

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA**

*DIPARTIMENTO DIEM*

**TESI DI LAUREA**

in

**TECNOLOGIE SPECIALI LS**

**IMPLEMENTAZIONE DI ROUTINE PER LA PREVISIONE  
DELL'EVOLUZIONE DELLA DIMENSIONE DEL GRANO  
DURANTE L'ESTRUSIONE DI PROFILI IN LEGA LEGGERA**

**CANDIDATO:**  
Emanuele Di Giacomo

**RELATORE:**  
Chiar.mo Prof. Luca Tomesani

**CORRELATORI:**  
Chiar.ma Prof. Lorella Ceschini  
Dott. Ing. Lorenzo Donati  
Dott. Ing. Giampaolo Campana  
Ing. Antonio Segatori

Anno Accademico 2009/10

Sessione I



# Indice

INTRODUZIONE.....	6
Obiettivi.....	8
CAPITOLO 1. Estrusione di leghe d'alluminio .....	9
1.1 Il processo di estrusione .....	9
1.1-1 Introduzione ai processi di deformazione plastica .....	9
1.1-2 L'estrusione .....	11
1.1-3 Tipologie di estrusione .....	12
1.1-4 Temperature di estrusione.....	16
1.1-5 Tipologie di profili realizzabili.....	18
1.1-6 Tribologia delle matrici di estrusione .....	22
1.2 Alluminio e le sue Leghe .....	25
1.2-1 Generalità.....	25
1.2-2 Le Leghe di Alluminio.....	28
1.2-3 Applicazioni.....	31
1.3 Microstruttura di estrusi in lega di alluminio.....	33
1.3-1 Aspetti introduttivi.....	33
1.3-2 Ricristallizzazione.....	35
1.3-3 Analisi metallografica della ricristallizzazione .....	37
CAPITOLO 2. Applicazione Deform .....	46
2.1 Introduzione .....	46
2.2 Capacità dell'applicazione Deform.....	47
2.2-1 In Deformazione: .....	47

2.2-2 Trattamenti Termici .....	48
2.3 Il Sistema Deform .....	51
2.3-1 Pre-Processor .....	51
2.3-2 Simulation .....	52
2.3-3 Post-Processor.....	54
2.4 User Routine.....	66
2.4-1 Aspetti Introduttivi.....	66
2.4-2 User-Defined FEM Routine.....	66
2.4-3 Riassunto delle subroutine.....	68
CAPITOLO 3. Prove Sperimentali .....	71
3.1 Introduzione .....	71
3.2 Estrusione diretta in piccola scala.....	72
3.2-1 Analisi metallografiche dei provini .....	77
3.2-2 Dimensioni del grano.....	80
3.3 Simulazione Deform dei profili estrusi.....	83
3.3-1 Deformazione equivalente per zona .....	87
3.3-2 Analisi dei risultati Deform .....	91
CAPITOLO 4. Implementazione subroutine .....	95
4.1 Aspetti introduttivi .....	95
4.2 Deformazioni in campo plastico .....	95
4.2-1 Deformazioni calcolate dal codice Deform .....	97
4.3 Implementazione subroutine .....	98
4.3-1 Simulazione di una doppia ricalcatura in assialsimmetria .....	104
4.3-2 Simulazione dell'estrusione sperimentale .....	116

4.3-3 Elaborazione dati acquisiti.....	123
4.3-4 Regressione dell'andamento generale della deformazione equivalente rispetto alle dimensioni del grano.....	128
4.3-5 Implementazione subroutine per il calcolo delle dimensioni del grano .....	134
4.3-6 Affidabilità della subroutine .....	135
CONCLUSIONI.....	140
Bibliografia.....	144

## **INTRODUZIONE**

Lo sviluppo tecnologico per la lavorazione dei metalli è in continua evoluzione, nuovi processi produttivi e nuove leghe vengono studiate per realizzare le caratteristiche meccaniche richieste per una specifica produzione ed ogni settore esige particolari costruttivi e tecnologici tali da differenziare ogni singolo componente.

La necessità, in un regime di cambiamento rapido e diffuso quale quello attuale, di una crescente diversificazione dei prodotti e la riduzione dei corrispondenti cicli di vita richiedono alle imprese di gestire in modo appropriato il confronto con l'innovazione tecnologica nelle sue molteplici forme.

Nella pratica industriale, negli ultimi decenni, sono stati sviluppati dei software che permettono di simulare i cicli di lavorazione per deformazione plastica che un determinato componente dovrà subire nella realtà. In questo modo riusciamo ad anticipare, mediante modelli sul calcolatore, lo studio di un processo tecnologico senza che questo sia effettivamente costruito o direttamente sperimentato.

La sperimentazione virtuale permette di migliorare la qualità dei prodotti e ridurre tempi e costi di fabbricazione; essa è riconosciuta, oggi, come il principale veicolo di quella innovazione metodologica necessaria alle imprese per assicurare loro una adeguata competitività.

Oltre alla riduzione dei costi in questo modo riusciamo ad ottimizzare quelle che sono le caratteristiche del componente lavorato, eliminando i difetti e preservando da rotture le macchine utensili. Questi software di simulazione FEM (Finite Element Method) ci permettono di conoscere in anticipo il comportamento del materiale durante un ciclo di lavorazione e di conseguenza è possibile ottimizzare il processo inizialmente sul software, variando i parametri tecnologici, e

successivamente in produzione consentendo di ottenere il miglior risultato con il minore dispendio economico e di tempo.

Il software preso in esame nel presente lavoro, denominato DEFORM, è un software agli elementi finiti 2D e 3D.

I modelli di previsione della microstruttura hanno suscitato un grande interesse da parte delle industrie, specialmente per quanto riguarda le leghe leggere dove le proprietà meccaniche sono fortemente dipendenti dalla microstruttura finale. Inoltre è ben noto come la dimensione del grano e la precipitazione di fasi secondarie influenzano diversi aspetti del prodotto finale, quali, ad esempio, l'effetto estetico, la resistenza a trazione, la formabilità, la resistenza a fatica e alla corrosione.

La struttura a grana fine è particolarmente richiesta specialmente quando il prodotto viene sottoposto ad elevati carichi di fatica, oppure viene messo in opera in atmosfera corrosiva.

L'ottenimento della microstruttura ottimale si è spesso basato sull'esperienza tramandata e solo di recente l'interesse verso i processi di simulazione è significativamente aumentato.

Nel presente lavoro è stata eseguita una procedura sperimentale per la previsione della microstruttura di un estruso in lega di alluminio. L'evoluzione della microstruttura, a cause della deformazione, presenta delle zone con dei grani allungati ed altre con dei grani ricristallizzati con fenomeni di accrescimento.

Il lavoro è stato svolto in quattro fasi: nella prima, sono stati realizzati dei profili estrusi in lega di alluminio AA6082 su piccola scala, variando i parametri di lavorazione che sono stati scelti in modo tale da riprodurre le condizioni tipiche industriali. Nella seconda fase è stata analizzata l'evoluzione della microstruttura e la misura delle dimensioni dei grani della lega presenti in varie zone del materiale

deformato. Nella terza fase sono state avviate delle simulazioni con il codice Deform per confrontare le deformazioni simulate con le dimensioni reali dei grani. Nella quarta fase è stato implementato il codice attraverso una subroutine, in modo da ottenere una previsione delle deformazioni equivalenti e delle dimensioni dei grani in maggiore accordo con la realtà delle analisi metallografiche.

### **Obiettivi**

Questo lavoro pone come obiettivo principale lo studio dell'evoluzione micro strutturale della lega di alluminio AA 6082 durante l'estrusione, mediante l'implementazione di subroutine del codice Deform.

Vogliamo verificare l'affidabilità del codice riguardo la previsione delle deformazioni dei grani, confrontando i risultati delle simulazioni FEM con le analisi metallografiche degli estrusi ottenuti nella realtà.



# **CAPITOLO 1. Estrusione di leghe d'alluminio**

## **1.1 Il processo di estrusione**

### **1.1-1 Introduzione ai processi di deformazione plastica**

I processi di deformazione plastica vengono generalmente suddivisi in due categorie, a causa delle differenti problematiche coinvolte:

- a) i processi di formatura massiva come l'estrusione, la forgiatura, la laminazione e la trafilatura;
- b) i processi di formatura delle lamiere, come la stiratura, l'imbutitura, la piegatura.

Complessivamente si tratta di processi altamente significativi nella produzione di beni, sia di consumo che per l'industria.

Una seconda classificazione assai comune è quella di dividerli in processi a freddo e a caldo (rispettivamente al di sotto e al di sopra della temperatura di ricristallizzazione), dato che la maggior parte dei materiali si comportano diversamente col variare della temperatura. In particolare, la tensione di flusso di un materiale, cioè la resistenza che offre alla deformazione, dipende dalla deformazione nei processi a freddo e dalla velocità di deformazione nei processi a caldo. I principi che governano la formatura dei metalli alle diverse temperature sono fondamentalmente gli stessi; non è quindi molto utile definire un approccio basato sulle temperature iniziali, quanto piuttosto sulle geometrie di inizio e fine processo, sul materiale e sulle velocità di deformazione.

Geometrie complesse sono ottenibili sia in processi a caldo che a freddo; con la sola differenza che le minori tensioni di flusso del

materiale in deformazione nei processi a caldo produrranno minori tensioni sugli utensili.

La deformazione plastica diventa un processo conveniente soprattutto nei casi in cui:

- si ha una bassa complessità geometrica e i volumi di produzione sono elevati, cosicché è possibile contenere i costi degli utensili per unità prodotta (ad esempio in campo automobilistico);
- le proprietà del componente e l'integrità metallurgica sono molto importanti, come accade ad esempio negli aerei cargo, nei componenti di motori a reazione e di turbine.

Il progetto, l'analisi e l'ottimizzazione dei processi di deformazione plastica richiedono:

- 1) la conoscenza del comportamento reologico del materiale;
- 2) le modalità di flusso del materiale negli stampi;
- 3) informazioni tecnologiche riguardo al lubrificante, alle tecniche di riscaldamento e raffreddamento;
- 4) la conoscenza delle macchine.

Nel seguente studio tratteremo il processo di lavorazione dell'*estrusione*.

## 1.1-2 L'estrusione

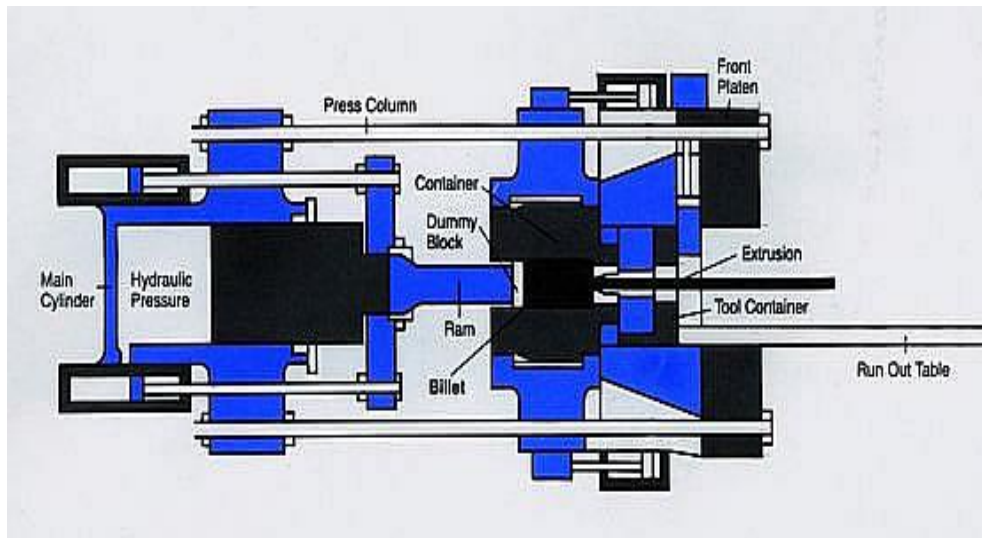
I prodotti estrusi costituiscono più del 50% del mercato dei prodotti d'alluminio in Europa. Estrusi di alluminio sono usati in costruzioni commerciali e domestiche per le strutture di porte e finestre, per la costruzione di tetti e rivestimenti. Inoltre gli estrusi sono utilizzati nel settore dei trasporti, per le strutture dei velivoli, e nelle applicazioni marine.

L'estrusione è un processo di lavorazione per deformazione plastica, realizzabile sia a caldo che a freddo, che permette di ottenere principalmente dei semilavorati di sezione costante anche complessa.

Questo processo consente finiture superficiali da 1,6 a 25 $\mu$ m ( $R_a$ ) e tolleranze dimensionali ISO da IT7 a IT1 su prodotti lunghi di sezione costante. Gli spessori minimi possono essere dell'ordine di 0,5 mm, con complessità di forma talora eccezionali. Inoltre, è caratterizzato da elevate produttività ed elevate riduzioni di sezione, le velocità di uscita del materiale variano dai 40 mm/s per le leghe di zinco e magnesio sino ai 400 mm/s per ottone e leghe di alluminio.

In tale processo uno spezzone di barra a sezione genericamente circolare chiamato billetta, introdotto in un contenitore, viene sottoposto a forze di compressione tramite una pressa orizzontale ed obbligato a fuoriuscire attraverso una matrice la cui sezione corrisponde, in forma e dimensioni, al prodotto desiderato (*fig.1.1*).

Questa lavorazione si effettua su materiali ad elevata deformabilità, come ottone e leghe di alluminio, ed anche su acciai. E' caratterizzata da elevate produttività ed elevate riduzioni di sezione.



*Fig.1.1. Schema semplice di una pressa di estrusione idraulica orizzontale tipica; il senso dell'estrusione qui è da sinistra a destra.*

### 1.1-3 Tipologie di estrusione

I processi di estrusione vengono distinti:

- estrusione a caldo ed estrusione a freddo a seconda della temperatura del processo;
- estrusione diretta ed estrusione inversa a seconda della direzione relativa tra spintore-profilo estruso.

#### **Estrusione a caldo ed estrusione a freddo**

Come detto in precedenza è un processo che si può svolgere sia a caldo che a freddo, in funzione se ci si trovi al di sopra o al di sotto della temperatura di ricristallizzazione:

- L'estrusione a caldo comporta evidentemente minori forze a parità di deformazione, ma occorre risolvere i problemi creati dall'ossidazione superficiale dello spezzone e quelli della lubrificazione a temperatura elevata. Il primo problema, che può provocare deformazioni poco omogenee dato il differente

coefficiente di attrito tra il metallo e il suo ossido, viene risolto usando un pistone premente di diametro inferiore a quello delle pareti del contenitore; in questo modo lo strato di ossido rimane aderente alle pareti del contenitore come una “pelle”. Il secondo problema viene risolto usando vetro fuso come lubrificante, che mantiene una buona viscosità alle alte temperature e costituisce inoltre un buon coibente termico che rallenta il raffreddamento dello spezzone di barra. Nel caso delle leghe di alluminio queste temperature variano dai 400-500 °C.

- L'estrusione a freddo, nonostante richieda forze più elevate, permette di ottenere migliori caratteristiche meccaniche e migliore qualità del prodotto, in termini di finitura superficiale e precisione dimensionale.

### **Estrusione diretta ed estrusione inversa**

I metodi principalmente usati per estrarre sono l'estrusione diretta e l'estrusione inversa, a seconda che il moto del prodotto estruso sia, o meno, nella stessa direzione dello spintore premente (Fig.1.2, Fig.1.3). Nel caso dell'estrusione inversa la sezione è ricavata all'interno dello spintore, come nel caso di figura, oppure nell'intercapedine fra spintore e camera, quando il diametro dello spintore è più piccolo di quella. Chiaramente nel caso dell'estrusione inversa la lunghezza dello spintore deve essere almeno pari a quella del prodotto estruso, creando una forte limitazione di lunghezza dello stesso, in quanto prodotti troppo lunghi creerebbero problemi di stabilità (carico di punta) sul pistone.

# Estrusione

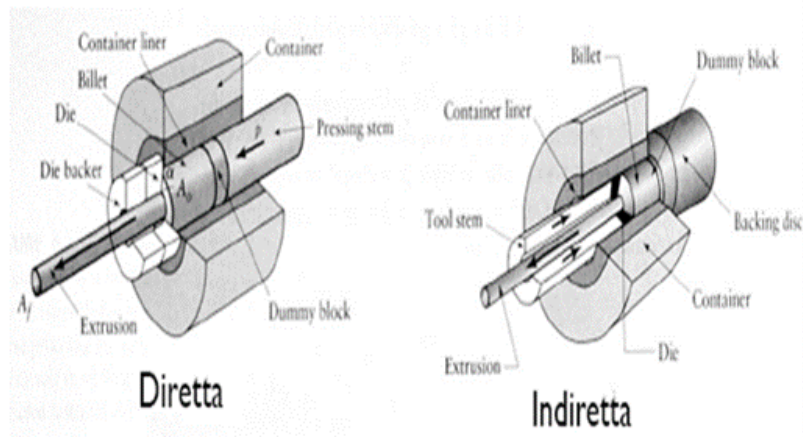


Fig.1.2. Estrusione diretta ed indiretta.

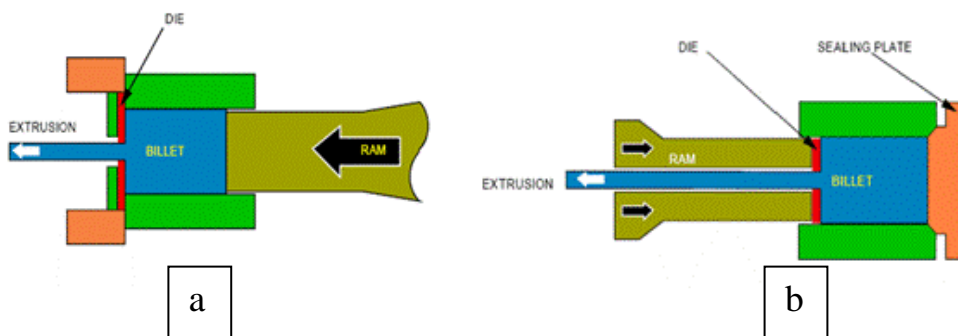
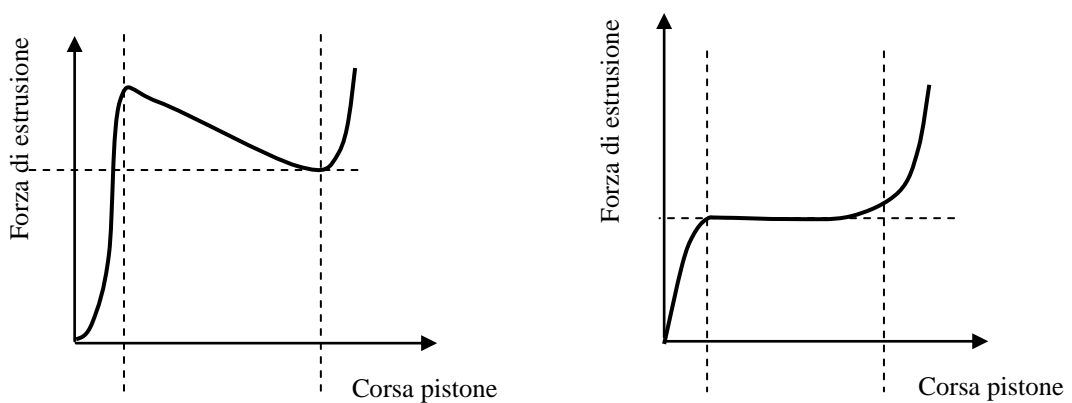


Fig 1.3. a) Estrusione diretta b) Estrusione inversa



Graf 1.1. Grafici corsa /forza per l'estrusione diretta e l'estrusione inversa

Nel precedente grafico (*Graf 1.1*) sono stati riportati gli andamenti qualitativi della forza di estrusione in funzione della corsa del pistone relativamente all'estrusione diretta e inversa.

La forza totale di estrusione è la risultante della componente necessaria a provocare la deformazione plastica del materiale e della componente necessaria per vincere gli attriti. Nella prima parte della corsa del pistone la forza aumenta fino al completo riempimento della camera di estrusione, ma nel caso di estrusione diretta la forza raggiunge un valore più elevato, in quanto deve essere superato l'attrito di primo distacco nel movimento dello spezzone di barra rispetto alle pareti del contenitore, movimento assente nel caso dell'estrusione inversa. Nella seconda parte della corsa, laddove avviene l'estrusione vera e propria, la forza si mantiene costante nel caso dell'estrusione inversa, mentre, nel caso della diretta, il valore della forza prima raggiunto decresce, corrispondentemente al fatto che la superficie di attrito con il contenitore va progressivamente diminuendo. Nell'ultima fase della corsa la forza nei due casi aumenta rapidamente, a causa della maggiore difficoltà della deformazione plastica, che prevede movimenti anche radiali del materiale con maggiori superfici di attrito. Per questo motivo non si riesce ad estrarre tutta la billetta e quindi l'ultima parte viene tagliata ed eliminata dal contenitore.

E' opportuno notare che, nell'estrusione diretta, la velocità di efflusso del metallo al centro della sezione è maggiore rispetto ai bordi, zona dove è presente l'attrito con le pareti del contenitore. Questo gradiente di velocità può provocare dei difetti all'interno del profilo, in particolare, nella zona centrale del prodotto estruso. Questo difetto è anche legato, nell'estrusione a caldo alla superficie ossidata dello spezzone che non riesce a saldarsi in corrispondenza delle cavità

centrali. Un metodo per ovviare a questo problema è proprio quello, prima indicato, di usare pistoni di diametro minore di quello del contenitore, in modo che lo strato di ossido rimanga aderente alle pareti e le eventuali cavità che si formano si possano agevolmente richiudere.

L'estrusione inversa non presenta questo fenomeno ed è caratterizzata da forze inferiori, quindi richiede presse di minori prestazioni; d'altro lato il costo del pistone cavo è generalmente maggiore, la produzione è discontinua e quindi il costo al Kg è decisamente superiore rispetto all'estrusione diretta.

#### 1.1-4 Temperature di estrusione

Durante l'estrusione si genera un gradiente di temperature di notevole complessità. Si ha infatti (Fig. 1.4):

- generazione di calore nella zona di deformazione;
- generazione di calore per attrito nella camera;
- dispersione di calore dal materiale verso la camera;
- dispersione di calore dalla camera verso l'esterno;
- fuoriuscita di calore con il prodotto estruso.

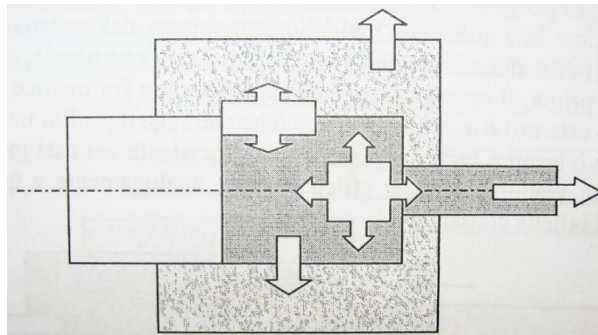


Fig. 1.4. Generazione e dispersione di calore nell'estrusione



Questo insieme di fenomeni rende difficoltosa la previsione della temperatura di uscita del materiale, che è sempre maggiore della temperatura di preriscaldamento della billetta.

In generale, la temperatura è un fattore che regola la tensione di flusso plastico del materiale: più la temperatura è alta, più il materiale è tenero, più si riducono forze e potenze di lavoro, più è facile creare profili complessi.

D'altra parte, la temperatura è limitata superiormente dal raggiungimento di condizioni metallurgiche critiche. In particolare, si temono gli *hot shortness*, o bruciature intergranulari; queste sono delle fusioni incipienti del materiale che producono l'ossidazione dei bordi di grano, determinando una completa perdita delle caratteristiche meccaniche. In queste condizioni il materiale è da scartare. Il fenomeno degli *hot shortness* si verifica indicativamente 40-50° al di sotto della temperatura di fusione del materiale considerato.

Ciò che va evitato, quindi, è che il prodotto estruso raggiunga quella temperatura critica. La temperatura di preriscaldamento del materiale deve essere stabilita, pertanto, considerando che durante il processo la temperatura aumenterà in maniera fortemente dipendente dai fenomeni citati.

I fattori che incrementano la temperatura sono i primi due già elencati:

- generazione di calore nella zona di deformazione: dipende dall'entità della deformazione (dal rapporto di estrusione) e dalla tensione di flusso (quindi dalla velocità di deformazione). Deformazione blanda e basse velocità riducono la temperatura (a scapito della produttività ovviamente).
- generazione di calore per attrito: dipende dalla lunghezza della billetta e dalle tensioni tangenziali. Per ridurre la temperatura di

attrito si possono usare billette più corte, oppure andare più piano (minor velocità produce minori velocità di deformazione, minori tensioni di flusso e minori tensioni tangenziali).

I fattori che limitano gli incrementi di temperatura sono:

- dispersione di calore dal materiale verso la camera: si devono scegliere materiali con una adeguata conduttività termica in base al processo.
- dispersione di calore dalla camera verso l'esterno: si può ricorrere a matrici con circolazione forzata di acqua per smaltire al massimo il calore.
- fuoriuscita di calore con il prodotto estruso: si utilizzano talora getti di azoto liquido in prossimità della fuoriuscita del materiale per ridurre la temperatura.

### **1.1-5 Tipologie di profili realizzabili**

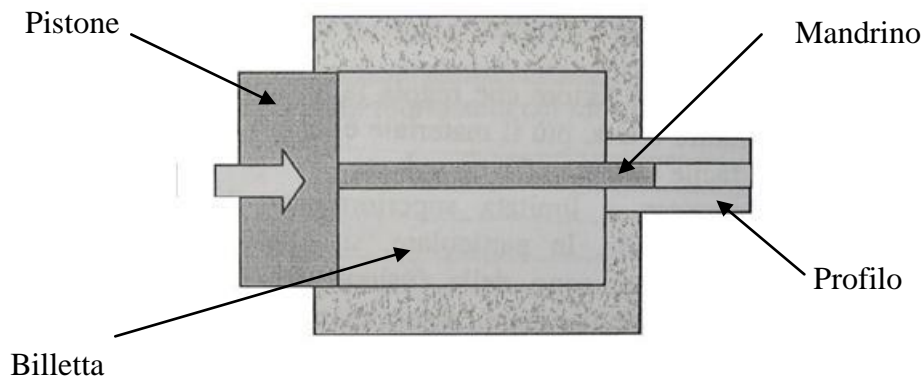
Il processo di estrusione consente di realizzare una grande varietà di profili, dai più semplici, a *sezione piena*, ai più complessi, a *sezione cava*. È proprio di questi ultimi più interessante parlare, in quanto sono molto frequenti nella realizzazione (un esempio di profilo cavo semplice è un tubo) e comportano delle difficoltà tecnologiche.

Essenzialmente, occorre disporre di una cavità con un profilo esterno (realizzato dalla matrice) ed uno interno. Il problema consiste nel “sostegno” di questo profilo interno, dato che il materiale vi fluisce attorno.

Una prima soluzione potrebbe essere quella di appoggiare al pistone un mandrino atto a realizzare il profilo interno (*Fig. 1.5*). Il mandrino,

lungo e sottile, non potrebbe mai avere la forza di “forare” la billetta, che quindi dovrebbe essere preparata cava.

Questa operazione, benché possibile, è assai scomoda. Inoltre, l’esilità del mandrino condurrebbe a scarse precisioni di posizionamento dello stesso durante l’operazione, soprattutto all’inizio della corsa.



*Fig. 1.5. Profili cavi con mandrino solidale al pistone*

Migliori risultati si ottengono con una matrice in due parti. La parte anteriore riporta delle cavità (*Fig. 1.6*) che vengono attraversate dal materiale in corso di estrusione. I flussi di materiale si riuniscono in una cavità posteriore, detta camera di saldatura, subito prima di essere estrusi nell’intercapedine fra matrice inferiore (che realizza il profilo esterno) e matrice superiore (che sorregge il profilo interno).

Questa soluzione è sempre preferita, rispetto alla precedente, nei casi in cui i flussi di materiale siano in grado di saldarsi efficacemente.

