecnica sperimentale che permetta di separare questi due aspetti.

Una ricerca dell'Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e Produzione ha condotto una ricerca focalizzata sul coefficiente di attrito dinamico e che presenta una metodologia sperimentale che permette di valutare la dipendenza di questo parametro dalla dimensione dei componenti. L'attrito, in particolare quello dinamico, è fondamentale in molti processi tecnologici sia per asportazione di truciolo sia per deformazione plastica.

I risultati sperimentali hanno permesso di dedurre che i coefficienti di attrito non variano significativamente con la dimensione del grano e l'effetto di scala è dunque da imputare ad una differente risposta plastica del materiale, come evidenziato da analisi microstrutturali effettuate su perni ottenuti per micro-estrusione. L'ipotesi

d'isotropia del materiale cessa di essere valida quando ogni grano del materiale occupa porzioni notevoli del volume dei micro perni. La dimensione relativa, la posizione e l'orientamento dei singoli grani hanno, infatti, un impatto rilevante sul processo di estrusione a queste scale.

1.1.3. Tribologia

La tribologia è la scienza che studia l'attrito, la lubrificazione e l'usura di superfici a contatto e in moto relativo e gioca un ruolo fondamentale nella micro formatura.

1.1.3.1. L'attrito

L'attrito è una forza dissipativa che esercita la resistenza al moto relativo di due corpi che strisciano uno sull'altro sotto l'azione di un carico normale. I processi di lavorazione dei metalli sono molto soggetti ad attrito a causa dei moti e delle forze presenti tra utensili, stampi e pezzi. L'attrito comporta dissipazione di energia che genera calore, portando ad un aumento di temperatura, possibile causa di difetti di lavorazione e condiziona il flusso e la deformazione dei materiali. Può rappresentare anche un fattore positivo, ad esempio nella laminazione.

Esistono varie teorie per spiegare il fenomeno dell'attrito. Un modello elementare è quello di Coulomb, che afferma che la causa dell'attrito sia l'interazione meccanica tra le asprezze delle superfici a contatto.

La teoria adesiva dell'attrito si basa sull'osservazione che due superfici metalliche pulite e non lubrificate si toccano solo in corrispondenza di una frazione della loro area nominale di contatto. Il carico statico all'interfaccia è sopportato solamente dalle asperità che si toccano. La somma delle aree di contatto viene detta area reale di contatto A_r .

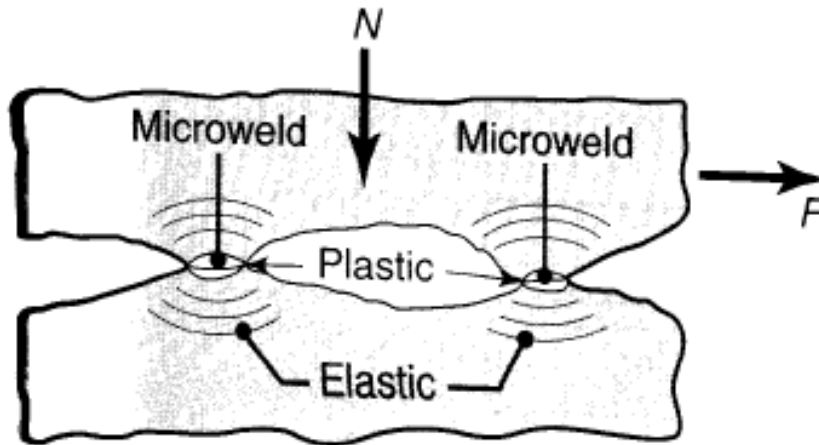


Figura 1.4: Andamento delle tensioni sull'area di contatto

Per carichi normali bassi e con un'area di contatto estesa, la tensione normale in corrispondenza delle giunzioni è bassa e quindi si mantiene in campo elastico. Quando il carico cresce, la tensione aumenta portando eventualmente le giunzioni a deformazione plastica. Accrescendo il carico, l'area di contatto delle asperità aumenta e si formano nuove giunzioni.

Il forte contatto delle asperità genera un legame adesivo e la forza di tale legame dipende dalle proprietà fisiche e meccaniche dei metalli, dalla temperatura e dalla natura dello spessore .

Lo scorrimento tra due corpi sottoposti ad un carico normale N è possibile solo applicando una forza tangenziale F . secondo la teoria adesiva dell'attrito, F è la forza di taglio richiesta per rompere le giunzioni e viene chiamata forza d'attrito. Il coefficiente d'attrito μ è definito all'interfaccia come:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau A_r}{\sigma A_r} = \frac{\tau}{\sigma}$$

dove τ è la resistenza a taglio della giunzione e σ è la tensione normale.

Un'interfaccia molto resistente richiede una forza tangenziale elevata per vincere l'attrito e provocare lo scorrimento relativo. Il coefficiente d'attrito può esser ridotto sia diminuendo la resistenza a taglio, sia aumentando la durezza dei materiali in contatto, rappresentata da σ .

In assenza di disturbi, l'area reale di contatto può idealmente crescere fino ad eguagliare l'area nominale di contatto, A . Tale area rappresenta la massima area di contatto possibile e la forza d'attrito risulta pari alla forza necessaria per tagliare il materiale. In questo modo viene a realizzarsi la condizione di sticking tra le due

superfici, cioè che lo sforzo d'attrito ha raggiunto il suo valore limite. La condizione di sticking su un'interfaccia mobile non significa necessariamente completa adesione all'interfaccia come nella saldatura; piuttosto indica che la tensione d'attrito sulla superficie ha raggiunto la tensione di snervamento del materiale k .

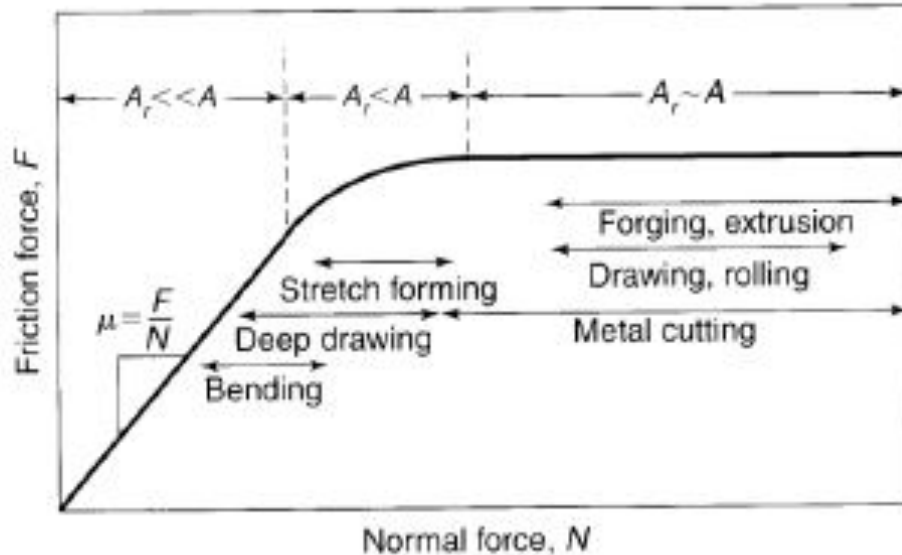


Figura 1.5: Andamento della forza di attrito

Si può notare che quando l'area reale di contatto A_r si avvicina all'area nominale A , la forza d'attrito raggiunge il valore massimo e si stabilizza.

Un modello più recente si basa sulla definizione di un fattore di attrito m :

$$m = \frac{\tau_i}{k}$$

Dove τ_i è la resistenza a taglio dell'interfaccia e k è la tensione di snervamento a taglio del materiale più tenero tra le due superfici.

In tale modello, quando $m=0$ non è presente attrito, mentre quando $m=1$ si ha la completa adesione tra le due superfici.

Il valore di m è indipendente quindi dalla forza e dalla tensione normale perché la tensione tangenziale di snervamento di uno strato sottile di materiale non è influenzata dalla grandezza della tensione normale.

1.1.2.3. Double cup-extrusion

Il coefficiente d'attrito viene generalmente determinato per via sperimentale sui campioni specifici o durante i processi di lavorazione. Il size effect nell'attrito è stato studiato per la prima volta utilizzando la ring compression test, ovvero la prova di compressione dell'anello nella quale si sottolineava un aumento del coefficiente d'attrito al diminuire delle dimensioni del campione.

Successivamente si svolse uno studio più approfondito utilizzando la double cup extrusion (DCE). Questo test fornisce risultati più rappresentativi dell'attuale situazione nella micro-estrazione diretta in quanto genera un'elevata espansione superficiale ed elevate pressioni, superiori rispetto al "ring compression test".

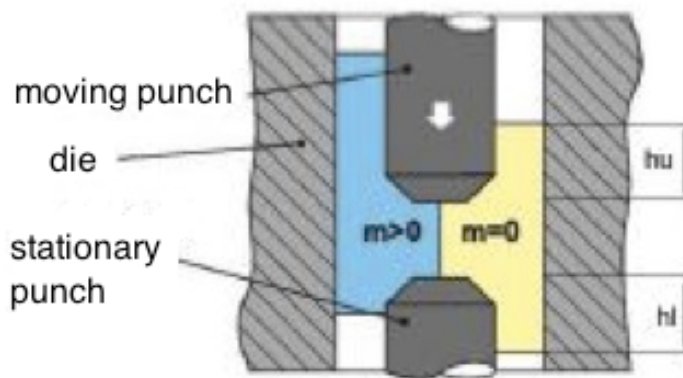


Figura 1.6: Double cup extrusion

Durante l'esperimento, una billetta cilindrica viene posizionata in una matrice tra un punzone mobile ed uno stazionario di identiche dimensioni. Il punzone superiore si muove verso il basso causando la deformazione del materiale plasticamente che va a formare due coppe con altezza rispettivamente h_u e h_i .

Nel caso teorico di assenza di attrito ($m=0$), entrambe le coppe avrebbero la stessa altezza, mentre in condizioni di sticking (condizione di incollaggio superficiale, $m=1$) il materiale fluisce solo sulla coppa superiore.

Se $0 \leq m \leq 1$ l'altezza della coppa superiore e di quella inferiore raggiungono valori intermedi rispetto ai casi estremi illustrati in figura; il materiale fluisce a formare entrambe le coppe, ma quella superiore avrà altezza maggiore.

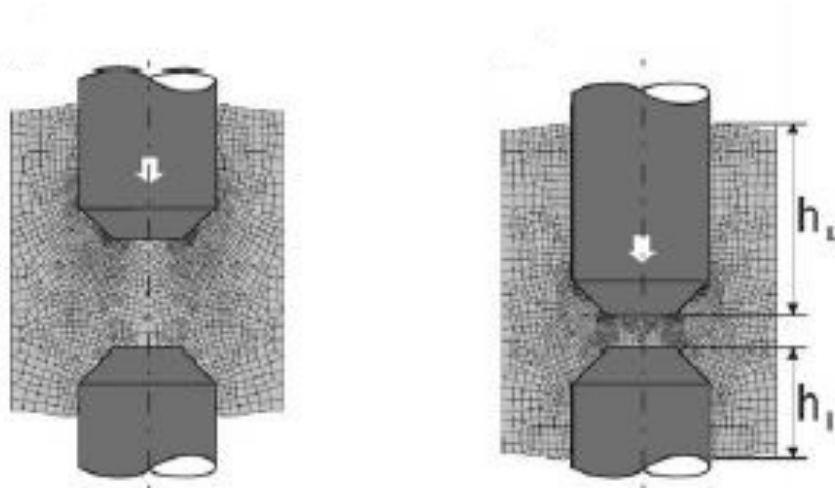


Figura 1.7: Double cup extrusion

Questo comportamento si spiega con le diverse velocità relative tra punzone fisso e mobile, matrice e billetta.

La variazione nelle altezze delle coppe, espressa con il rapporto tra le altezze h_u/h_l assume valori apprezzabili anche se l'attrito varia di poco.

E' però importante notare come la variazione di altezza durante il processo non avviene in modo graduale o proporzionale, a causa delle condizioni d'attrito non costanti durante la corsa del punzone mobile.

Per eseguire i test sono state utilizzate billette in CuZn15 geometricamente simili con diametro di 4, 2, 1 e 0.5 mm e con rapporto tra il diametro della billetta D_0 e la sua altezza h_0 unitario, cioè $D_0/h_0=1$. Le dimensioni medie del grano sono $5\mu\text{m}$ e la rugosità superficiale si attesta tra $Ra=0.025\mu\text{m}$ e $0.05\mu\text{m}$.

Una volta eseguita l'estrusione, le due parti vengono sezionate a metà.

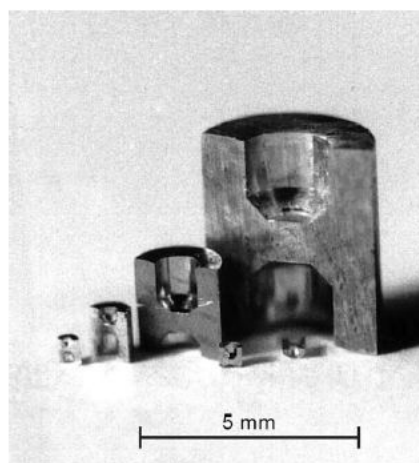


Figura 1.8: La superficie del grano

Poiché i campioni sono geometricamente simili, il cambiamento nelle condizioni di attrito con la miniaturizzazione del campione può essere direttamente determinato comparando i rapporti tra le altezze delle coppe.

Per avere un'idea del fattore di attrito m corrispondente ad un certo valore del rapporto tra le altezze delle coppe è stata eseguita una simulazione numerica con il software agli elementi finiti (FEM) DEFORM-2D impiegando i dati ottenuti durante gli esperimenti di formatura con il DCE test.

Il grafico in fig.1.9 riporta il valore del rapporto tra le altezze delle coppe al variare dell'avanzamento relativo del punzone.

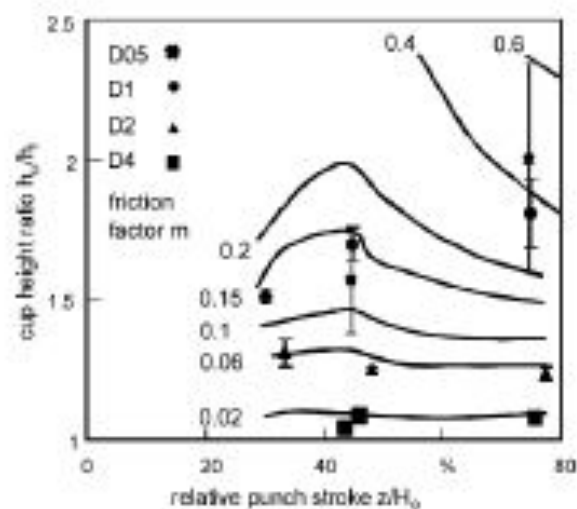


Figura 1.9: La superficie del grano

Si può facilmente notare come il rapporto tra le altezze, e quindi l'attrito, cresca al decrescere delle dimensioni del provino. Il DCE test conferma le osservazioni di Messner, cioè che l'attrito aumenta con la riduzione delle dimensioni del campione e inoltre si verifica un incremento della dispersione dei risultati.

1.1.3.3. Open and closed lubricant pockets

Per spiegare il comportamento del coefficiente d'attrito nella riduzione dimensionale è stato sviluppato il modello degli Open and Closed Lubricant Pockets, denominato anche dynamic and static Lubricant Pockets.

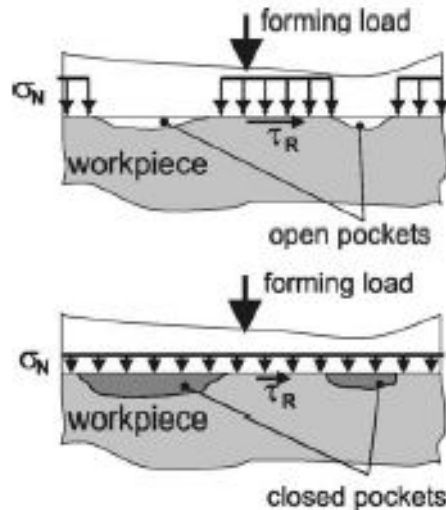


Figura 1.10: La superficie del grano

Tale modello si basa sul fatto che quando un carico è applicato su una superficie lubrificata di una billetta, le asperità, dette picchi di rugosità, cominciano a deformare plasticamente così che si verifica un aumento della pressione del lubrificante intrappolato nelle valli rugose.

Questo è vero fintanto che le depressioni generate dalla rugosità formano delle "micro tasche" chiuse dette closed lubricant pockets, impedendo al lubrificante di fuoriuscire. Contemporaneamente le micro-tasche localizzate agli estremi della superficie non possono trattenere il lubrificante, in quanto sono direttamente collegate con l'esterno. Tali zone prendono il nome di "open lubricant pockets": in questo caso con l'aumento della pressione il lubrificante sfugge, pregiudicando la possibilità di trasmettere il carico su tutta la superficie. Il carico va quindi ad agire solo sulle asperità, provocando su di esse una pressione normale superiore ed incrementando così le forze di attrito.

Al contrario i "closed lubricant pockets" non hanno sbocco sui bordi della superficie, intrappolando il lubrificante nelle micro-tasche che si vengono a formare. Il lubrificante è quindi pressurizzato ed aiuta a trasmettere il carico, riducendo la pressione normale sulle asperità e quindi l'attrito.

Si può pertanto concludere che i “closed lubricant pockets” aiutano a ridurre l’attrito, diversamente dagli “open lubricant pockets” i quali sono presenti fino ad una certa distanza dal bordo della superficie.

Applicando questo modello al DCE test precedentemente descritto, con la riduzione delle dimensioni del provino si verifica un aumento del rapporto tra open e closed lubricant pockets; nel caso più estremo i “closed lubricant pockets” possono scomparire del tutto.

E’ infatti noto che in provini di dimensioni diverse ma aventi la stessa topografia superficiale, la profondità dell’area interessata dagli “open lubricant pockets” rimane costante, denominata x .

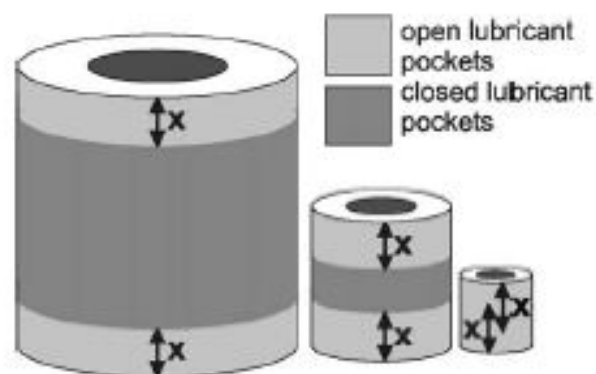


Figura 1.11: La superficie del grano

Questo fenomeno può essere facilmente confermato attraverso il rilevamento della rugosità superficiale del provino dopo l’estrusione: nelle due regioni ai bordi del campione si evidenzia, infatti, un abbassamento delle asperità (e quindi del valore della rugosità) indicando la presenza degli “open lubricant pockets”. La misura della profondità di tale regione in provini diversi risulta essere costante, indipendentemente dalle dimensioni di questi ultimi.

Con la progressiva miniaturizzazione dei provini, anche nel caso di esperimenti che mantengono il diametro D_0 costante e variandone l’altezza si verifica la riduzione e in seguito la scomparsa dell’area centrale di “closed lubricant pockets” portando ad un incremento significativo dell’attrito.

Bisogna comunque riportare che il modello appena esposto è valido solamente nel caso di lubrificanti fluidi. Utilizzando lubrificanti solidi questi non possono fuoriuscire dagli “open lubricant pockets” che, di fatto, possono essere paragonati ai “closed

lubrificant pockets”:come risultato si osservano valori dell’attrito non influenzati dagli effetti dimensionali.

1.1.3.4.Riscaldamento dovuto all’attrito

L’energia dissipata per vincere l’attrito viene sperperata in gran parte sotto forma di calore, mentre la restante rimane come energia interna. Il calore prodotto dall’attrito provoca un innalzamento della temperatura e una redistribuzione del gradiente termico. Tale fenomeno è dovuto non solo alla frizione, ma anche alla velocità di lavorazione, dalla rugosità del materiale e dalle sue proprietà fisiche.

1.1.3.5. Lubrificazione

Nelle lavorazioni dei materiali, l’interfaccia tra utensili, matrici, stampi e pezzi è soggetta a molte variabili, tra le quali le più importanti sono:

- Pressione di contatto, che può assumere valori variabili dal campo elastico a multipli della tensione di snervamento del materiale lavorato.
- Velocità, che ha un range di variabilità molto elevato.
- Temperatura, che muta tra la T_{ambiente} alla T_{fusione} del materiale.

Quando due superfici strisciano uno contro l’altra in condizioni di pressioni, velocità e temperature elevate e in assenza di strati protettivi all’interfaccia, attrito ed usura risultano consistenti, anche se possono esser ridotti interponendo tra le due superfici una sostanza in grado di diminuire la tensione di taglio necessaria per permettere lo strisciamento, detta lubrificante.

Le funzioni principali dei lubrificanti per le lavorazioni metallurgiche sono:

- Ridurre l’attrito in modo da ridurre anche le forze e l’energia richieste e prevenire l’incremento di temperatura.
- Ridurre l’usura e il grippaggio.
- Migliorare il flusso di materiale negli stampi.
- Agire come barriera termica tra le superfici di pezzi, stampe i matrici.
- Fungere da agente di distacco per favorire l’estrazione dei pezzi dagli stampi.
- Proteggere le superfici dalla corrosione.

Nella lavorazione metallurgica si possono usare varie topologie di lubrificanti.

Tra i fluidi per la lavorazione troviamo:

- gli oli lubrificanti caratterizzati da un'elevata resistenza dello strato fluido e buona bagnabilità. Possono essere minerali, animali o vegetali;
- le emulsioni, ottenute mescolando due liquidi insolubili e additivi;
- le soluzioni sintetiche, costituite da componenti inorganici e prodotti chimici diluiti in acqua;
- i saponi, i grassi e le cere.

I fluidi lubrificanti vengono mescolati con vari additivi, compresi agenti antiossidanti, anticorrosivi, antisettici, anti schiume e contro l'odore.