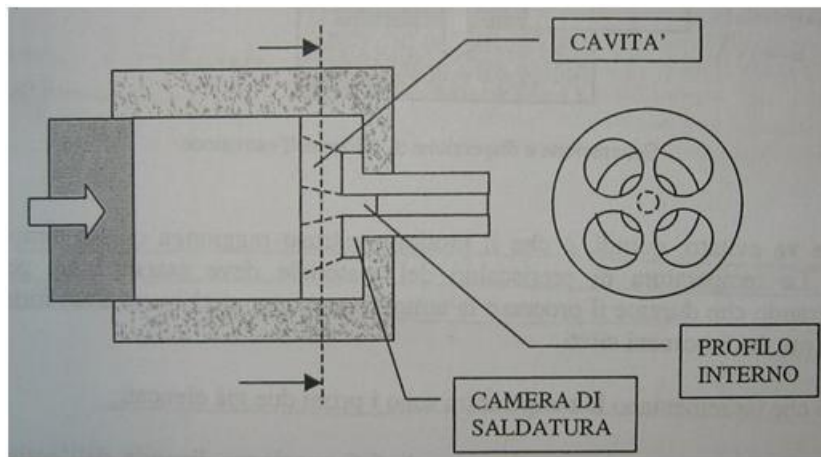


Fig. 1.6. Profili cavi con matrice a ponte

Da quanto sopra esposto, risulta che la parte più importante delle attrezzature è la **matrice**, in quanto permette di realizzare in maniera corretta ed efficace la geometria del profilo finale ed inoltre assolve anche la funzione di smaltimento del calore [1].

Un'interessante metodo sperimentale, usato per studiare il moto del materiale durante i processi di deformazione plastica, è quello della visioelasticità, che permette di verificare le modalità di deformazione nel caso di estrusioni (Fig. 1.6): lo spezzone di barra da estrarre viene diviso in due parti con un taglio assiale, una delle due superfici corrispondente al piano di sezione viene incisa con una griglia di opportune dimensioni, quindi le due parti vengono unite con una brasatura (saldatura a bassa temperatura, senza fusione del metallo base) e il tutto estruso. Dopo l'estrusione lo studio della griglia deformata permette di risalire allo stato di tensione e deformazione nei vari punti. In particolare si può mettere in rilievo la formazione di *zone morte* (Fig. 1.7) sul fondo del contenitore intorno alla matrice e sulle pareti del contenitore.

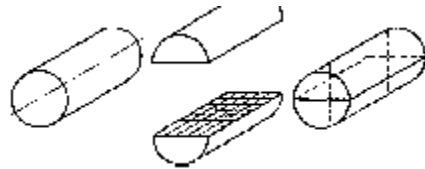
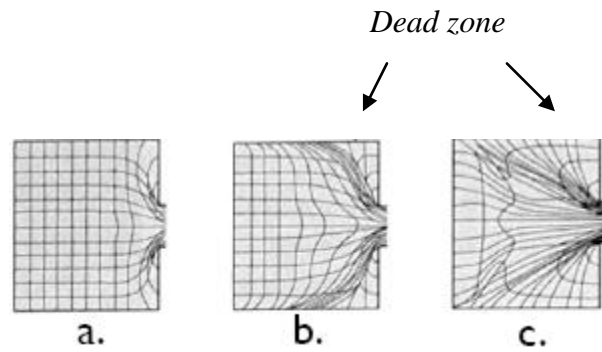


Fig. 1-6.  
Visioplasticità e  
Flussi di metallo  
nell'estrusione.



- a. Flusso di metallo omogeneo, avviene nel caso di assenza di attrito tra billetta matrice e contenitore.
- b. Nel caso in cui l'attrito sia alto, si sviluppa una zone morta e la superficie della billetta entra nel flusso provocando difetti interni.
- c. Con un attrito elevatissimo con il contenitore, la zona morta si estende all'indietro con considerevole aumento di difetti [2].

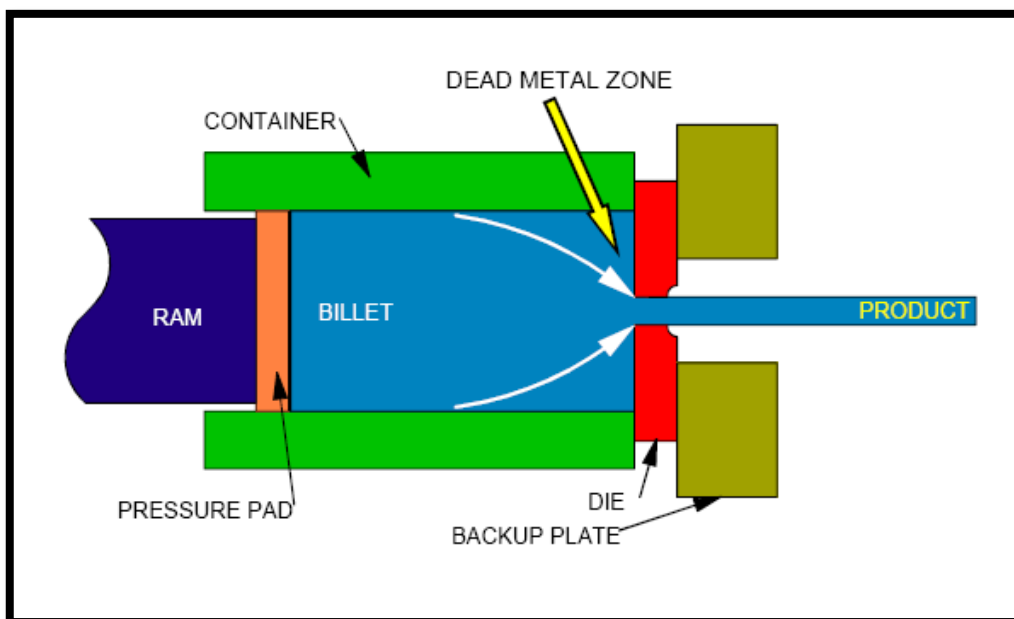


Fig. 1.7. Flow metal in direct extrusion and dead zone.

La forma del profilo è un fattore determinante per la stima del costo e della facilità con cui si può estrudere. Possono ottenersi un'ampia varietà di figure, considerando dei limiti: la forma, la figura, la lega, il rapporto d'estrusione, la tolleranza, il rivestimento, il fattore ed il rapporto dello scarto.

Ogni particolare lavorazione, per forma, lega, rapporto di estrusione, tolleranze, è correlata nel processo dell'estrusione con la velocità di estrusione, la temperatura della billetta, la pressione dell'estrusione. Generalmente, la velocità dell'estrusione varia direttamente con la temperatura e la pressione del metallo sviluppate all'interno del contenitore. La temperatura e la pressione sono limitate dalla lega usata e dalla figura che si estrude. Per esempio, le temperature d'estrusione più basse produrranno solitamente delle figure con le superfici di qualità migliore e le dimensioni più esatte, richiedendo però pressioni più elevate. La temperatura preferita della billetta è quella che fornisce gli stati accettabili di tolleranza e della superficie e, allo stesso tempo, concede il tempo di ciclo più corto possibile. Ideale è l'estrusione della billetta alla temperatura più bassa che il processo consente [3]-[4]-[5].

### **1.1-6 Tribologia delle matrici di estrusione**

All'interno del processo di estrusione esistono vari aspetti che producono delle non conformità e difettosità del profilo e, altrettanto importanti, dei guasti e delle rotture all'impianto che portano al blocco o al fermo di produzione. Queste possono dipendere sia dall'attrezzatura che dal processo stesso.

Entrambi questi aspetti comportano una perdita economica rilevante per un'azienda, in quanto generano degli scarti di produzione che possono incidere in maniera anche pesante nei costi aziendali.

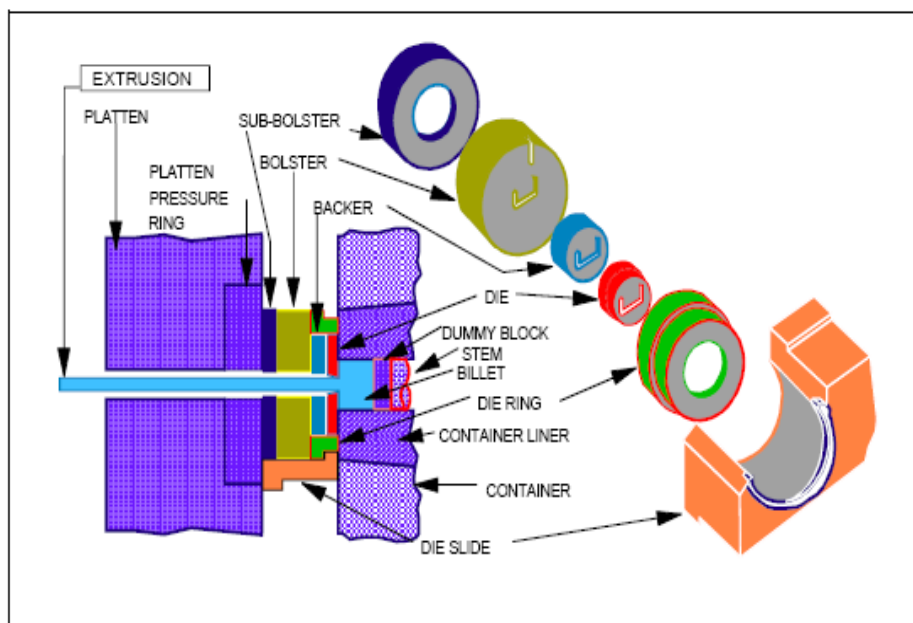
Le rotture delle matrici sono l'aspetto dell'impianto e dell'attrezzatura che maggiormente influenza queste perdite.

La tribologia nelle matrici di estrusione di alluminio (ovvero i processi di attrito ed usura) è influenzata da diversi fattori tra cui:

- Le variazioni di temperatura superficiali
- La velocità di estrusione
- La forma e la geometria della matrice
- Lo spessore della luce di uscita
- Le condizioni superficiali della matrice
- Le proprietà della lega da estrudere.

Possiamo affermare, comunque, che gli ultimi 5 fattori dipendono fortemente dalla variazione di temperatura sulla superficie e di conseguenza possiamo considerare il primo fattore come determinante per i meccanismi dei processi di attrito e di usura. In particolare l'aumento della velocità di estrusione e della rugosità superficiale provoca un aumento della temperatura superficiale. L'usura di una matrice si manifesta tramite una progressiva perdita o rimozione di materiale sulla superficie. E' chiaro che tale fenomeno ha una notevole importanza economica e tecnologica in quanto col passare delle billette estruse tende a cambiare la finitura superficiale dell'estruso stesso ed in alcuni casi più gravi persino la forma. L'usura inoltre è la causa indiretta del danneggiamento delle matrici in quanto può dar luogo ad inneschi di cricche sulla superficie delle stesse.

Nell'estrusione diretta, a causa delle elevate temperature e pressioni in gioco il fenomeno di usura comprende i due aspetti indicati: la combinazione delle azioni abrasive ed adesive alle alte temperature causa l'inevitabile continua asportazione del materiale superficiale. Se la matrice è ben progettata, in modo cioè da evitare inneschi di cricche sui ponti, il problema principale che causa la messa fuori servizio del componente è data dalla progressiva usura della luce di uscita. Una volta che questa ha superato le tolleranze previste l'estrusione deve essere fermata. In particolare la maggiore usura dello spessore di uscita è dovuta al fatto che a causa dei piccoli spessori in gioco la velocità di estrusione, e quindi la temperatura superficiale, è la più alta di tutta la matrice e ciò facilita l'azione di usura. Inoltre, un eccessivo aumento della temperatura sulla luce di uscita, aumenta la tendenza allo sviluppo di uno strato adesivo di alluminio; questa spiccata tendenza alla formazione ripetuta di strati di alluminio ed al conseguente distacco causa spesso una contaminazione dell'estruso finale, pregiudicandone il livello qualitativo [6].



*Esempio matrice.*



## 1.2 Alluminio e le sue Leghe

### 1.2-1 Generalità

L'alluminio è uno degli elementi più diffusi sulla terra, secondo solo ad ossigeno e silicio. In natura si trova sempre combinato con altri elementi; è presente in numerosi minerali. Dal punto di vista industriale questo metallo leggero (la sua densità è di  $2.71 \text{ g/cm}^3$ ) viene prodotto a partire dalla bauxite, roccia rosso bruno o giallo, diffusa soprattutto negli USA, in Russia, Guyana, Ungheria, nei territori dell'ex Jugoslavia.

Le strutture in alluminio trovano maggiore applicazione nel campo dei rivestimenti e degli infissi grazie alla sua estrema leggerezza. L'alluminio consente una facile lavorazione, anche se spesso si utilizzano delle leghe di alluminio in quanto il metallo in sé è troppo duttile e poco resistente.

Leghe molto impiegate nel settore dell'illuminazione e dei rivestimenti poiché questo materiale ha particolari capacità di riflettere la luce ed il calore radiante.

Inoltre, la bassa densità ed un elevato rapporto forza-peso lo rende un materiale idoneo per aerei, treni ad alta velocità e traghetti.

Le proprietà salienti dell'alluminio e delle sue leghe sono:

- Basso peso specifico, pari a circa un terzo di quello dell'acciaio o delle leghe di Rame.
- Elevata resistenza alla corrosione.
- Alta conducibilità termica ed elettrica.
- Atossicità.
- Elevata plasticità.
- Eccellente duttilità e malleabilità.

- Basso potere radiante.
- Ottima saldabilità (a gas, ad arco elettrico, per resistenza).
- Riciclabile al 100%.

Pochi elementi in natura si prestano a costituire un numero così elevato di leghe come l'alluminio. Per migliorare le caratteristiche meccaniche si aggiungono all'alluminio determinati quantitativi di elementi alleganti. Quando si combina con altri elementi, le caratteristiche di questo metallo, che allo stato puro è tenero e duttile, cambiano radicalmente. Per quanto riguarda le leghe metalliche formate dall'alluminio, le peculiarità in comune per tutte sono:

- Bassa temperatura di fusione compresa tra i 510 ed i 650°C.
- Basso peso specifico, compreso tra 2,66 e 2,85 gr/cm<sup>3</sup>.
- Elevatissima conducibilità elettrica e termica.
- Contenuto di Alluminio maggiore del 95%.

Gran parte degli elementi metallici sono solubili nell'alluminio, tuttavia Rame (Cu), Silicio (Si), Magnesio (Mg), Zinco (Zn), Manganese (Mn) sono i leganti utilizzati per l'alluminio a costituire le leghe madri; accanto ad essi si possono impiegare elementi che migliorano alcuni aspetti prestazionali delle leghe, conosciuti come correttivi. Si trovano aggiunte, per scopi particolari, piccole percentuali di nichel, titanio, zirconio, cromo, bismuto, piombo, cadmio scandio ed anche stagno e ferro, quest'ultimo peraltro sempre presente come impurezza.

Quando gli elementi sopra menzionati vengono aggiunti all'alluminio di base da soli si hanno leghe binarie, quando aggiunti a due a due o a tre a tre si hanno rispettivamente leghe ternarie o leghe quaternarie. Ogni elemento possiede il suo particolare effetto, per esempio:

- Silicio: migliora la colabilità e riduce il coefficiente di dilatazione.
- Magnesio: aumenta la resistenza alla corrosione in ambiente alcalino e in mare.
- Manganese: aumenta la resistenza meccanica e alla corrosione.
- Rame: accresce la resistenza meccanica, soprattutto a caldo.
- Zinco: soprattutto se associato al magnesio, conferisce un'elevata resistenza meccanica.

## 1.2-2 Le Leghe di Alluminio

La classificazione internazionale prevede un sistema di quattro cifre di cui la prima indica il principale elemento allegante, secondo questo indice:

1XXX	Alluminio con purezza minima 99.00%
2XXX	Leghe Al-Cu
3XXX	Leghe Al-Mn
4XXX	Leghe Al-Si
5XXX	Leghe Al-Mg
6XXX	Leghe Al-Mg-Si
7XXX	Leghe Al-Zn
8XXX	Leghe Al con altri elementi
9XXX	Serie sperimentale

La lettera che segue la denominazione della lega indica il trattamento subito: F per fabbricata, O per ricotta, H per incrudita, T per trattata termicamente. Il numero che segue queste lettere specifica la condizione del trattamento. Per esempio: T4 significa trattamento di solubilizzazione, tempra ed invecchiamento naturale.

La lega presa in esame nel nostro caso appartiene alla **serie 6000**: i principali elementi di lega sono Silicio e Magnesio. Si tratta di leghe da trattamento termico; dopo il trattamento termico sviluppano caratteristiche meccaniche intermedie.

Questa lega presenta buona formabilità, lavorabilità, truciolabilità e saldabilità. Viene utilizzata per applicazioni architettoniche, telai motociclistici e ciclistici, strutture saldate in genere. Questo sistema costituisce la classe principale di leghe per i pezzi lavorati a caldo e per quelli ricavati da fusione. Esse riescono a combinare alcune

caratteristiche favorevoli: buone resistenze meccaniche, sensibilità relativamente bassa alla tempra, buona resistenza alla corrosione. L'indurimento avviene soprattutto per precipitazione del composto  $Mg_2Si$ . Per ottenere prodotti estrusi con questa lega normalmente si mantengono Mg e Si al di sotto dell'1.5% in peso. Il Silicio, infine, aumenta la fluidità del fuso e riduce il coefficiente di dilatazione, come già detto anche per le leghe Al-Si; inoltre aumenta la resistenza alla corrosione intergranulare tipica di questa lega.

Le differenze tra le diverse leghe di alluminio sono straordinariamente variabili. La resistenza meccanica a trazione ad esempio varia dai  $650 \text{ kg/cm}^2$  della *1080-0* ai  $5.800 \text{ kg/cm}^2$  della *7075-T6* (rapporto di 8,9). Il rapporto tra massa e caratteristiche meccaniche fanno sì che il materiale più utilizzato nelle industrie aerospaziali ed aeronautiche sia oggi la lega di Alluminio.

La resistenza alla corrosione è altrettanto variabile da lega a lega. Per le leghe della serie 6000, che nella denominazione commerciale italiana vanno sotto il nome di ANTICORDAL, questa caratteristica è classificata ai massimi livelli.

Questa lega, che nella designazione internazionale viene oggi classificata come 6000, ha la presenza del magnesio nella composizione chimica, che varia da 1% al 5%. Con la presenza di altri elementi quali il Silicio ed il Manganese (che non superano mai l'1%), e soprattutto con trattamenti termici ed incrudimento, le caratteristiche tecnologiche vengono ottimizzate per raggiungere il massimo risultato nell'ambito della particolare applicazione [7]-[8].

La lega studiata ed utilizzata nel processo di estrusione è designata **AA6082** con le seguenti composizioni chimiche e proprietà meccaniche:

LEGA DI ALLUMINIO DA ESTRUSIONE EN AW-6082											
I manufatti estrusi in lega di alluminio EN AW-6082 sono impiegati in prevalenza come componenti di strutture e macchinari, ove valgono requisiti di alta resistenza e rigidità meccanica, associati ad una accettabile resistenza a corrosione. La composizione chimica e i parametri di estrusione della lega in esame sono formulati per consentire la realizzazione di profili con sezione di media complessità, comprendente cavità e scanalature.											
CARATTERISTICHE FISICHE											
Massa volumica:	2,71	grammi / cm <sup>3</sup>	Conducibilità termica a 20 °C		- nello stato 0:	2,09	Watt / cm · °Kelvin				
Punto di fusione inferiore:	580	°Celsius	- nello stato T6:		1,72	Watt / cm · °Kelvin					
Calore specifico tra 0 e 100 °C:	897	Joule/kg · °Kelvin	Coefficiente di dilatazione termica lineare:		- tra 20° e 100 °C:	23,2 · 10 <sup>-6</sup>	1 / °Kelvin				
Modulo di elasticità lineare E:	69 000	Newton / mm <sup>2</sup>	- tra 20° e 200 °C:		24,1 · 10 <sup>-6</sup>	1 / °Kelvin					
Modulo elasticità tangenziale G:	26 000	Newton / mm <sup>2</sup>	- tra 20° e 300 °C:		25,0 · 10 <sup>-6</sup>	1 / °Kelvin					
			Resistività elettrica a 20 °C		- nello stato 0:	3,14	microhm · cm				
			- nello stato T6:		3,85	microhm · cm					
COMPOSIZIONE CHIMICA SECONDO NORMA EUROPEA EN 573.3											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Altri		Al
									Ossano	Totale	
EN AW-6082	0,70 ÷ 1,30	0,50 max	0,10 max	0,40 ÷ 1,0	0,60 ÷ 1,20	0,25 max	0,20 max	0,10 max	0,05 max	0,15 max	resto
PROPRIETÀ MECCANICHE SECONDO NORMA EUROPEA EN 755.2											
Tipo di profilo	(1) Stato fisico di fornitura	diametro D (mm) per tondi, o spess. S (mm) per barre, o spess. di parete e per profili		Carico di rottura o trazione Rm (Mpa)		Carico limite di elasticità R <sub>0,2</sub> (Mpa)		Allungamento			
		min	max	min	max	A % min	A <sub>10mm</sub> % min				
tondi o barre piano	0, H111	D ≤ 200	S ≤ 200	-	160	-	110	14	12		
	T4 (*)	D ≤ 200	S ≤ 200	205	-	110	-	14	12		
	T6 (*)	D ≤ 20	S ≤ 20	295	-	250	-	8	6		
		20 < D ≤ 150	20 < S ≤ 150	310	-	260	-	8	-		
150 < D ≤ 200		150 < S ≤ 200	280	-	240	-	6	-			
		200 < D ≤ 250	200 < S ≤ 250	270	-	200	-	6	-		
tubi	0, H111	e ≤ 25		-	160	-	110	14	12		
	T4 (*)	e ≤ 25		205	-	110	-	14	12		
	T6 (*)	e ≤ 5		290	-	250	-	8	6		
5 < e ≤ 25		310	-	260	-	10	8				
profili cavi o aperti	0, H111	tutte le dimensioni D, S, e		-	160	-	110	14	12		
	T4 (*)	e ≤ 25		205	-	110	-	14	12		
profili aperti	T5	e ≤ 5		270	-	230	-	8	6		
	T6 (*)	e ≤ 5		290	-	250	-	8	6		
		5 < e ≤ 25		310	-	260	-	10	8		
profili con	T5	e ≤ 5		270	-	230	-	8	6		
	T6 (*)	e ≤ 5		290	-	250	-	8	6		
		5 < e ≤ 15		310	-	260	-	10	8		
NOTE (*): proprietà meccaniche dello stato fisico indicato: ottenibili anche con tempera alla pressa											

### **1.2-3 Applicazioni**

L'alluminio, grazie alle sue particolari proprietà, trova molteplici applicazioni e il suo utilizzo segue un andamento costante di crescita.

In particolare l'alluminio viene impiegato nei seguenti campi:

- **Alluminio in Edilizia**

L'alluminio viene impiegato per la costruzione di serramenti, facciate continue, infissi, porte, finestre, persiane, controfinestre, zanzariere, verande, ringhiere, recinzioni, cancelli, gronde, frangisole, tende da sole, tende veneziane, edilizia prefabbricata, termosifoni e scambiatori di calore, lamiera per controsoffittature, pannelli solari, per coperture ecc.

- **Alluminio nei Trasporti** (ferroviari, aeronautici ed automobilistici)

Grazie al suo elevato rapporto resistenza/peso, alla sua bassa densità e buona resistenza alla corrosione l'alluminio è impiegato per la costruzione di motori, pompe, pistoni, ruote, bielle, mozzi, valvole, cornici e finiture, paraurti, sponde da camion, furgonature, elementi di carrozzeria e radiatori e scambiatori di calore. Il settore dei trasporti è quello a più alta utilizzazione d'alluminio, pari a circa un terzo di tutto il metallo consumato in Europa. Una delle principali ragioni è che muovere un peso costa energia.

- **Alluminio nelle Costruzioni meccaniche**

L'alluminio viene utilizzato nella fabbricazione di macchine e nell'impiantistica. Macchine per stampa, macchine tessili,

macchine per la lavorazione del legno, macchine per ufficio e computers, strumentazione scientifica.



- **Alluminio in Elettronica**

L'alluminio è il principale materiale in competizione con il rame, grazie all'elevata conducibilità elettrica. L'applicazione maggiormente conosciuta è quella delle linee elettriche aeree di distribuzione, quasi tutte in cavi d'alluminio.

- **Alluminio nel Settore domestico**

L'alluminio viene utilizzato in numerosi prodotti di uso domestico: pentolame, elettrodomestici, scale, cabine doccia, mobili, apparecchiatura di illuminazione, componenti dell'arredamento, attrezzature per sport e tempo libero.

Sono veramente pochi i settori di applicazione in cui non viene impiegato l'alluminio. L'utilizzo è destinato progressivamente a crescere in quanto le sue proprietà sono particolarmente apprezzate dai progettisti, architetti e ingegneri, dai costruttori e dagli utilizzatori finali del prodotto.

Inoltre, l'impatto ambientale dell'alluminio è molto buono in quanto è riciclabile al 100%. Nessuno dei suoi processi produttivi comporta rischi significativi per la salute o l'ambiente. L'industria dell'alluminio si è infatti adoperata negli anni per ridurre l'inquinamento e le conseguenze ambientali [9].



## 1.3 Microstruttura di estrusi in lega di alluminio

### 1.3-1 Aspetti introduttivi

La microstruttura della lega è determinata generalmente dalla trasformazione termo meccanica.

Durante la deformazione plastica di un metallo, la maggior parte dell'energia spesa va sotto forma di calore, ma una certa frazione viene immagazzinata come energia di deformazione per la creazione di difetti reticolari, dislocazioni, che portano il materiale ad un crescente incrudimento (*Fig. 1.1*).

L'aumento della densità delle dislocazioni prodotto dalla lavorazione induce un notevole accumulo di energia di deformazione elastica nel reticolo del metallo.

Tuttavia è da ricordare che l'energia di deformazione immagazzinata non è in relazione lineare con la deformazione, ma piuttosto in relazione parabolica, in quanto l'incrudibilità del materiale tende man mano a diminuire per la tendenza di esso ad un riassetto dinamico spontaneo, allorché, le dislocazioni, a causa dell'alta densità raggiunta, sono soggette a forti interazioni elastiche, con formazione di pareti di dislocazioni e nello stesso tempo si verificano fenomeni di *scorrimento deviato* (*cross slip*) in cui la dislocazione può slittare su un piano di scorrimento superiore o inferiore ma parallelo al primo.

Durante la deformazione plastica aumentano il numero dei difetti puntuali, interstiziali e soprattutto vacanze (*Fig. 1.2*).

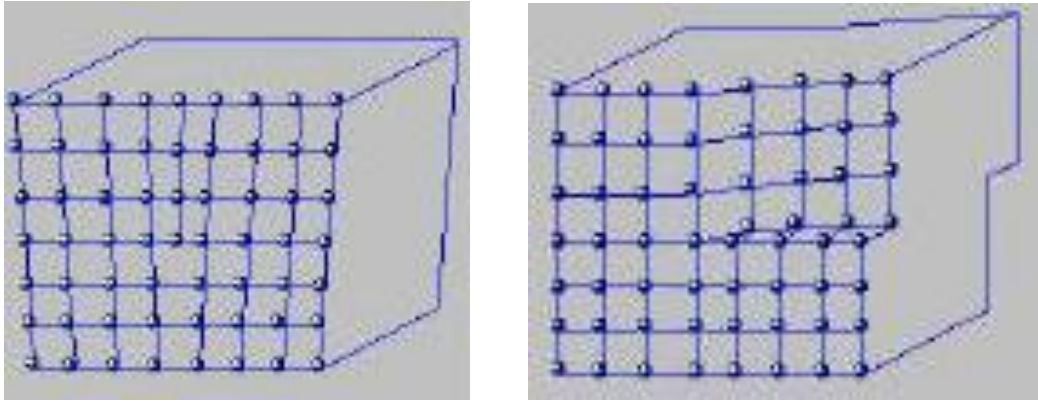


Fig. 1.1. Dislocazioni a spigolo e a vite

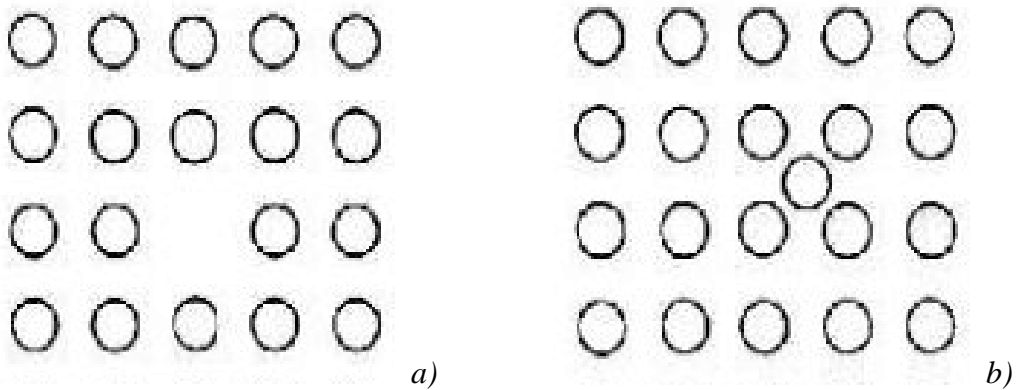


Fig. 1.2. Difetti: a) vacanza; b) interstiziale

In generale l'immagazzinamento dell'energia di deformazione é favorito, oltre che da un alto tasso di deformazione, dalle temperature più basse e da un alto tenore di alligazione del metallo.