Tra i lubrificanti solidi si distinguono:

- La grafite, che ha bassa resistenza a taglio lungo i suoi piani di sfaldamento e quindi un basso coefficiente d'attrito.
- Il bisolfuro di molibdeno.
- I rivestimenti in materiali polimerici e metalli teneri.
- Il vetro.
- I trattamenti superficiali di conversione.
- Il fullerene.

1.1.3.6. Modello meccanico reologico

Le teorie espone finora sull'influenza degli effetti dimensionali sull'attrito hanno un carattere qualitativo; per sviluppare un approccio più dettagliato e di tipo quantitativo è stato teorizzato un modello meccanico-reologico.

Il modello preso in considerazione nasce da una legge generalizzata sull'attrito sviluppata da Wanheim/ Bay:

$$\tau = f \alpha_{RC} k$$

dove

τ : tensione di flusso del materiale

f: il coefficiente d'attrito

k: tensione di snervamento del materiale

α_{RC} : il rapporto tra l'area di contatto reale e l'area di contatto apparente.

La legge(numero) si può esprimere anche come:

$$\frac{\tau}{k} = f \alpha_{RC} = m$$

L'obiettivo dello studio svolto è sottolineare che il coefficiente d'attrito m aumenta di 20 volte nella riduzione dal modello macro al micro, diminuendo il campione di 8 volte nella geometria.

A differenza delle precedenti trattazioni sull'attrito, il parametro m viene sostituito dal prodotto $f * \alpha_{RC}$, dove entrambi i fattori sono affetti dall'effetto dimensionale e in particolare α_{RC} risulta dominante.

La tensione normale σ è un parametro molto influente nell'analisi delle legge(num), in quanto è responsabile del livellamento delle asperità, regolando l'entità del rapporto α_{RC} . Per rappresentare la legge si traccia la tensione d'attrito rispetto alla pressione normale, entrambe normalizzate alle corrispondenti tensioni k e k_f rispettivamente.

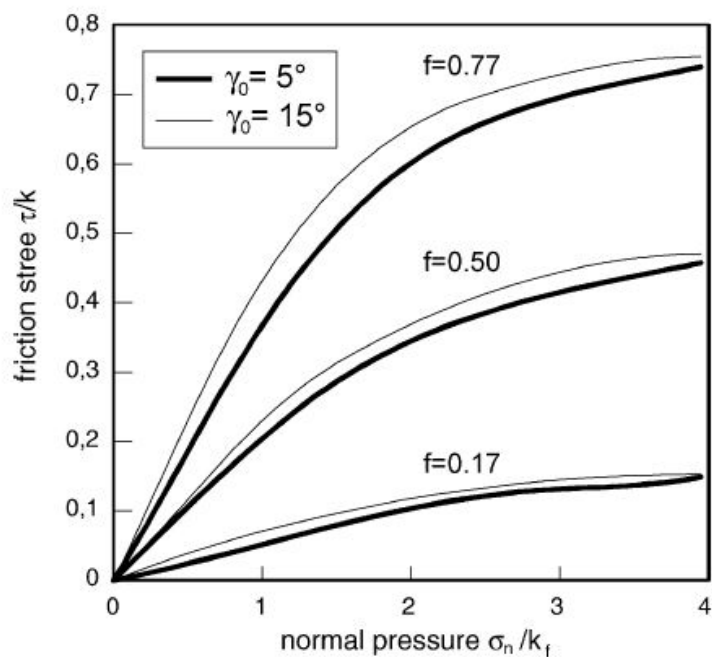


Figura 1.12: Andamento forza di attrito

Da questo grafico, la funzione corrispondente di α_{RC} può essere ottenuta Via EQ. (1), nella figura 1.2 dove si nota l'incidenza di un altro fattore geometrico, cioè l'angolo medio di asperità γ_0 , compreso fra i 5° e i 15° .

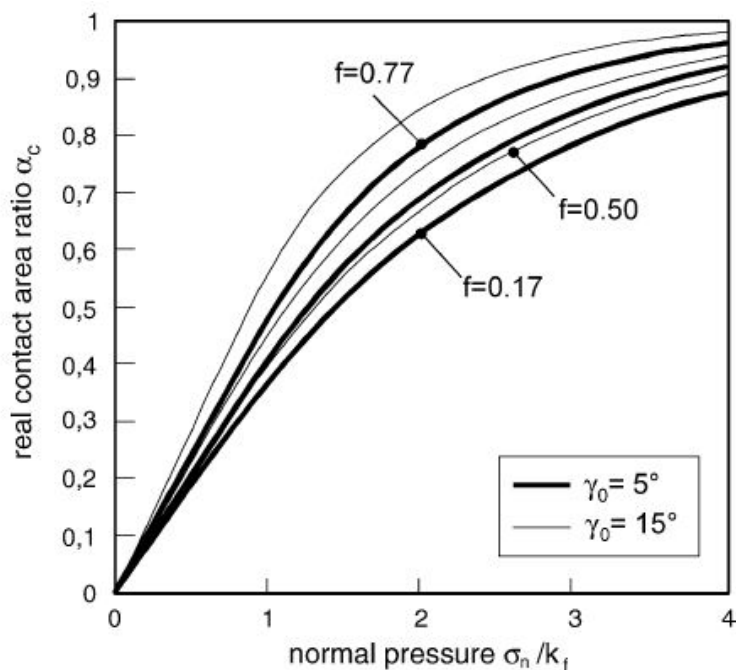


Figura 1.13: Area di contatto / Pressione Normale

Il parametro α_{RC} , rappresentato precedentemente, può essere scritto in forma generale come:

$$\alpha_{RC} = \frac{\tau}{k_f} = \psi \left(\frac{\sigma_n}{k_f}, f \right)$$

I grafici precedenti sono validi solamente nel caso in cui le pressioni normali siano interamente agenti sulla RCA, cioè real contact area.

Nel caso vi sia la presenza di lubrificante, ricordando il modello degli open and closed lubricant pockets, questa condizione non è verificata in quanto parte della pressione viene scaricata anche negli avvallamenti delle asperità superficiali tramite il lubrificante stesso. Vi è quindi un ulteriore parametro da considerare, ossia la pressione idrostatica, che agisce riducendo la pressione sull'area reale di contatto e di conseguenza l'attrito.

La pressione normale σ_n che agisce sull'intera superficie in condizioni di lubrificazione quindi è data dalla relazione:

$$\sigma_n = \sigma_n^0 + p$$

dove σ_n^0 rappresenta la tensione che, in assenza di un'adeguata lubrificazione, porta ad ottenere lo stesso valore di α_{RC} e p rappresenta la frazione di tensione dovuta alla pressione idrostatica.

In considerazione del modello degli open and closed lubricant pockets si sviluppa una relazione più dettagliata per descrivere σ_n :

$$\sigma_n = \sigma_n^0 + \left(1 - \frac{1-\alpha_{RC}}{\lambda}\right) p$$

dove λ rappresenta il fattore di scala.

Il modello appena esposto permette di analizzare l'influenza della riduzione dimensionale sull'attrito, altrimenti non valutabile con le teorie tradizionali. Infatti, senza scomporre il fattore d'attrito m in due componenti una delle quali va a considerare la porzione di area reale di contatto tra le superfici, non sarebbe possibile legare analiticamente gli effetti dimensionali (inglobati tramite il fattore di scala λ) con la variazione nei valori dell'attrito.

1.2.Estrusione

La tecnica di formatura estrusiva è classificata entro quelli che sono i parametri della deformazione massiva, caratterizzata quindi da sensibili deformazioni della sezione del pezzo sottoposto a deformazione plastica, quindi permanente, e da un recupero elastico trascurabile dovuto alle presenza di una zona soggetta a deformazione plastica molto maggiore della zona sottoposta a deformazione elastica.

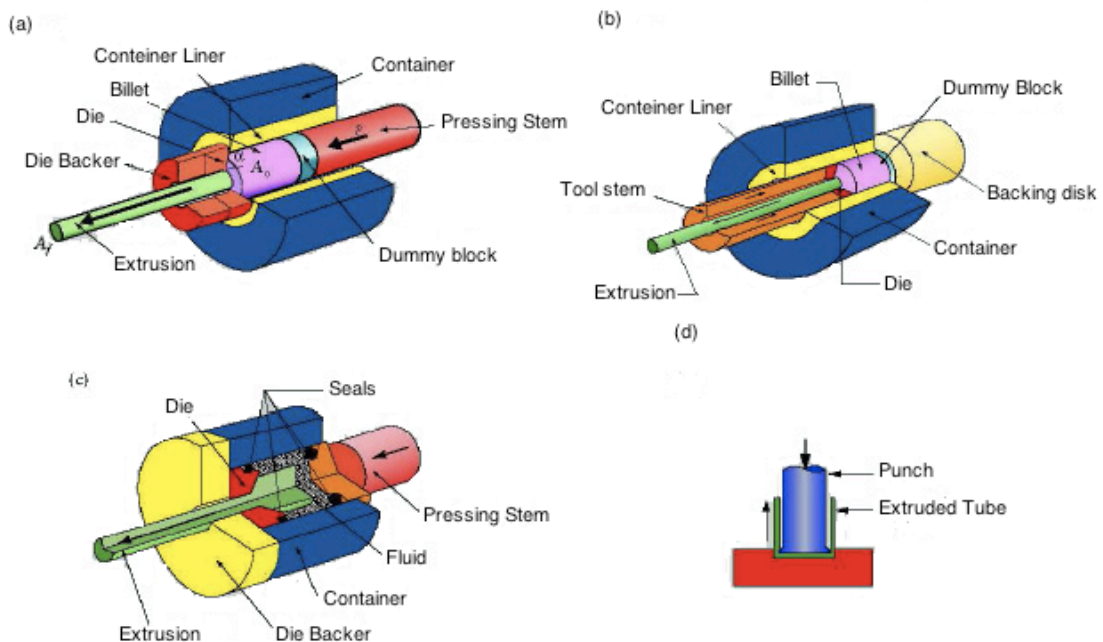


Figura 1.14: Tipologie di estrusione: (a)diretta; (b)inversa; (c)idrostatica; (d)ad impatto

L'estrusione è quindi un processo di produzione industriale di deformazione plastica che consente di produrre pezzi a sezione cilindrica (tubi, profilati). Essa è utilizzata

per i materiali metallici come l'acciaio, l'alluminio o il rame, la gomma la plastica e altre produzioni.

Consiste essenzialmente nel forzare per compressione il materiale a passare attraverso matrice o filiera che riproduce la forma esterna del pezzo che si vuole ottenere. Se la sezione di questo è cava, sarà presente un'anima che riprodurrà il profilo della cavità interna. All'uscita dalla matrice il materiale verrà raffreddato o, nel caso della gomma, sottoposto a vulcanizzazione (lavorazione della gomma che induce la modificazione della conformazione molecolare del polimero alla quale è dovuto l'aumento di elasticità e resistenza a trazione, la soppressione di proprietà negative quali l'abrasività e l'appiccicosità oltre che una maggiore resistenza agli effetti dell'ossigeno atmosferico e a molte sostanze chimiche). La compressione del materiale a monte della matrice è ottenuta, per la gomma e la plastica, da apparecchiature a semplice o doppia vite senza fine (vite di Archimede), che spingono il materiale verso la testa di estrusione; questo macchinario è appunto chiamato estrusore. Nel caso della plastica si introduce il materiale in granuli o in polvere, il calore prodotto dall'attrito e da resistenze elettriche ne causa la "fusione" (o meglio il "rammollimento"). Nel caso delle fibre tessili la testa di estrusione è chiamata filiera. Per i metalli si usano macchine a pistone.

Mediante opportuni accorgimenti (matrici con parti mobili) si riescono ad ottenere profilati in gomma a sezione variabile, come ad esempio alcuni tipi di guarnizione per le porte degli autoveicoli. Inoltre l'estrusione è anche utilizzata per la produzione di pre forme per la successiva forgiatura in stampi chiusi e possono per esempio venire fabbricate piastre, tubi e profilati senza saldature con sezione costante per tutta la loro lunghezza, ma anche guide in laminato plastico o tubi flessibili di lunghezza in definita. In fase di progettazione della matrice bisogna tener presente tre obiettivi fondamentali: la realizzazione di un flusso di materiale uniforme e scorrevole, la stabilità dimensionale della matrice e una buona finitura superficiale dell'estruso.

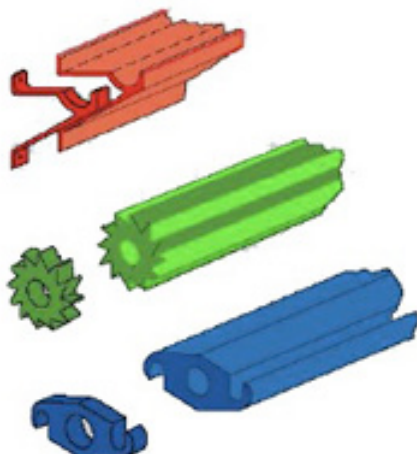




Figura 1.15: Esempi di profilati estrusi

Infine, in fase di progettazione, è necessario tenere presente l'influenza della forma nel processo estrusivo la quale influenza la velocità di deformazione e, se il processo è a caldo, il profilo di temperatura del pezzo.

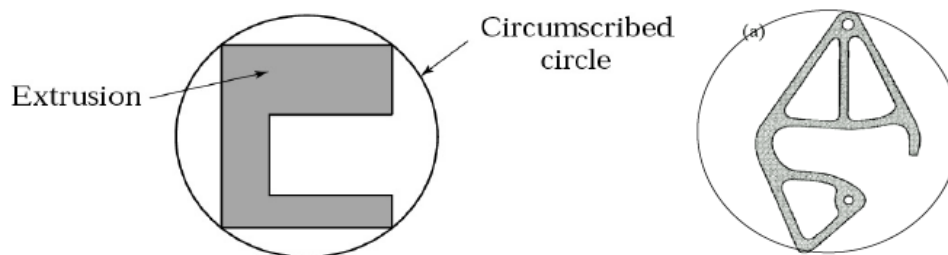


Figura 1.16: E' evidenziato il CCD (circumscribing circle diameter): cerchio di diametro minimo che contiene la forma. E' un parametro che esprime la dimensione della geometria del componente da realizzare; tale parametro fornisce anche una stima della potenza della pressa da utilizzare.

1.2.1. Meccanica dell'estrusione :

- Rapporto di estrusione definito come: $R = \frac{A_0}{A_f}$
- Deformazione reale definita come: $\epsilon_1 = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right) = \ln R$
- L'energia dissipata per unità di volume nella deformazione: $u = Y\epsilon_1$
- Il lavoro quindi vale: $L = A_0 L_0 Y \epsilon_1 = p A_0 L_0$

- dove p è la pressione del pistone e vale: $p = u = Y \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) = Y \ln R$

1.2.2. Effetto dell'angolo di entrata (figura 1.17):

- La forza totale (a) richiesta per l'estrusione è funzione dell'angolo dello stampo o matrice.
- La forza nel processo ideale non dipende dall'angolo (b)
- La forza richiesta per il lavoro di deformazione ridondante (c) cresce con l'angolo.
- La forza richiesta per vincere l'attrito (d) cala con il crescere dell'angolo in quanto diminuisce la lunghezza del percorso.

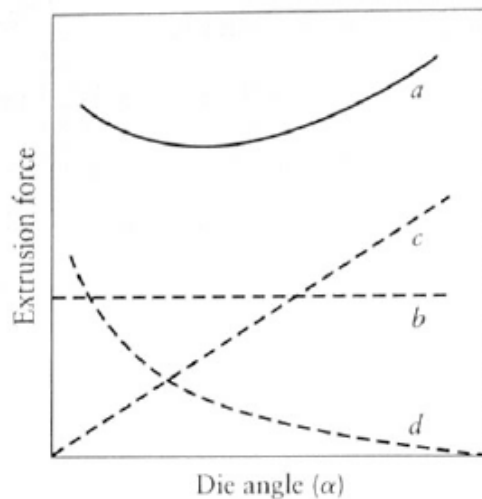


Figura 1.17: Andamento forza di estrusione in relazione all'angolo di entrata

1.2.3. Flusso di materiale durante l'estrusione:

La presenza o l'assenza di attrito tra il metallo e le pareti del contenitore determinano un diverso flusso di materia entro il pezzo modificandone così le proprietà meccaniche e determinano la comparsa di difetti.

In particolare si differenziano tre andamenti del flusso al variare dell'attrito tra billetta, stampo e contenitore (figura 1.18):

- Assenza di attrito: il flusso di metallo è omogeneo.

- b. Attrito elevato: si sviluppa una zona morta (dead zone) e la superficie della billetta entra nel flusso provocando difetti interni.
- c. Attrito elevatissimo con il contenitore: la zona morta si estende all'indietro e se l'estrusione avviene a caldo abbiamo anche la formazione di un gradiente con difetti a tubo.

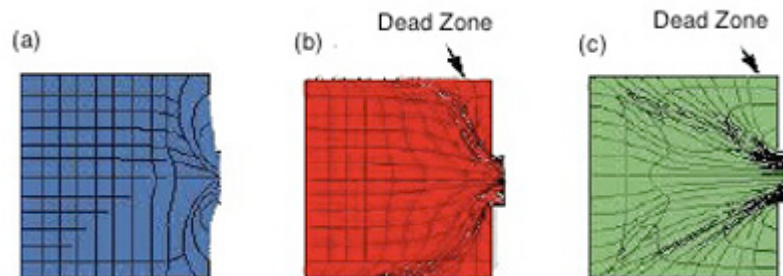


Figura 1.18: Tre tipologie di flusso plastico nell'estrusione

1.2.4. Difetti d'estrusione

- Cricche superficiali: velocità troppo elevate e locali aumenti di temperatura possono portare alla formazione di cricche superficiali. Per ovviare a ciò è consigliato diminuire velocità e temperatura di estrusione. Il difetto di stick-slip è dovuto invece a basse temperature: si verifica che il materiale rimane bloccato per attrito alle pareti e quindi rilasciato a scatti. Difetto quest'ultimo comune nell'estrusione idrostatica, e facilmente riducibile con un miglior lubrificante.
- Difetti di estrusione: si tratta di inclusioni di ossidi e impurità che nell'estrusione vengono inglobati e indirizzati verso il centro del pezzo dai flussi di materiale.
- Cricche interne di tipo Chevron: dovute a deformazioni disomogenee, da stati di trazione idrostatica e dall'attrito tra matrice e materiale, si riducono aumentando l'attrito e diminuendo l'angolo di entrata (figura 1.19).

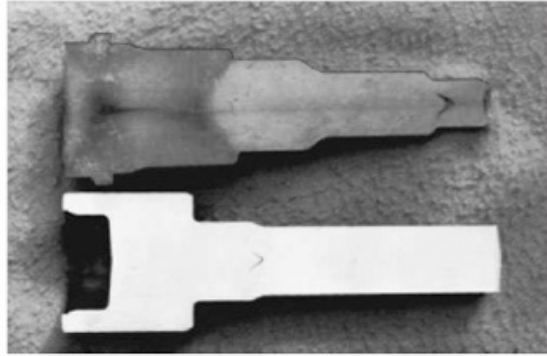
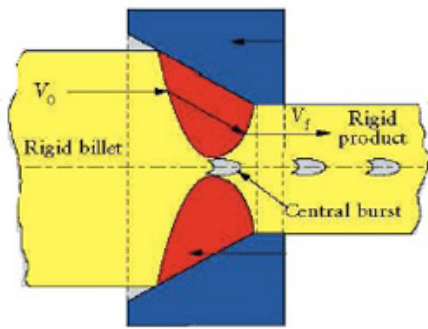


Figura 1.19: (a)Zone di deformazione durante l'estrusione: si vedono le zone deformate e quelle ancora rigide. E' da evidenziare come la cricca di tipo chevron si forma tra le due zone deformate che non sono in contatto tra loro.

Figura 1.19: (b)Cricche chevron in barre tonde di acciaio: se non si ispezionano correttamente i lavorati si rischia rotture in servizio del pezzo.

1.2.5.Estrusione Idrostatica

L'estrusione idrostatica è un processo di deformazione massiva che si caratterizza per la differente applicazione del carico esterno rispetto alle tecniche di estrusione tradizionale. Nella fattispecie la forza necessaria all'estrusione è applicata dall'azione di un fluido che circonda completamente la billetta, pressurizzandola in misura sufficiente ad estruderla attraverso la matrice.

Tale tecnica estrusiva è prevista sia in ambiente termostato ad elevate temperature che a temperatura ambiente e, grazie ai suoi molteplici vantaggi, viene impiegata per l'estrusione di materiali particolarmente fragili, altrimenti non lavorabili con le normali tecniche estrusive.

I principali vantaggi dell'estrusione idrostatica rispetto ai tradizionali metodi estrusivi sono:

- Il disaccoppiamento delle dimensioni dell'attrezzatura da quelle del pezzo.
- L'assenza di attrito tra billetta e contenitore: ciò riduce sensibilmente la forza estrusiva necessaria.
- La pressione di estrusione più bassa, e l'attrito ridotto consentono l'utilizzo di rapporti di estrusione più alti ed eventualmente temperature inferiori.

- La pressione costante lungo tutta la superficie della billetta consente l'utilizzo di billette non perfettamente rettilinee.

Contrariamente, i principali svantaggi includono:

- La difficoltà di contenimento del fluido ad alta pressione (fino a 2GPa) che richiede sigilli affidabili tra contenitore e pistone pressurizzatore. Di per se sono ampiamente disponibili le tecnologie necessarie a tali livelli di tenuta ma queste sono ancora piuttosto costose.
- L'utilizzo di un volume di fluido molto superiore al volume utile della billetta implica un aumento del volume di movimentazione del liquido e quindi la sua sostituzione ad ogni ciclo, un ridotto controllo della velocità della billetta a causa dei potenziali stick-slip e quindi un accumulo di energia nel fluido compresso. Inoltre ciò riduce l'efficienza dell'intero processo in termini di rapporto volumetrico billetta-contenitore e la comparsa di ulteriori complicazioni in presenza di temperature elevate.

Una soluzione intermedia tra una normale estrusione e quella idrostatica è il processo Hydrafilm ovvero una tecnica che prevede di apporre il lubrificante sul solo massello ed utilizzare un impianto estrusivo tradizionale

1.2.5.1. Apparato di estrusione idrostatica

Nel più semplice metodo di estrusione idrostatica il metallo viene estruso attraverso una matrice conica opportunamente realizzata con un adeguato angolo di attacco, mentre il pistone di testa viene movimentato da un sistema idraulico esterno che applica una pressione costante. L'estrusione vera e propria ha inizio nel momento in cui la pressione idrostatica raggiunge un livello sufficientemente alto in funzione delle sollecitazioni dovute al flusso di materiale e del rapporto di estrusione.