La temperatura, infatti, esalta l'aspetto cinetico del *riordino* (*annealing*), cioè della eliminazione dei difetti reticolari termodinamicamente non necessari.

### 1.3-2 Ricristallizzazione

Si definisce ricristallizzazione di un metallo la cristallizzazione che parte da una fase solida. Essa è caratterizzata da nucleazione e accrescimento.

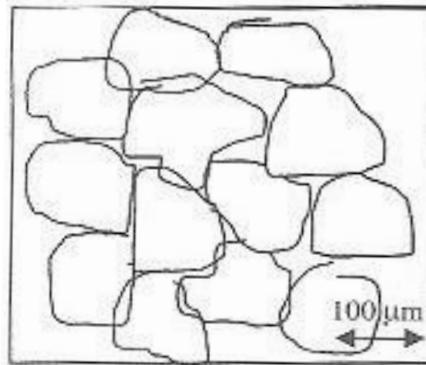
Si esaminano i casi in cui avviene la ricristallizzazione:

- *ricristallizzazione in una trasformazione allotropica*: tale trasformazione permette il cambiamento reticolare dovuto al passaggio attraverso un limite di temperatura; le proprietà fisiche e chimiche variano sensibilmente, al contrario di quelle meccaniche;
- *ricristallizzazione effettuata per recuperare le eccessive tensioni dell'incrudimento*: l'incrudimento introduce energia nel reticolo cristallino di un metallo e tale energia, aggiunta a un certo livello di energia termica, stimola il riordinamento dei cristalli. Si consideri il graduale passaggio a livelli via via più elevati di temperatura: all'inizio si ha un semplice riassetto (ricottura di distensione) che, diminuendo le tensioni interne, previene la corrosione e la distorsione dei manufatti; quando la temperatura supera la TR (temperatura di ricristallizzazione, la quale decresce all'aumentare della purezza del metallo), inizia un processo di nucleazione e accrescimento fino al raggiungimento di una desiderata grandezza media del grano cristallino, dipendente da incrudimento iniziale, temperatura raggiunta, durata del processo. Tale processo permette infatti di recuperare la situazione dannosa creata con un eccessivo incrudimento, che porta ad un avvicinamento inaccettabile del carico di snervamento e di rottura rendendo difficili anche le deformazioni plastiche, oltre che la pericolosa messa in esercizio del pezzo pesantemente incrudito.

- *ricristallizzazione nel corso di una deformazione plastica*, **ricristallizzazione dinamica** è quella ricristallizzazione che avviene durante un processo di lavorazione plastica, e non tramite un riscaldamento successivo a una lavorazione. Produce una riduzione della tensione di flusso aumentando la duttilità del materiale.

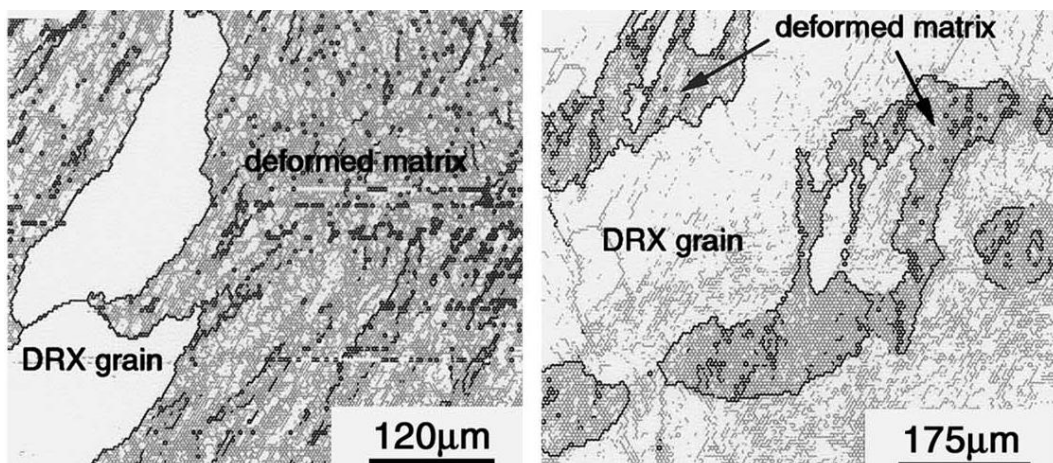
### 1.3-3 Analisi metallografica della ricristallizzazione

Supponendo di analizzare la microstruttura di un provino in condizioni as-cast (da colata) esso assume l'aspetto di *figura 1.3*:



*Figura 1.3. Microstruttura da colata.*

È bene specificare che i grani di colore diverso non sono necessariamente grani diversi, bensì possono essere sottograni (sub-grain). I sottograni si formano solo dopo una deformazione plastica del materiale as-cast, dove non sono presenti sottograni. Se in un materiale ci sono sottograni questo può essere completamente ricristallizzato (a meno che dopo la ricristallizzazione non venga effettuata una nuova deformazione).



*Fig. 1.4. Bordi di grano con basso ed alto angolo di disorientazione, le linee grigie e nere indicano il basso e alto angolo.*

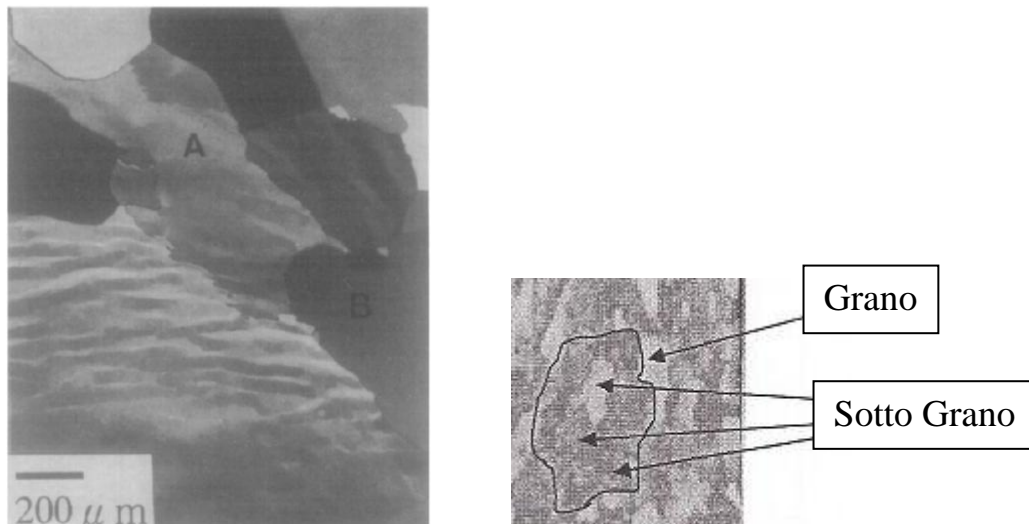


Fig. 1.5. Grani con (A) e senza (B) sottograni.

Il sub-grano è una porzione di cristallo in cui l'orientazione degli assi, piani reticolari è leggermente diversa da quella delle porzioni vicine. La differenza tra il grano e il sotto grano è l'angolo di inclinazione dei bordi (che provoca la differenza di colorazione), nelle leghe di alluminio se tale angolo è minore di  $15^\circ$  si parla di sotto grani, se è superiore di  $15^\circ$  di un grano diverso (Fig. 1.4, 1.5). Inoltre, nelle leghe di alluminio sul bordo grano sono presenti intermetallici allineati, mentre nel sub-grano intermetallici dispersi.

Quindi, riassumendo, durante tutto il processo termo-meccanico avvengono diversi meccanismi metallurgici come la ricristallizzazione statica (SRX), la ricristallizzazione dinamica (DRX), la ricristallizzazione geometrica dinamica (GDRX), la crescita dei grani ed infine la precipitazione di fasi secondarie [10]-[11].

Durante il processo di lavorazione delle leghe di alluminio, i grani vengono fortemente deformati lungo una direzione principale con un corrispondente assottigliamento lungo l'altra direzione; inoltre il bordo del grano diventa ondulato (seghettato), e quando lo spessore del grano raggiunge l'ordine di grandezza di quello del sottograno,

ogni grano allungato si trasforma in diversi nuovi piccoli grani. Questo fenomeno viene chiamato *ricristallizzazione geometrica dinamica (GDRX)*, per distinguerlo dalla classica *ricristallizzazione dinamica (DRX)* ove avviene la nucleazione di nuovi grani lungo il bordo di grano deformato. Altri fenomeni come la ricristallizzazione statica e l'accrescimento del grano avvengono a deformazione compiuta (all'uscita dallo stampo) e non risulta facile capire il contributo di ogni fenomeno separatamente.

I fenomeni principali che modificano la microstruttura di una lega di alluminio possono essere di cinque tipi:

1. *Geometric Dynamic Recrystallization.*
2. *Dynamic Recrystallization.*
3. *Static Recrystallization.*
4. *Recovery.*
5. *Grain Growth.*

### **Geometric Dynamic Recrystallization (GDRX):**

Il meccanismo di base è che durante la deformazione i grani saranno sempre più appiattiti e separati su ogni lato da una distanza ridotta. La deformazione è accompagnata dalla dentatura dei bordi del grano.

Continuando la deformazione i punti delle dentellature del bordo grano verranno a contatto dividendo il grano originario e generando due nuovi grani con dimensioni più piccole (*pinch-off*) come riportato in *figura 1.6*.

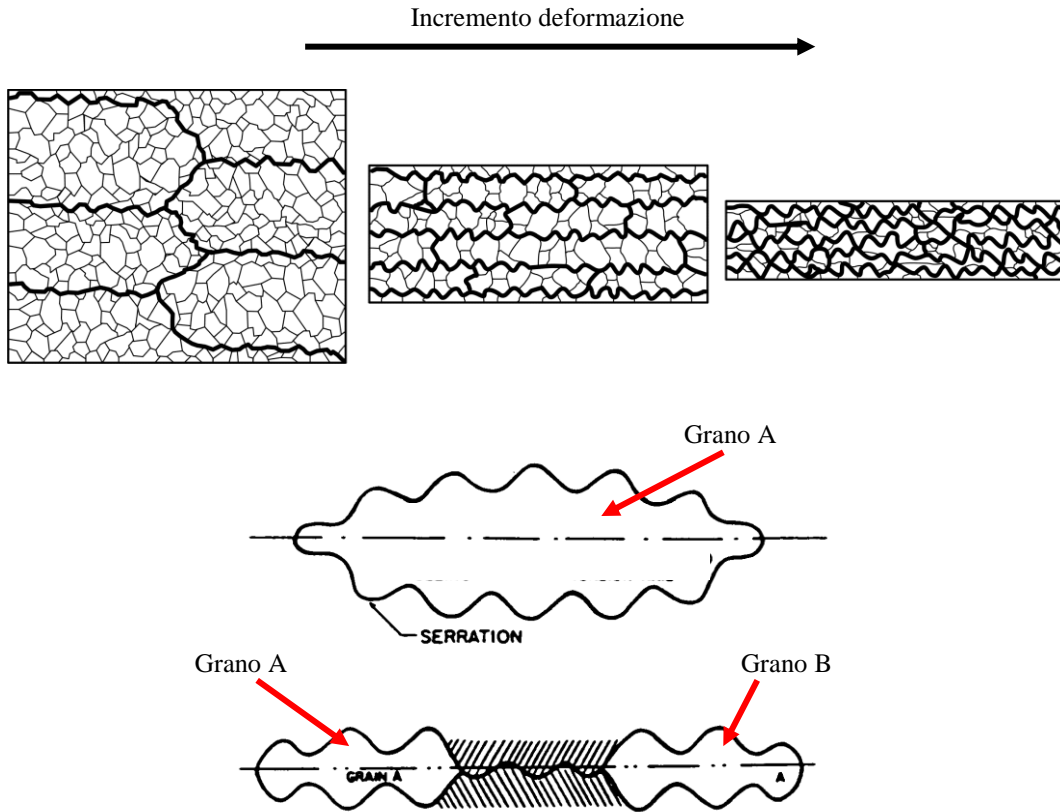


Fig. 1.6. Geometric Dynamic Recrystallization and Pinch-off.

In un materiale deformato a caldo o a freddo, durante la lavorazione, avviene principalmente il fenomeno della Geometric Dynamic Recrystallization (Fig. 1.7):

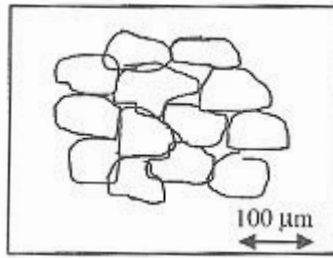


Fig. 1.7. Geometric Dynamic Recrystallization allungamento grani.

Visto su questo piano produce un allungamento del grano in una direzione ed un assottigliamento nella direzione ortogonale, mantenendo, in questo caso, un'area del grano analoga alla precedente non deformata. Nel caso in cui l'allungamento avviene in direzione ortogonale al piano di analisi, la micrografia mostra una riduzione della sezione del grano, quando in realtà è semplicemente una

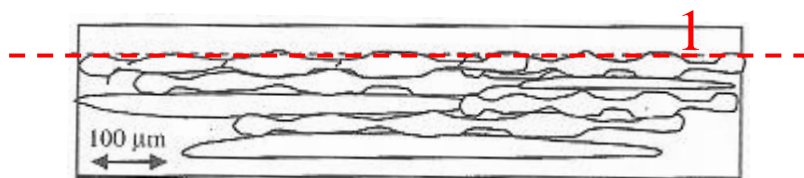


deformazione del grano medesimo. Questo è il motivo per cui si parla di Geometric Dynamic Recrystallization (*Fig. 1.8*).



*Fig. 1.8. Geometric Dynamic Recrystallization in direzione ortogonale.*

Inoltre, durante la deformazione i grani si deformano assumendo una struttura chiamata a “*pancakes*”, ossia i grani si deformano allungandosi e sovrapponendosi come frittelle americane. Quando la deformazione supera certi valori critici, i bordi dei grani non rimangono lisci, bensì diventano ondulati come riportato in *figura 1.6*. Con un ulteriore aumento della deformazione la ricristallizzazione dinamica geometrica, mostra la formazione di grani realmente più piccoli: ossia il grano si assottiglia in alcune zone, fino a diventare zone di separazione in cui si formano nuovi grani, di dimensioni decisamente minori rispetto al grano iniziale. Tale fenomeno deve essere ben differenziato perché durante l’analisi metallografica si può commettere un errore: sezionando secondo la linea 1 e osservando dall’alto può sembrare che ci siano tanti grani mentre in realtà è un unico grano che viene sezionato, dalla linea di riferimento 1, in più punti (*Fig. 1.9*).



*Fig. 1.9. Sezionamento del piano cristallino.*

### **Dynamic Recrystallization (DRX):**

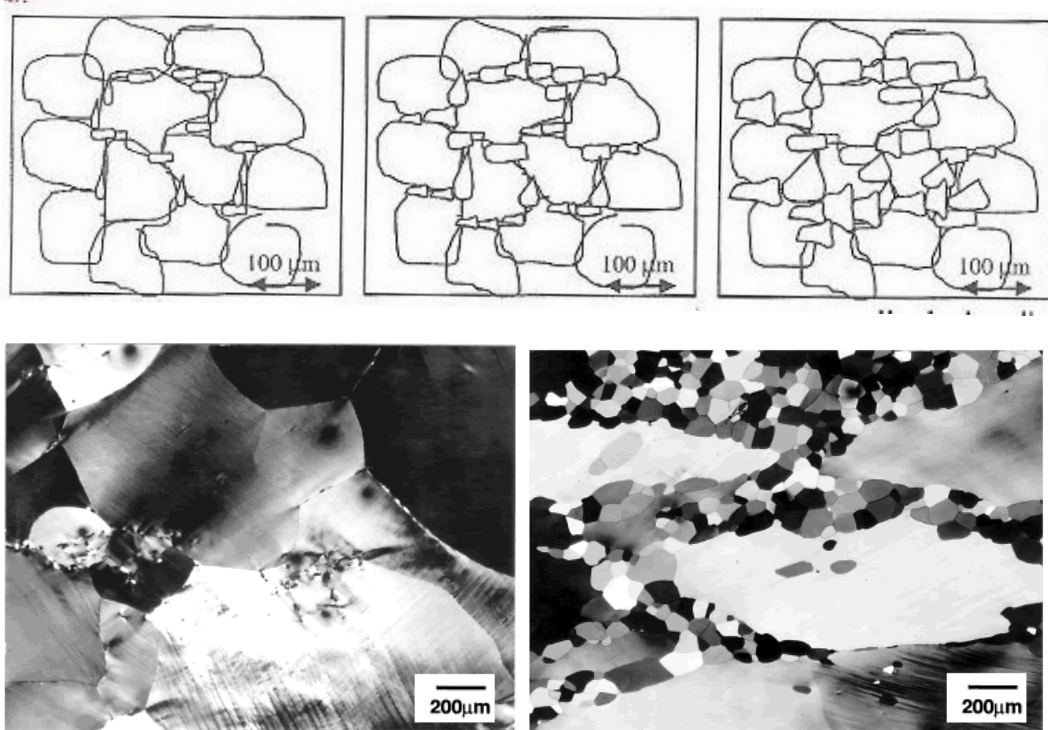
In ricristallizzazione dinamica, al contrario di ricristallizzazione statica, la nucleazione e la crescita di nuovi grani si verifica durante la deformazione, quando questa supera una deformazione critica, e non dopo come parte di un trattamento termico separato [12].

È un processo responsabile dell'evoluzione della microstruttura durante la deformazione ad alta temperatura delle leghe di alluminio, dovuta all'immagazzinamento di energia di deformazione che provoca la migrazione di grani ad alto angolo di disorientamento e il moto di riordinamento delle dislocazioni.

La resistenza alla deformazione diminuisce all'aumentare della temperatura per l'allentamento dei legami interatomici e ciò spiega perché le lavorazioni plastiche risultino più facili ad alta temperatura che non a bassa.

Durante le lavorazioni i grani vengono stirati e frantumati; la temperatura dei pezzi, superiore della temperatura di ricristallizzazione pari a circa  $0,6 T_f$  (*temperatura di fusione*), favorisce immediatamente la nucleazione. Tale processo è detto **ricristallizzazione dinamica**, in cui la formazione di nuovi grani e il movimento dei bordi di grano ad alto angolo di disorientamento (maggiore di  $15-20^\circ$ ) è provocato dall'energia di deformazione immagazzinata durante la lavorazione sottoforma di dislocazioni [13].

Nel caso della ricristallizzazione dinamica (DRX) durante la deformazione dal borgo grano nascono centri di nucleazione che si ingrandiscono nel tempo come riportato in *figura 1.10*:

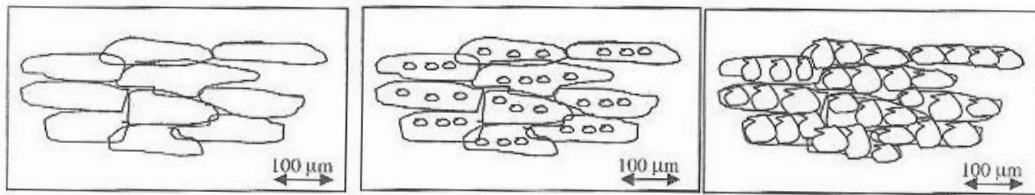


*Fig. 1.10. Ricristallizzazione dinamica (DRX).*

Questo fenomeno a dire degli esperti non si verifica nelle leghe di alluminio e soprattutto non è presente nelle leghe della serie 6XXX.

### **Static Recrystallization**

È un fenomeno simile alla ricristallizzazione dinamica, ma con la differenza che avviene *solo* al termine di una operazione di deformazione e *solo* quando non si effettuano più deformazione sul materiale (altrimenti sarebbe ricristallizzazione dinamica), ed i centri di nucleazione partono dall'interno del grano, non dal bordo, come illustrato in *Fig. 1.11*. Può iniziare anche in tempi molto ridotti (inferiori al secondo) su particolari leghe.

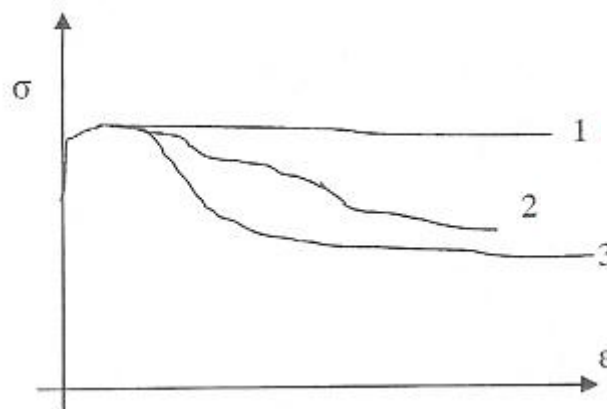


*Fig. 1.11. Static Recrystallization.*

Durante il fenomeno di ricristallizzazione statica e dinamica ha senso parlare di percentuale di volume ricristallizzato  $X_v$ . Con tale termine indichiamo il rapporto fra l'area dei grani ricristallizzati nuovi e quelli vecchi, ad esempio  $X_v=5\%$  indica che il 95% della superficie ha grani vecchi ed il 5% grani nuovi.

### **Recovery**

Il recovery (riassetto) è un fenomeno che si verifica ad estrusione conclusa mediante il quale i grani deformati possono ridurre la loro energia immagazzinata mediante la soppressione o riorganizzazione di difetti nella loro struttura cristallina. Produce il riassetto delle dislocazioni. È il responsabile del picco del flow stress nel diagramma *effective stress-effective strain*. In *figura 1.12* la *curva 1* rappresenta un materiale senza riassetto e senza ricristallizzazione dinamica, la *curva 2* un materiale con il solo riassetto, la *curva 3* un materiale con riassetto e ricristallizzazione.



*Fig. 1.12*

Al microscopio ottico non si nota nessuna variazione nella forma del grano, semplicemente le dislocazioni presenti all'interno del grano (Fig. 1.13) si annullano, grazie al fenomeno del cross-slip, creando un riassetto della struttura.

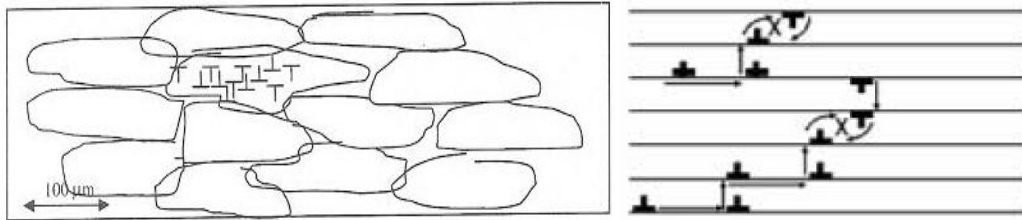


Fig. 1.13 – Movimento di dislocazioni a spigolo; le dislocazioni si muovono attraverso una sequenza di scorrimenti (freccie orizzontali) e salti (freccie verticali), fino ad incontrare dislocazioni di segno opposto annullandosi.

### Grain Growth

È la crescita del grano, quando al termine della ricristallizzazione statica e dinamica, il grano ha ancora dell'energia di deformazione all'interno che deve essere ridotta. L'accrescimento dei cristalli grandi avviene a discapito di quelli adiacenti più piccoli, che andranno ad annullarsi, cosicché il loro numero complessivo dei grani diminuisce e le loro dimensioni aumentano (Fig. 1.14). È un fenomeno che avviene in contemporanea alla ricristallizzazione statica.

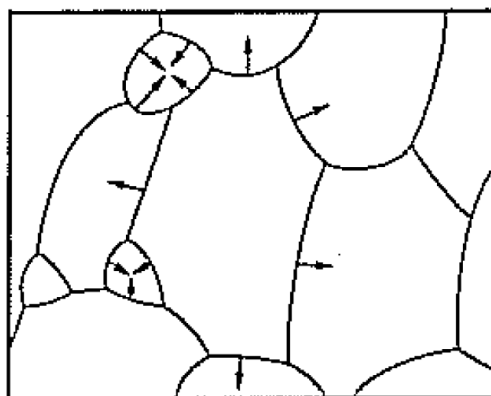


Fig. 1.14. Grain Growth.

## **CAPITOLO 2. Applicazione Deform**

### **2.1 Introduzione**

DEFORM è un software ingegneristico che permette ai progettisti di analizzare la formatura dei metalli, i trattamenti termici e le lavorazioni meccaniche sul computer piuttosto che in officina con molteplici prove ed errori. DEFORM ha dimostrato di essere estremamente efficace in una vasta gamma di ricerche e applicazioni industriali. DEFORM è un codice FEM (Finite Element Method) ed è un sistema basato sulla simulazione e quindi sull'analisi di vari processi di formatura e di trattamento termico. La simulazione di processi di fabbricazione su un computer permette ai progettisti di:

- ridurre la necessità di una sperimentazione costosa in officina e la riprogettazione di attrezzature e processi;
- migliorare la progettazione di stampi per aumentare la produzione e ridurre i costi dei materiali;
- ridurre i tempi di produzione nel portare un nuovo prodotto sul mercato.

DEFORM-HT (heat-transfer) aggiunge la capacità di simulare processi di trattamenti termici, tra cui la normalizzazione, la ricottura, la tempra, il rinvenimento, l'invecchiamento e la cementazione. DEFORM-HT può prevedere la durezza, le tensioni residue, le deformazioni, e altre importanti caratteristiche meccaniche e del materiale che variano con il calore [14].

## **2.2 Capacità dell'applicazione Deform**

All'interno del codice è possibile considerare lavorazioni meccaniche, trattamenti termici oppure lavorazioni termo-meccaniche.

### **2.2-1 In Deformazione:**

- Modellazione di deformazione e di trasferimento di calore per la simulazione dei processi di stampaggio a freddo e a caldo.
- Ampio database di materiale con molte leghe comuni, tra cui acciaio, alluminio, titanio, e super-leghe.
- Possibilità per dell'utente di definire un materiale non incluso nel database dei materiale.
- Informazioni sulla tensione di flusso dei materiali, riempimento di stampi, carico di forgiatura, flusso di grano, formazione di difetti e di frattura duttile.
- Modelli di materiale rigido, elastico, e termo-viscoplastico ideale per la modellazione di deformazioni di grandi dimensioni.
- Modelli di materiale per modellazione elasto-plastica per problemi di tensione residua e ritorno elastico.
- Modello di materiale poroso per la modellazione di formatura di prodotti di metallurgia delle polveri (2D, 3D).
- Modelli di prodotti integrati per presse idrauliche, martelli, presse a vite, e presse meccaniche.
- Possibilità per dell'utente di definire tramite subroutine la modellazione di materiali, modellazione di stampi, criteri di frattura e altre funzioni (2D, 3D).

- FLOWNET per il tracciamento punto per punto di informazioni importanti sul comportamento del materiale durante la lavorazione.
- Visualizzazione di temperatura, tensione, stress, danni, e le altre variabili essenziali dopo il processo.
- Condizioni al contorno di auto-contatto con un robusto *remeshing* consente di continuare e completare la simulazione anche dopo che sia stato alterato l'elemento finito.
- Consente l'analisi dei soli pezzi in deformazione o accoppiati con gli utensili.
- Modelli di iniziazione, propagazione della frattura e crack sulla base di ben noti fattori di danno che consentono la modellazione di taglio, tranciatura, ed altre lavorazioni meccaniche.