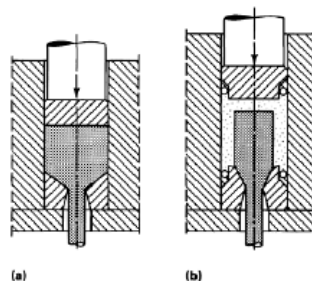


Fig. 1 Comparison of the conventional extrusion (a) and hydrostatic extrusion (b) processes

Figura 1.20: (a) estrusione diretta; (b) estrusione idrostatica

1.2.5.2. Andamento della pressione (Stick-slip):

La pressione idrostatica, costante e ortogonale lungo tutta la superficie della billetta, tende a valori di picco in fase di avvio del processo. Nella prima fase, infatti, il flusso del metallo a contatto con la matrice è ostacolato dall'attrito fin tanto che non si crea un film di lubrificante tra la matrice e la billetta e si raggiungono quindi le condizioni di stazionarietà. Tale picco può raggiungere valori anche molto elevati soprattutto se si verifica una rottura della pellicola lubrificante. Successivamente a questo picco la pressione tende a diminuire rapidamente fino a raggiungere un valore costante dovuto all'assenza di attrito sulle pareti del contenitore, in questa seconda fase possono verificarsi periodiche oscillazione della pressione dovute all'effetto di slittamento noto come stick-slip. Risulta infatti che l'accelerazione della billetta provoca l'espansione del fluido con conseguente diminuzione della sua pressione interna; ad un certo punto la pressione del fluido raggiunge un minimo locale e non è più sufficiente a far proseguire l'estrusione del materiale che così tende a fermarsi. La decelerazione della billetta provoca un nuovo innalzamento della pressione e il ciclo si ripete. L'effetto di stick-slip può essere ridotto o modificando alcuni parametri di processo ovvero con l'uso di ammortizzatori viscosi. E' necessario agire sul volume del fluido e sulle sue caratteristiche di comprimibilità oltre che sul valore di velocità di discesa del pistone.

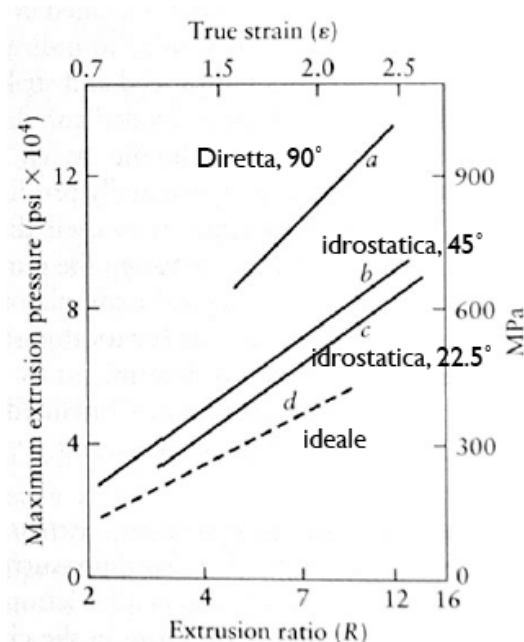


Figura 1.21: Pressione di estrusione in funzione del rapporto di estrusione per una lega di alluminio: (a) estrusione diretta, $\alpha=90^\circ$; (b) estrusione idrostatica, $\alpha=45^\circ$; (c) estrusione idrostatica, $\alpha=22.5^\circ$; (d) deformazione omogenea ideale ottenuta per calcolo numerica.

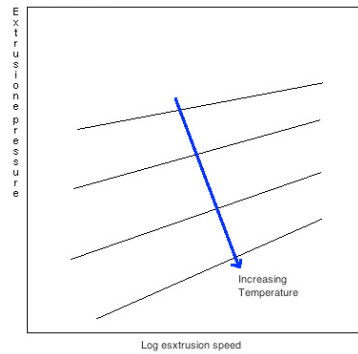


Figura 1.22: Illustrazione schematica dell'effetto della temperatura e della velocità del pistone sulla pressione di estrusione

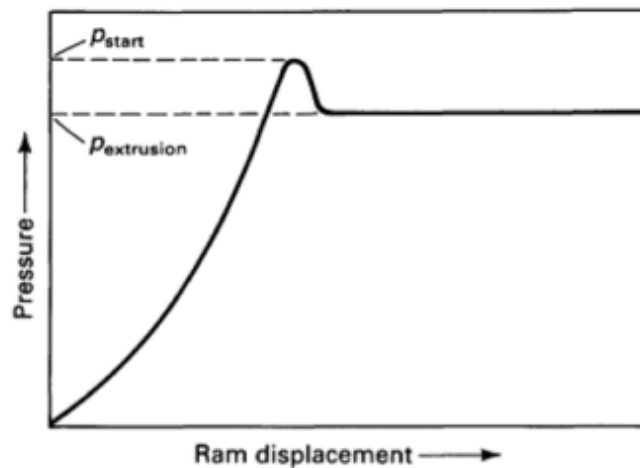


Figura 1.23: Variazione della pressione al variare della corsa del pistone

La pressione necessaria all'estrusione in fase stazionaria (steady-state) dipende invece dalla tipologia di materiale lavorato, ed è correlata linearmente al logaritmo naturale del rapporto R di estrusione secondo l'equazione empirica:

$$p = k_1 \ln R + k_2 \text{ dove } k_1 \text{ e } k_2 \text{ sono costanti.}$$

La figura 1.24 illustra tale rapporto per l'estrusione a freddo di billette per differenti tipologie di lega. La pendenza delle linee risulta essere leggermente più ripida per sezioni più complesse.

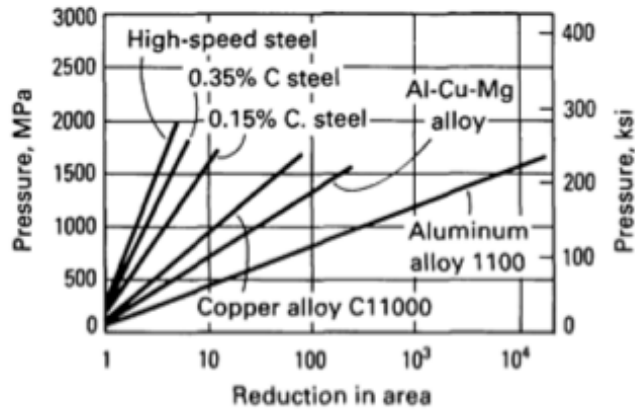


Figura 1.24: Variazione della pressione di estrusione al variare della riduzione di area in funzione del tipo di materiale

1.2.5.3. Estrusione idrostatica dei materiali fragili

La maggior parte dei materiali fragili sono soggetti, durante l'estrusione, alla formazione di cricche sulle superfici circonferenziali, ovvero trasversali, e su quelle longitudinali della porzione di billetta estrusa. Questo fenomeno può essere evitato utilizzando la metodologia fluid-to-fluid, per cui la billetta viene idrostaticamente estrusa in un liquido a pressione più bassa. Per contro, tale metodologia prevede costi operativi e delle attrezzature molto elevati e inoltre le lunghezze di estrusione sono limitate dalla lunghezza della camera secondaria e dall'aumento della pressione del fluido necessaria per l'estrusione. Per tali motivi il metodo fluid-to-fluid può non essere adatto per molte applicazioni industriali.

La difficoltà nell'estrudere metalli a bassa duttilità è stata affrontata in maniera differente dai ricercatori della Battelle Columbus Division, i quali hanno stabilito che le cricche, o le prime fratture si sviluppano nella parte posteriore, immediatamente prima del piano di uscita, e che la superficie di rottura a trazione è il risultato di tensioni residue. La direzione delle tensioni residue, longitudinali o trasversali, da origine a crepe sia trasversali che longitudinali. Si è successivamente scoperto che è possibile invertire tali tensioni residue causate da precedenti sollecitazioni di compressione con una successiva riduzione a basso contenuto di zona (<2%). A tal fine gli stessi ricercatori hanno realizzato una filiera-matrice a doppia riduzione del 2% nel secondo passaggio. Si ritiene che la seconda riduzione impedisca la formazione di cricche imponendo una contropressione anulare sul materiale estruso, contrastando così le sollecitazioni di trazione assiale derivanti dalle tensioni residue,

dalla flessione elastica e dall'attrito. Questo metodo è stato applicato con successo nell'estrusione di materiali friabili, tra cui il berillio e leghe di molibdeno.

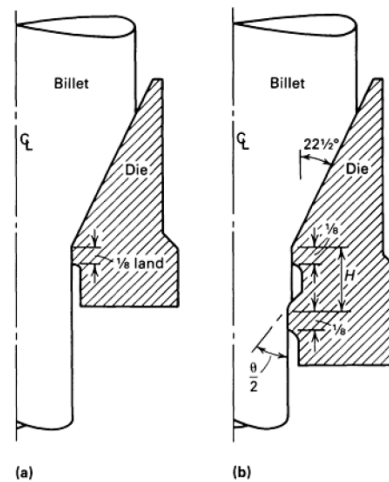


Figura 1.25: (a)matrice normale; (b)matrice a doppia estrusione

1.2.6. Micro mondo-Micro Estrusione

1.2.6.1. Effetto scala:

La progressiva miniaturizzazione di componenti industriali in molti campi come l'elettronica, l'ottica e le telecomunicazioni, ha reso necessario lo studio delle proprietà fisiche di componenti fino a scale molto ridotte. Le proprietà fisiche dei microcomponenti sono dominate dal così detto "effetto di scala", ovvero le loro proprietà variano con la dimensione del componente stesso. Uno dei motivi per cui si verifica l'effetto di scala è che alcune proprietà del materiale, assunte uniformi o isotrope per componenti di dimensioni maggiori, non lo sono più per componenti molto piccoli a causa del fatto che le dimensioni fisiche degli stessi diventano comparabili con quelle della microstruttura del materiale.

L'effetto scala nei processi di deformazione plastica può manifestarsi in due modi: (a) con differenze nella risposta del materiale e (b) con differenze nell'attrito superficiale. Per comprendere il fenomeno è quindi necessario utilizzare una tecnica sperimentale che permetta di separare questi due aspetti.

Una ricerca dell'*Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e Produzione* ha condotto una ricerca focalizzata sul coefficiente di attrito dinamico evidenziando una metodologia sperimentale che permette di valutare la dipendenza di questo parametro dalla dimensione dei componenti. L'attrito, in particolare quello

dinamico, è fondamentale in molti processi tecnologici sia per asportazione di truciolo che per deformazione plastica.

I risultati sperimentali hanno permesso di concludere che i coefficienti di attrito non variano significativamente con la dimensione del grano e l'effetto di scala è dunque da imputare ad una differente risposta plastica del materiale, come evidenziato da analisi microstrutturali effettuate su perni ottenuti per micro estrusione. Contemporaneamente l'ipotesi di isotropia del materiale cessa di essere valida quando ogni grano del materiale occupa porzioni notevoli del volume dei micro perni. La dimensione relativa, la posizione e l'orientamento dei singoli grani hanno, infatti, un impatto significativo sul processo di estrusione a queste scale.

1.2.6.2. Micro estrusione idrostatica

Il processo di micro estrusione idrostatica non si differenzia in alcun modo dal processo macro estrusivo in termini di apparati sperimentali necessari. Differiscono invece i parametri di sensibilità degli apparati in termini di tenuta e precisione e risulta più complessa la gestione dei parametri di processo a causa della presenza del fluido intermedio il quale, durante l'avanzamento della billetta, è soggetto a fluttuazioni di pressioni considerevoli. Questo rappresenta lo svantaggio principale del processo di estrusione micro-idrostatica in quanto non permette un completo controllo della velocità di estrusione, fenomeno meno accentuato in ambiente macroscopico.

In generale, a causa delle difficoltà di realizzazione dell'apparato di estrusione già per i processi di macro scala e considerando le crescenti difficoltà nella realizzazione degli elementi di tenuta lavorando su micro scala, la letteratura riguardante questo processo è scarsa.

Una sperimentazione continua ha però evidenziato un differente andamento della manifestazione dell'attrito in ambiente microscopico, risulta infatti che al diminuire delle dimensioni l'attrito non aumenta in maniera proporzionale ma segue un andamento più esponenziale.

Altro fattore di rilievo è la durata di applicazione del carico come evidenzia l'analisi condotta dal dipartimento di tecnologia meccanica dell'università di Padova.

La prova conseguita nell'esperimento prevedeva l'estrusione di una billetta di acciaio a basso tenore di carbonio lunga 5mm con una riduzione di diametro da 300 a 269 μm . Il fluido è stato pressurizzato attraverso un attuatore manuale fino a 4200bar.

Dai dati si evince come l'incremento della durata del processo e del contributo della pressione di estrusione induca un incremento del tratto estruso, anche se le variazioni dovute all'aumento del tempo di applicazione del carico risultano essere molto meno sensibili per pressioni ridotte come da figura 1.26.

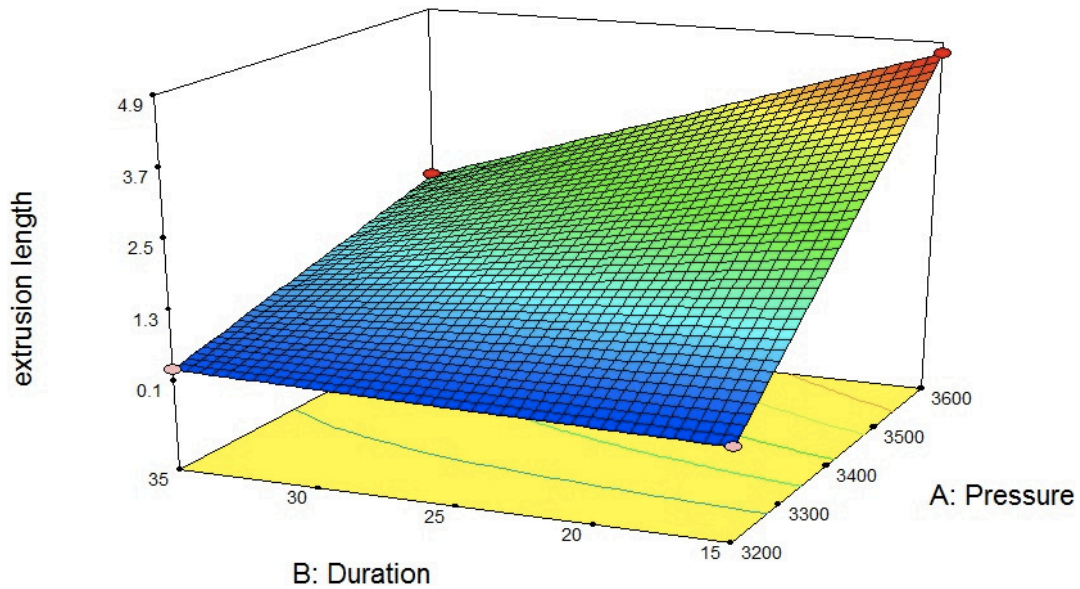


Figura 1.26: Analisi dell'andamento delle lunghezze estruse come funzione della pressione e della durata del processo

La successiva analisi delle dimensioni del grano ha evidenziato che la struttura del grano al cuore (con un diametro di $249\mu\text{m}$) è molto simile a quella del materiale pre-estrusione avente dimensione del grano pari a $4\mu\text{m}$ con deviazione standard di $2\mu\text{m}$. Nei dintorni della superficie esterna, invece, (su un'area di $10\mu\text{m}$), come si osserva dalla figura 1.27, si nota in maniera marcata una deformazione elevata del grano in direzione radiale: in questa fascia è impraticabile la misurazione delle dimensioni del grano a causa delle ridottissime dimensioni.

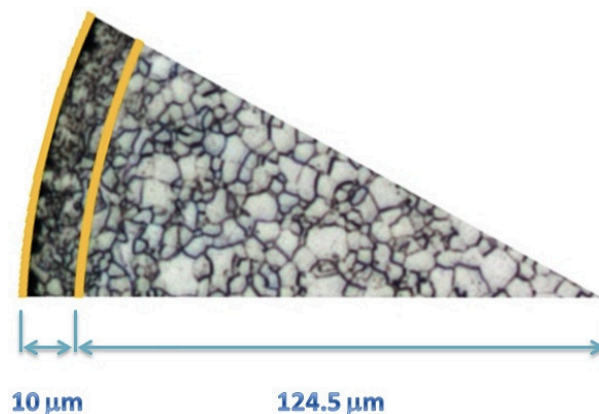


Figura 1.27: Micrografia di una sezione estrusa

L'analisi di micro durezza Vickers permette quindi di definire due zone all'interno della sezione del provino: una prima zona localizzata entro un raggio di $0,085\mu\text{m}$, con una durezza compresa tra i 125 e i 140 HV, e una seconda zona di raggio superiore a

0,115 μm avente un range di durezza tra i 160 e i 170 HV come si evince dalla figura 1.28.

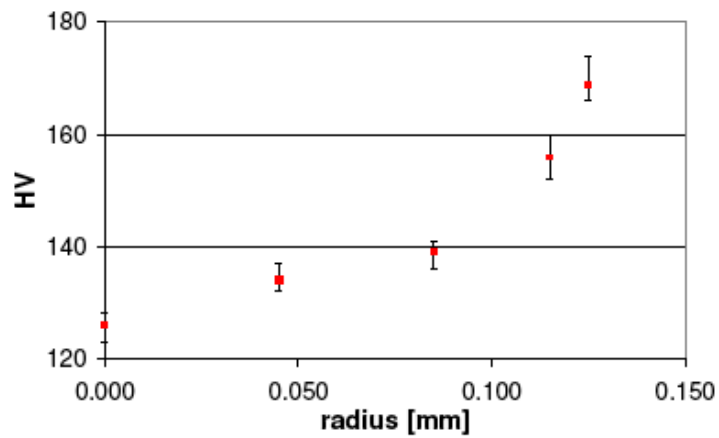


Figura 1.28: Micro durezza Vickers di un pezzo estruso a partire dal centro della superficie

Dai dati raccolti siamo in grado di affermare che il processo di micro estrusione tende quindi a migliorare le proprietà meccaniche del materiale, in quanto induce un affinamento delle dimensioni dei grani che va aumentando in direzione radiale.

CAPITOLO 2

Micro estrusione idrostatica e dati sperimentali

2.1 Prova di micro-estrusione idrostatica

Riprodurre il processo di estrusione in micro dimensioni non è semplice in quanto è necessaria un'attrezzatura in grado di resistere alle alte pressioni e in commercio non sono disponibili macchine per l'estrusione idrostatica di micro componenti.

In seguito ad un'approfondita ricerca di mercato, è stato acquistato un generatore di pressione che permette di comprimere l'olio fino alle pressioni che si desiderano applicare e successivamente lo si è adattato alle esigenze in laboratorio.

2.1.1 Apparato strumentale

L'apparato sperimentale della prova di micro-estrusione è costituito da:

- Un generatore di pressione;
- Un nipple per il collegamento tra generatore e T;
- Una T a tra vie;
- Un nipple per il collegamento tra T e sensore di pressione;
- Un sensore di pressione;
- Un tappo con foro passante;
- Una matrice.

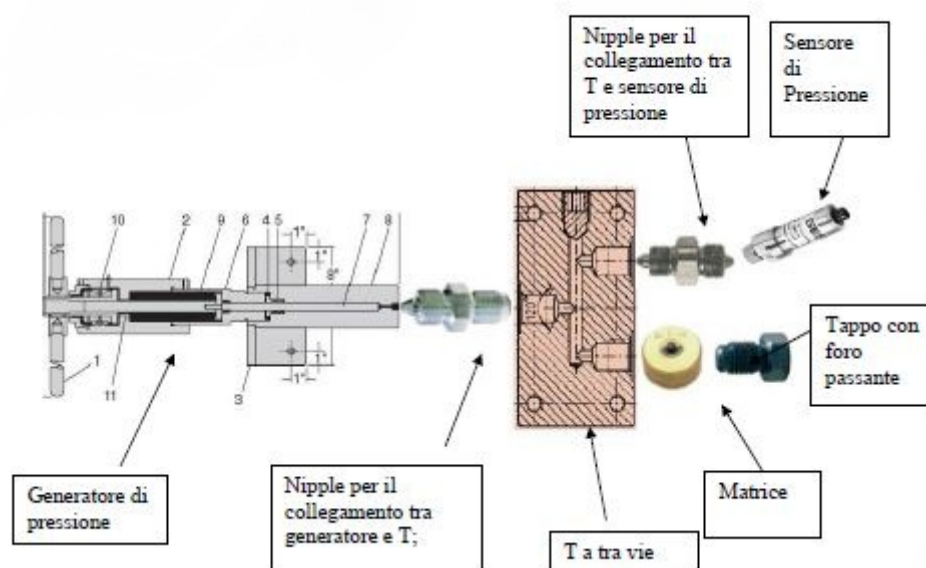


Fig. 2.4: Generatore di pressione e circuito.

Il principio di funzionamento del generatore di pressione è il seguente: una manovella azionata per rivoluzione da un operatore agisce su un pistone primario che, a sua volta avvitandosi fa avanzare il pistone di compressione all'interno della camera di alta pressione. L'olio, grazie al T a tre vie, esercita la pressione sia sul filo da estrarre, sia sul sensore di pressione permettendo così la lettura del carico.

I vari componenti sono assemblati con la seguente modalità:

1. Vengono fissati i nipples per il collegamento del blocco di distribuzione al sensore di pressione e al generatore di pressione. È necessario controllare che per entrambi i nipples sia applicata una forza di serraggio sufficiente alla deformazione plastica della parte conica degli stessi.
2. Successivamente viene inserito il filo da estrarre nella matrice, la quale viene posizionata nello spazio creato *ad hoc* dalla riduzione della lunghezza del blocco per la matrice.
3. Il blocco della matrice viene congiunto al blocco di distribuzione assicurandosi che la forza di serraggio sia sufficiente a deformare plasticamente la parte conica della matrice lavorata al fine di ottenere la tenuta stagna.
4. Il pistone del generatore di pressione deve essere portato a fine corsa, la camera deve essere completamente libera e il generatore posto in posizione verticale.
5. Il fluido andrà inserito nel generatore di pressione dalla sede filettata fino al completo riempimento del volume della camera. Questa operazione deve avvenire utilizzando una siringa in modo da permettere all'aria presente nella camera di uscire.
6. Il blocco di distribuzione deve essere assemblato al generatore di pressione.
7. Il livello del fluido deve essere rabboccato dal foro del nipple del sensore di pressione in modo da riempire completamente il volume del blocco di distribuzione, l'operazione deve essere svolta ancora una volta utilizzando la siringa.
8. Collegare il sensore di pressione.
9. Assicurare l'apparato per micro-estrusione idrostatica al tavolo di lavoro in posizione orizzontale.

La configurazione finale dell'apparato è mostrata nelle figure 2.5 e 2.6:



Fig. 2.5 e 2.6: Apparato sperimentale per la prova di micro-estrusione

2.1.2 Risultati sperimentali

È stato definito un piano di simulazioni, dove le variabili prese in considerazione sono state il tempo di lavorazione e la pressione di estrusione alle quali è soggetto il campione.

Viene attribuito al materiale un comportamento elasto-plastico regolato dalla relazione esponenziale:

$$\sigma_y = a(\bar{\epsilon})^m \cdot (\dot{\epsilon})^n + b$$

Parametri validi per il rame ed ottenuti dalla prova di trazione in laboratorio con unità di tipo SI-mm:

- Young's Modulus: 105000 MPa;
- Poisson's ratio: 0.3;
- Mass density: $8,92 \cdot 10^{-6} \text{ Kg/m}^3$;
- Coefficient a: 472 MPa;

- Exponent m: 0.29;
- Minimum yield stress: 110 MPa.

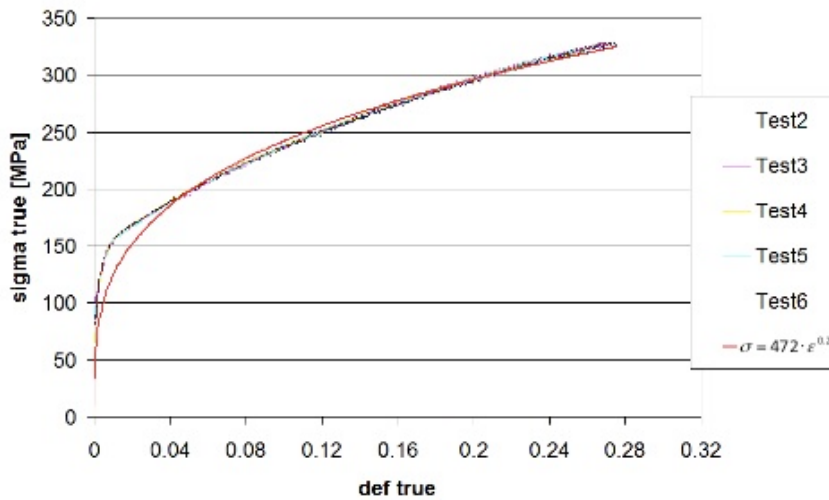


Fig. 2.8.b: Curva di trazione del rame

Definita una pressione, sono state svolte prove per tempi pari a 10, 20 e 30 minuti. Le pressioni prese in considerazione sono state 230 e 222,5 MPa. Per valori superiori il generatore di pressione non assicura una tenuta perfetta con tempi di lavorazione pari a quelli della sperimentazione. Nella tabella 2.2 si può notare il risultato sperimentale medio relativo ad ogni tipologia di prova considerando l'errore di misurazione valutato come di seguito:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.4)$$

Premessa:

- La misurazione del tratto estruso è estremamente complessa ed esposta a sensibili errori a causa delle ridottissime dimensioni dei provini che non permettono misure consone, se non con l'utilizzo di microscopi a diverse decine di ingrandimenti. Inoltre, non è assolutamente trascurabile l'assenza di riferimenti precisi di inizio e fine estrusione sulla superficie della billetta. In questo caso per misurare il tratto estruso si è preso come punto di inizio estrusione il segno della trafilatura e come tratto finale, invece, un punto intermedio nel cono d'ombra creato, per effetto ottico, dal microscopio sulla zona di filo che è l'ultima a contatto con la matrice e che perciò risulta essere inclinata.

Materiale: Cu					
Lubrificante: Mina grafite B					
Prova	Pressione [bar]	Tempo [min]	Lunghezza estruso [mm]	Val.medio [mm]	dev.st [mm]
1	2225	10	0,338806818	0,317	0,067
2			0,371676136		
3			0,24188447		
4	2300	10	0,747566288	0,833	0,074
5			0,881150568		
6			0,869351326		
7	2225	20	0,463541667	0,402	0,059
8			0,346813447		
9			0,394431818		
10	2300	20	1,219279054	1,080	0,122
11			1,029905303		
12			0,992293609		
13	2225	30	0,465648674	0,492	0,044
14			0,466491477		
15			0,542765152		
16	2300	30	2,207254071	2,031	0,456
17			2,373180193		
18			1,512984245		

Tabella 2.2: Risultati sperimentali

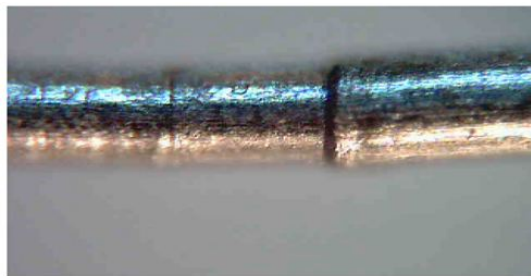


Fig. 2.9: Particolare del cono d'ombra

Di seguito (tabella 2.3) è stata formulata una scrematura dei dati raccolti elidendo quei valori che sono anomali rispetto alla serie e che si allontanano troppo da un andamento lineare del processo estrusivo.

Pressione [Mpa]	Time [s]	Estruso [mm]	
222,5	680	0,338806818	valore valido
		0,371676136	elimino, compare a 20'
		0,24188447	valore valido
	1280	0,463541667	Valore valido
		0,346813447	valore valido
		0,394431818	valore valido
	1880	0,465648674	elimino, compare a 20'
		0,466491477	elimino, compare a 20'
		0,542765152	Valore valido

Pressione [Mpa]	Time [s]	Estruso [mm]	
230	680	0,747566288	valore valido
		0,881150568	valore valido
		0,869351326	valore valido
	1280	1,219279054	Elimino, valore esterno
		1,029905303	valore valido
		0,992293609	elimino, valore esterno
	1880	2,207254071	elimino, valore esterno
		2,373180193	elimino, valore esterno
		1,512984245	valore valido

Tabella 2.3: scrematura valori

Altro elemento rilevante è la velocità di estrusione del processo che è possibile ricavare analiticamente in funzione della legge oraria del moto, equazione. 2.5:

$$x = v \cdot t \quad (2.5)$$

Nel caso specifico applicando carichi tramite rampe di pressione di conseguenza la velocità media tiene conto di diverse componenti di velocità:

- della velocità v_0 presente nel primo intervallo di tempo in cui è applicata una rampa di pressione. La rampa parte dal valore nullo di pressione, fino a raggiungere la pressione prevista dal piano delle simulazioni. Le velocità in tale intervallo cresce costantemente secondo una componente di accelerazione diversa da zero;
- della velocità v_1 presente nell'intervallo di tempo in cui si ha realmente l'estrusione, costante e non influenzata da una componente di accelerazione, ma dall'effetto di *stick slip*;
- della velocità v_2 presente nell'ultimo intervallo di tempo, dove è applicata una rampa di pressione di discesa. La rampa parte dal valore costante di pressione, fino ad annullarsi. Le velocità in tale intervallo decresce

costantemente secondo una componente di accelerazione non nulla e minore di zero.

Di seguito sono riportati gli andamenti della velocità di estrusione, ma si sottolinea l'aspetto puramente qualitativo di queste rappresentazioni per le motivazioni appena illustrate. E' giusto evidenziare la tendenza a decrescere della velocità come aspetto che verrà di seguito illustrato.

Pressione [Mpa]	Tempo [s]	Velocità [mm/s]	Vel. Media [mm/s]
225,5	680	0,000498245	0,000426979
		0,000355712	
225,5	1280	0,000362142	0,000313747
		0,000270948	
		0,00030815	
222,5	1880	0,000288705	0,000288705

Pressione [Mpa]	Tempo [min]	Velocità [mm/s]	Vel. Media [mm/s]
230	10	0,001099362	0,001224543
		0,00129581	
		0,001278458	
230	20	0,000952562	0,000878588
		0,000804614	
230	30	0,000775229	0,00097465
		0,001174071	

Figura 2.4: Tabella velocità medie

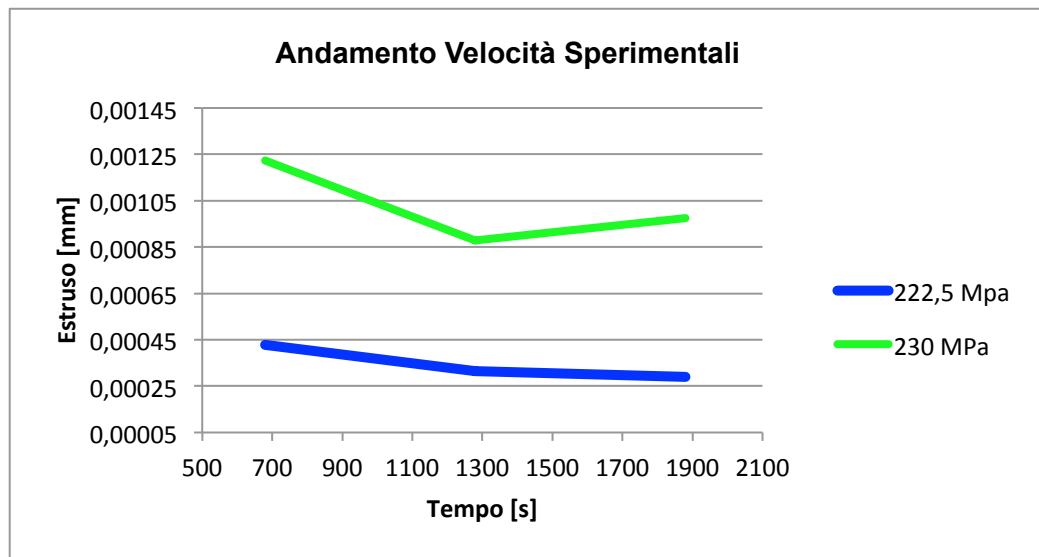


Figura 2.4.a: Andamento velocità media

CAPITOLO 3: Modello FEM

3.1.Messa a punto del modello FEM per la simulazione numerica del processo di estrusione idrostatica

L'elaborazione, e la successiva messa a punto di un modello riprodotto fedelmente lo stato delle cose in un processo di micro estrusione idrostatica è risultato essere molto più complesso di quanto inizialmente preventivato. Oltre alle difficoltà incontrate nell'acquisizione delle competenze necessarie ad un adeguato utilizzo del software di analisi agli elementi finiti Simufact GP 9.0, ci siamo via via resi conto che, a causa delle altissime pressioni in gioco e delle microscopiche dimensioni riprodotte, è fondamentale utilizzare un elevatissimo numero di elementi in cui suddividere l'intero elemento e di conseguenza osservare un sensibile aumento dei tempi di elaborazione dati che hanno raggiunto picchi di 4-5 giorni di lavoro continuo da parte dei calcolatori.

Innanzitutto si è deciso di sfruttare la particolare geometria assial simmetrica del complesso pistone, contenitore, matrice e billetta al fine di riprodurre il processo di micro estrusione con un'analisi bidimensionale.

In seguito, dopo aver definito al simulatore componenti e materiali, è stato necessario simulare l'azione idrostatica esercitata nella realtà dal fluido pressante. Ed è proprio in questa fase che abbiamo cominciato ad avere i primi problemi tecnici al fine di simulare un'azione pressoria costante sulle superficie longitudinale e trasversale della billetta. Dopo circa una settimana di simulazioni e verifiche incrociate tra risultati ottenuti e dati sperimentali, ci siamo resi conto di avere di fronte esiti incongruenti tra loro. Abbiamo quindi proceduto a un'accurata analisi dell'intero modello. Tuttavia, non avendo idea di cosa fosse errato, infatti a livello logico tutto quadrava alla perfezione, abbiamo impiegato numerosi giorni per individuare le criticità del modello.

3.1.1.Prima fase

Senza troppi indugi, abbiamo inizialmente pensato di riprodurre la pressione idrostatica semplicemente introducendo l'azione di due forze ortogonali alle superfici trasversali e longitudinali della billetta ed agenti sui nodi superficiali della billetta. Proprio in questa fase di definizione del modello siamo incappati in un errore tanto nascosto quanto fatale. Infatti, l'azione delle forze si scaricava su nodi in movimento, e non su delle coordinate spaziali statiche. Ciò comporta che le forze trasversali riproducono fedelmente la realtà giacché agiscono costantemente, mentre le forze longitudinali, applicate ai nodi, continuando ad agire costantemente anche quando il

nodo è già oltre la matrice, non riproducendo assolutamente lo stato delle cose come si osserva in figura 3.1.

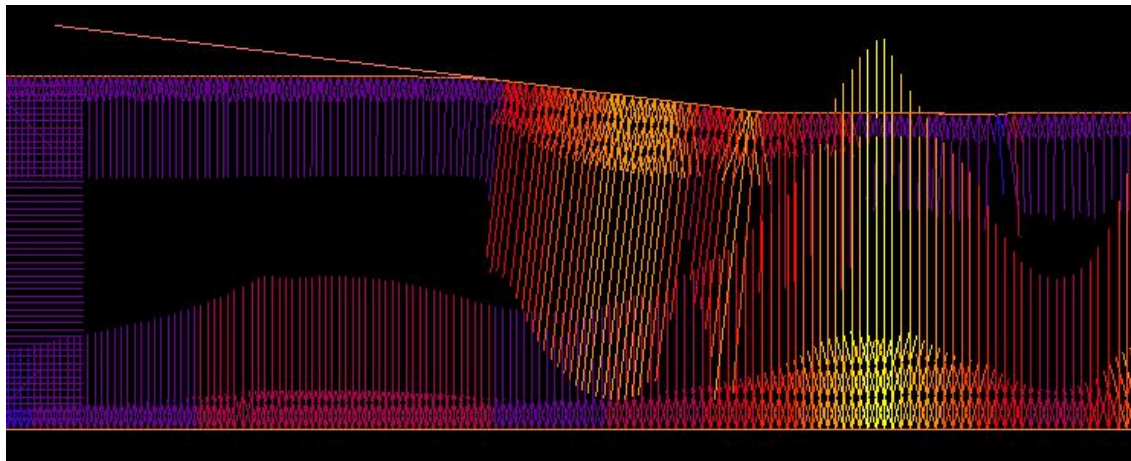


Fig.3.1. Modello con forze longitudinali applicate ai nodi. Si nota come le forze si manifestino anche dopo la matrice.

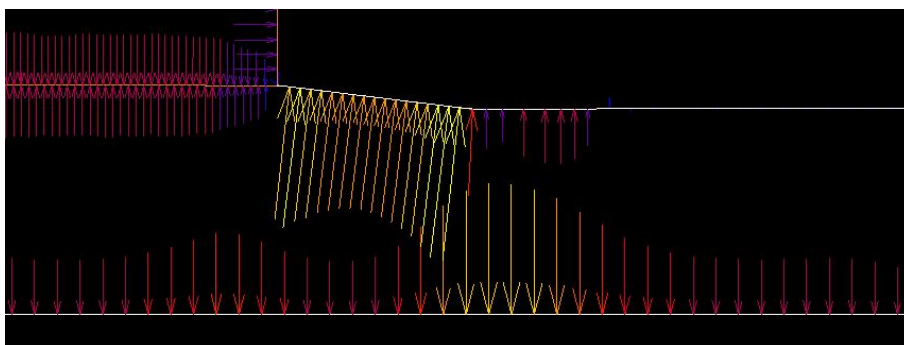


Fig.3.1. Modello con forze longitudinali applicate da un fluido. Si nota come le forze scompaiano all'uscita della matrice.

3.1.2. Seconda fase

Identificato l'ostacolo, è stato necessario rimuoverlo. A livello teorico si può facilmente chiarire l'incognita semplicemente applicando le forze longitudinali non più sui nodi ma su delle coordinate statiche. A livello sperimentale, altresì, la faccenda non è stata così semplice: non avevamo le conoscenze approfondite del software, né le guide ci venivano incontro, e neppure l'assistenza software sapeva come indirizzarci. Numerosi giorni sono stati così impiegati in innumerevoli, quanto fallimentari, tentativi di una riproduzione corretta delle forze. Man mano che passava il tempo però, oltre ad affrontare l'ostilità del simulatore software, abbiamo cominciato a percepire come il fattore numero di incrementi software giocava un ruolo chiave nell'analisi. Il numero di incrementi software non è altro che il numero di operazioni che il software impiega

per completare una simulazione. Accadeva, infatti, che, a parità di modello, e a differenza di numero incrementi software si ottenevano risultati differenti: inconcepibile.

Per quanto riguarda la riproduzione della pressione idrostatica abbiamo tentato di lasciare inalterata la modalità di azione delle forze trasversali, apparentemente corretta, e di simulare l'azione delle forze longitudinali su coordinate statiche attraverso l'introduzione di un contenitore cilindrico a contatto con la billetta (rappresentato da una linea grazie all'assial simmetria) su cui agivano le forze longitudinali (figura 3.2). In prima approssimazione le simulazioni apparivano corrette, in particolare a basse pressioni (280MPa), ma con l'aumentare dei tempi di azione e della pressione idrostatica venivano a formarsi sulla superficie della billetta estrusa delle cuspidi (figura 3.2), e tra billetta e matrice si determinavano compenetrazioni infattibili, data la funzione imposta agli elementi. Ulteriormente a ciò, a elevate pressioni (340MPa), si verificava la formazione di una sorta di coda sulla parte posteriore, tra la billetta e il contenitore circolare. Nell'andare ad approfondire le questioni con un'analisi specifica delle tensioni dei componenti ci siamo accorti come nelle zone di contattato tra matrice-billetta-contenitore si sviluppavano tensioni inusuali. La strada intrapresa non ci consentiva quindi di simulare correttamente il processo di micro estrusione idrostatica.

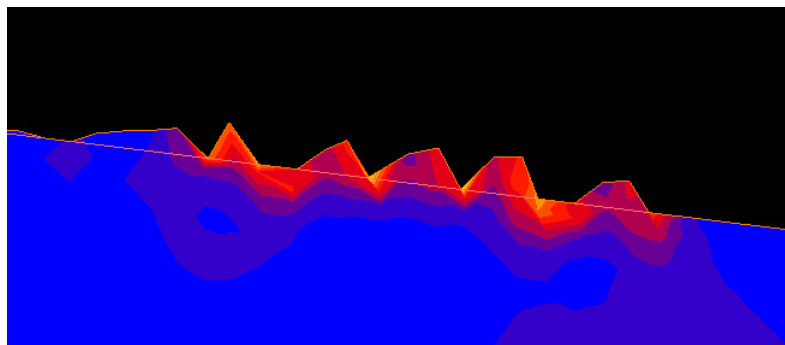


Figura 3.2.a: Cuspidi sulla superficie della matrice

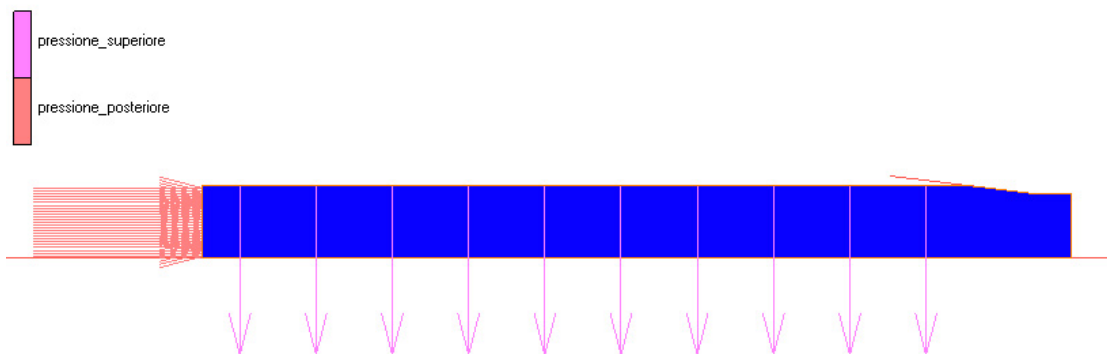


Fig.3.2.Modello intermedio con forze verticali applicate ad una piastra

3.1.3 Terzo modello

Dati i risultati fallimentari precedenti, si è deciso di riprodurre al simulatore l'azione della pressione idrostatica nel modo più fedele possibile, introducendo un fluido.

Tale scelta presenta però una serie di problemi:

- Un aumento sensibile del numero di elementi che il software deve calcolare, con un notevole aumento dei tempi di elaborazione dei risultati;
- necessità di conoscere i coefficienti di espansione volumetrica, di densità e di viscosità del fluido;
- esigenza di introdurre un sistema contenitivo del fluido ad alta pressione;
- richiesta di una conoscenza approfondita nell'utilizzo di Simufact GP 9.0.

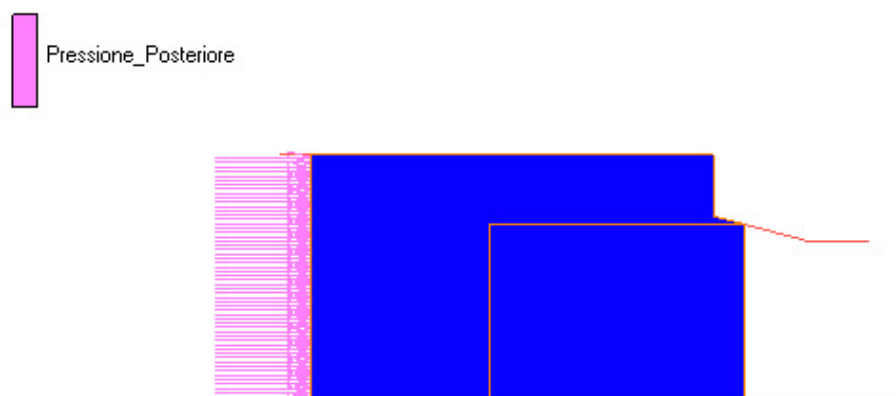


Fig. 3.6: Terzo modello con un unico contenitore.