## 2.2-2 Trattamenti Termici

- Possibilità di simulare trattamenti di normalizzazione, ricottura, tempra, rinvenimento e cementazione:

Normalizzazione (*non ancora disponibile*):

Riscaldamento di una lega ferrosa ad una temperatura adeguata al di sopra del range di trasformazione e raffreddamento in aria ad una temperatura notevolmente al di sotto del range di trasformazione.

Ricottura

Un termine generico che indica un trattamento, costituito da riscaldamento e permanenza ad una temperatura adeguata seguito da un raffreddamento ad una velocità adeguata, utilizzato principalmente per ammorbidire i materiali metallici ed annullare eventuali trattamenti termici precedenti.



### Tempra (non ancora disponibile)

Riscaldamento al di sopra ( $50-70^{\circ}\text{C}$ ) di  $\text{Ac}_3$  per gli ipoeutettoi e sopra  $\text{Ac}_1$  per gli ipereutettoi, allo scopo di realizzare la trasformazione austenitica; Mantenimento per un tempo tale da avere anche nel cuore una struttura austenitica; raffreddamento rapido in un mezzo di spegnimento, con velocità superiore alla velocità critica superiore dell'acciaio, in modo da ottenere la formazione di martensite.

### Rinvenimento di Distensione

Riscaldamento di una lega temprata ad una temperatura adeguata, mantenimento a tale temperatura per un tempo adeguato riducendo le tensioni residue e un raffreddamento abbastanza lento per ridurre al minimo lo sviluppo di nuove tensioni residue.

### Spegnimento

Un rapido raffreddamento per il controllo della microstruttura e dei prodotti di fase.

- Previsione della durezza, della percentuale in volume di struttura metallica, della distorsione e del contenuto di carbonio.
- Modelli di materiali specializzati per il *creep*, la trasformazione di fase, la durezza e la diffusione.
- Dati della *prova Jominy* che possono essere inseriti per prevedere la distribuzione della durezza nel prodotto finale.
- Modellazione di fasi multiple del materiale, ciascuna con proprietà elastiche, plastiche, termiche e di durezza. Le proprietà del materiale risultante dalla miscela dipendono dalla

percentuale di ogni fase presente, in qualsiasi passo della simulazione del trattamento termico.

Nei modelli di simulazione Deform è presente una complessa interazione tra deformazione, temperatura, e, nel caso del trattamento termico, tra la trasformazione e la diffusione. Vi è accoppiamento tra i fenomeni, come illustrato in Fig. 2.1. Quando i moduli sono attivati, otteniamo il riscaldamento a causa del lavoro di deformazione, il rammollimento termico, la temperatura della trasformazione controllata, il calore latente di trasformazione, la plasticità della trasformazione, sforzi di trasformazione, effetti dello stress sulla trasformazione e gli effetti del tenore di carbonio su tutte le proprietà dei materiali.

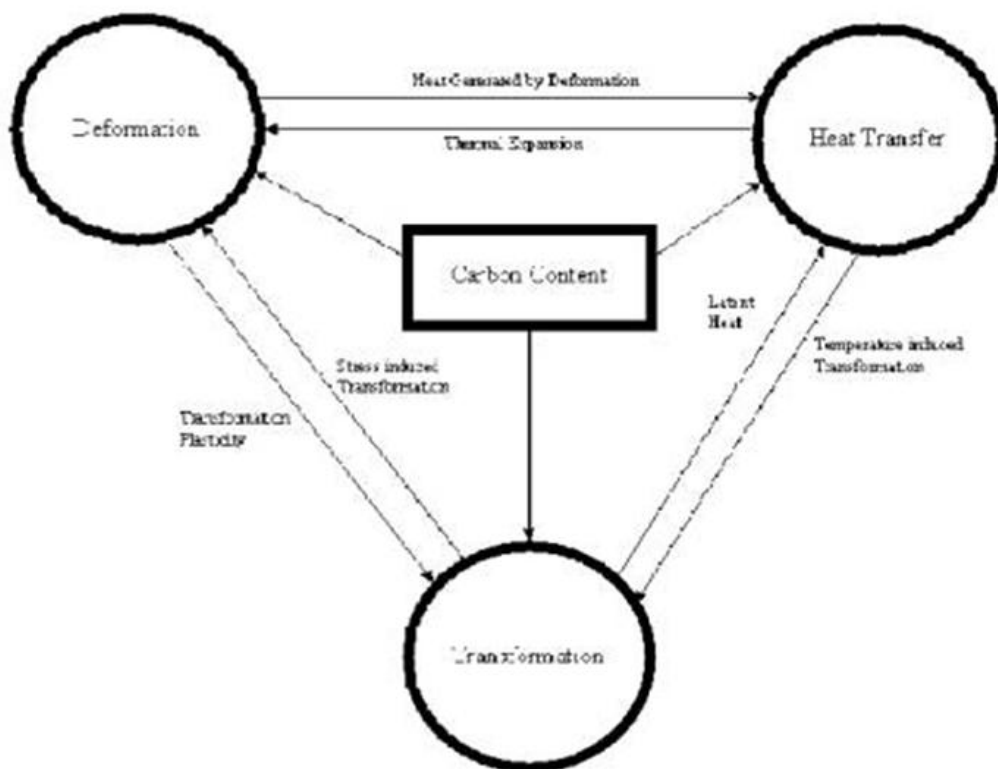


Fig. 2.1. Relazioni tra i vari moduli.

Il codice DEFORM può essere utilizzato per analizzare i processi di formatura termo-meccanica. L'approccio generale è quello di definire

la geometria e il materiale del pezzo iniziale da deformare, poi in sequenza inseriamo ogni processo che deve essere eseguito sul pezzo per ottenere il prodotto finito [14].

## 2.3 Il Sistema Deform

Il sistema DEFORM è costituito da tre componenti principali: *Pre-Processor*, *Simulation*, *Post-Processor*.

### 2.3-1 Pre-Processor

Questo componente consente la creazione, l'assemblaggio, inserimento dati necessari per eseguire la simulazione e per generare il file di database della lavorazione. Dati di ingresso comprendono:

- ***Object description***: comprende tutti i dati associati ad un oggetto, tra cui la geometria, mesh, la temperatura, materiali, ecc.
- ***Material data***: include i dati che descrivono il comportamento del materiale durante la deformazione.
- ***Simulation controls***: comprende le istruzioni che Deform deve utilizzare per risolvere il problema, comprese le condizioni dell'ambiente di lavoro, quali processi fisici dovrebbero essere modellati, la durata della lavorazione, quanti steps devono essere utilizzati per modellare il processo. Il tipo di lavorazione (deformazione, trattamento termico o entrambi), l'unità di misura e le impostazioni della simulazione.
- ***Inter object conditions***: interazioni tra i vari oggetti e come interagiscono tra di loro, contatto, attrito e trasferimento di calore.
- ***Inter material data***: descrive il processo fisico di una fase di un materiale che si trasforma in altre fasi dello stesso materiale in un

processo di trattamento termico. Ad esempio, la trasformazione della austenite in perlite, banite e martensite.

### 2.3-2 Simulation

Questo componente (*fig. 2.2*) esegue i calcoli numerici necessari per analizzare il processo, e scrive i risultati nel file di database. Il file di database contiene i dati della simulazione per ogni passo di simulazione salvato. Le informazioni sono memorizzate in un formato compresso leggibile dalla macchina, ed è accessibile solo tramite il DEFORM *Pre- e Post-Processor*. Se non viene specificato un passo da salvare la simulazione continua trovando una soluzione per il passo successivo, i dati della fase attuale verranno sovrascritti dai dati del prossimo passo. Dopo aver impostato il problema e creato il file di database, procediamo con la simulazione nella finestra *main* di DEFORM:

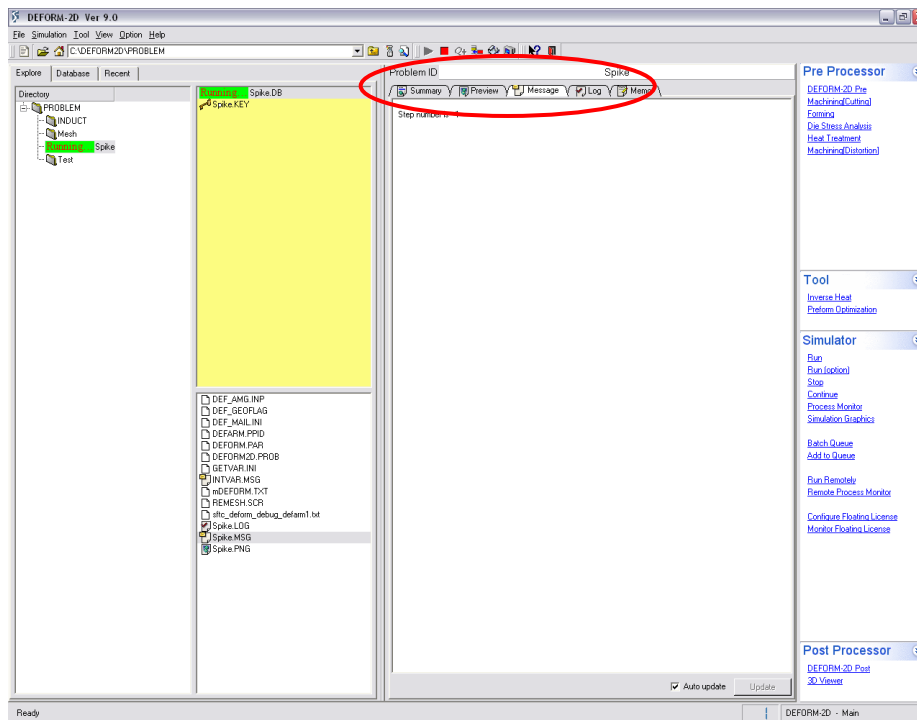


Fig. 2.2. Avanzamento della simulazione

Da questa finestra possiamo accedere al controllo di tutte le fasi della simulazione tra cui:

- **Summary:** visualizzazione di tutti gli incrementi di step salvati nella simulazione con le relative coordinate di posizione, velocità, carichi applicati dalla *Primary Die*.

Problem ID Spike2\_NonIsothermal

Summary Preview Message Log Memo

**Spike2\_NonIsothermal**

DEFORM SIMULATION  
Version No. : 9919  
Release Date : 05/15/06

Process Condition

- Units : English
- Step -1 ~ 100

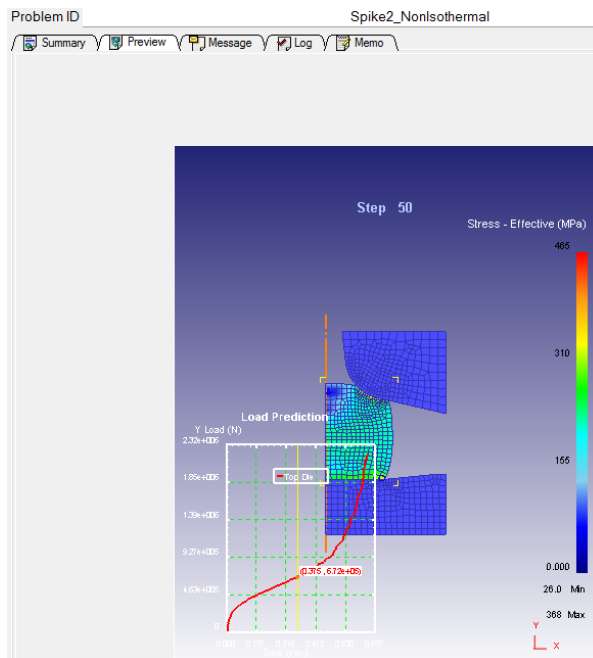
Operation List

- Operation : 1
- Simulation mode : Non-iso
- Simulation No. : 1
- No. of Object(s) : 3
- Priority of Object No. : 2

Step No.	Mesh No.	Stroke	Time	Load X	Load Y	Speed X	Speed Y	Volume
-1	1	0	0	--	--	0	0	7.06736
5	1	0.075	0.0375	25.039	57.8063	5.6655e-16	2	7.06654
10	1	0.15	0.075	36.932	75.8886	5.6655e-16	2	7.06567
15	1	0.225	0.1125	44.2775	88.6672	5.6655e-16	2	7.06484
20	1	0.3	0.15	49.5792	98.1896	5.6655e-16	2	7.0634
25	1	0.375	0.1875	53.7742	107.744	5.6655e-16	2	7.06219
30	1	0.45	0.225	57.9116	116.427	5.6655e-16	2	7.06093
31	1	0.465	0.2325	58.476	118.078	5.6655e-16	2	7.06065
32	2	0.465	0.2325	58.476	118.078	5.6655e-16	2	7.05964
35	2	0.525	0.2625	63.0714	125.51	5.6655e-16	2	7.0586
40	2	0.6	0.3	65.7004	133.468	5.6655e-16	2	7.05719
45	2	0.675	0.3375	72.6613	143.636	5.6655e-16	2	7.05608
50	2	0.75	0.375	75.9948	150.976	5.6655e-16	2	7.05465
55	2	0.825	0.4125	82.4044	160.117	5.6655e-16	2	7.0534
60	2	0.9	0.45	92.5555	170.337	5.6655e-16	2	7.052
65	2	0.975	0.4875	105.803	186.882	5.6655e-16	2	7.05086
70	2	1.05	0.525	113.559	200.426	5.6655e-16	2	7.0493

Summary.

- **Preview** della lavorazione:



Preview.

- **Log (LOG) file:** i file di log vengono creati quando una simulazione è in esecuzione. Essi contengono informazioni generali su di inizio e fine simulazione, remeshings (se presente), e potrebbero contenere messaggi di errore se la simulazione si arresta in modo imprevisto.
- **Messaggio (MSG) file:** i file di messaggi vengono creati quando una simulazione è in esecuzione. Essi contengono informazioni dettagliate circa lo stato di avanzamento della simulazione ed i relativi calcoli, e possono contenere informazioni sul motivo per cui una simulazione si è fermata.

### 2.3-3 Post-Processor

Questo componente viene utilizzato per visualizzare ed estrarre i risultati della simulazione dal file di database. Tutte le fasi e i risultati della simulazione vengono salvati e sono disponibili nel *post-processor*, includendo:

- Geometria deformata, compresi i movimenti e le deformazioni di ogni maglia ad ogni passo.
- Visualizzazione della distribuzione di tutte le variabili inerenti una lavorazione per deformazione plastica, come la deformazione, la tensione, la temperatura, i danni, ed altri.
- Vettori di velocità di spostamento, indicandone la grandezza e la direzione di spostamento o la velocità per ogni nodo ad ogni passo durante tutto il processo.
- Grafici di variabili chiave, come i carichi durante la deformazione.

- Il punto di monitoraggio per mostrare come si muove il materiale e come evolvono le variabili di stato in questi punti.
- Grafico di una variabile di stato tra due punti specificati dall'utente.

Le variabili di stato, la geometria e i dati di immagine possono anche essere estratti in un certo istante della deformazione. Il *post-processor* dispone di tre finestre principali (*fig. 2.3*): una per visualizzare le informazioni, una di manipolazione delle viste ed una per controllare le informazioni visualizzate:

### ***Display Window***

La Display Window è la finestra principale del post-processor. È la rappresentazione grafica di tutti i risultati di informazioni, tra cui la geometria, la mesh, i grafici.

### ***Graphic Utilities***

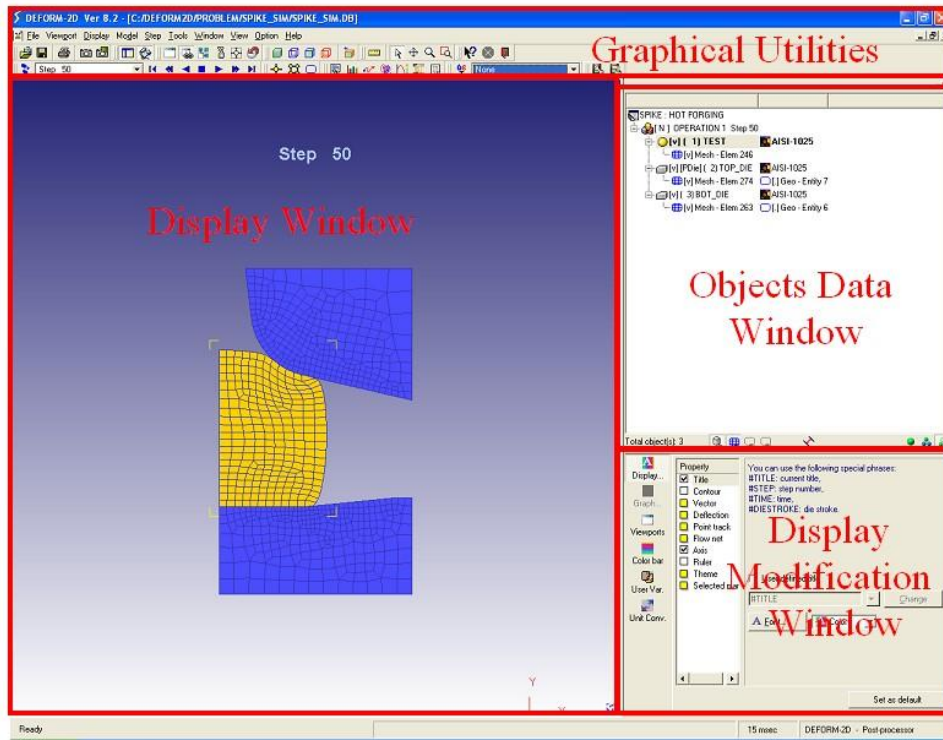
La finestra Graphic Utilities fornisce funzioni di visualizzazione e manipolazione di altre utilità per il Display Window. Le caratteristiche includono zoom e pan, unità di misura, i controlli viewport multipli, la stampa, la creazione di programmi di utilità e di animazione. La finestra grafica contiene anche pulsanti di controllo step in modo da muoversi continuamente nel database, step in avanti o indietro, o per passare all'inizio o alla fine del database.

### ***Objects Data Window***

Gli oggetti e la visualizzazione delle informazioni (come il load-stroke, informazioni di stato o variabile) sono disponibili in questa finestra.

## *Display Modification Window*

In questa finestra sono disponibili tutte le opzioni per la modifica delle proprietà di visualizzazione, quali le proprietà grafiche.



*Fig. 2.3. DEFORM-2D post-processor che mostra le quattro regioni del layout dell'interfaccia.*

## **State Variable**

Al fine di visualizzare le variabili di stato, la variabile e la componente della variabile deve essere selezionata come in Fig.2.4. Inoltre, deve essere selezionato un tipo di scala: a livello globale (min/max di tutti gli oggetti per tutte le fasi di simulazione), locali (min/max di tutti gli oggetti per il passo particolare), e definito dall'utente (che di default è riferito ai valori globali). È possibile selezionare il tipo di curva di livello per la visualizzazione della nostra variabile (linea/ombroso/vettoriale) e per quali oggetti devono essere tracciate selezionandoli nella lista di oggetti.



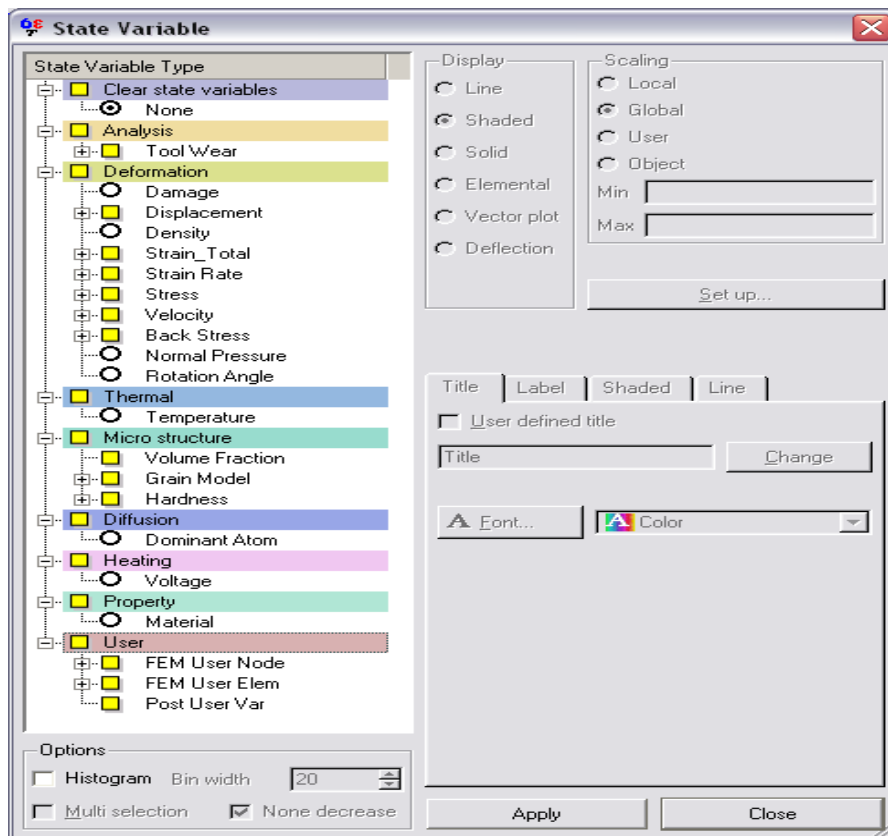


Fig. 2.4. State variables window.

## Load Stroke

Questa finestra grafica viene utilizzata per visualizzare il carico, la velocità, la coppia, la velocità angolare, e il volume rispetto al tempo (o il carico) per tutti gli oggetti. Sullo stesso grafico possono essere visualizzati gli andamenti di multi-oggetti. Se il tempo è utilizzato come asse x, allora il grafico può essere utilizzato per selezionare il singolo passaggio di interesse. Cliccando su un punto del grafico caricheremo il passo più vicino salvato dal database (vedi Fig.2.5).

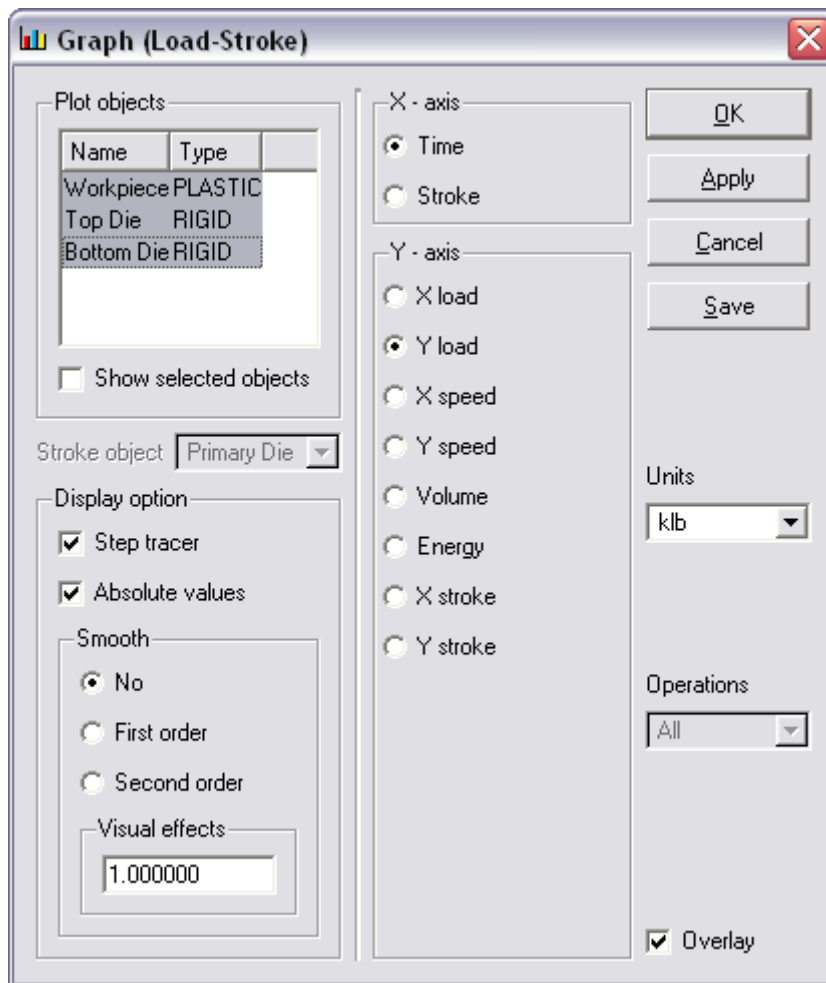


Fig. 2.5. Load-stroke window.

### Step selector

All'interno di questa finestra (Fig. 2.6) lo step selector ci permette di controllare l'avanzamento della lavorazione step per step. Per impostazione predefinita, in DEFORM, nell'elenco sono riportati solo gli step positivi.

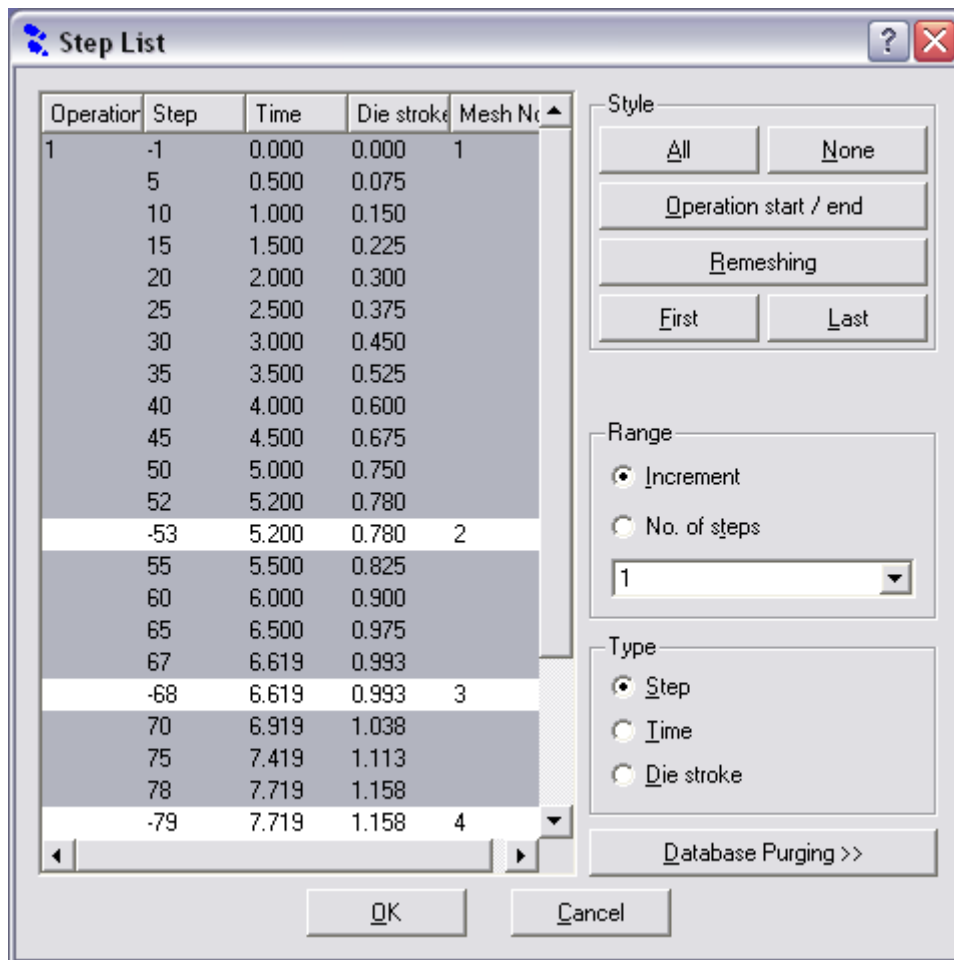
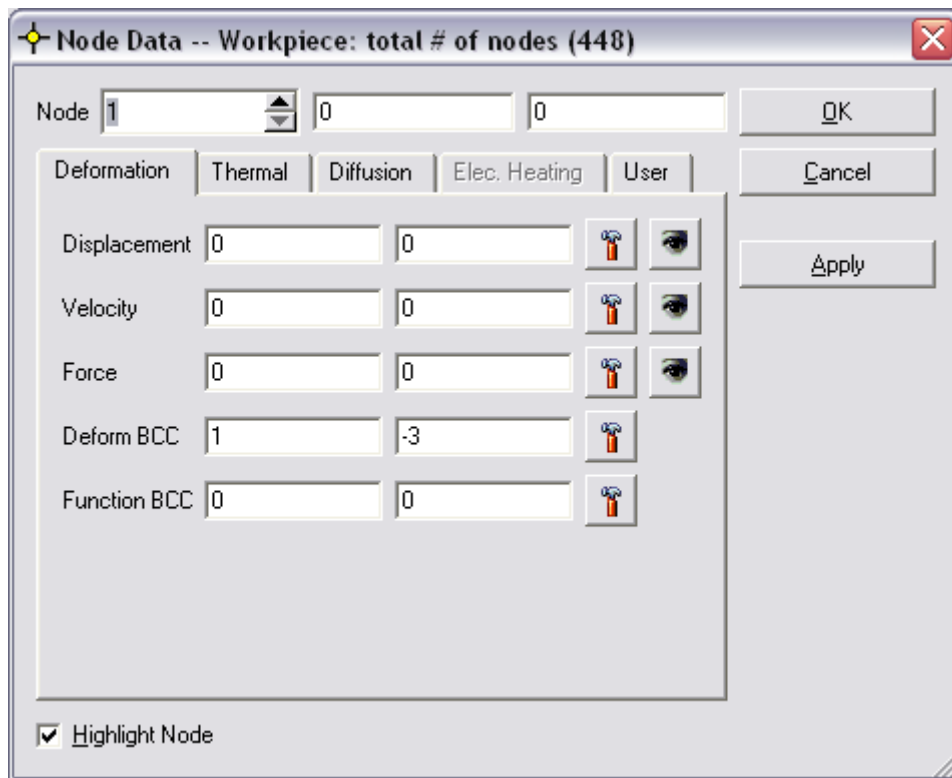


Fig. 2.6. Step Selection Window.