Per evitare complesse interazioni nei *tools* tra l'azione posteriore e superiore del fluido, nel riprodurre una pressione costante su tutta la superficie della billetta sotto l'azione di un'unica forza, dopo alcuni tentativi si è pensato di realizzare due contenitori separati:

- Un contenitore superiore;
- Un contenitore posteriore.

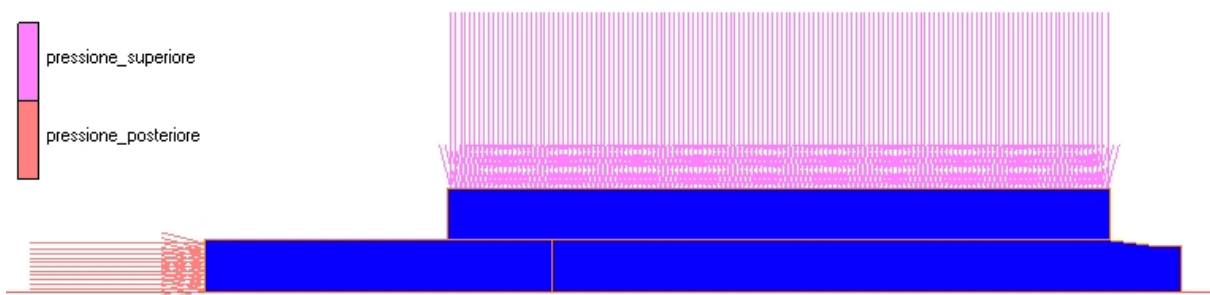


Fig. 3.7: Terzo modello con due contenitori separati.

Lo schema in figura 3.7 rappresenta l'evoluzione più raffinata del terzo modello, anche se non la conclusiva. Innanzitutto si è stabilito che il contenitore di fluido posteriore sia sufficientemente lungo in modo che ci sia una parte di fluido che non venga sovrastato da quello superiore durante l'avanzamento della billetta. Se non fosse soddisfatta tale condizione, si verrebbero a formare tensioni elevate e inopportune nella zona di contatto tra billetta, fluido posteriore e fluido superiore.

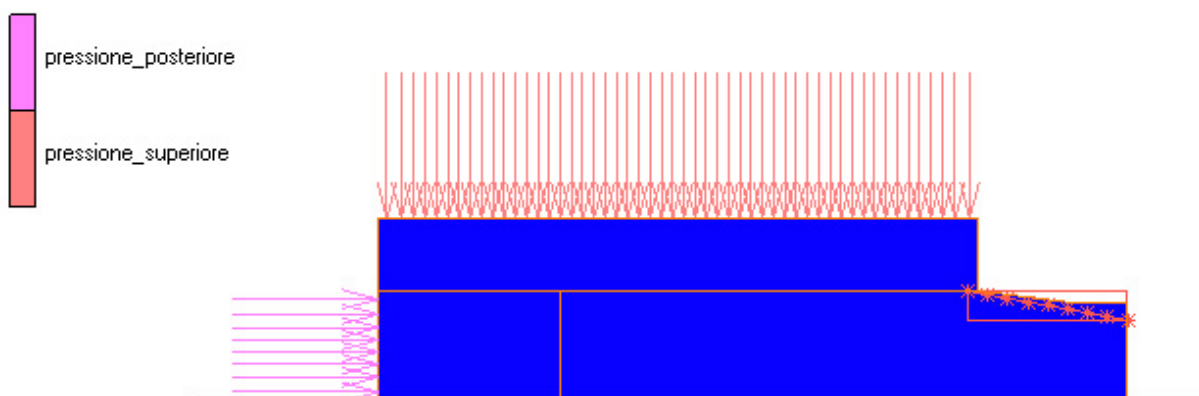


Fig. 3.8: Modello intermedio con criterio di *re-mesh*.

Nonostante il modello riproduca fedelmente lo stato reale della sperimentazione, a medie ed elevate pressioni, si ripresentano costantemente delle cuspidi. La strada intrapresa per eliminarle, seppur esosa in termini di tempo di simulazione, è stata quella di introdurre un criterio di *re-mesh*, ovvero di un opportuno sistema di ricalcolo della suddivisione in elementi dell'intero modello ad ogni incremento del software. Nonostante il raddoppio dei tempi di elaborazione l'obiettivo di eliminare le cuspidi è stato raggiunto.

3.1.4.Perfezionamento del modello: fase finale

Completata la ricerca di un modello adeguato alla micro estrusione idrostatica, la fase finale di perfezionamento dello schema FEM ha interessato in maniera particolare la riduzione dei tempi di elaborazione software a parità di precisione.

Si è realizzato che la taglia di *mesh* impostata dall'utente non influisce sul tempo del processo di simulazione, in quanto se è attivato un criterio di *re-mesh* allora la maglia viene modificata continuamente. Il confronto tra modelli con *mesh* molto fitta, sia sui fluidi che sulla billetta, e tra modelli con *mesh* fitta solo sulla billetta e maglia larga sui fluidi, ha riscontrato i medesimi risultati.

Si è deciso di realizzare un criterio di *re-mesh* che coinvolga la porzione di materiale a partire da un infinitesimo prima dell'ingresso nella matrice, ad un infinitesimo dopo l'uscita dal calibratore in quanto si è osservato che le cuspidi vengono a formarsi proprio nella zona d'uscita dalla matrice, particolarmente sensibile, e che le restanti zone non sono soggette a tale fenomeno.

A conclusione di tre mesi di lavoro impostato sul confronto tra modelli, ipotesi teoriche, e acquisizione sempre più specifica delle potenzialità di Simufact GP 9.0 si è realizzato un modello riprodotto in maniera estremamente sensibile lo stato delle cose in un reale processo di micro estrusione, nonostante siano stati introdotti nel modello numerosi artifici tecnici tesi a superare le difficoltà pratiche.

3.2.4.1.Ulteriori considerazioni in fase di perfezionamento del modello

Come accennato nel paragrafo 3.2.2, molti sono stati i fattori che entrano in gioco nella modellazione del sistema estrusivo simulato. Un elemento non trascurabile è la rilevanza del numero di *steps/incrementi* elaborati dal simulatore per portare a termine un processo intero. Da un confronto tempo/allungamento con differenti incrementi fissati in uno dei primi modelli realizzati, quindi non adatti a simulare il processo estrusivo, ma altresì pienamente utilizzabili per considerazioni numeriche del software, abbiamo potuto approfondire tale questione. Le prove confrontate prevedono un intervallo di tempo di 600 s, a pressione costante di 280 MPa e con un attrito pari a 0.4. Come si evince dal grafico di figura 3.9, all'aumentare del numero di incrementi fissati, diminuisce la quantità di materia estrusa a parità di condizioni al contorno.

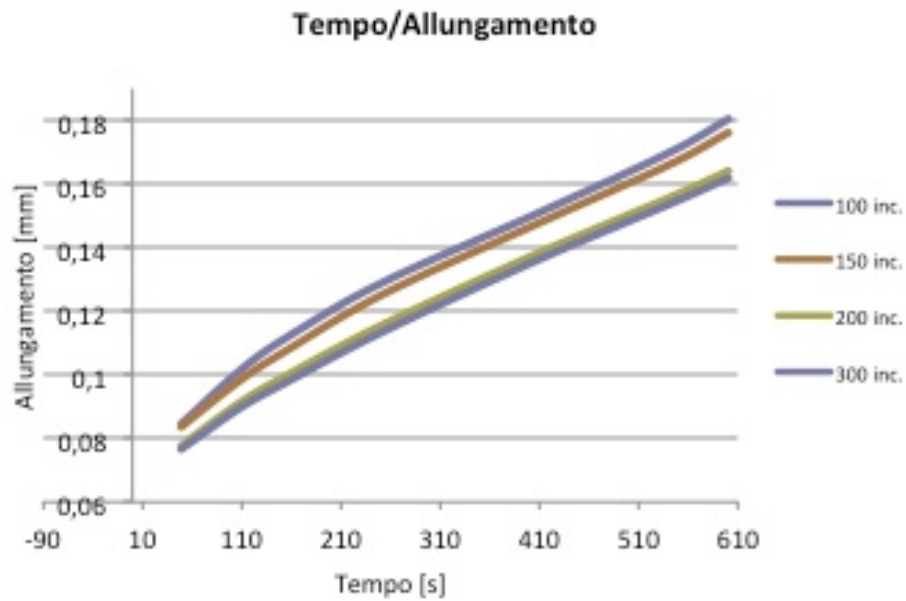


Fig. 3.9: Confronto tempo/allungamento con differenti incrementi fissati.

Dall'analisi dei passi integrativi svolti dal processore si comprende come il minor allungamento non sia dovuto ad un errore, ma sia dovuto ad una maggiore sensibilità del software, il quale aumentando l'ampiezza del dominio di integrazione riduce la possibilità di simulare uno spostamento errato di un particolare elemento facente parte del dominio della billetta. Aumentando il numero di incrementi aumenta anche la precisione della simulazione, quindi ipotizzando un numero di incrementi infiniti si otterrebbe la precisione assoluta, il tutto però a spese di maggiori tempi di elaborazione.

Fortuitamente in fase di studio è stata rilasciata una versione aggiornata del software Simufact che prevede una modalità adattiva (auto step) del numero di passaggi incrementati dal software che ci ha permesso di ovviare all'annoso problema riscontrato fino ad allora.

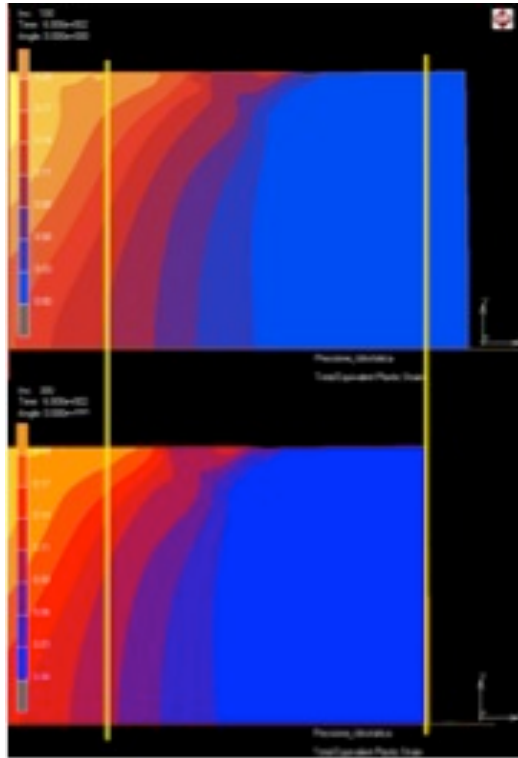


Fig. 3.10: Materiale estruso a parità di condizioni al contorno e con differenti *time step*.

Un'altra variabile incognita del modello è stata la definizione dei contatti: esistono infatti due tipi di contatti che hanno funzione simile, cioè il *glue* e il *touching*. La definizione di *glue* è stata definita tra il fluido superiore e i contenitori che lo accolgono. Il *touching* invece è caratteristica dei contatti della billetta con la matrice, con l'asse di simmetria e con il fluido superiore.

3.2. Modello definitivo



Fig. 3.11: Modello definitivo

3.2.1. Parametri tecnici del modello con Simufact GP 9.0

- **Job type:** Axisymmetric mechanical
- **Preprocessing:**
 - **Mesh generation:**
 - Si Inseriscono le coordinate spaziali dei punti elementari dell'intero modello attraverso l'apposita opzione *add pts*.
Le coordinate della billetta sono:
punto A: (-3.4, 0, 0) mm;
punto B: (1.6, 0, 0) mm;
punto C: (1.6 ,0.15 ,0) mm;
punto D: (-3.4,0.15, 0) mm;
punto E: (-3.6, 0.15, 0) mm;
punto F: (-3.6, 0.2, 0) mm;
punto G: (1.6, 0.2, 0) mm.

Le coordinate della matrice sono:

punto H: (1.512, 0.162278) mm;

punto I: (1.73824, 0.1345) mm.

Le coordinate dell'asse di simmetria sono:

punto K: (3.5, 0, 0) mm;

punto J: (-3.8, 0, 0) mm.

Nota:

A conclusione di numerosi tentativi di simulazione si è deciso di definire la lunghezza della billetta pari alla lunghezza reale utilizzata sperimentalmente. La forza esercitata dalla pressione verticale tende a diminuire con l'estrusione della billetta, la quale comporta una progressiva diminuzione della sezione attiva. Indi per cui si è ritenuto

opportuno riprodurre fedelmente la lunghezza della billetta ai fini di mantenere la linearità del processo.

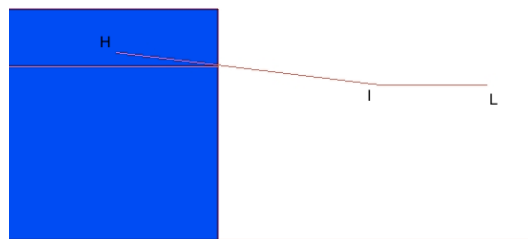
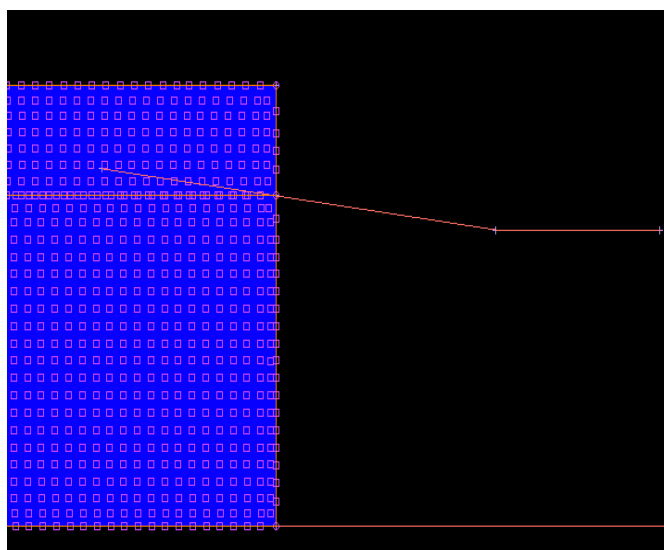


Fig. 3.12: Coordinate della matrice.

- Si collegano i punti tra di loro con apposite curve, utilizzando il comando *add curve* di tipo *poly line* per la matrice, e di tipo *line* per tutti gli altri elementi.
- Si è deciso di creare una *mesh* quadrangolare con una dimensione laterale di ogni elemento pari a 0.0075 mm. Per avere una distribuzione costante degli elementi si seguono le seguenti suddivisioni:
 - Billetta: $x = 667, y = 200$
 - Fluido superiore: $x = 694, y = 67$.

Si seleziona l'opzione *automesh, 2d planar meshing* e utilizzando l'opzione *quadrilaterals(overlay)*.



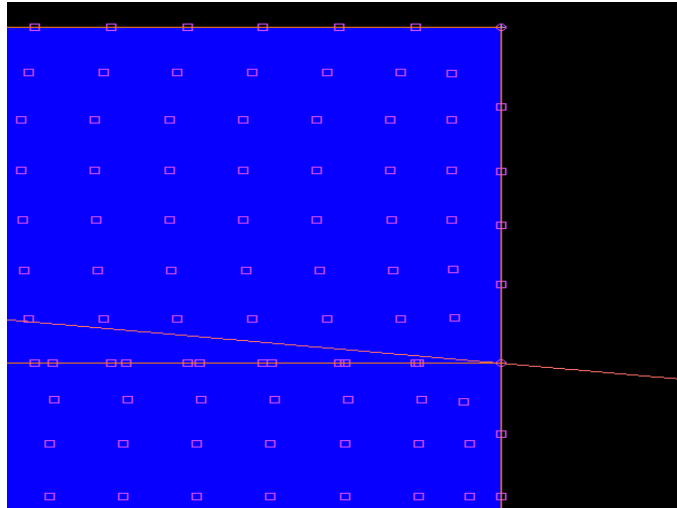


Fig. 3.13 e 3.14: Particolare della mesh

- **Material properties**

- Si genera un nuovo materiale attraverso l'opzione *new*, rappresentato dal rame, a cui si attribuiscono proprietà di tipo *mechanical* in *set material properties*, inserendo i valori del modulo elastico, del coefficiente di Poisson e della densità noti in unità del Sistema Internazionale.

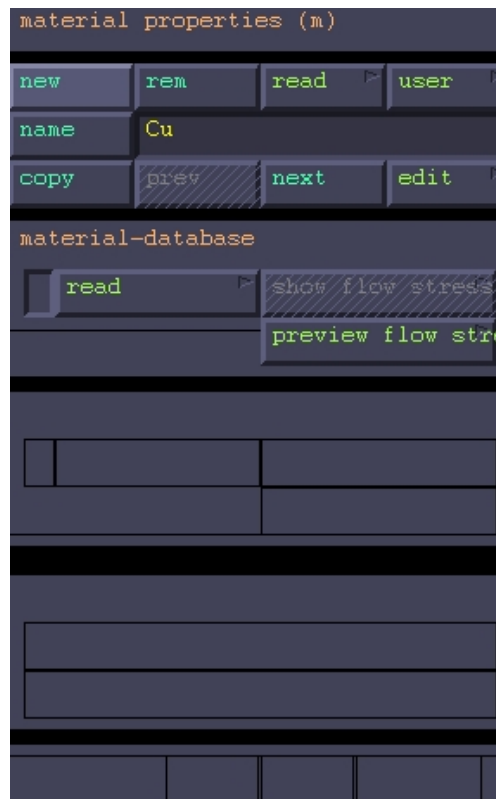


Fig. 3.15: Material properties.

Viene attribuito al materiale un comportamento elasto-plastico regolato dalla relazione esponenziale:

$$\sigma_y = a(\bar{\epsilon})^m \cdot (\dot{\epsilon})^n + b \quad (3.1)$$

Parametri validi per il rame ed ottenuti dalla prova di trazione in laboratorio con unità di tipo SI-mm:

- Young's Modulus: 105000 MPa;
- Poisson's ratio: 0.3;
- Mass density: $8,92 \cdot 10^{-6} \text{ Kg/m}^3$;
- Coefficient a: 472 MPa;
- Exponent m: 0.29;
- Minimum yield stress: 110 MPa.

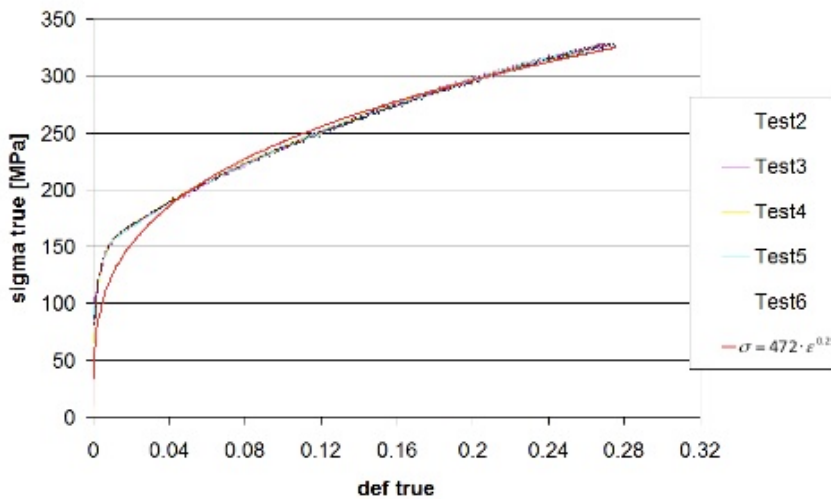


Fig. 3.16.a: Curva di trazione del rame

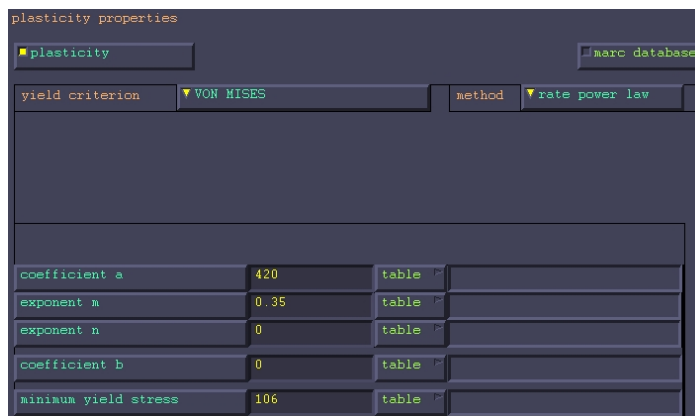


Fig. 3.16.b: Definizione dei parametri del rame.

Viene generato un secondo materiale, fluido, a cui si attribuisce la proprietà di tipo *fluid* inserendo i valori del modulo elastico, del coefficiente di Poisson e della densità noti.

Parametri validi per il fluido:

- Young's Modulus: 250000 MPa;
- Poisson's ratio: 0.3;
- Mass density: 1 Kg/m^3 .

Dopo aver definito il tipo e le proprietà di ogni materiale che entra in gioco nella lavorazione, viene assegnato ad ogni elemento della geometria il materiale di cui è composto, in *set material properties*.

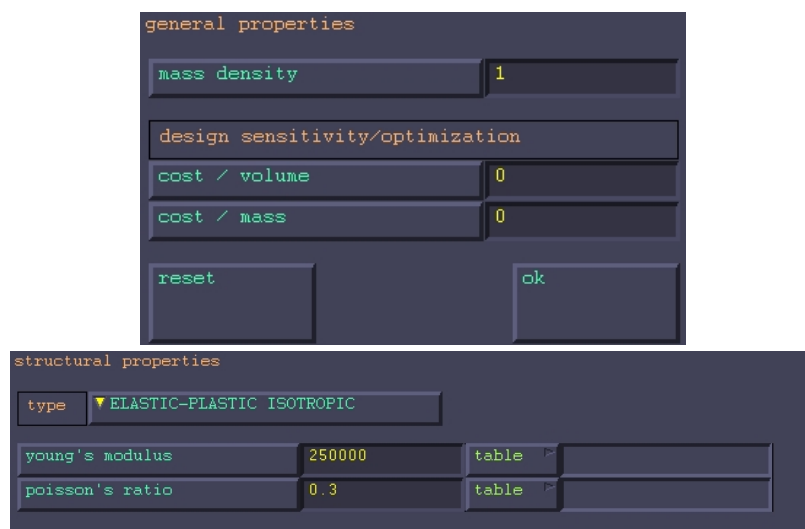


Figura 3.17. Dettagli del fluido.



Fig. 3.18: Modello rappresentativo della disposizione dei materiali.

- **Contact**

Si procede alla definizione dei ruoli di ogni singolo elemento del modello, attraverso l'opzione *new*, la denominazione e la scelta del tipo di *tool* o di *workpiece*:

- La billetta è un *workpiece*, alla quale si assegnano gli elementi costituenti attraverso *workpiece, add elements*;
- L'asse di simmetria è un *simmetry body*;
- La matrice è un *tool* di tipo *rigid (velocity controlled)*, in quanto è lo strumento che permette l'estrusione, per tanto la sua geometria deve esser costante e non modificabile. Nella definizione delle proprietà della matrice, si fissa un coefficiente d'attrito che verrà applicato dalla matrice sulla billetta da estrudere.
- Il fluido superiore è un *tool* di tipo *deformable tool*, in quanto l'olio ha volume costante perchè incomprimibile, ma non ha una forma rigida;
- Il contenitore del fluido superiore a sinistra è un *tool* di tipo *rigid(velocity controlled)*. La definizione di un contenitore è necessaria dato che l'olio è caratterizzato da deformabilità e continuerebbe il moto trasmesso alla billetta se non vincolato;
- Il contenitore del fluido superiore a destra è anch'esso un *tool* di tipo *rigid(velocity controlled)*. Si sono definiti due contenitori diversi a destra e sinistra per la necessità della presenza degli stessi, ma non volendo sovraccaricare la simulazione di ulteriori elementi, si è deciso di non creare un contenitore superiore non essendo indispensabile. Dopo aver creato il profilo di ogni elemento, si impostano le opzioni avanzate di contatto delineando una nuova tabella dei contatti, la *contact table properties* di figura 3.19.

contact table properties				second					
first		body name	body type	1	2	3	4	5	6
	1	billetta	workpiece		T	T			T
	2	olio_superiore	deformable				G	G	
	3	matrice	rigid						
	4	contenitore_olio_sup_	rigid						
	5	contenitore_olio_sup_	rigid						
	6	simmetria	symmetry						

Fig. 3.19: Tabella delle proprietà dei contatti.

I contatti sono in gran parte di tipo *touching* dove si presentano degli accostamenti tra i componenti del modello. *Touching* implica l'aderenza tra coppie di elementi considerati senza che siano incollati, quindi con la possibilità di scostamento. Solo tra il fluido superiore e i contenitori del fluido superiore destro e sinistro è stata definita l'opzione *glue* perché deve esserci l'adesione completa, e l'olio deve avere velocità pari a 0, in quanto non si deve muovere sotto l'azione della pressione, come la billetta.

Nella figura 3.20 sono rappresentati tutti i *contact* del modello definitivo.

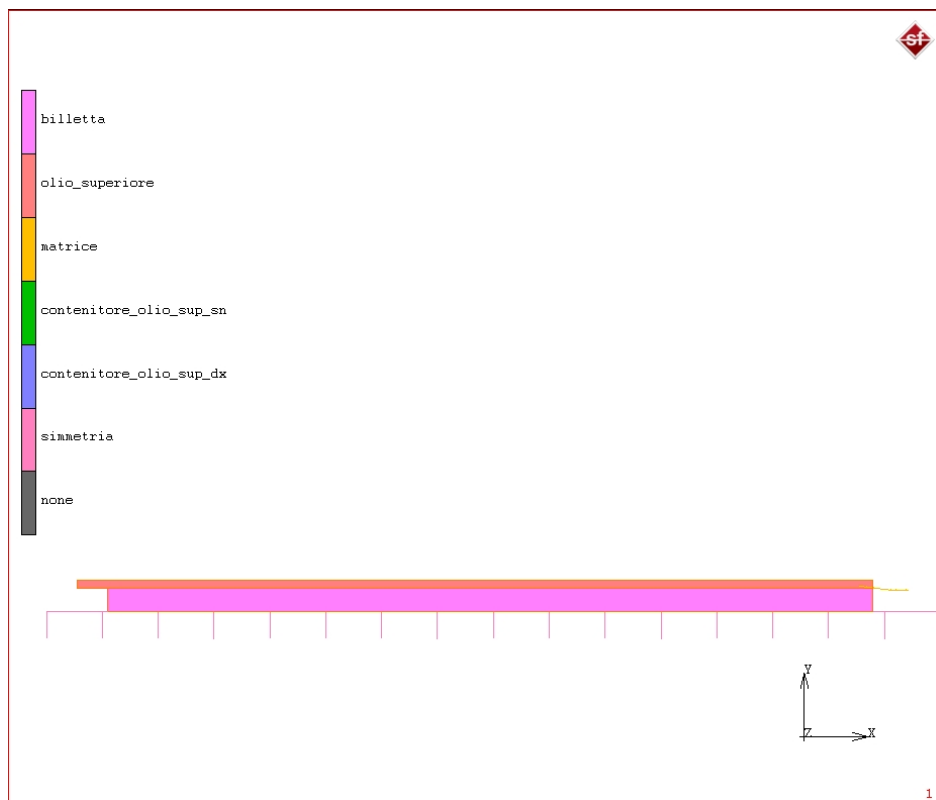


Fig. 3.20: Schema dei contatti del modello

- **Boundary conditions**

Un ruolo fondamentale nell'estrusione idrostatica è quello della pressione. Si definiscono due tipi di pressione:

- Una pressione idrostatica superiore;
- Una pressione idrostatica posteriore.

Entrambi i carichi sono parametri del tipo *edge load* con un andamento di applicazione non costante per simulare la realtà. È stata utilizzata la seguente modalità:

- Con $t = 0$ s, la pressione $P = 0$ MPa;
- Con $t = 80$ s, la pressione $P = P_{max}$ MPa;
- Con $t = t_{max}$ s, la pressione $P = P_{max}$ MPa.

La pressione perciò è stata definita con un andamento a rampa per ricreare la sperimentazione reale, in cui il carico si applica manualmente, attraverso un volano, dal valore nullo al valore desiderato.

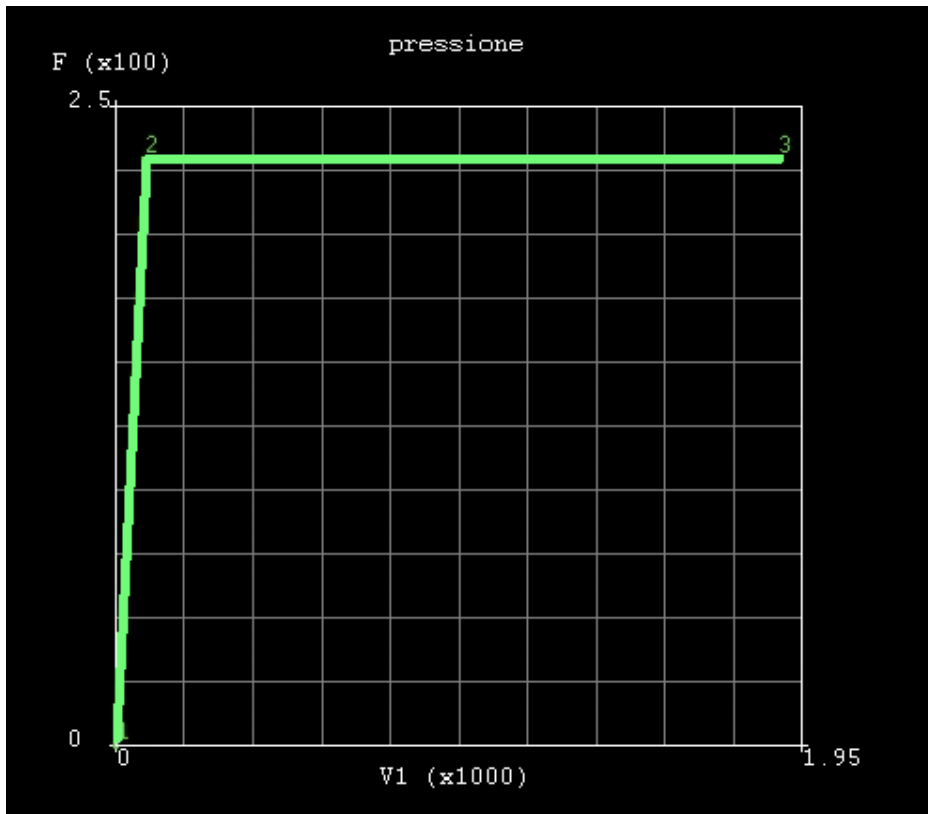


Fig. 3.21: Rampa di carico.

La pressione posteriore è applicata ai nodi della parte finale della billetta, mentre la pressione superiore è applicata ai nodi del fluido superiore.

Si è optato per eliminare la rampa di discesa in quanto si è osservato che, a causa degli ampi intervalli di tempo con cui l'elaboratore suddivide il tempo totale di applicazione del carico, si verificava un istante in cui la pressione passa da valori massimi a valori nulli da uno step all'altro determinando così una brusca depressione che induceva l'arretramento della billetta. Ai fini dell'analisi numerica elidere la rampa non comporta alcun tipo di variazione sul tratto estruso in quanto se presente indurrebbe esclusivamente pressioni non sufficienti all'estrusioni.

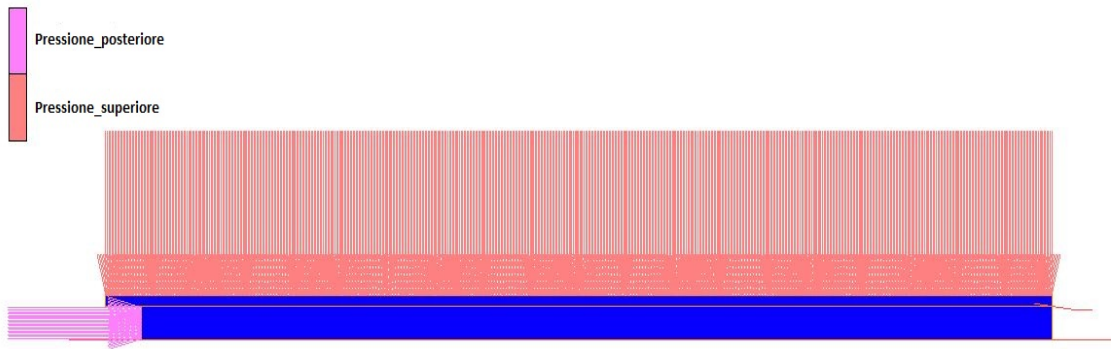


Fig. 3.22: Rappresentazione delle boundary conditions.

- **Remeshing Criteria**

Il criterio di *remeshing* permette di impostare, in una determinata area costituita da n elementi, la rimodulazione della suddivisione degli elementi di *mesh* ad ogni incremento dell'elaboratore.

Si è stabilito di usare il metodo di tipo *advancing front quad*.



Fig. 3.23: Criterio di *remesh*.

Invece i parametri di *remeshing* sono:

- *Curvature control*: 36;
- *Smoothing ratio*: 0.5;
- *Element edge length*: 0.0075 mm.



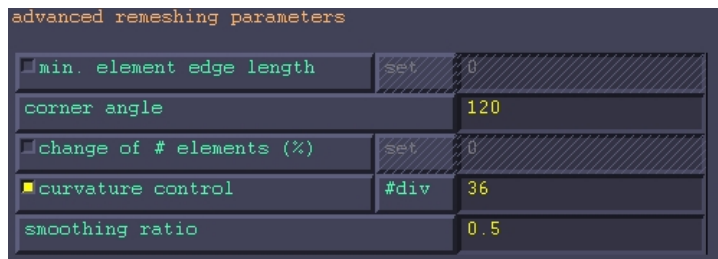


Figura 3.24: a-b: dettagli criterio di remesh

Evidenziamo che esiste la possibilità di creare dei box di remeshing nelle zone più sensibili, come nell'intorno della matrice, tuttavia è stato osservato che un criterio base di remeshing è più che sufficiente ai fini di una distinta simulazione.

Come ultimo passaggio è consigliato modificare il parametro *2-D Contact Limit Angle* come da figura; questo indice va a modificare la sensibilità del simulatore nell'analisi numerica nell'intorno degli spigoli vivi. Avendo noi una matrice con un angolo di attacco di 7° abbiamo, al fine di migliorare l'accuratezza, ritenuto opportuno optare per un valore di questo parametro inferiore all'angolo di attacco della matrice.

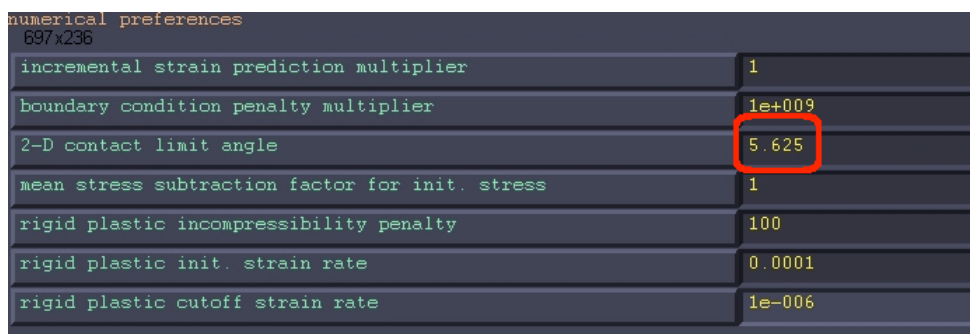


Figura 3.25: 2-D contact limit angle

CAPITOLO 4

Raccolta dati

4.1. Simulazioni software con differenti attriti

4.1.1 Simulazione della micro estrusione con attrito $\mu=0,157$ e pressione 230 MPa

Time [s]	Δl estruso [mm]
680	0,8327
1280	1,0299
1880	1,513

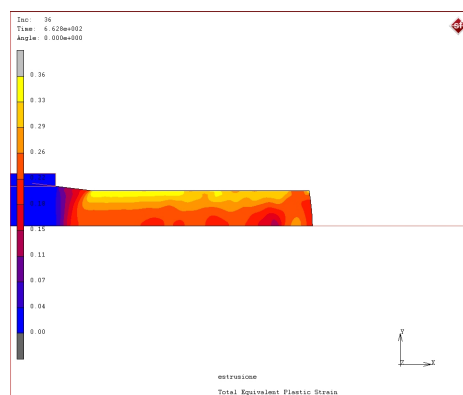


Fig. 4.1.a:
Time= 680s

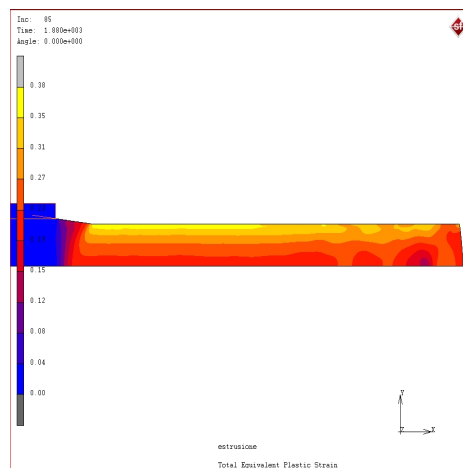


Fig. 4.1.b:
Time= 1280s

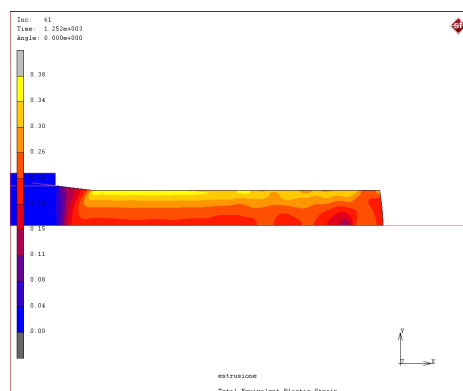


Fig. 4.1.c:
Time= 1880s

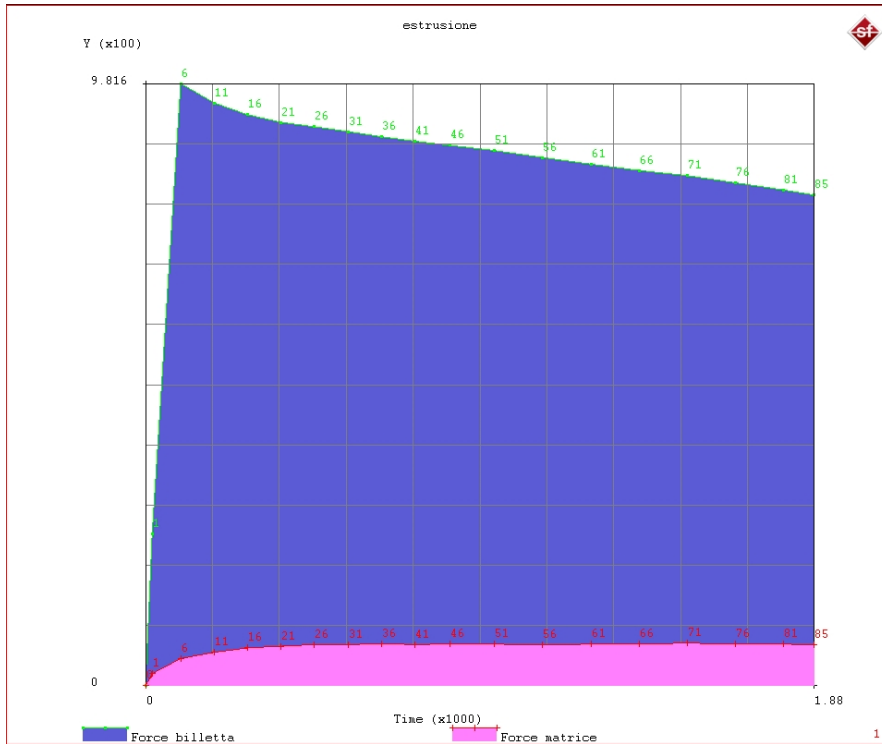


Fig. 4.2: Forza totale sulla billetta (blu), e sulla matrice (rosa)

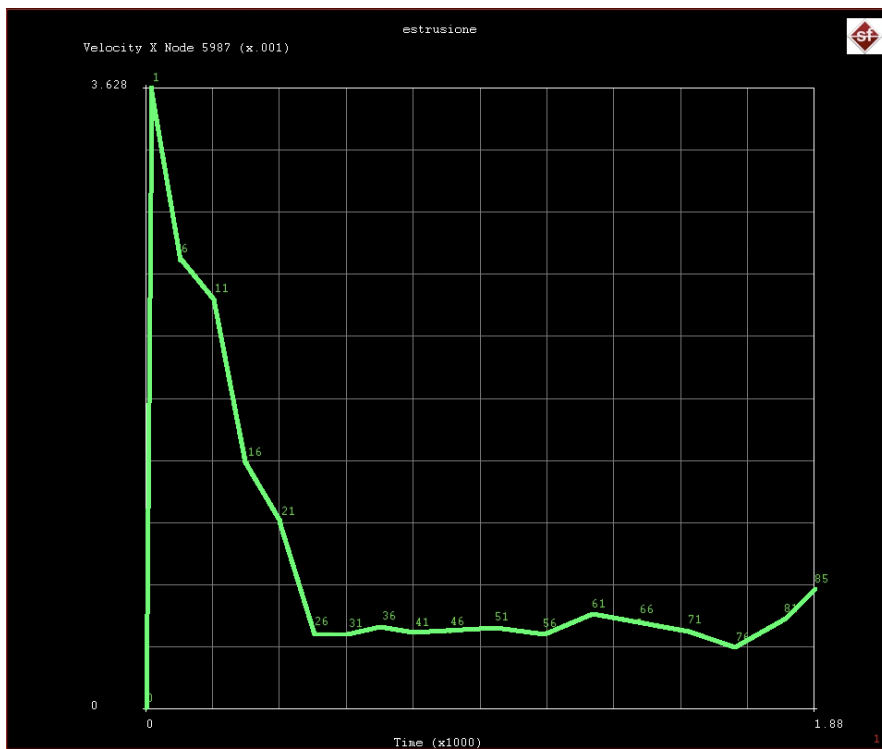


Fig. 4.3: Velocità della billetta

4.1.2 Simulazione della micro estrusione con attrito $\mu=0,157$ e pressione 222,5 MPa

Time [s]	Δl estruso [mm]
680	0,2903
1280	0,4016
1880	0,5428

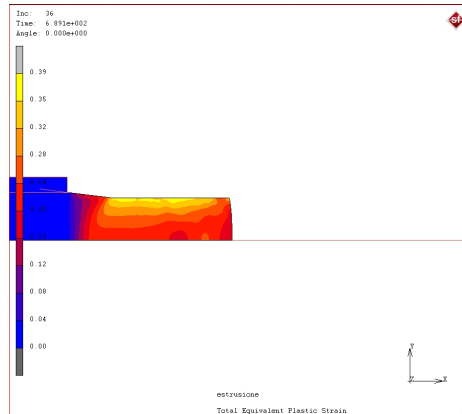


Fig: 4.4.a.
Time= 680s

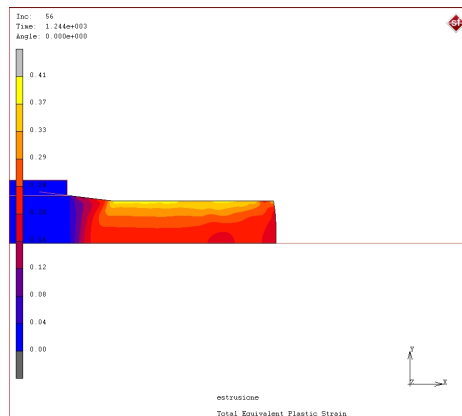


Fig: 4.4.b.
Time= 1280s

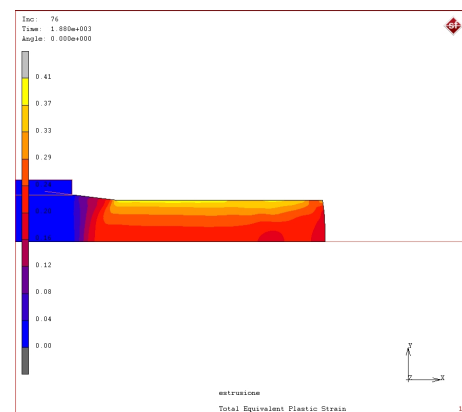


Fig: 4.4.c.
Time= 1880s

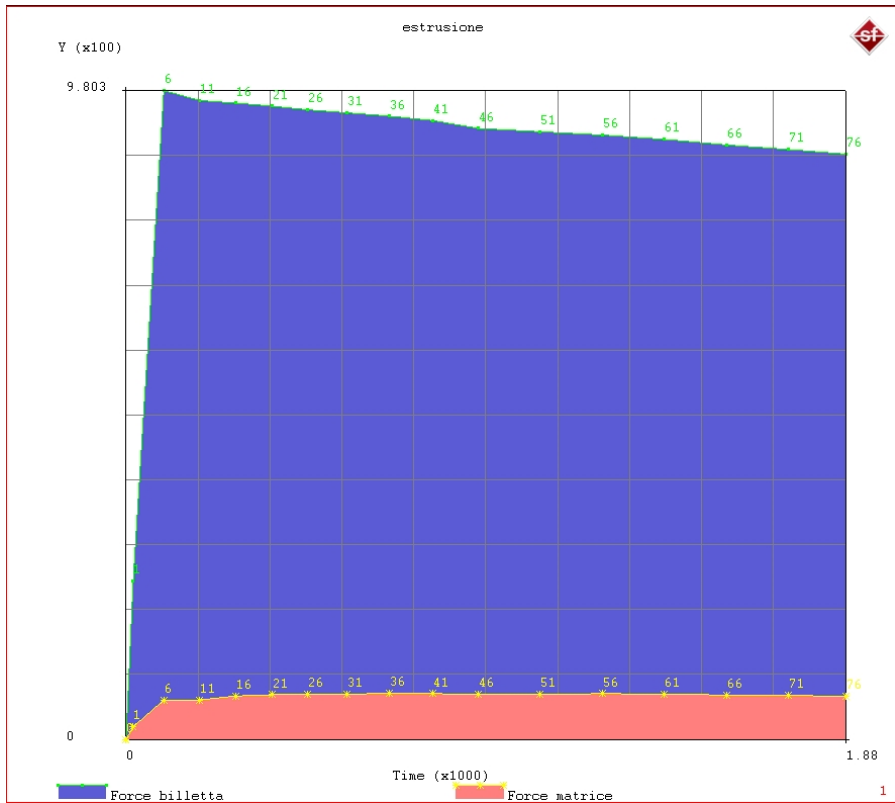


Fig. 4.5. Forza totale sulla billetta (blu), e sulla matrice (rosa)