### Nodes Window

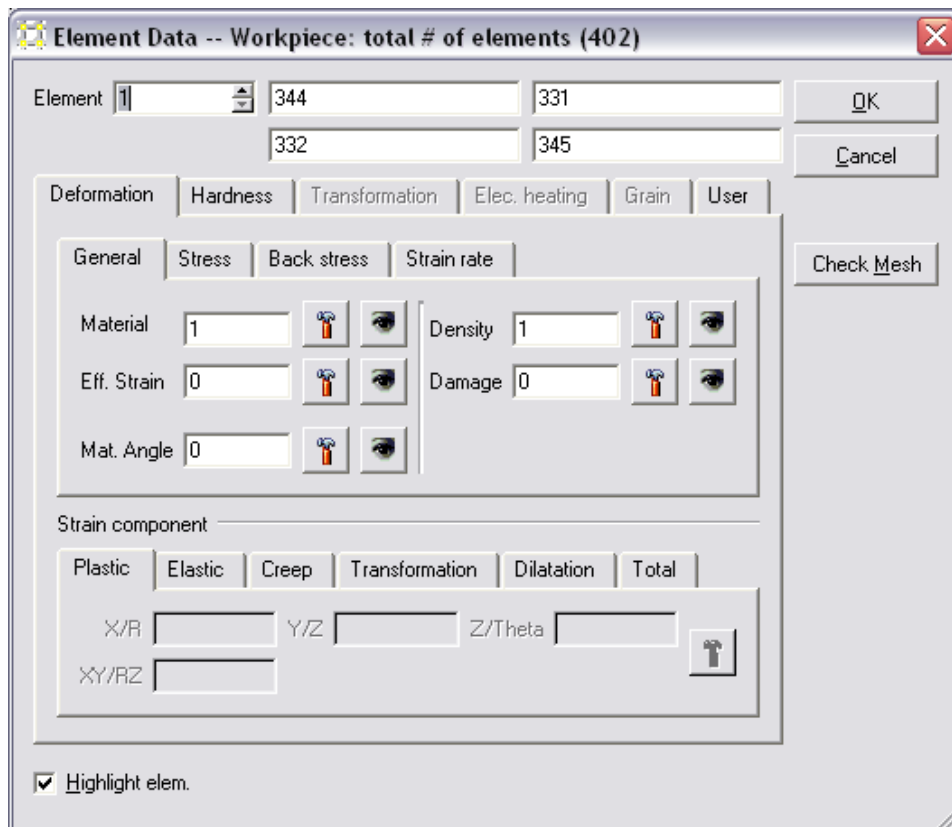
Nella nodes window (Fig.2.7) verranno visualizzate le informazioni riguardanti i nodi dell'oggetto selezionato. Queste informazioni includono la posizione, le variabili di stato, e le condizioni al contorno. Un nodo diverso può essere selezionato attraverso la casella di testo nodo o selezionandolo graficamente dal display window (direttamente dall'oggetto). Le informazioni cambieranno a seconda dello step considerato nella display window.



*Fig. 2.7. Nodes data window.*

## **Elements Window**

Nella elements window verranno visualizzate le informazioni sugli elementi dell'oggetto selezionato (*Fig. 2.8*). Un elemento differente può essere selezionato attraverso la casella di testo elemento o selezionandolo graficamente dal display window (direttamente dall'oggetto). Le informazioni cambieranno a seconda dello step considerato nella display window.



*Fig. 2.8. Elements data window.*

## **Data Extraction**

In questa finestra (*Fig. 2.9*) è possibile estrarre i dati delle variabili relativi a tutto il ciclo di deformazione oppure considerando un range di step o un singolo step.

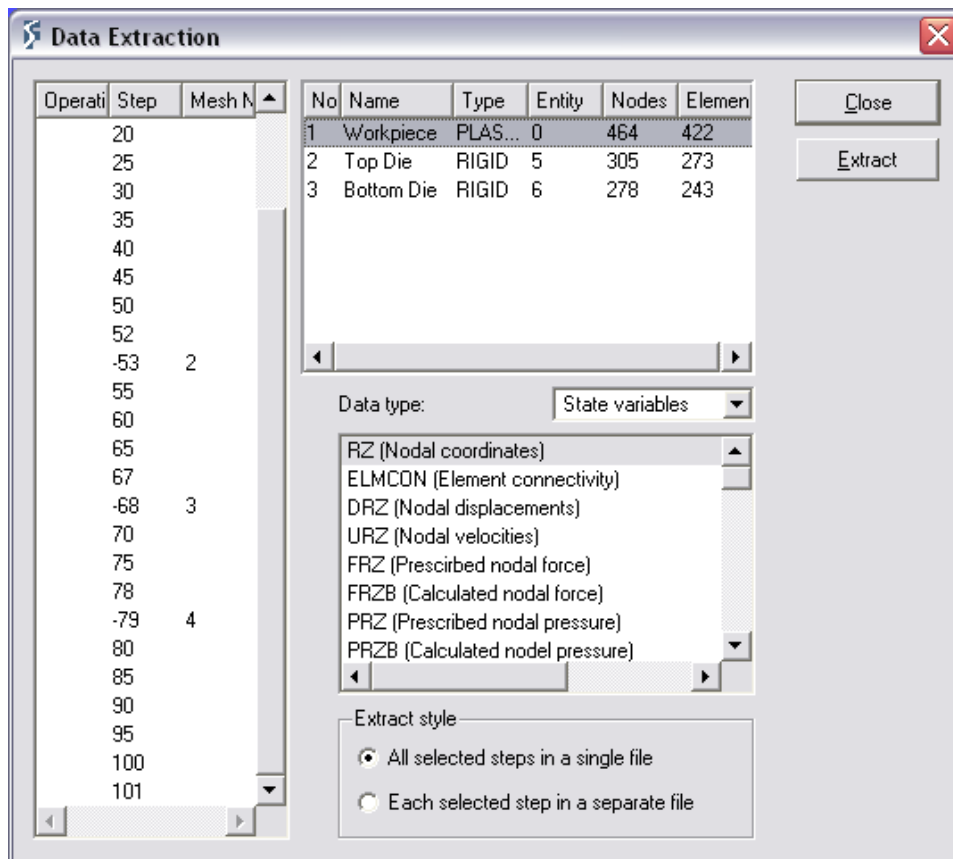
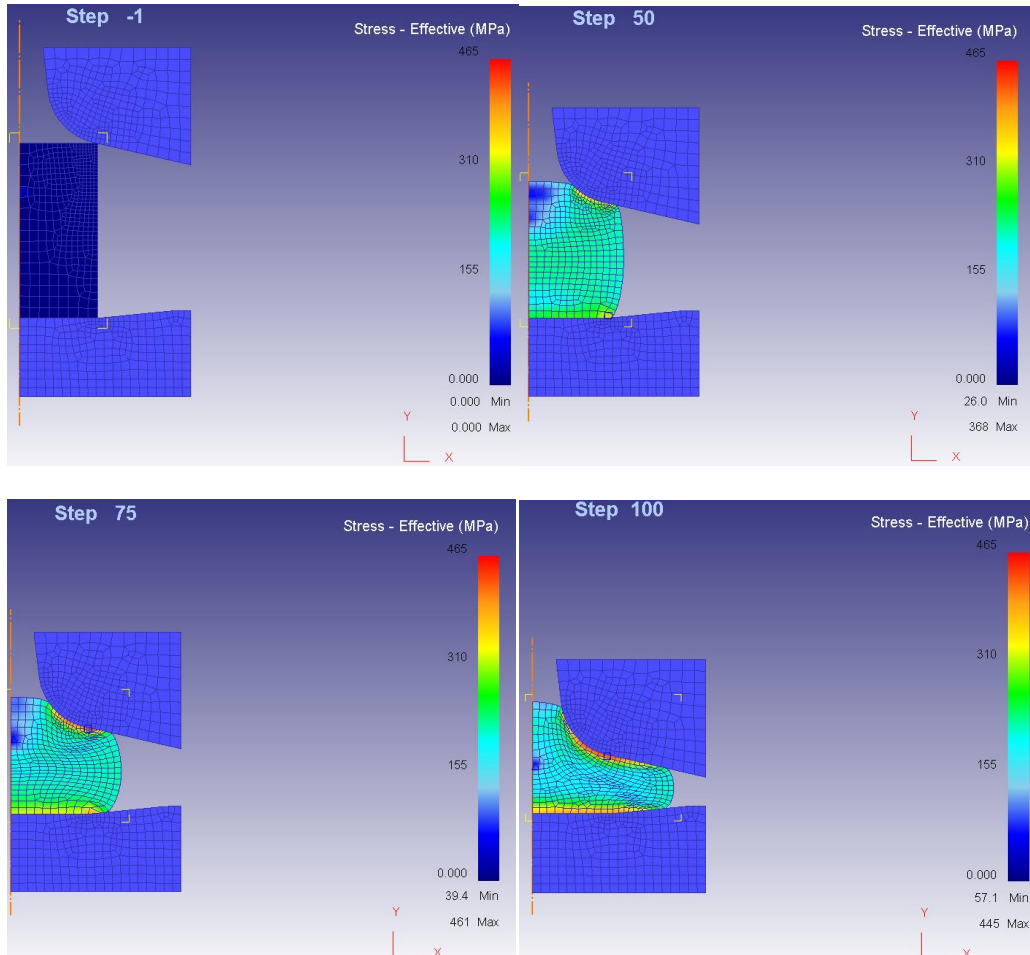


Fig.2.9. Data extraction window.

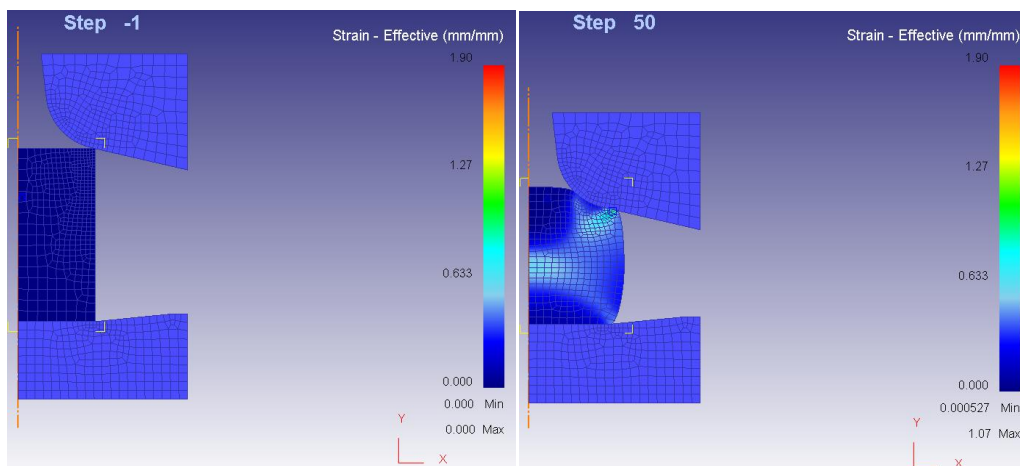
In ogni istante della lavorazione è possibile visualizzare l'andamento del carico, della deformazione, della temperatura, del danno e molte altre caratteristiche che mutano nell'elemento durante l'avanzamento della deformazione [14].

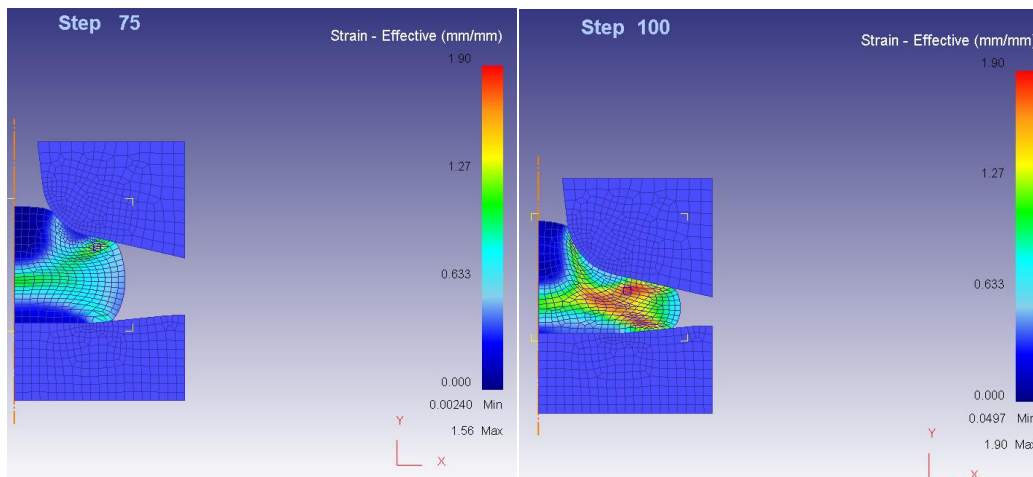
Ad esempio, nel caso di una semplice ricalcatura, possiamo notare come variano dall'inizio (step-1) alla fine (step 100) della lavorazione:

### 1. La tensione effettiva

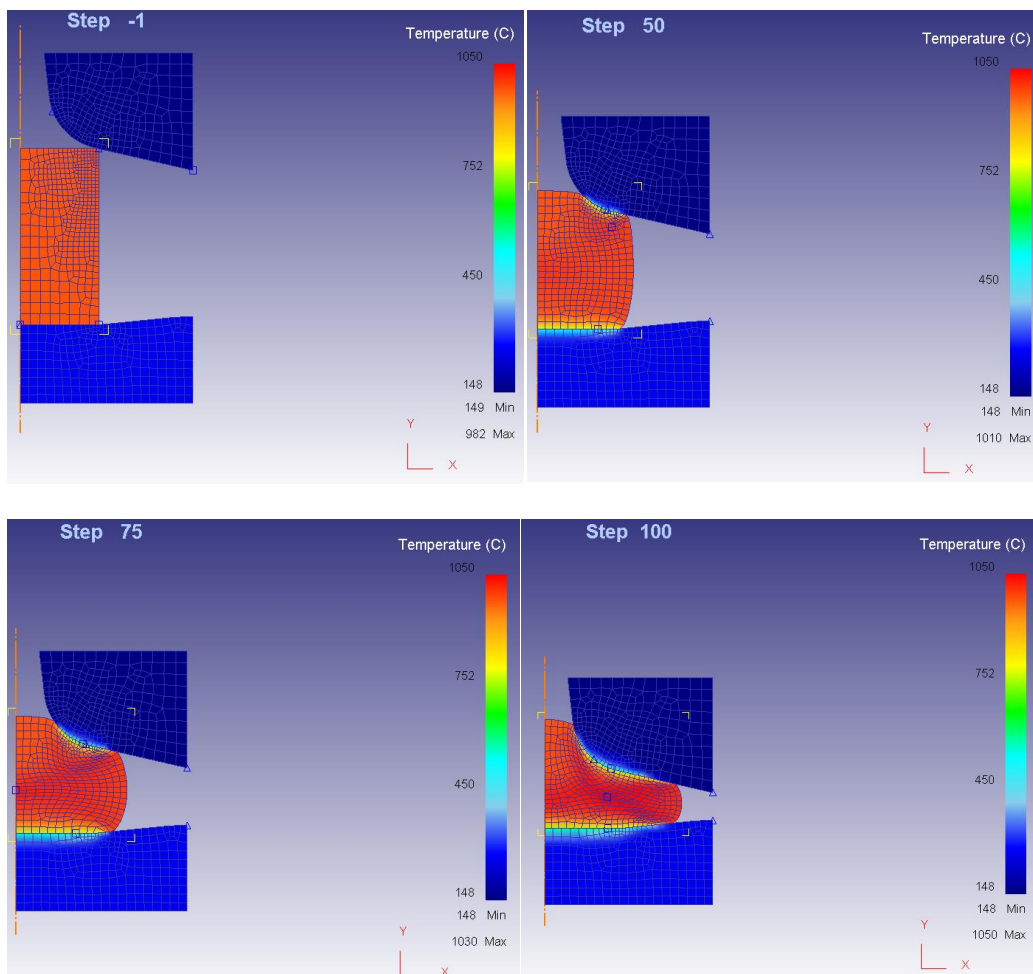


### 2. La deformazione effettiva



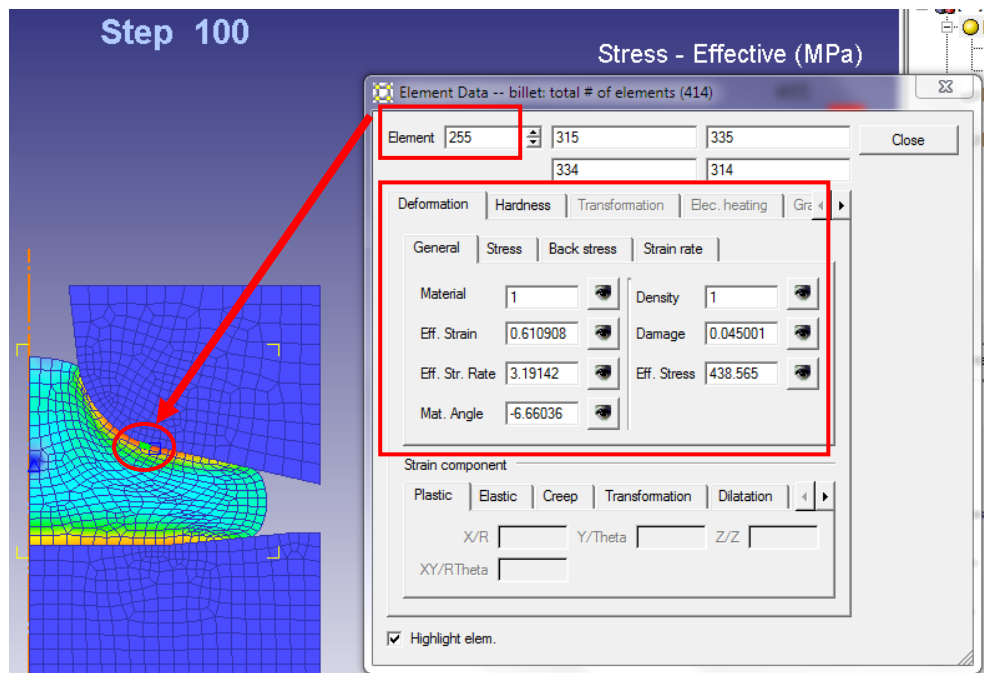


3. La temperatura: partendo inizialmente da una billetta riscaldata a 1800°C e dagli utensili riscaldati a 300°C, notiamo come avviene lo scambio termico tra la billetta e gli utensili con l'avanzamento della lavorazione:



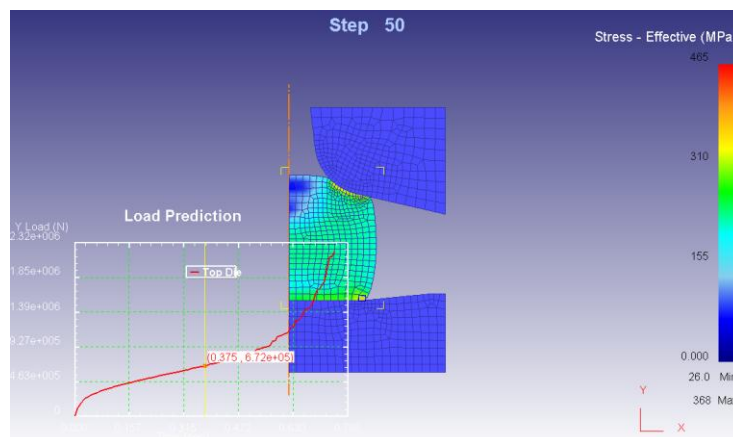


Dall'applicazione *Object element*, per ogni elemento dell'oggetto possiamo conoscere l'andamento delle caratteristiche meccaniche in ogni fase della lavorazione. Ad esempio, per l'elemento 255 possiamo visualizzare le caratteristiche di quell'elemento in un determinato istante (step 100) della lavorazione (*Fig.2.10*).



*Fig. 2.10. DEFORM-2D post-processor Object element*

Selezionando il Load Stroke otteniamo un grafico esplicativo di come viene applicato il carico dagli utensili sulla billetta istante per istante. Ad esempio allo step 50 (*Fig. 2.11*):



*Fig. 2.11.*

## 2.4 User Routine

### 2.4-1 Aspetti Introduttivi

È possibile implementare le capacità del programma introducendo degli algoritmi che ci consentono di interagire con il programma stesso e calcolare, tramite la definizione di nuove variabili nel *pre-processor*, caratteristiche esterne al programma standard.

L'utente deve avere almeno una conoscenza elementare del linguaggio FORTRAN. Questa sezione non vuole essere un'introduzione al linguaggio FORTRAN vuole però spiegare come costruire delle user routine e come implementarle all'interno di DEFORM.

Sono disponibili due diversi tipi di user routine:

- User-Defined FEM Routine.
- User-Defined Post-Processing Routine.

Per implementare le user routine è necessario disporre di un compilatore FORTRAN installato sul proprio sistema o è necessario utilizzare il sito web DEFORM Support (solo Windows).

### 2.4-2 User-Defined FEM Routine

Le routine FEM definite dall'utente sono subroutine in linguaggio FORTRAN in cui l'utente può modificare le routine interne al motore DEFORM FEM per ottenere funzioni molto specializzate nell'ambito delle deformazioni. Queste subroutine possono essere compilate e collegate al codice oggetto (generale) del DEFORM in modo da generare un motore (codice) FEM personalizzato. Tutte le subroutine disponibili sono contenute in un file chiamato DEF\_USR.FOR

(UNIX) o def\_usr.f (Windows). Questo è un file di testo contenente tutte le subroutine FORTRAN disponibili. Per compilare questo file, bisogna eseguire il file di script DEF\_INS.COM (Unix) o seguire le istruzioni riportate di seguito (Windows). A questo punto, il file FORTRAN sarà compilato e collegato al codice oggetto denominato DEF\_SIM.OBJ (UNIX) e DEF\_SIM\_LIB.lib (Windows). Questo genererà un nuovo motore (codice) FEM, chiamato DEF\_SIM.EXE che dovrà essere copiato nella cartella di esecuzione del programma DEFORM, sovrascrivendo nel caso il file preesistente. Nel caso di piattaforme UNIX, tutto questo processo è illustrato in *figura 2.12*.

Attualmente esistono user routine per la definizione della tensione di flusso, per il controllo dei movimenti, per il calcolo di due valori nodali (USRNOD), per il calcolo dei valori di un elemento (USRELM), e per altri modelli. Per esempio, ci sono molti metodi differenti per l'utente di controllare il movimento di un corpo rigido nel deformarsi, ad esempio, velocità costante, pressa meccanica, la velocità in funzione del tempo. Tuttavia, vi sono alcuni casi in cui è richiesto un controllo dei movimenti più specializzati, come il movimento basato sulla variazione delle variabili di stato del pezzo. Questo può essere effettuato utilizzando user-routine in quanto queste variabili sono disponibili quando il movimento dello stampo rigido viene calcolato [14].

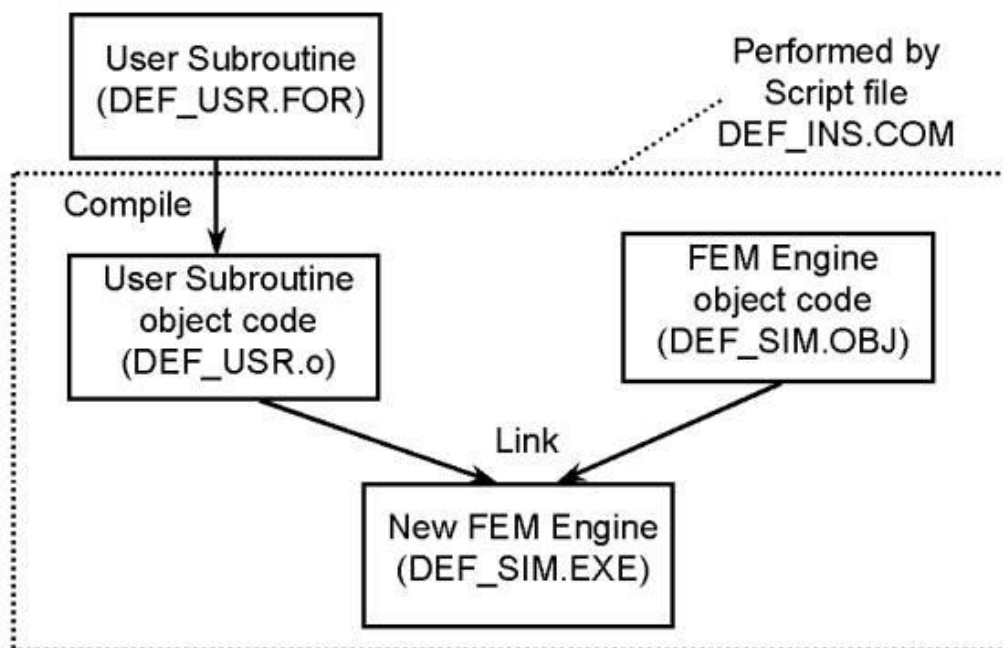


Fig. 2.12. Description on how to compile/link a new FEM engine.

### 2.4-3 Riassunto delle subroutine

Di seguito sono elencate le differenti subroutine che l'utente può modificare al fine di soddisfare le proprie esigenze:

#### 1. USRMTR

Questa routine permette all'utente di calcolare la tensione di flusso di un materiale. Questa routine è chiamata all'inizio di ogni iterazione.

#### 2. USRDSP

Questa routine permette all'utente di calcolare la velocità di un oggetto rigido che ha il movimento definito dall'utente tramite un modello. Questa routine è chiamata all'inizio di ogni step.

#### 3. USRUPD

Questa routine permette all'utente di calcolare le variabili di stato e memorizzarle per ogni nodo ed elemento. Queste variabili possono essere visualizzate in Post-Processor o essere usate durante la

simulazione per il calcolo della tensione di flusso. Le variabili nodali definite dall'utente sono aggiornate solo al termine di uno step, mentre le variabili per gli elementi definite dall'utente sono aggiornate all'inizio di ogni iterazione e alla fine di uno step.

#### 4. USRDMG

Questa routine permette all'utente di calcolare i danni subiti dal materiale ed è chiamata una volta per ogni step.

#### 5. USRZRT

Questa routine si aggiunge per la convenienza di integrare USRRAT ed è chiamata ogni volta che INCUBT è chiamato.

#### 6. USPM

Questa subroutine consente all'utente di specificare tramite un modello i parametri per l'addensamento di un materiale poroso. Questa routine viene chiamata prima della generazione della matrice di rigidità all'inizio di ogni iterazione.

#### 7. USRCRP

Questa routine è utilizzata per definire il tasso di creep e la sua derivata come una routine. Questa routine è disponibile solo per materiali elasto-plastici. Questa è chiamata all'inizio di ogni iterazione.

#### 8. USRBCC

Questa routine viene utilizzata per consentire all'utente di specificare impostazioni particolari e condizioni al contorno di un oggetto dato. È chiamata all'inizio di ogni iterazione.

#### 9. USRMAT

Questa routine consente all'utente di specificare una proprietà unica del materiale per un determinato oggetto. Questa è chiamata all'inizio di ogni iterazione.

#### 9. USRMSH

Questa routine viene utilizzata come una routine di uso generale che ha accesso a molte variabili interne del DEFORM. Questa routine è raccomandata quando tutte le altre routine non soddisfano le esigenze dell'utente. Questa routine è chiamata all'inizio e alla fine di ogni step.

#### 10.USRBC2

Questa routine viene utilizzata per consentire all'utente di specificare impostazioni particolari e condizioni al contorno di un oggetto dato. È chiamata all'inizio di ogni iterazione [14].

Nel nostro caso faremo riferimento alla subroutine USRMSH.

# CAPITOLO 3. Prove Sperimentali

## 3.1 Introduzione

L'obiettivo principale di queste prove è di trovare una relazione tra la dimensione dei grani cristallini e la deformazione equivalente subita nel processo, considerando che per il conferimento delle migliori proprietà meccaniche e superficiali è preferibile ottenere delle dimensioni dei grani cristallini fini, omogenei e di forma circolare.

Nel laboratorio di Dortmund sono stati realizzati degli estrusi in lega d'alluminio AA 6082 per analizzarne l'evoluzione delle dimensioni dei grani cristallini in seguito alla lavorazione. Successivamente, tramite il software FEM Deform sono state riprodotte sul calcolatore le estrusioni eseguite in laboratorio.

In figura 4.1 è stato riportato uno schema di lavoro:

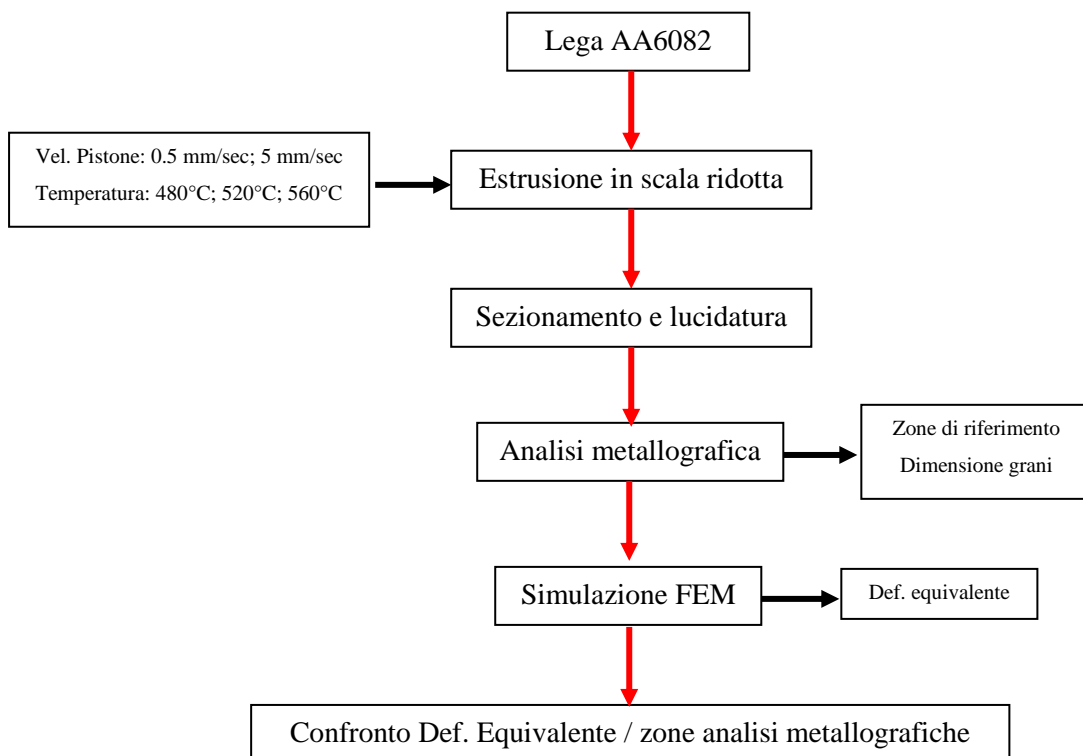
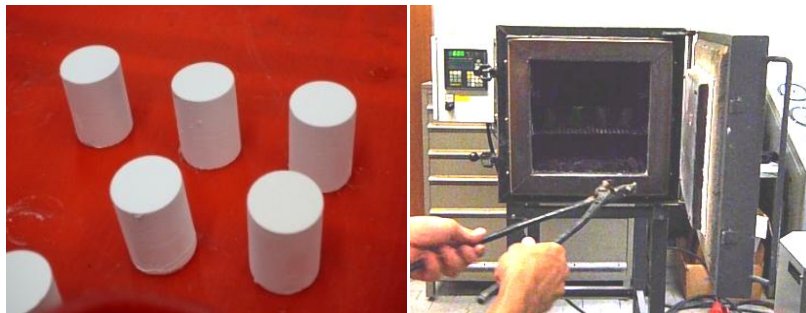


Fig. 4.1. Schema di lavoro.

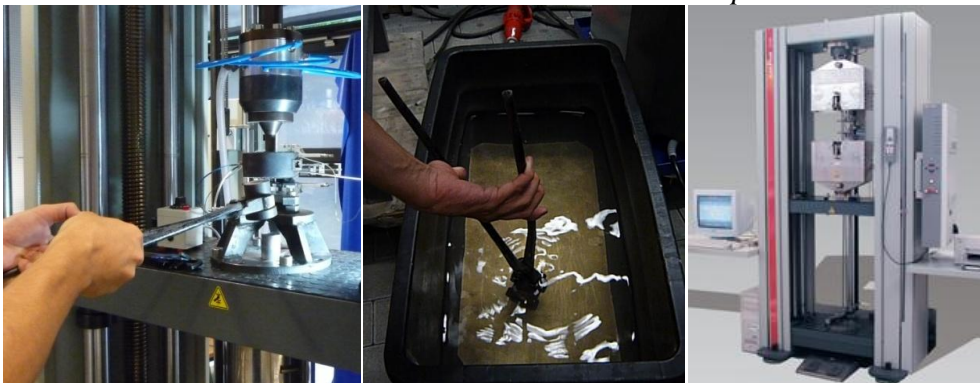
### 3.2 Estrusione diretta in piccola scala

Prima di eseguire l'estrusione le billette sono state ricoperte di nitruro di boro per facilitarne l'estrazione dal container alla fine del processo, inserite nel container/matrice ed il tutto riscaldato in forno a  $600^{\circ}\text{C}$  per 1 ora. In seguito, all'interno del container/matrice è stata inserita una termocoppia per controllare la temperatura durante la lavorazione. L'assieme è stato inserito nella pressa avente il punzone riscaldato a  $400^{\circ}\text{C}$ . Quando la termocoppia ha raggiunto il valore della temperatura stabilito per l'esperimento eseguiamo l'estrusione. All'uscita dalla matrice il profilo viene raffreddato in acqua. Finito il processo anche il container ed il fondello rimanente al suo interno vengono raffreddati in acqua.

Il processo è stato illustrato in figura 4.2:



*Nitruro di boro e riscaldamento a  $T=600^{\circ}\text{C}$  per 1 h.*



*Fig. 4.2. Estrusione, raffreddamento e Presa Zwick 250kN con cella di carico.*



L'estrusione è stata realizzata con una pressa **Zwick 250kN** partendo da billette con diametro iniziale  $d_0=19\text{mm}$  e lunghezza iniziale  $l_0=25\text{mm}$ .

Il piano sperimentale, come rappresentato in figura 4.3, prevede di realizzare la lavorazione considerando:

- due velocità di estrusione pari a  $5$  e  $0.5$  mm/sec;
- tre diversi diametri di apertura della matrice di estrusione  $d_f = 3$  mm,  $4$  mm e  $6$  mm;
- tre diverse temperature di riscaldamento  $T = 480$  °C,  $520$  °C e  $560$  °C.

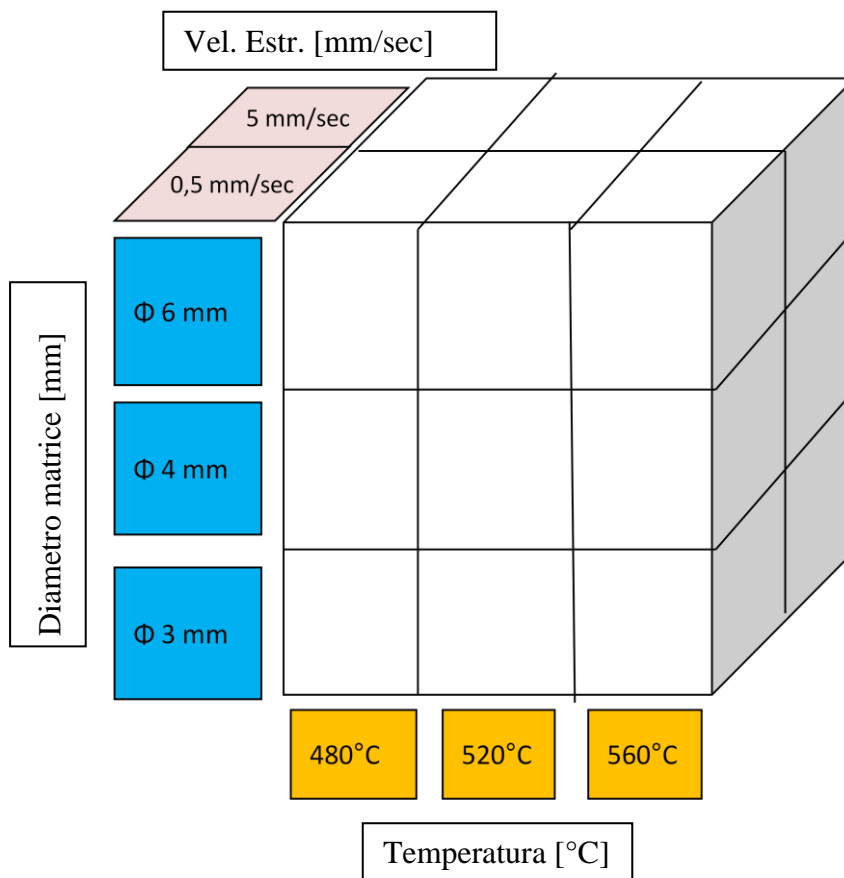


Fig. 4.3. Piano Sperimentale.

Prove analizzate: (se le prove non sono affidabili il campione ed il suo numero viene scartato):

<b>Velocità 5 [mm/sec]</b>			
<b>Diametro [mm] / Temperatura [°C]</b>	<b>480 °C</b>	<b>520 °C</b>	<b>560 °C</b>
<b>6 mm</b>	18	16	8
<b>4 mm</b>	19	9	1
<b>3 mm</b>	13		6

<b>Velocità 0.5 [mm/sec]</b>			
<b>Diametro [mm] / Temperatura [°C]</b>	<b>480 °C</b>	<b>520 °C</b>	<b>560 °C</b>
<b>6 mm</b>	12b	4b	2b
<b>4 mm</b>	14b	3b	1b
<b>3 mm</b>		16	

In figura 4.4 è rappresentato il disegno tecnico del container e della matrice:

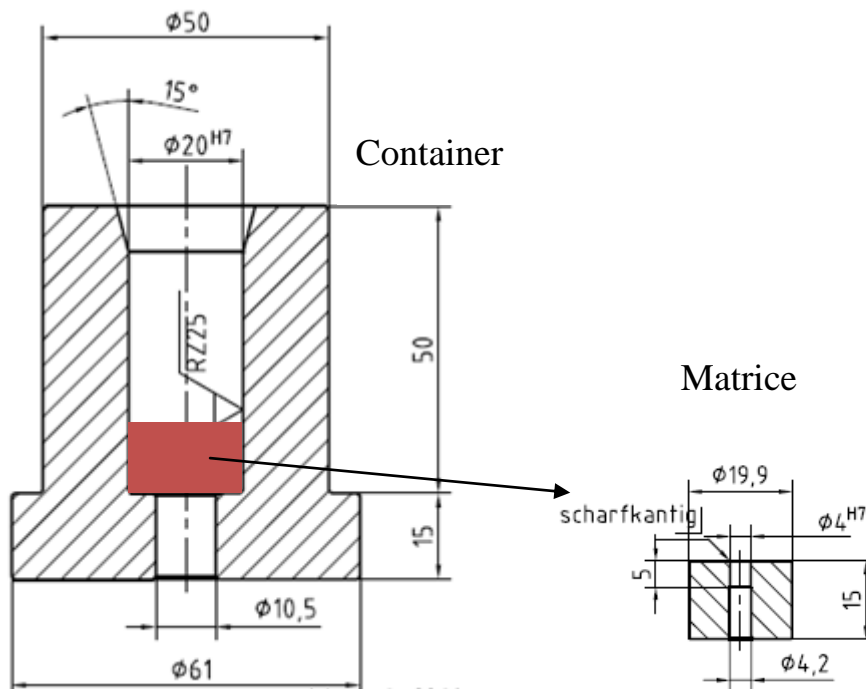


Fig.4.4. Disegno tecnico del Container e della Matrice.

In figura 4.5 è rappresentato lo schema di avanzamento del processo di estrusione:

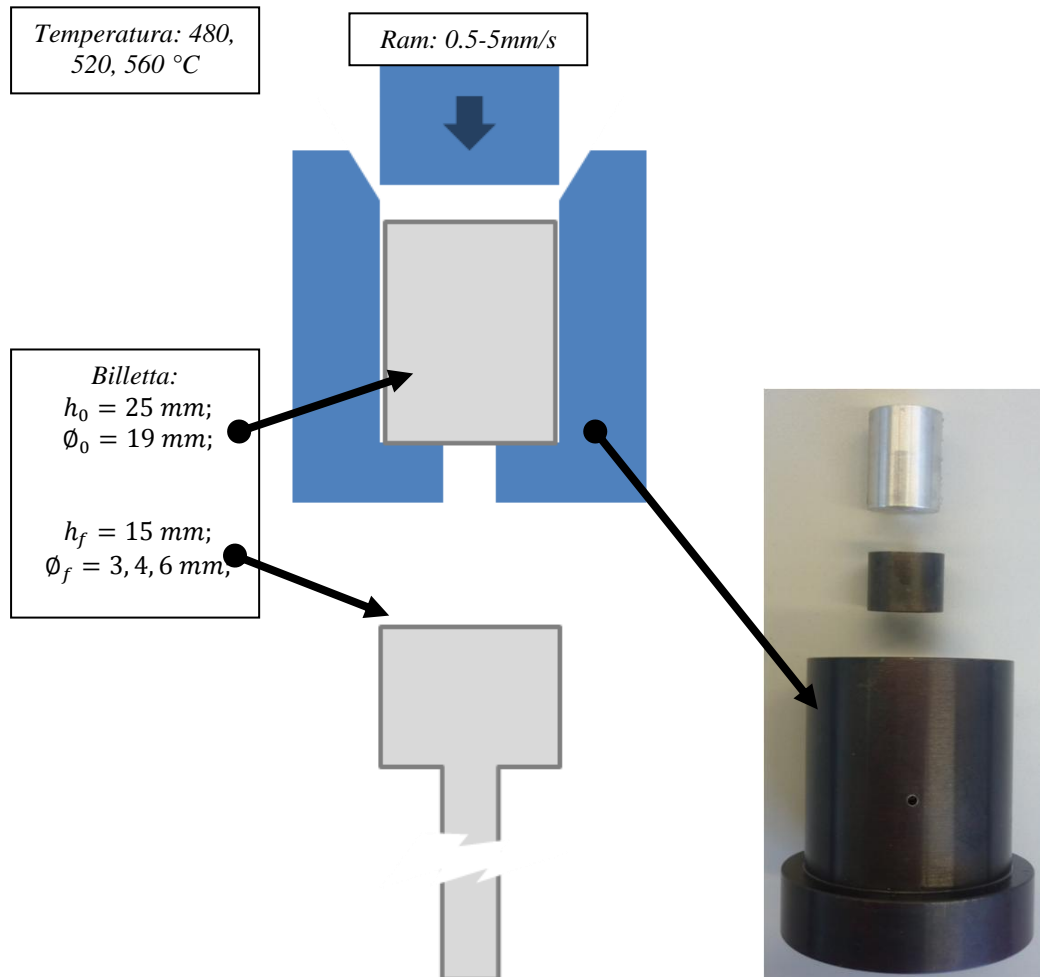
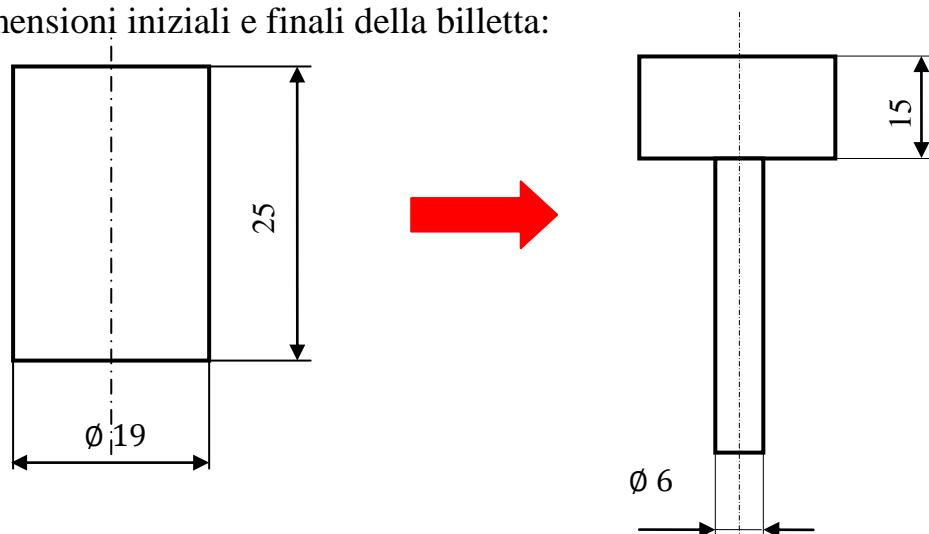


Fig.4.5. Schema di processo e foto del Container e della Matrice.

Dimensioni iniziali e finali della billetta:



In figura 4.6 è visualizzato l'esploso dei componenti a fine lavorazione.

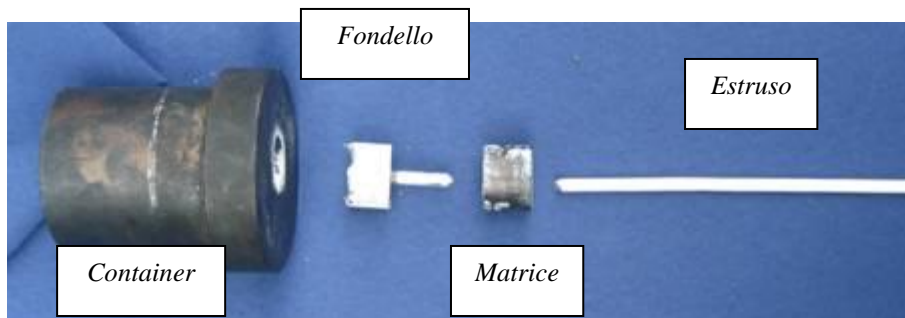


Fig. 4.6. Esploso componenti.

I provini analizzati sono i fondelli delle lavorazioni e sono stati catalogati con la seguente nomenclatura, ad esempio:

*1b\_560\_4\_0.5*

Dove:

- *1b* indica il numero del provino;
- *560* indica la temperatura d'estrusione;
- *4* indica il diametro di uscita della matrice;
- *0.5* indica la velocità del punzone.

Durante l'estrusione si evidenziano le seguenti zone (Fig. 4.8):

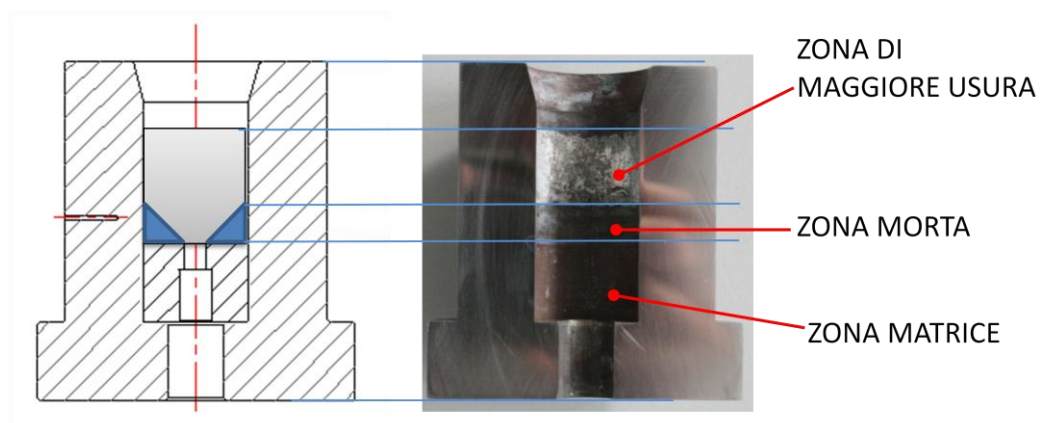


Fig. 4.8. Zone significative.

### 3.2-1 Analisi metallografiche dei provini

Eseguita l'estrusione i provini sono stati sezionati lungo l'asse longitudinale tramite una sega Struers Labotom (Fig 4.9 ), lucidati con una sequenza di carte da 200 a 1000 grit e un ciclo di lucidatura elettrochimica (60 sec, 20 Volt) ed infine un attacco elettrolitico con reagente di Baker (70 sec, 20 Volt; temperature solution <math><20^{\circ}</math>).

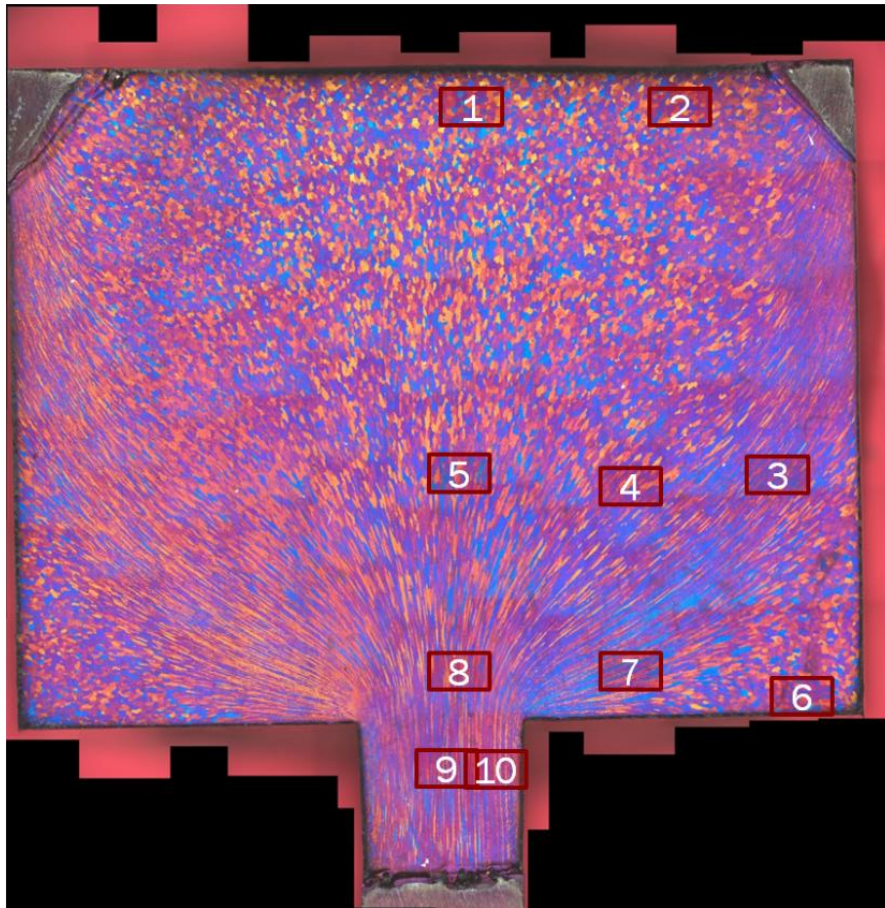


*Fig. 4.9. Sezionamento con sega Struers Labotom-3 cut-off machine 3.0 kW / 3.2 kW cutting motor and a cutting capacity of up to 90 mm diameter.*

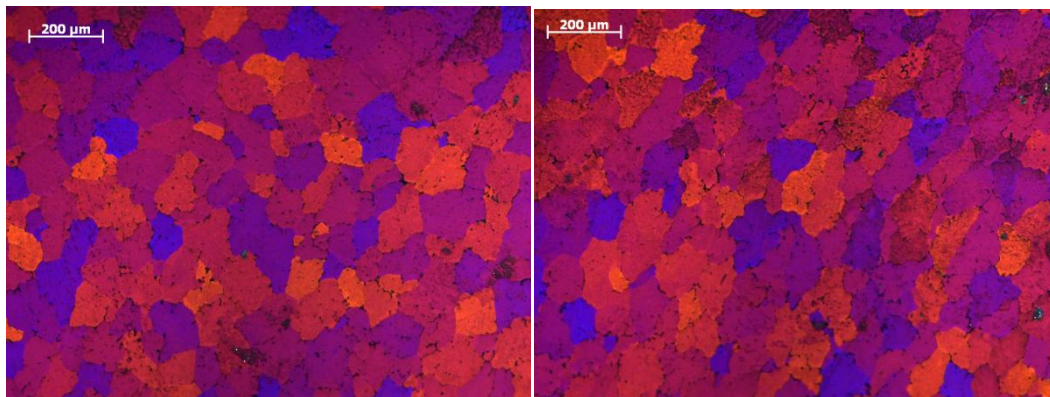
Successivamente è stata analizzata la microstruttura dei provini grazie ad un microscopio Zeiss axio Imager a luce polarizzata, individuando 10 zone di riferimento con grano omogeneo per lo studio delle dimensioni dei grani (Fig. 4.10, Fig.4.11):



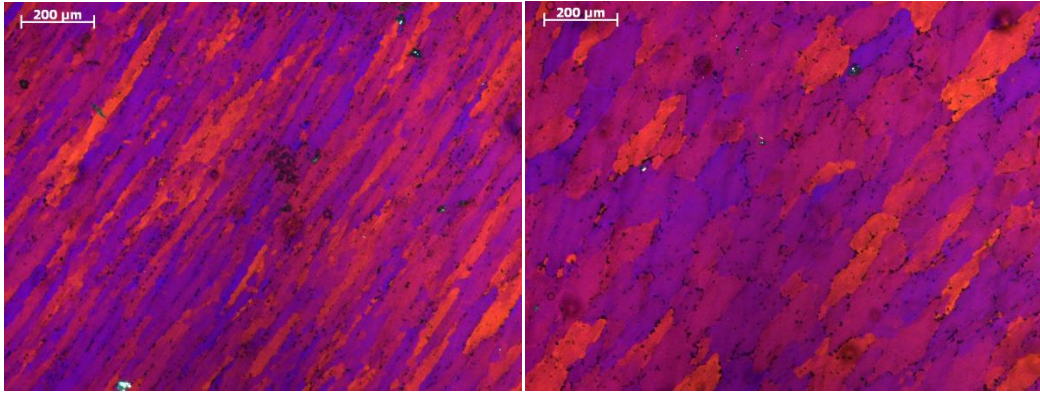
*Fig. 4.10. Lucidatrice e microscope Zeiss axio Imager M1.m with polarized light.*