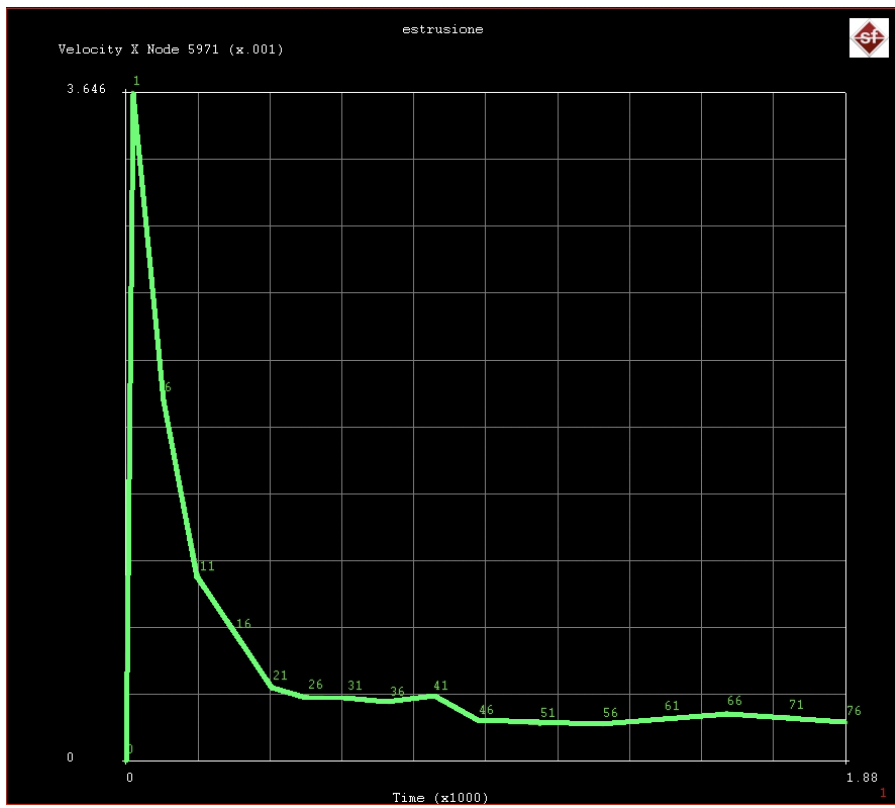


Fig. 4.6: Velocità della billetta

CAPITOLO 5

Analisi dei risultati e conclusioni

5.1. Confronto tra risultati numerici FEM e sperimentali:

Il coefficiente di attrito del rame è stato ricavato mediante ripetute simulazioni alla pressione di 230 MPa in cui si è variato il valore fino all'eguagliamento dei tratti estrusi virtualmente con i tratti estrusi sperimentalmente nei medesimi intervalli di tempo. A conclusione di questa prima fase in cui si è proceduto per tentativi è stato ricavato un valore del coefficiente di attrito $\mu=0,157$.

In seguito, a verifica della veridicità del coefficiente di attrito calcolato, questo valore è stato introdotto in una simulazione parametrizzata a pressione di 222,5 MPa e con i medesimi intervalli di tempo dell'esperienza precedente.

Quest'ultima simulazione ha fornito risultati molto prossimi a quelli sperimentali il che va a conferma sia della correttezza del valore del coefficiente di attrito, sia della validità del modello realizzato.

Di seguito è riportato l'andamento di una prova di simulazione FEM parametrizzata a 230MPa e $\mu=0,157$ confrontata con le lunghezze di estruso ottenute sperimentalmente.

Pressione [Mpa]	Tempo [s]	Δl reale medio [mm]	Δl virtuale [mm]	Dev. St. reale [mm]
230	680	0,7347	0,73465	0,074
	1280	0,9968	0,99677	0,122
	1880	1,311	1,31105	0,256

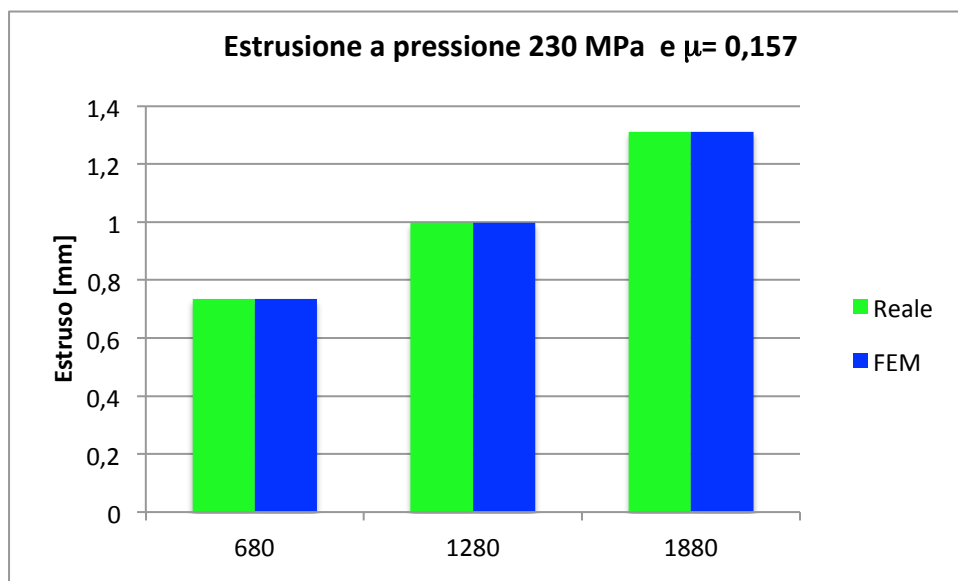


Figura 5.4: Confronto estrusione reale e FEM

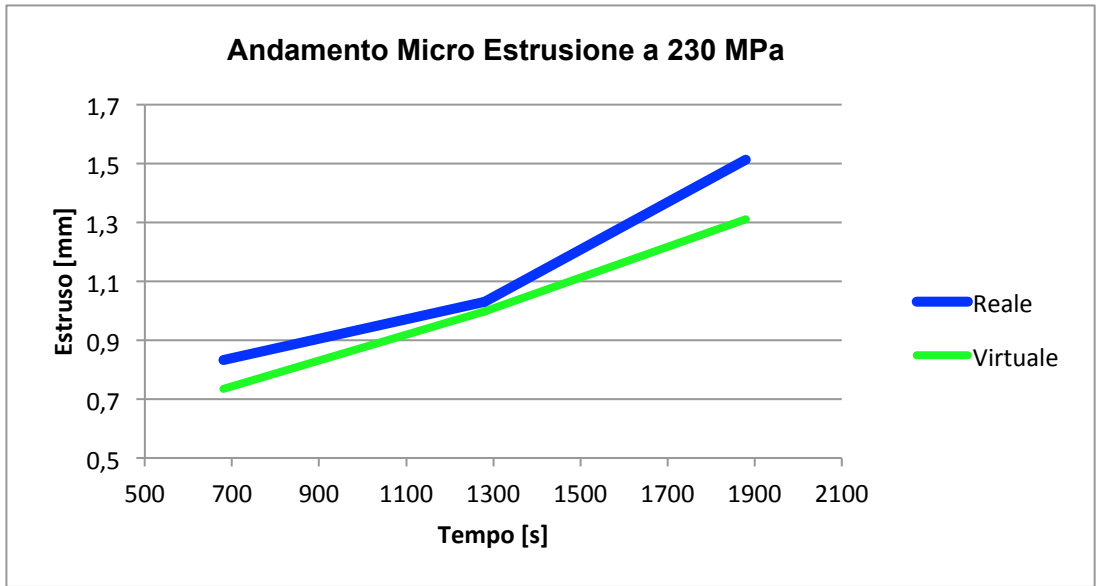


Figura 5.5: Confronto estrusione reale e FEM

Come ulteriore verifica è stato utilizzato l'attrito precedente per simulare una prova di micro estrusione alla pressione di 222,5 MPa al fine di confrontarla con i dati sperimentali.

Pressione [Mpa]	Tempo [s]	Δl reale medio [mm]	Δl virtuale [mm]	Dev. St. reale [mm]
222,5	680	0,2901	0,29008	0,067
	1280	0,4302	0,43015	0,059
	1880	0,5857	0,58572	0,044

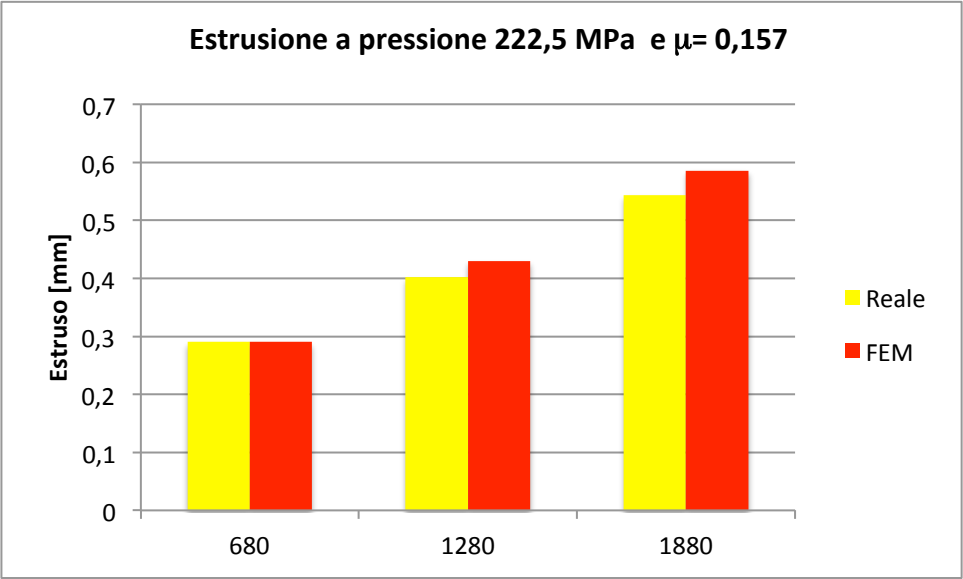


Figura 5.6: Confronto estrusione reale e FEM

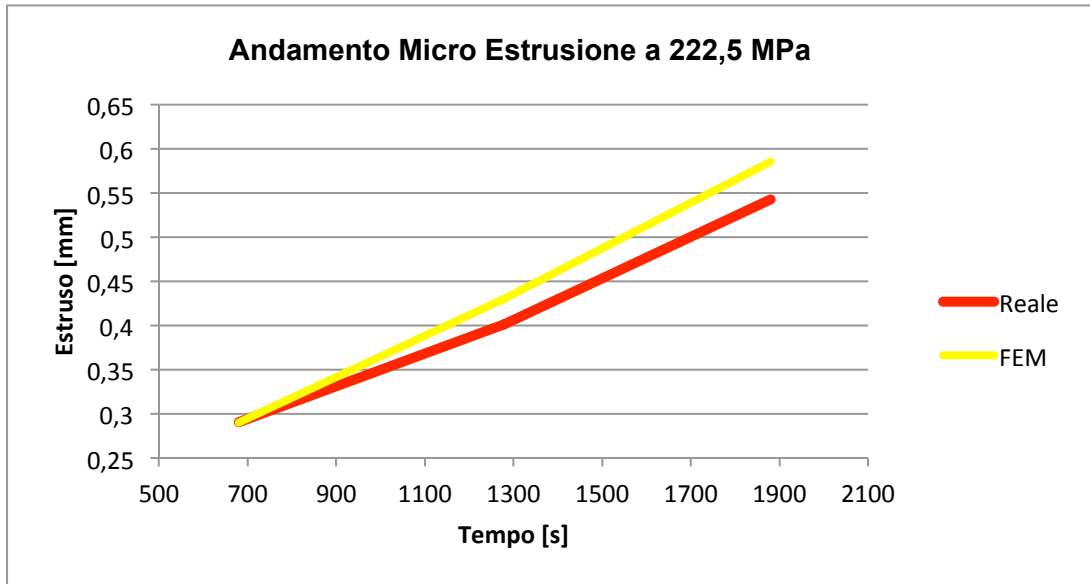


Figura 5.7: Confronto estrusione reale e FEM

Si osserva che le simulazioni elaborate con attrito $\mu=0,157$ hanno riportato andamenti della lunghezza di estruso estremamente verosimili con ridottissimi margini di scarto rispetto ai valori reali. In entrambe le simulazioni a 230 e 222,5 MPa si osserva inoltre il delinarsi di un andamento lineare tra la lunghezza di materiale estruso e il trascorrere del tempo di applicazione del carico.

Infine è riportato di seguito l'andamento delle velocità medie di estrusione risultanti al FEM.

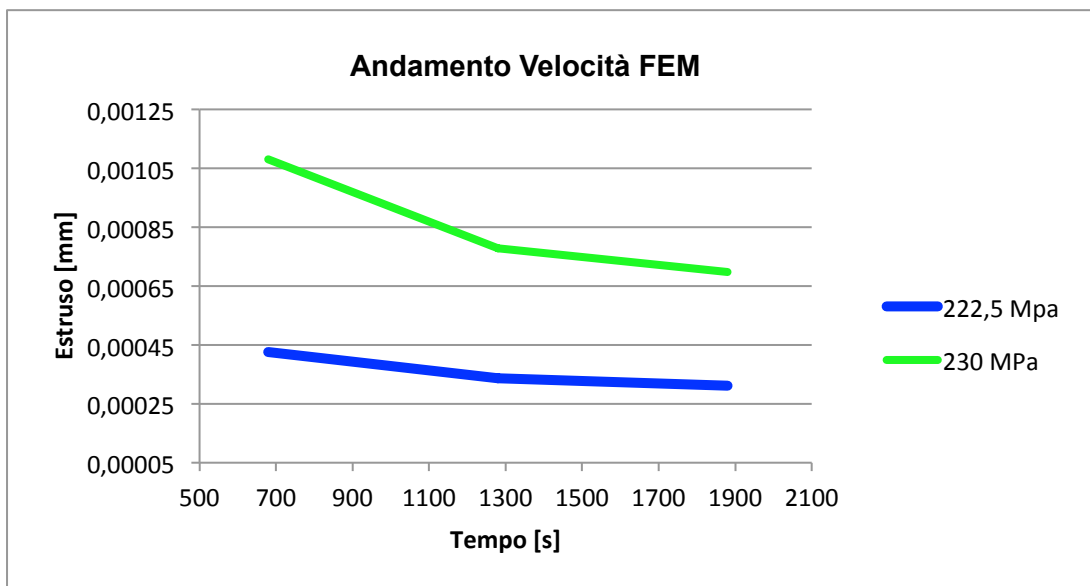


Figura 5.8: Confronto estrusione a differenti pressioni

Osservando nello specifico si evince come anche l'andamento della velocità di estrusione riproduce fedelmente la realtà delle cose.

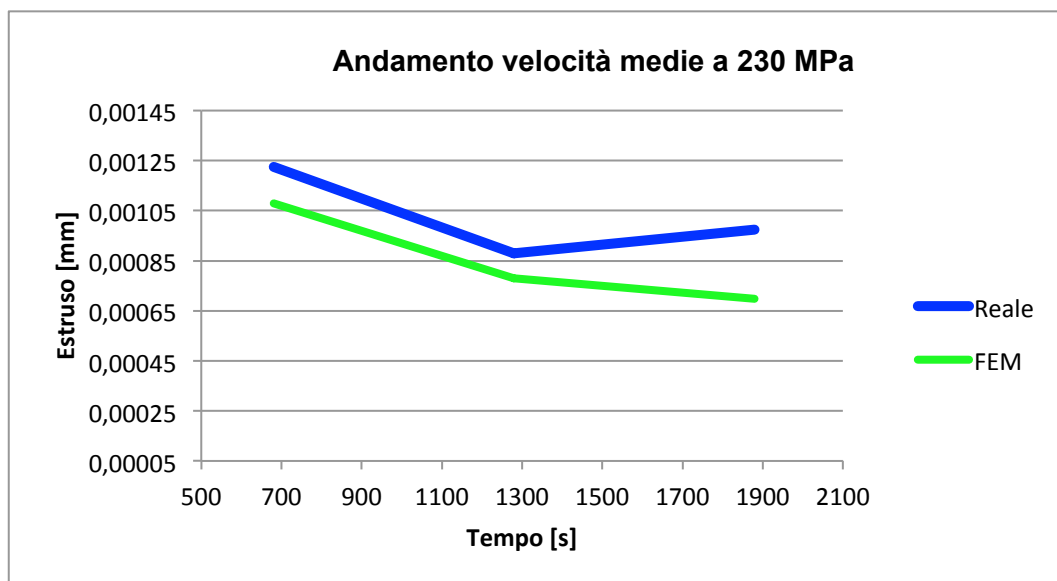


Figura 5.9: Confronto estrusione reale e FEM

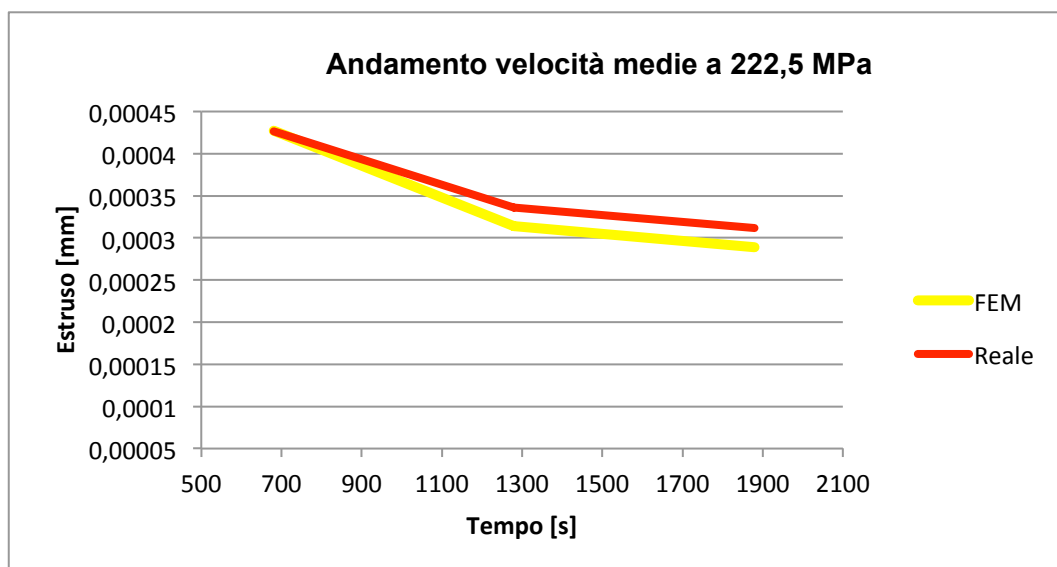


Figura 5.10: Confronto estrusione reale e FEM

Dall'osservazione del grafico in figura 5.9 e 5.10 risulta sottolineare come il comportamento della velocità media di estrusione a pressioni differenti riproduca fedelmente l'andamento medio sperimentale indi per cui questo è a tutti gli effetti un segnale di buona riuscita dell'esperienza. Quando si analizzano queste velocità media va tuttavia sottolineato che le grandezze trattate non sono istantanee ma sono, altresì, grandezze ricavate matematicamente e che quindi non riproducono l'intero evolvere del processo ma lo schematizzano verosimilmente.

5.2. Conclusioni

Alla luce delle considerazioni sin ora concretate e dal punto di vista delle competenze acquisite fin ora in termini di simulazione numerica della micro estrusione idrostatica non è ottimistico suggerire il conseguimento di un risultato più che discreto degli obiettivi prefissati.