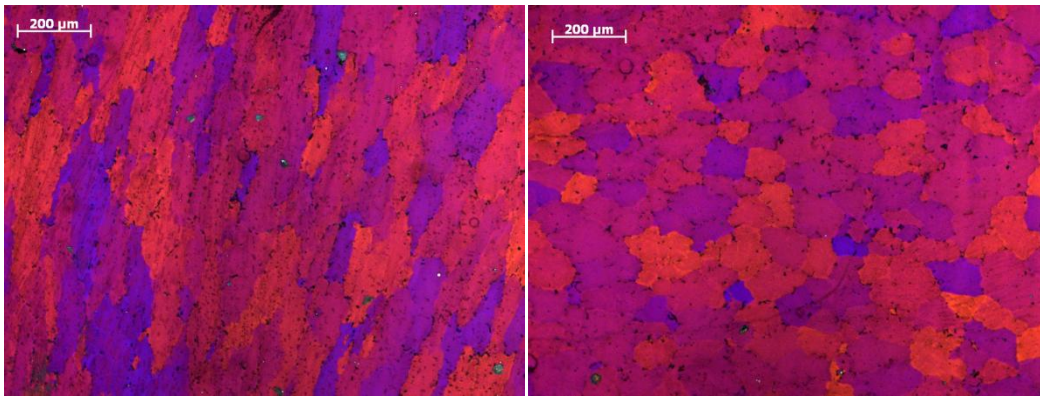
*Fig. 4.11. Zone di riferimento.*



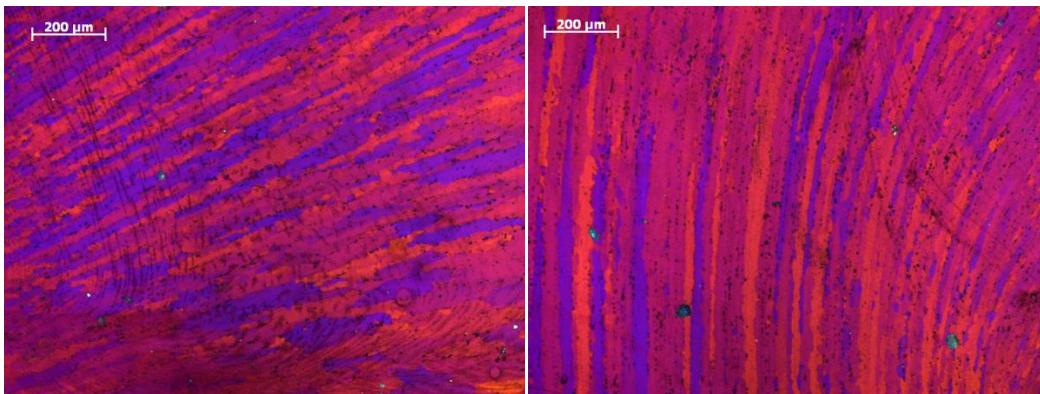
*Zona 1 e 2.*



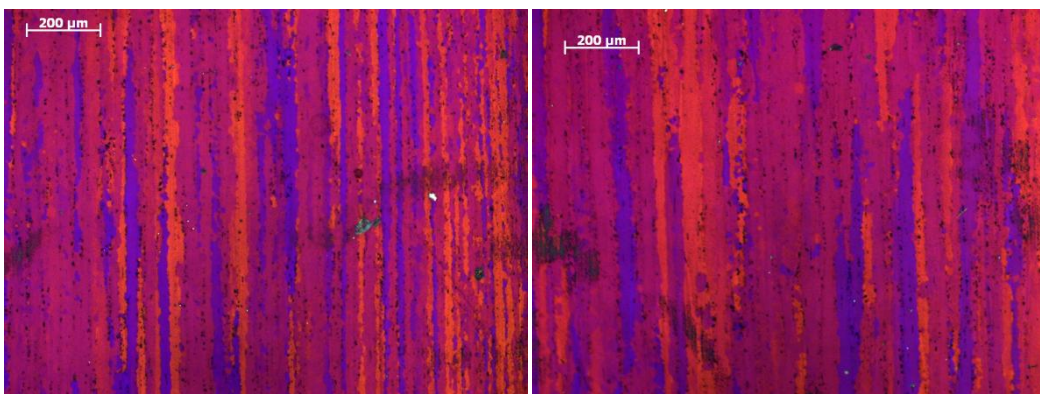
*Zona 3 e 4.*



*Zona 5 e 6.*



*Zona 7 e 8.*

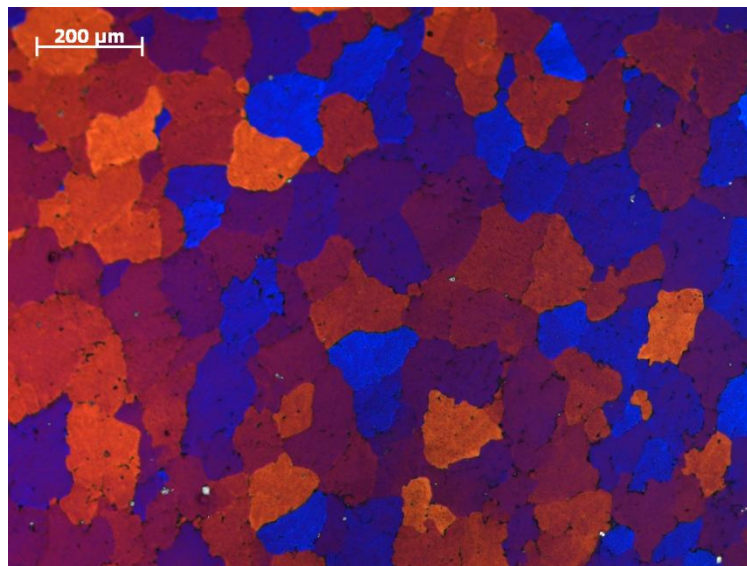


*Zona 9 e 10.*

### 3.2-2 Dimensioni del grano

Il grano cristallino, partendo da una geometria all'incirca circolare, in seguito alla deformazione plastica tende ad allungarsi diminuendo la sua sezione. Infatti, come si evince dall'analisi metallografiche, nelle zone a maggiore deformazione il grano risulta allungato mentre in quelle a minore deformazione assume una forma all'incirca circolare. Considerando le singole zone ingrandite vogliamo trovare una relazione tra la deformazione e la dimensione del grano in una determinata zona.

Ad esempio, considerando l'ingrandimento della zona 1 (Fig. 4.12):



*Fig. 4.12. Ingrandimento zona 1.*

In seguito è stata tracciata una griglia di riferimento sull'ingrandimento della zona 1. Nel caso del provino *1b\_560\_4\_0.5* per la determinazione del diametro medio e della lunghezza media dei grani per ogni linea (verticale ed orizzontale) è stato contato il numero delle intersezioni con i bordi di grano (Fig. 4.13).



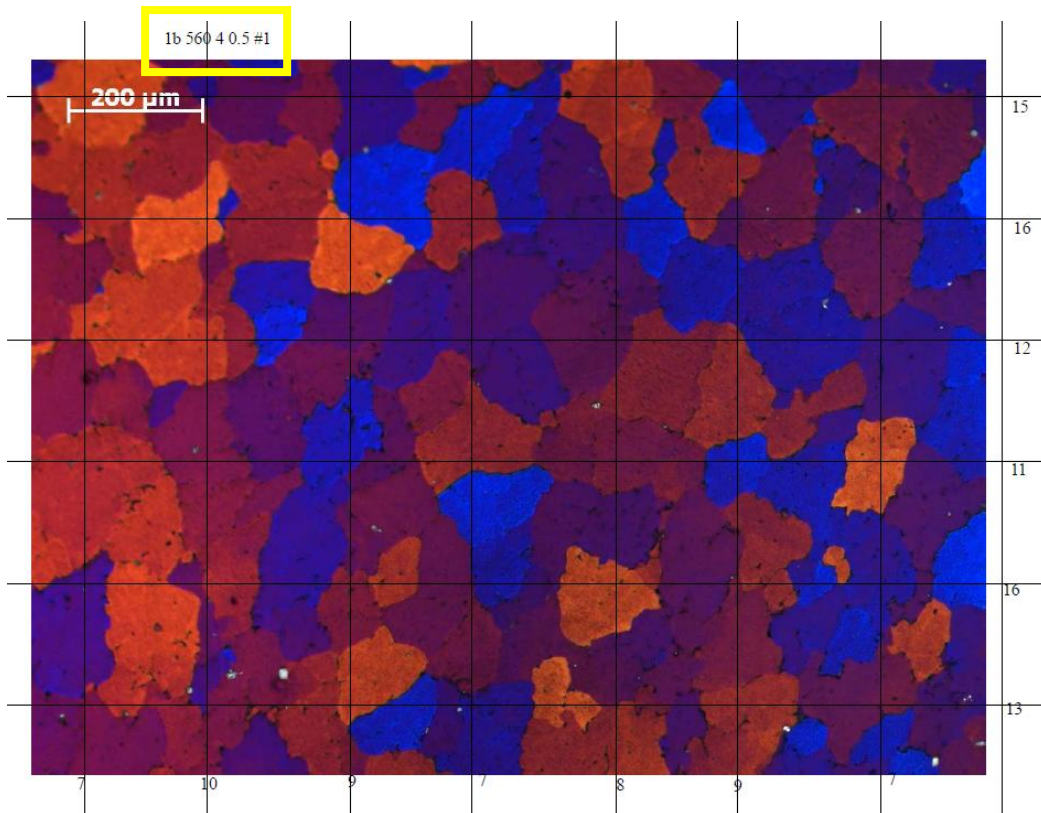
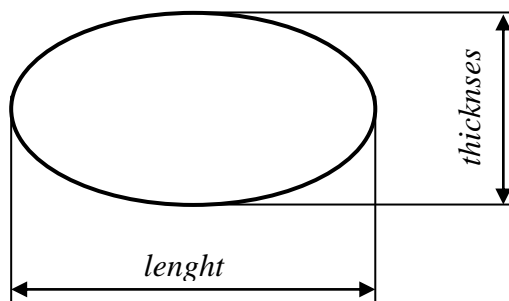


Fig. 4.13. Griglia di riferimento.

I dati acquisiti sono stati riportati in tabella per la valutazione della lunghezza e dello spessore medio dei grani per la singola zona 1:

test	temp °C	diametro [mm]	speed [mm/sec]							
1b	560	4	0,5							
zone	grani circolari	dimensioni [μm]	dim settore [μm]	media	numero di grani per ogni linea					
1	length	131,14	1067,84	8,14	7	10	9	7	8	9
	thickness	101,35	1402,03	13,83	15	16	12	11	16	13



Grano deformato

Quindi, ripetendo per ogni zona e per ogni estruso, otteniamo una media della lunghezza e dello spessore dei grani contenuti in ogni singola zona eseguendo il seguente rapporto:

$$l_{ave\_zona\_1} = \frac{dimensione\_zona}{numero\_medio\_grani\_zona} = \frac{1067,84}{8,143} = 131,138 \mu m$$

$$d_{ave\_zona\_1} = \frac{dimensione\_zona}{numero\_medio\_grani\_zona} = \frac{1402,03}{13,833} = 101,351 \mu m$$

### 3.3 Simulazione Deform dei profili estrusi

Dopo aver estruso i provini ed eseguito le analisi metallografiche è stata eseguita un'analisi agli elementi finiti (FEM) tramite l'applicazione DEFORM. Sono stati inseriti nel codice tutti i parametri relativi al processo di estrusione con cui sono stati realizzati i nostri provini, come la geometria della billetta, la temperatura, i contatti tra i vari oggetti ect.

Il modello è stato realizzato considerando l'assialsimmetria.

**La billetta** è stata modellata con illustrato in figura 4.14, scegliamo il materiale considerando precedenti prove di caratterizzazione materiale eseguite presso l'università di Bologna, generiamo la mesh con 4000 elementi finiti ed impostiamo la temperatura di processo:

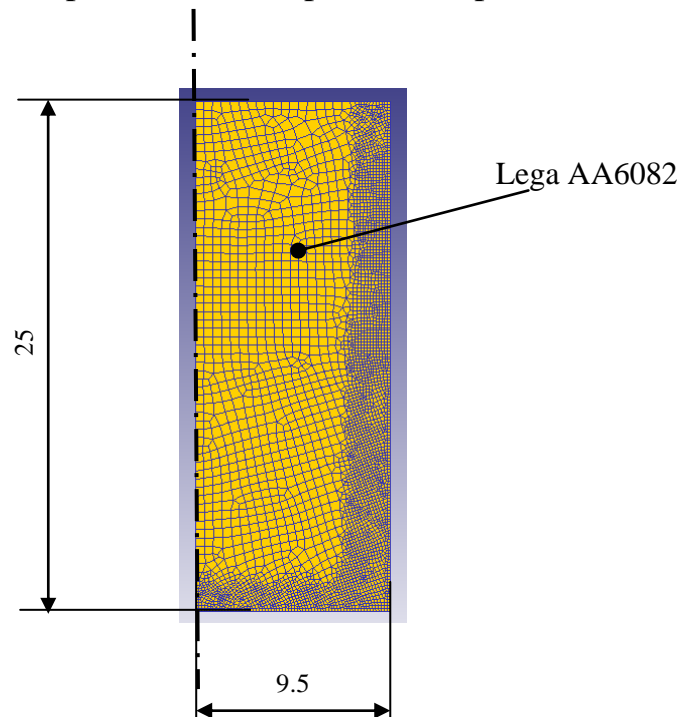
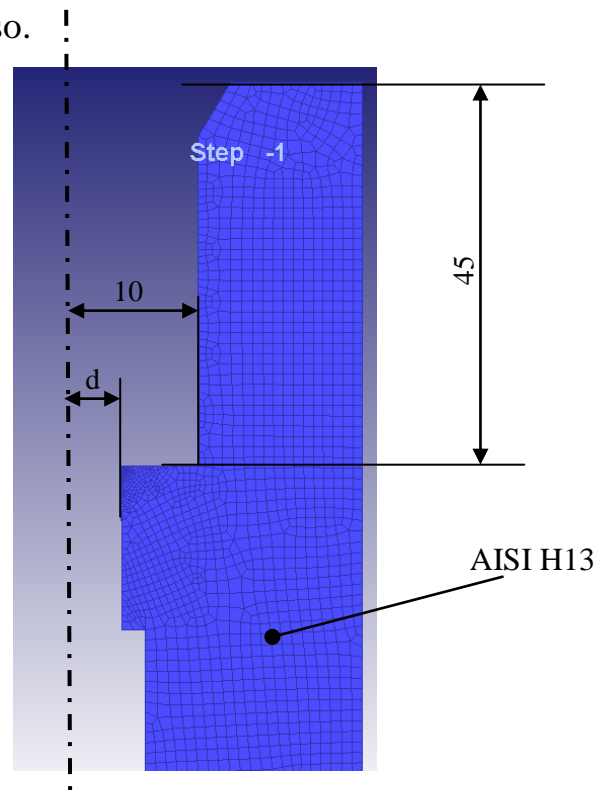


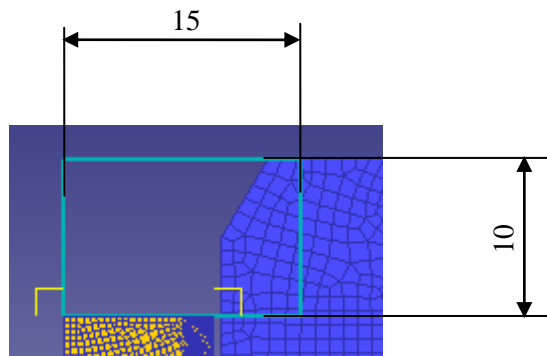
Fig. 4.14. Modellazione Billetta.

Per facilitare il modello, il *contenitore e la matrice* sono stati realizzati come unico corpo per alleggerire e velocizzare i tempi di calcolo (Fig.4.15). È stato scelto un acciaio AISI H13 idoneo per le

matrici, assegnata una mesh di 1500 elementi e impostata la temperatura di processo. !

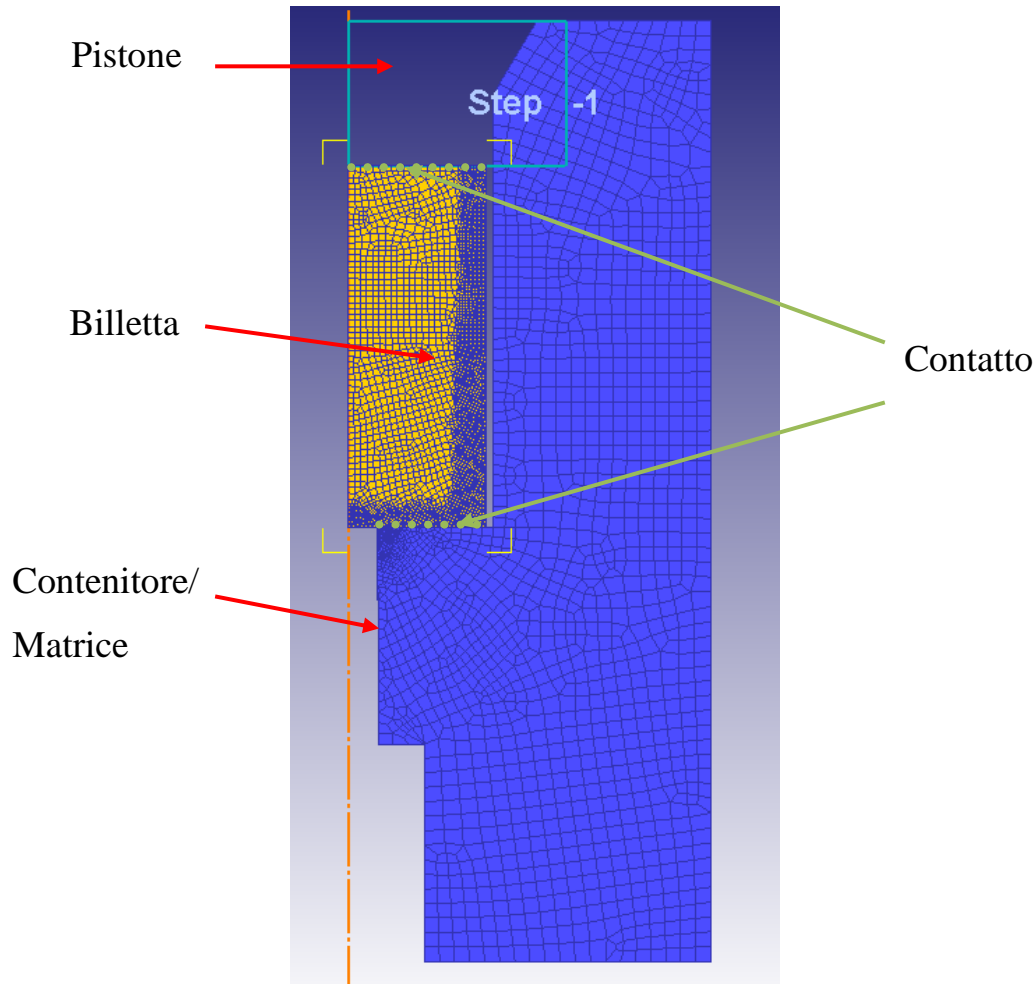


**Il Pistone** è stato modellato imponendo una temperatura di 400 °C e un movimento di 0.5 mm/sec oppure 5 mm/sec lungo l'asse -y (Fig. 4.16.).



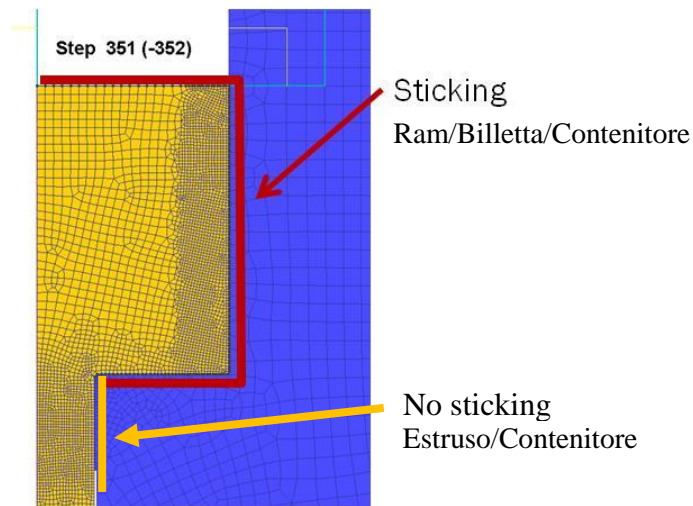
Otteniamo il seguente modello ed imponiamo i contatti tra i vari oggetti considerando precedenti prove di caratterizzazione (Fig. 4.17):

- il coefficiente di attrito pari ad 1;
- coefficiente di scambio termico pari ad  $11 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



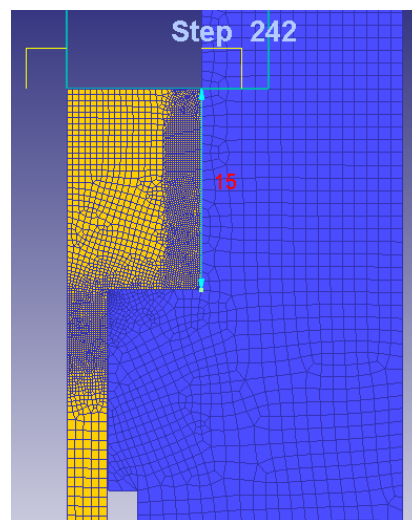
*Fig. 4.17. Modello assemblato.*

Avviamo la simulazione e la stoppiamo allo step 27 quando la billetta è stata completamente ricalcata ed è a contatto con il contenitore/matrice. Riapriamo il pre-processor ed imponiamo lo sticking (attrito) tra il contenitore e la billetta e tra il pistone e la billetta. Imponiamo invece del semplice contatto, senza sticking, tra il contenitore ed il profilo in uscita già estruso Fig. 4.18.



*Fig.4.18. Sticking and no sticking.*

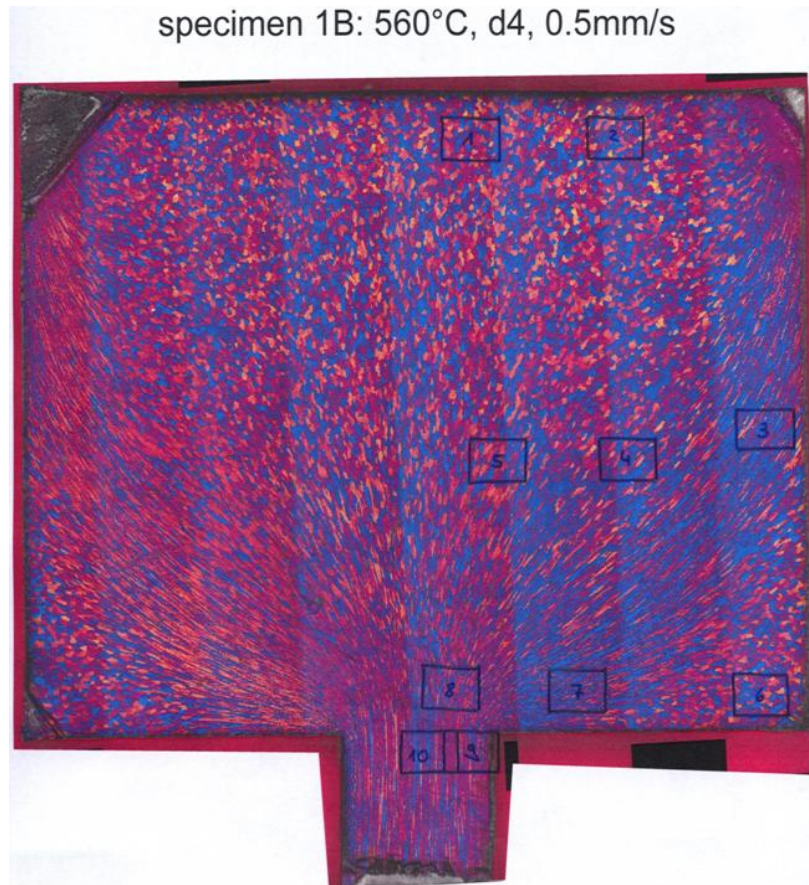
Generiamo un nuovo database, ripartendo dallo step 27, con lo sticking impostato e facciamo ripartire la simulazione. Ottenendo in definitiva l'estrusione della billetta fino ad un'altezza finale di  $h_f = 15$  mm (Fig. 4.19).



*Fig. 4.19. Stato finale estrusione.*

### 3.3-1 Deformazione equivalente per zona

La deformazione equivalente per ogni zona è stata valutata sovrapponendo i risultati delle simulazioni Deform con la mappa dell'analisi metallografica in cui sono state evidenziate le varie zone di riferimento (Fig. 4.20).



*Fig.4.20. metallografia e inserimento zone di riferimento.*

A questa immagine sovrapponiamo, volta per volta, gli andamenti della deformazione equivalente individuando, per quest'ultima, una scala di valori ottimale che descriva al meglio lo stato deformativo delle singole zone come riportato in seguito (Fig. 4.21; 4.22; 4.23):

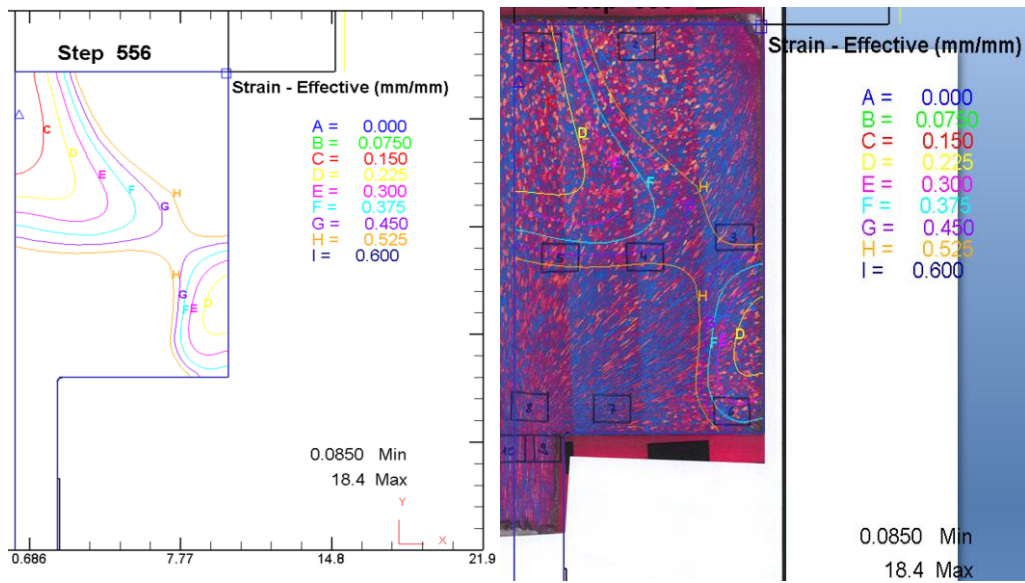


Fig. 4.21. Andamento della deformazione equivalente tra 0 e 0.6, valido per la valutazione della deformazione nelle zone 1-3-4-5-6.