La ricerca e il perfezionamento del prototipo hanno dato come risultato un modello numerico che riproduce puntualmente la realtà di un processo di micro estrusione idrostatica in termini di pressione e attrito. Va altresì sottolineato come le priorità del progetto sono andate via via modificandosi in direzione del perfezionamento del modello il quale ha implicato un consistente lavoro di studio dell'uso del software di simulazione relativamente alla parametrizzazione e alle condizioni di criticità della capacità di calcolo.

In conclusione, essendo il modello affidabile, è fiducioso pensare che il coefficiente di attrito $\mu=0,157$, rilevato dal confronto numerico tra tratti estrusi virtualmente e sperimentalmente, a diverse pressioni e in differenti intervalli di tempo, è un risultato realistico. Infatti, a parità di attrito, e variando gli altri parametri, il modello estrude virtualmente con un'ottima approssimazione le quantità estruse sperimentalmente in laboratorio. A conferma di ciò si osserva che l'attrito ricavato è molto vicino ai valori di una prova di trafilatura, ossia in condizioni di assenza di lubrificante; questo si spiega con la teoria dell'open lubricat pockets la quale sostiene che una riduzione sensibile della sezione resistente, come nel caso della micro estrusione, induce la presenza di sole tasche aperte sulla superficie dalle quali il lubrificante fuoriesce mettendo direttamente a contatto le due superfici metalliche rendendo la micro estrusione molto simile ad un processo di trafilatura con eguale attrito.

In ultimo, è corretto osservare come il grado di precisione del coefficiente di attrito riscontrato sia verosimile, infatti, è plausibile che il simulatore sia sensibile a variazioni di attrito fino alla quarta cifra decimale, ma non sia altresì realistico in quanto è impossibile riprodurre in laboratorio simili variazioni.

Contemporaneamente, si evidenzia come l'attrito ricavato dalle simulazioni è un valore riassuntivo di tutti i fenomeni di attrito presenti in un processo reale, quindi è molto probabile che questo inglobi altri attriti oltre a quello tra matrice e billetta. Infine, si sottolinea come tale valore sia molto elevato se confrontato con una normale prova di estrusione idrostatica che raggiunge di attrito pari a 0,05: viene intuitivo domandarsi se questa differenza è dovuta all'effetto di miniaturizzazione.

5.3.Considerazioni

5.3.1.Steady State

Lo steady state, o la condizione di equilibrio dipende da diversi fattori, quali la lubrificazione, la temperatura e la quantità di materiale da estrudere. Una variazione di qualsiasi di questi fattori va ad incidere sul tempo necessario al raggiungimento della condizione di equilibrio, il quale può oscillare da pochi minuti a svariate ore. Una variazione minima dei parametri può non indurre alcun effetto sul tempo necessario al raggiungimento dello steady state, mentre una variazione sensibile di almeno uno dei parametri può variarlo di molto. Altresì va aggiunto che la modifica dei parametri non influisce istantaneamente ma può manifestare degli effetti in maniera ritardata.

La pluralità di fattori che entrano in gioco durante un processo di micro estrusione idrostatica rende, di conseguenza, estremamente complessa l'analisi e la previsione di questa tecnica di micro formatura. Dovendo noi sviluppare un modello di simulazione il più vicino possibile al processo reale ci siamo quindi scontrati con innumerevoli problemi imprevisi e difficilmente superabili.

In un processo reale si sviluppano, infatti, forze ed attriti non facilmente riproducibili. La letteratura ci insegna, ad esempio, come una volta raggiunta una pressione ideale il processo di estrusione dovrebbe svilupparsi a velocità costante, raggiungendo, quindi, una sorta di *steady state*. Non sono però chiare le condizioni per cui si possa riconoscere il raggiungimento di questo regime permanente, ciò implica nel nostro caso una difficoltà di calcolo delle velocità medie di estrusione. A causa degli elevati tempi di elaborazione dei processori, e forti delle teorie sullo *steady state*, abbiamo provato a cercare la velocità di estrusione a regime al fine di tracciare un andamento lineare dell'evoluzione del processo di micro-estrazione. La velocità di estrusione a regime è la velocità con cui il materiale viene estruso a pressione costante, successivamente ad una fase di assestamento imputabile alle variazioni di pressione durante la rampa iniziale di pressione e al raggiungimento della pressione di estrusione. Sviluppati perciò tre modelli identici con durate di applicazione di carico a regime rispettivamente di 680,1280,1880 secondi abbiamo plottato a video le velocità di spostamento del nodo più esterno della billetta e abbiamo cercato di identificare lo *steady state* e quindi la velocità di estrusione a regime. Considerate quindi le quantità di materiale estruse in intervalli di tempi diversi abbiamo evidenziato, rapportando lo spazio con il tempo, un andamento costante delle velocità dopo una prima fase iniziale di instabilità, il che è in assoluta concordanza con il modello teorico.

Ulteriormente a ciò, dal grafico della velocità si evince una corretta accelerazione del materiale nella fase iniziale, dovuta alle minori forze di attrito in gioco, seguita da una

brusca e sensibile decelerazione, fino al raggiungimento di uno andamento a regime permanente il che ci fa ipotizzare di aver raggiunto le condizioni di *steady state*.

Contemporaneamente, non potendo conoscere le reali velocità istantanee in camera di estrusione non possiamo accertare questa ipotesi: il raggiungimento del regime di estrusione potrebbe, difatti, non essere mai stato raggiunto principalmente per due motivi:

- tempi di estrusioni non sufficienti (piccole quantità di estruso)
- pressioni di estrusioni non sufficienti.

Ipotesi estremamente condivisibile è che si siano utilizzate pressioni di estrusione non adeguate ed insufficienti e che, quindi, a causa del perenne conflitto tra deboli forze di estrusione ed elevati attriti, l'estrusione di laboratorio non abbia mai raggiunto lo *steady state*, ma sia proceduta a singhiozzi determinandola comparsa di stick-slip.

Il fenomeno dello stick-slip si caratterizza per un avanzamento a scatti del materiale, dovuto a continue fluttuazione della pressione causate dal movimento della billetta. Ogni volta che la billetta avanza il fluido perde pressione e quindi non è più in grado di estrudere, quando raggiunge nuovamente la pressione di estrusione la billetta entra in movimento ripetendo ciclicamente il fenomeno.

L'ipotesi della comparsa dello stick slip non è casuale, ma imputabile alla presenza di contigue cricche trasversali sulla superficie laterale dei provini estrusi come da figura 5.1.

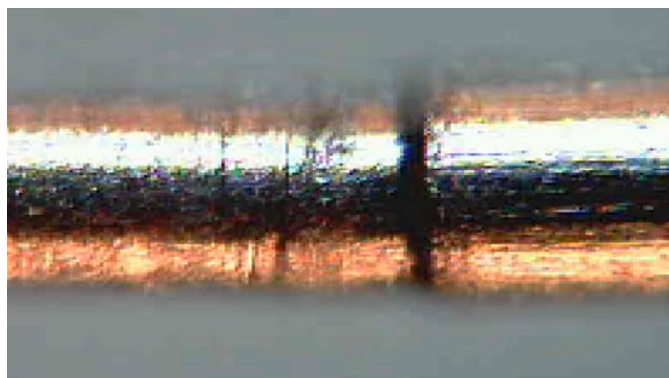


Figura 5.1: Cricche contigue

La verifica, e quindi una via d'uscita, sarebbe quella di provare ad estrudere tratti più lunghi nella speranza che lo *steady state* si manifesti successivamente i 1800 secondi al fine di osservare se sulla superficie del provino sia possibile osservare zone caratterizzate da cricche contigue e zone prive di tali difetti. Tale evidenza ci permetterebbe di rafforzare la nostra teoria di non raggiungimento dello *steady state*;

tuttavia l'apparecchiatura utilizzata prevede un blocchetto di carico per l'estrusione estremamente ridotto vincolando la lunghezza dei pezzi da estrudere.

Esiste quindi la possibilità di verificare l'ipotesi che potrebbe chiarirci le idee, altresì siamo impossibilitati a verificare l'ipotesi a causa delle limitate possibilità di misurazione in un processo di micro estrusione per colpa delle elevate pressioni e delle piccole dimensioni in gioco.

5.3.2. Pressione idrostatica

Dalla proiezione della distribuzione degli sforzi normali si evidenzia come la billetta sia soggetta ad una pressione costante verticale che l'accompagna fino all'ingresso in matrice, e, contemporaneamente, è soggetta ad una pressione longitudinale, pari in modulo a quella trasversale, che esercita la sua azione su tutta la sezione posteriore della billetta.

Ulteriormente è possibile osservare come all'uscita della matrice la billetta non è più sottoposta ad alcuna azione meccanica, proprio come accade sperimentalmente. (Figura 5.2 e 5.2.b)

Sommando i contributi delle osservazioni fatte si riscontra che l'azione congiunta delle forze trasversali e longitudinali riproduce fedelmente l'azione di un fluido posto in pressione da un unico pistone che distribuisce un carico normale costante su tutta la superficie della billetta a contatto con il fluido pressorio.

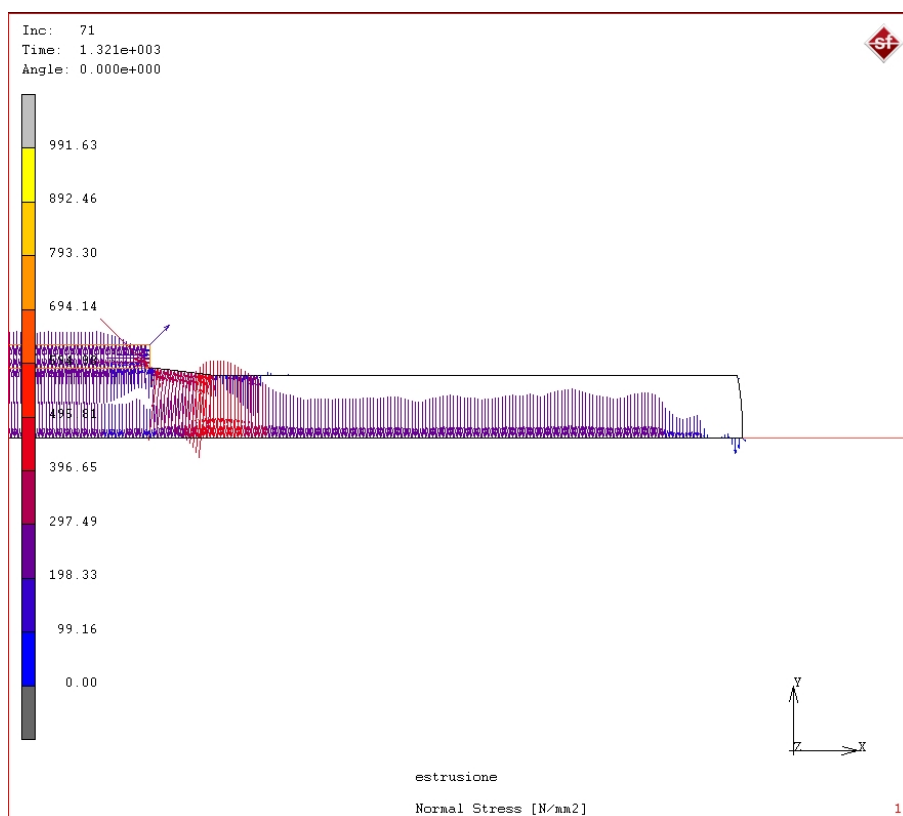


Fig. 5.2: Normal stress

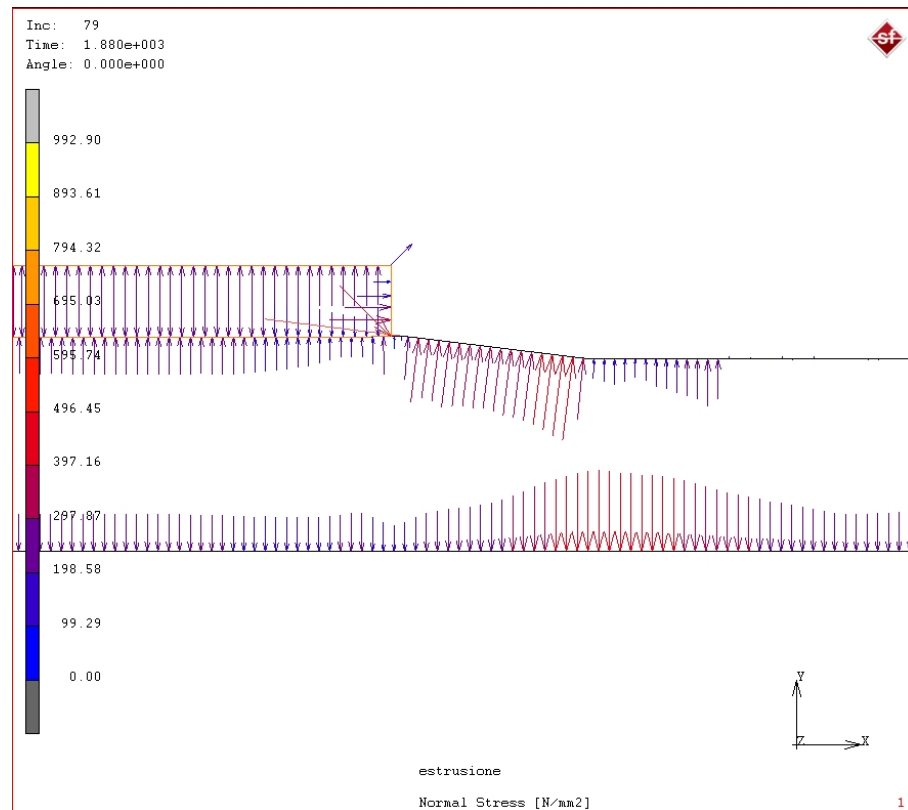


Fig. 5.2.b: Dettaglio Normal Stress

5.3.3. Attrito

Obiettivo principale di questa esperienza è stato quello di realizzare un modello adatto alla simulazione numerica del processo di micro estrusione idrostatica e per comprendere la correttezza del modello avevamo a disposizione i dati sperimentali recuperati in laboratorio i quali, confrontati con i risultati virtuali, ci hanno permesso di calibrare il modello in modo realistico ai fini di poter calcolare il coefficiente di attrito tra il rame estruso e la matrice di estrusione.

A tal fine è necessario che il modello manifesti attrito solo nelle zone dell'intorno della matrice ove si rivela la deformazione massiva. Inoltre va sottolineato come la lunghezza di estruso sperimentale è funzione di pressione, materiale ed altre variabili fisiche non riproducibili; perciò l'unica variabile su cui si può agire per rendere uguali lunghezze di estruso simulate e reali è il coefficiente di attrito virtuale, il quale, probabilmente, ingloberà non solo l'attrito tra matrice e billetta, ma anche tutti i fenomeni di attrito non evidenti e misurabili sperimentalmente.

Appendice A: prova di trazione

Permette di ricavare sperimentalmente i coefficienti K ed n , tipici della curva di tensione/deformazione di un materiale plastico, secondo la formula :

$$\sigma = K * \varepsilon^n \quad (2.1)$$

Apparecchiatura

La prova consiste nel tirare un filo ad una velocità costante di 50 mm/min tramite l'apparecchiatura in figura 2.1.

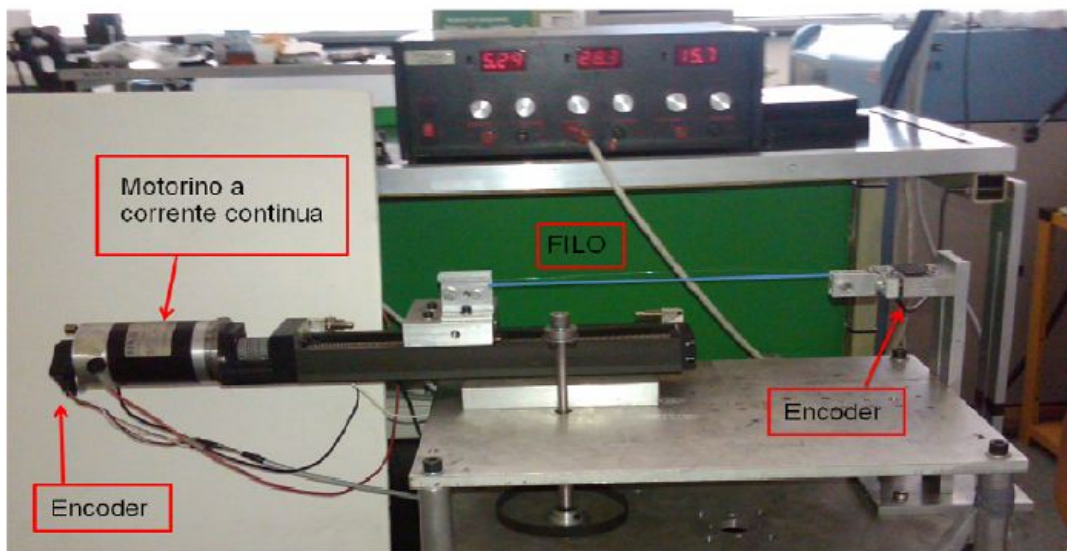


Fig. 2.1: Attrezzatura per la prova di trazione.

Le due estremità del filo sono avvolte e fissate ad una delle due pulegge, una delle quali è solidale ad una cella di carico fissata alla struttura, l'altra invece è solidale con un piano mobile messo in movimento lungo l'asse del filo grazie ad un collegamento con una vite senza fine, azionata da un motorino a corrente continua.

L'avanzamento della vite è reso continuo e costante, nonostante l'aumento progressivo della forza agente nel filo, grazie ad un controllo a circuito chiuso che, tramite un encoder che rileva la velocità di rotazione della vite ed un controllore di tipo PID, è in grado di azzerare l'errore tra l'avanzamento reale della vite e l'avanzamento desiderato.

Tramite il programma di acquisizione dati è possibile rilevare, per ogni intervallo di tempo desiderato, la corrispondente forza di trazione individuata dalla cella di carico.

L'importazione e l'analisi dei dati in Excel permette di ricavare la curva di tensione/deformazione del campione di filo, confrontabile successivamente con il modello analitico dell'equazione 2.1.

Appendice B: Olio usato in estrusione

I lubrificanti utilizzati sono:

- Chemetall Gardolube DO 338, un olio emulsionabile in acqua, composto da esteri di acidi grassi, inibitori di corrosione e tensioattivi, con densità di 0.99 g/cm^3 , viscosità a 23° C , (LVT g34 V50) = 350 cP.
- Mina di matita di durezza B stesa sulla circonferenza del filo lungo tutta la lunghezza da estrudere. È caratterizzata da densità pari a 1900 Kg/m^3 , calore specifico pari a $0.71 \text{ Kg/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$, conduttività termica pari a $178 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ e diffusività termica pari a $13.2 \text{ m}^2/\text{s} \cdot 10^5$.

Bibliografia:

- [1] Geiger M., Kleiner M., Eckstein R., Tiesler N., Engel U., 2001, "Microforming", *Annals of the CIRP*, vol. 50/2, pp. 445-462.
- [2] Engel U., Eckstein R., 2002, "Microforming-from basic research to its realization", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125-126, pp.35-44
- [3] Engel U. , 2006, "Tribology in microforming", *U. Engel / Wear* 260, pp. 265 – 273.
- [4] F. Vollertsen_, H. Schulze Niehoff, Z. Hu, 2006, "State of the art in micro forming", F. Vollertsen et al. / *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, pp. 1172–1179.
- [5] *ASM Metals Handbook*, 10th ed., vol. 14, 1990, "Forming and Forging", ASM - Metals Park, Ohio, pp. 646 – 674, 709 - 714.
- [6] *ASM Metals Handbook*, 10th ed., vol. 18, 1990, "Friction, lubrication, and wear technology", ASM - Metals Park, Ohio.
- [7] L. F. Mori, L. Lutterotti – *Tecnologie e sistemi di lavorazioni - Anno 2005-2006 - Università di Torino, Corso di ing. meccanica*. Ing. Roberto Guggia.
- [8] Alting L., Kimura F., Hansen H.N., Bissacco G., 2003, "Micro Engineering", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 2., pp. 635-657.
- [9] Berti G., Monti M., D'Angelo L., 2010, "Cold microforming of low carbon steel: wire drawing and hydrostatic extrusion", In *43rd ICFG Plenary Meeting 2010*, pp. 168-175.
- [10] S. Kalpakjian, S.R. Schmid, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, 4th Ed. Prentice Hall, 2000.
- [12] X. Peng, M.D. Sumption, and E.W. Collings , 2002, "Finite Element Modeling of Hydrostatic Extrusion for Mono-Core Superconductor Billets", pp. 1-4.
- [13] L. Zurlo, A.A.2009-10, "Indagine sperimentale sul comportamento del materiale in operazioni di microtrafilatura e di microestrusione", *Università degli Studi di Padova*.
- [14] G. Berti, M. Monti, L. D'Angelo, 2011, Hydrostatic microextrusion of steel and copper, *Proc. Of Esaform 2011*, pp. 499-504
- [15] AIAS – Associazione italiana per l'analisi delle sollecitazioni XXXVIII Convegno nazionale, 9-11 settembre 2009, Politecnico di Torino *Influenza dell'effetto di scala sul fenomeno dell'attrito dinamico:investigazione sperimentale della coppia ottone-acciaio*.

Sitografia:

- [1] “Limite di fatica con metodi termografici mediante regressione esponenziale”,
Curà F; Curti G; Gallinatti A.E., XXXVIII° Convegno Nazionale AIAS,
Politecnico di Torino
- lunedì 23 Ottobre 2010
 - <http://www.dimec.polito.it/>
- [2] Analisi agli elementi finiti
- TEC Eurolab Srl
 - mercoledì 23 Febbraio 2011
 - www.tec-eurolab.com
- [3] “Tecnologie e sistemi di lavorazione”, Ing. Roberto Guccia docente di Ing.
Meccanica presso l’Università di Ferrara
- giovedì 11 dicembre 2011
 - www.unife.it/ing/meccanica
- [4] www.tecnologiaindustriale.it
- martedì 7 Gennaio 2011
- [5] “Microsistemi, il mercato corre”, Prof. Renato Ugo, presidente associazione
italiana ricerca industriale – Ordinario di Chimica Organica presso
l’Università Statale di Milano
- mercoledì 23 Febbraio 2011