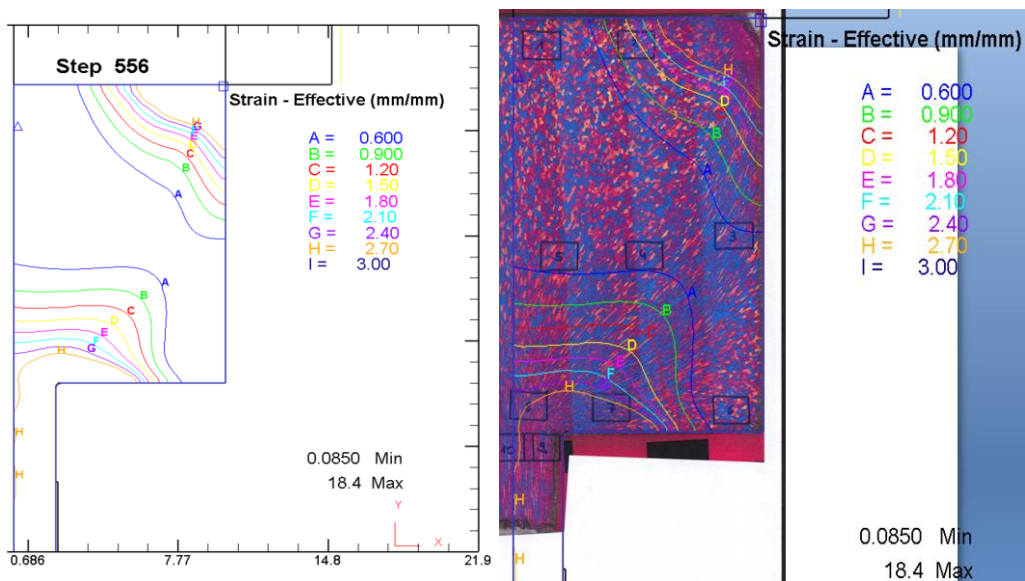
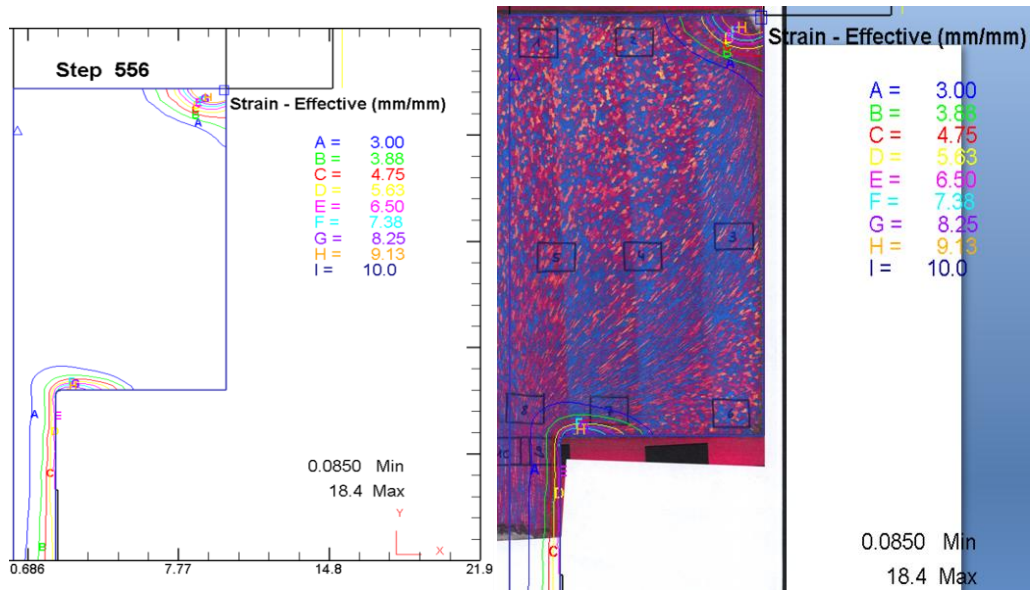


Fig. 4.22. Andamento della deformazione equivalente tra 0.6 e 3, valido per la valutazione della deformazione nelle zone 2-7-8-10.





*Fig. 4.23. Andamento della deformazione equivalente tra 3 e 10, valido per la valutazione della deformazione nelle zone 9.*

In questo modo, considerando ad esempio il provino 9\_520\_4\_5, siamo in grado di assegnare per ogni zona dell'estruso la relativa deformazione equivalente e le dimensioni del grano come riportato nella seguente tabella:

test	temp °C	diametro [µm]	speed [mm/sec]	scale mm→µm										
9	520	4	5	7,692307692										
STRAIN	zone	grani circolari	dimensioni [µm]	ratio l/d	dim settore [µm]	media	numero di grani per ogni linea							
0		length	150											
		thickness	150											
0,165	1	length	133,48	1,166258925	1067,84	8	9	7	8	6	10	8	8	
		thickness	114,4514286		1402,03	12,25	13	13	13	10				
1,75	2	length	131,0940351	0,966197844	1067,48	8,142857	7	9	10	8	7	9	7	
		thickness	135,6803226		1402,03	10,33333	14	12	12	8	8	8		
0,157	3	length	261,5584416	5,582549589		34,0026	29,6	24,14286	56	15,27273	19	60		
		thickness	46,85286488			6,090872	3,7	8,181818	4,645161	6,6	6,4375	7,6	6,0625	5,5
0,33	4	length	289,7222222	2,586805556		37,66389	30,5	43,75	24,33333	34,4	59,5	33,5		
		thickness	112			14,56	12	12,5	16	18	14,3			
0,8	5	length	233,51125	2,248455365	1067,48	4,571429	6	4	3	4	7	4	4	
		thickness	103,8540741		1402,03	13,5	15	18	12	12	14	10		
2,12	6	length	162,4426087	1,892419759	1067,48	6,571429	10	8	7	6	7	4	4	
		thickness	85,83857143		1402,03	16,33333	17	16	16	14	17	18		
1,54	7	length	410,3632479	7,586200654		53,34722	54	58	59,33333	34,5	97,5	16,75		
		thickness	54,09338173			7,03214	6,214286	8,764706	6,16	7,7	7,7	5,653846		
0,32	8	length	124,5393333	0,71062293	1067,48	8,571429	8	7	8	8	10	10	9	
		thickness	175,25375		1402,03	8	8	8	7	7	10			
2,95	9	length	934,045	14,78983973	1067,48	1,142857	2	1	1	0	2	1	1	
		thickness	63,1545045		1402,03	22,2	20	20	23	26	22			
8,6	10	length	92,82434783	4,223507826	1067,48	11,5	10	13						
		thickness	21,97802198		400	18,2	23	17	16	17	18			

Inizialmente, dall'analisi del grano allo stato in deformato, si considera un grano di dimensioni all'incirca sferiche di raggio 150µm.

### 3.3-2 Analisi dei risultati Deform

Confrontando la deformazione equivalente ottenuta dal codice Deform e le analisi metallografiche delle varie zone possiamo notare che per i provini estrusi con diametro  $d_f=6\text{ mm}$ , il codice esegue una buona descrizione della deformazione del grano cristallino, infatti, come nel caso del provino 8 560 6 5 riportato in figura 4.24, l'andamento della deformazione equivalente rispecchia la deformazione del grano cristallino visualizzabile dall'analisi metallografica.

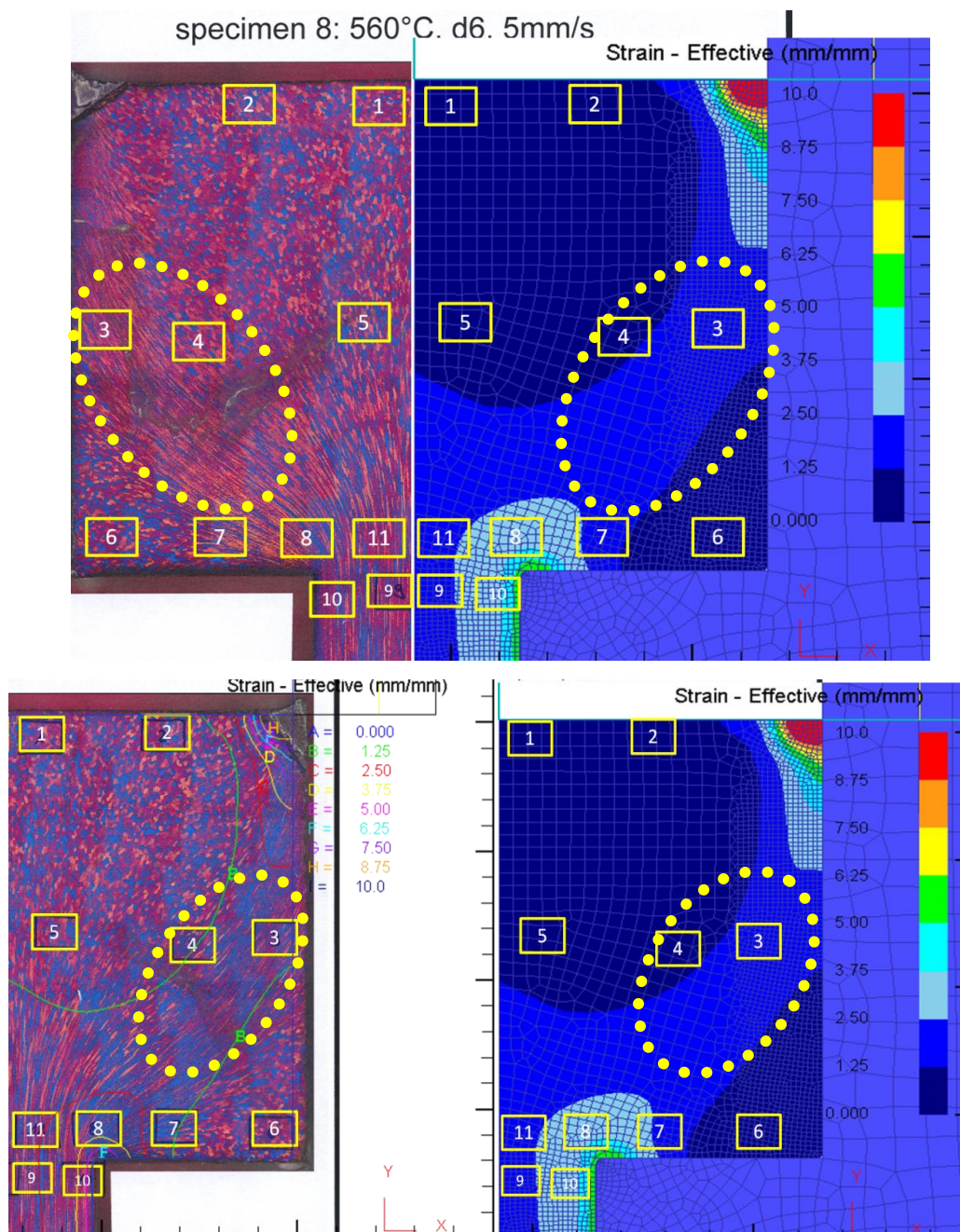


Fig.4.24 Stato Deformativo Provino 8 560 6 5.

Viceversa, nel caso dei provini estrusi con diametro di 3 e 4 mm il codice valuta una descrizione della deformazione che non rispecchia la reale deformazione del grano, in quanto, ad una elevata deformazione del grano cristallino in alcune zone associa una deformazione equivalente relativamente bassa.

Infatti, nel caso del provino 6 560\_3\_5 notiamo, come evidenziato in figura 4.25, che ad un'elevata alterazione della dimensione del grano cristallino zona 3 è associata la stessa deformazione equivalente della zona 5 poco deformata.

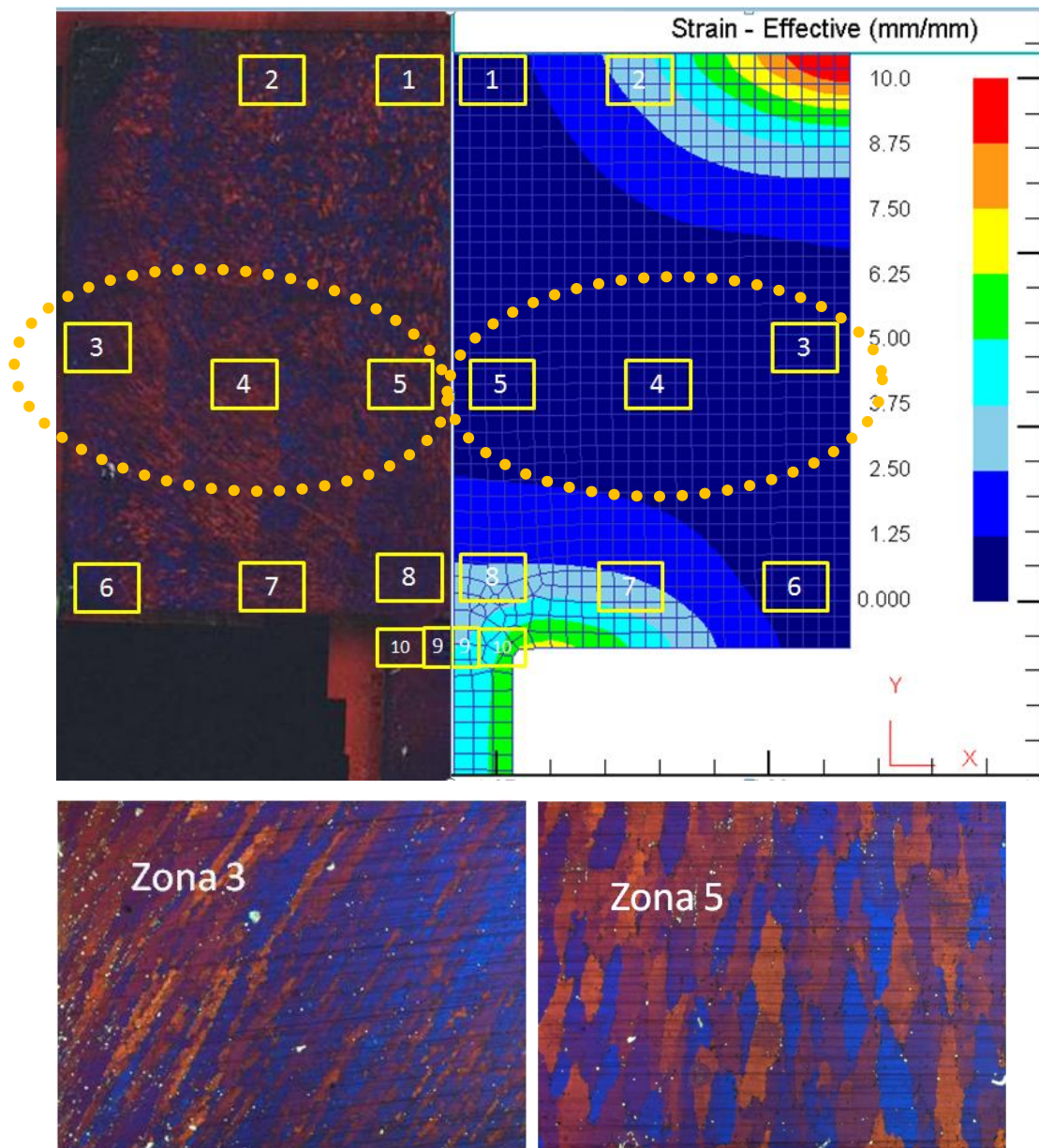
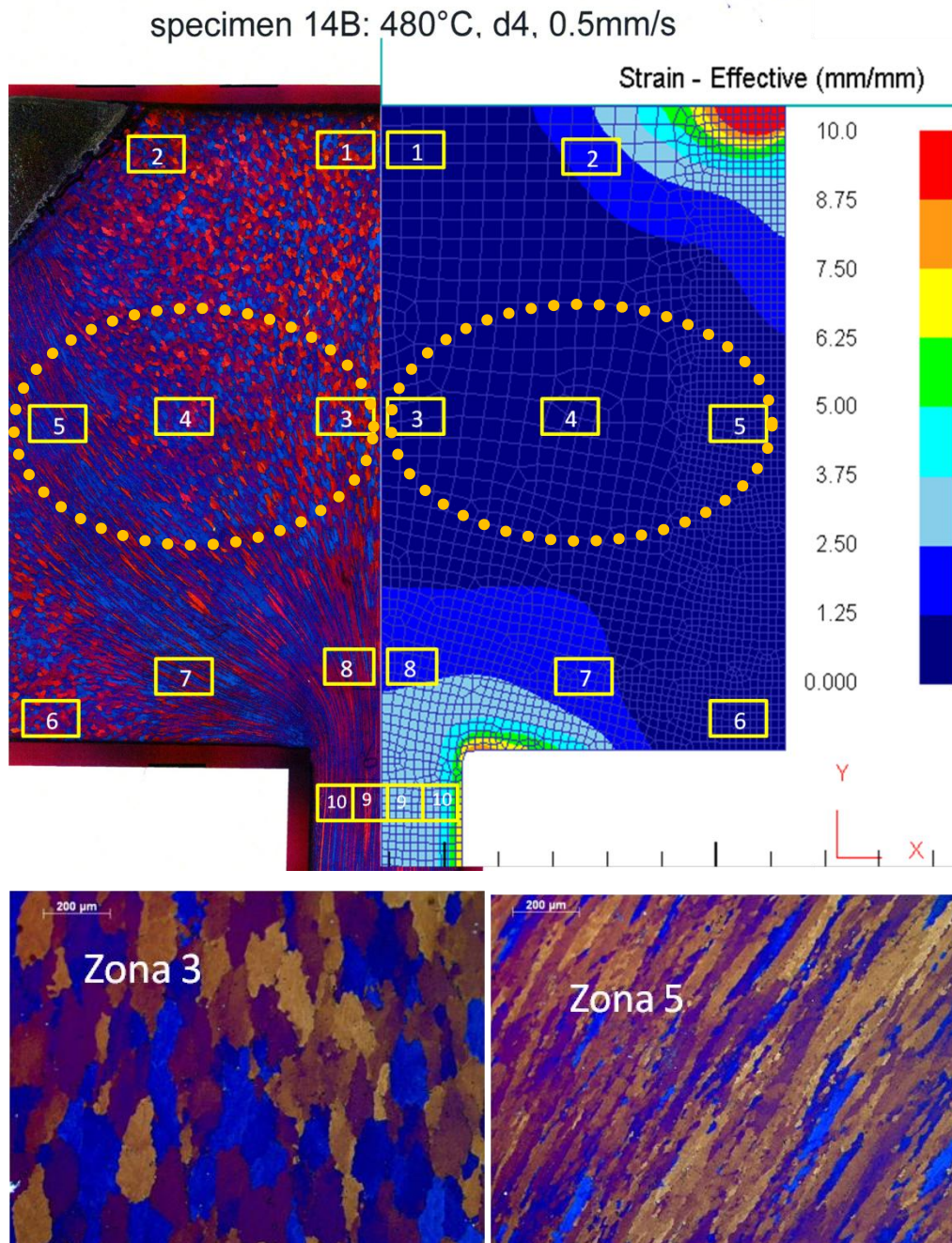


Fig. 4.25 Stato Deformativo provino 560 3 5 e zone 3-5.

Anche nel caso del provino *14B 480\_4\_05* notiamo che ad un'elevata alterazione della dimensione del grano cristallino la zona 5 è associata la stessa deformazione equivalente della zona 3 poco deformata (Fig. 4.26).



*Fig. 4.26 Stato Deformativo provino 480 4 05 e zone 3-5.*

In seguito a questa anomalia dei risultati derivanti dall'applicazione rispetto alle analisi metallografiche reali, in cui si evince che la deformazione equivalente delle zone a maggiore alterazione delle

dimensioni del grano non viene rilevata dal codice Deform, si è deciso di indagare e di implementare il codice con un algoritmo per determinare una deformazione equivalente che descriva meglio la realtà delle analisi metallografiche.

## CAPITOLO 4. Implementazione subroutine

### 4.1 Aspetti introduttivi

In seguito alla incongruenza tra la della dimensione del grano e della deformazione equivalente eseguita dal codice Deform, è stata creata una subroutine in cui calcoliamo la deformazione equivalente, come da teoria, considerando le singole componenti di deformazione in modo da rappresentare al meglio l'evoluzione della deformazione e della dimensione del grano durante la deformazione dei nostri provini.

### 4.2 Deformazioni in campo plastico

In campo plastico non esiste proporzionalità fra deformazioni e tensioni, quindi la deformazione non è più una quantità tensoriale. Soltanto gli incrementi di deformazione possono pertanto essere considerati quantità tensoriali a cui collegare lo stato tensionale.

Il tensore degli incrementi di deformazione reale è quindi:

$$d\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} d\varepsilon_x & \frac{d\gamma_{yx}}{2} & \frac{d\gamma_{xy}}{2} \\ \frac{d\gamma_{xy}}{2} & d\varepsilon_y & \frac{d\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{d\gamma_{xz}}{2} & \frac{d\gamma_{yz}}{2} & d\varepsilon_z \end{vmatrix}$$

Dalla formula dell'invariante del tensore degli incrementi di deformazione in una lavorazione assialsimmetrica: [15]

$$\begin{aligned} (d\varepsilon)^2 &= \frac{2}{9} \left\{ \left[ (d\varepsilon_r - d\varepsilon_\theta)^2 + (d\varepsilon_r - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\} = \\ &= \frac{2}{9} \left\{ \left[ 2(d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_\theta^2 + d\varepsilon_z^2) - 2(d\varepsilon_r d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_r d\varepsilon_z + d\varepsilon_\theta d\varepsilon_z) + \frac{3}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\} = \end{aligned}$$

Dove:  $d\varepsilon_r = d\varepsilon_\theta$  per l'assialsimmetria

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2}{9} \left\{ \left[ 2(d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_z^2) - 2(d\varepsilon_r^2 + 2d\varepsilon_r d\varepsilon_z) + \frac{3}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\} = \\
 &= \frac{2}{9} \left\{ \left[ 2d\varepsilon_r^2 + 2d\varepsilon_z^2 - 4d\varepsilon_r d\varepsilon_z + \frac{3}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\} = \\
 &= \frac{2}{9} \left\{ \left[ 2(d\varepsilon_r - d\varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\} = \\
 &= \frac{2}{3} \left\{ \left[ \frac{2}{3} (d\varepsilon_r - d\varepsilon_z)^2 + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Quindi  $d\varepsilon$ :

$$d\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left[ \frac{2}{3} (d\varepsilon_r - d\varepsilon_z)^2 + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\}}$$

Per la costanza del volume in una struttura assialsimmetrica vale:

$$d\varepsilon_r + d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_z = 0$$

Dove  $d\varepsilon_r = d\varepsilon_\theta$  per l'assialsimmetria

$$(2d\varepsilon_r + d\varepsilon_z)^2 = 0$$

$$4d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_z^2 + 4d\varepsilon_r d\varepsilon_z = 0$$

$$d\varepsilon_r d\varepsilon_z = -d\varepsilon_r^2 - \frac{1}{4} d\varepsilon_z^2$$

Quindi:

$$d\varepsilon = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left[ \frac{2}{3} (d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_z^2 - 2d\varepsilon_r d\varepsilon_z) + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\}} =$$

E sostituendo  $d\varepsilon_r \cdot d\varepsilon_z = -d\varepsilon_r^2 - \frac{1}{4} d\varepsilon_z^2$ :

$$\begin{aligned}
 d\varepsilon &= \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left[ \frac{2}{3} \left( d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_z^2 + 2d\varepsilon_r^2 + \frac{1}{2} d\varepsilon_z^2 \right) + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\}} = \\
 &= \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left[ \frac{2}{3} \left( 3d\varepsilon_r^2 + \frac{3}{2} d\varepsilon_z^2 \right) + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\}} =
 \end{aligned}$$



$$= \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left[ (2d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_z^2) + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\}} =$$

Per l'assialsimmetria  $d\varepsilon_r = d\varepsilon_\theta$ :

$$d\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3} \left\{ \left[ (d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_\theta^2 + d\varepsilon_z^2) + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right] \right\}}$$

#### 4.2-1 Deformazioni calcolate dal codice Deform

L'ultima formulazione dell'incremento di deformazione equivalente  $d\varepsilon_{eff}$  è uguale alla formula usata dal programma DEFORM.

Infatti, per il calcolo della deformazione equivalente e di Von Mises il DEFORM utilizza le seguenti formule:

$$d\varepsilon_{eff\_DEFORM} = \sqrt{\frac{2}{3} \left( d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_z^2 + d\varepsilon_\theta^2 + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right)}$$

$$\varepsilon_{Von\_Mises\_DEFORM} = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \varepsilon_r^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_\theta^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2 \right)}$$

Come rappresentato in figura 4.1 la deformazione equivalente (Effective Strain) descrive meglio il comportamento del materiale nella sezione di uscita dalla matrice e quella di Von Mises (Strain\_Total Von Mises) nella sezione centrale. Vogliamo verificare come vengono calcolate queste deformazioni dal programma considerando le componenti di deformazione  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_\theta$ ,  $\gamma_{rz}$  all'inizio e alla fine di ogni singolo step, con il fine di ottenere una migliore descrizione della deformazione del grano cristallino della lega durante il processo di estrusione.

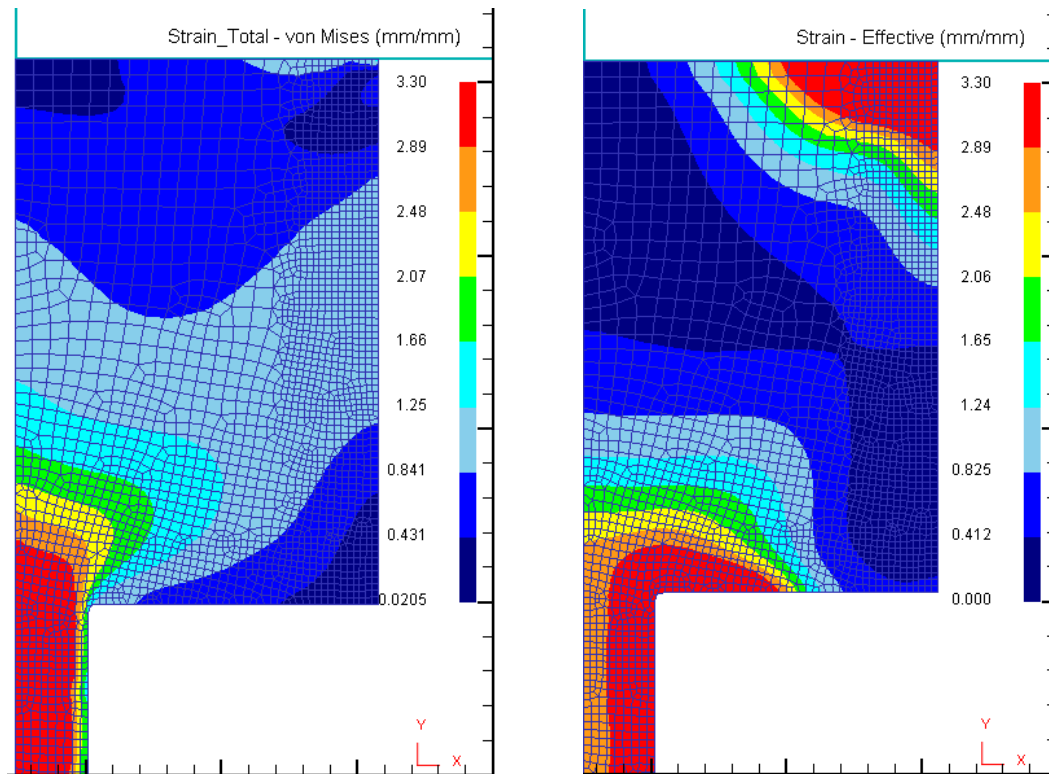


Fig 4.1. Strain Total Von-Mises; Effective Strain.

### 4.3 Implementazione subroutine

Per capire meglio il principio di funzionamento del programma, all'interno della subroutine USRMSH sono state estratte le componenti di deformazione lungo i rispettivi assi ed introdotte, sempre all'interno della subroutine, nella formula per il calcolo della deformazione equivalente e di Von Mises. Quindi definiamo l'incremento di deformazione per ogni singolo step e la deformazione secondo Von-Mises allo stato 0 e allo stato 1 di ogni singolo step:

$$d\varepsilon_{eff} = \sqrt{\frac{2}{3} \left( d\varepsilon_r^2 + d\varepsilon_z^2 + d\varepsilon_\theta^2 + \frac{1}{2} d\gamma_{rz}^2 \right)}$$

$$STATO 0 \quad \varepsilon_{Von\_Mises\_0} = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \varepsilon_{r0}^2 + \varepsilon_{z0}^2 + \varepsilon_{\theta0}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz0}^2 \right)}$$

$$STATO 1 \quad \varepsilon_{Von\_Mises\_1} = \sqrt{\frac{2}{3} \left( \varepsilon_{r1}^2 + \varepsilon_{z1}^2 + \varepsilon_{\theta1}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz1}^2 \right)}$$

Queste formule sono state inserite all'interno della subroutine in modo da confrontare i risultati con i valori derivanti dal Deform, verificando quindi l'effettiva affidabilità del codice.

La lavorazione viene suddivisa dal codice in step, ognuno dei quali è composto da un inizio (stato 0) ed un fine step (stato 1) come rappresentato in figura 4.2:

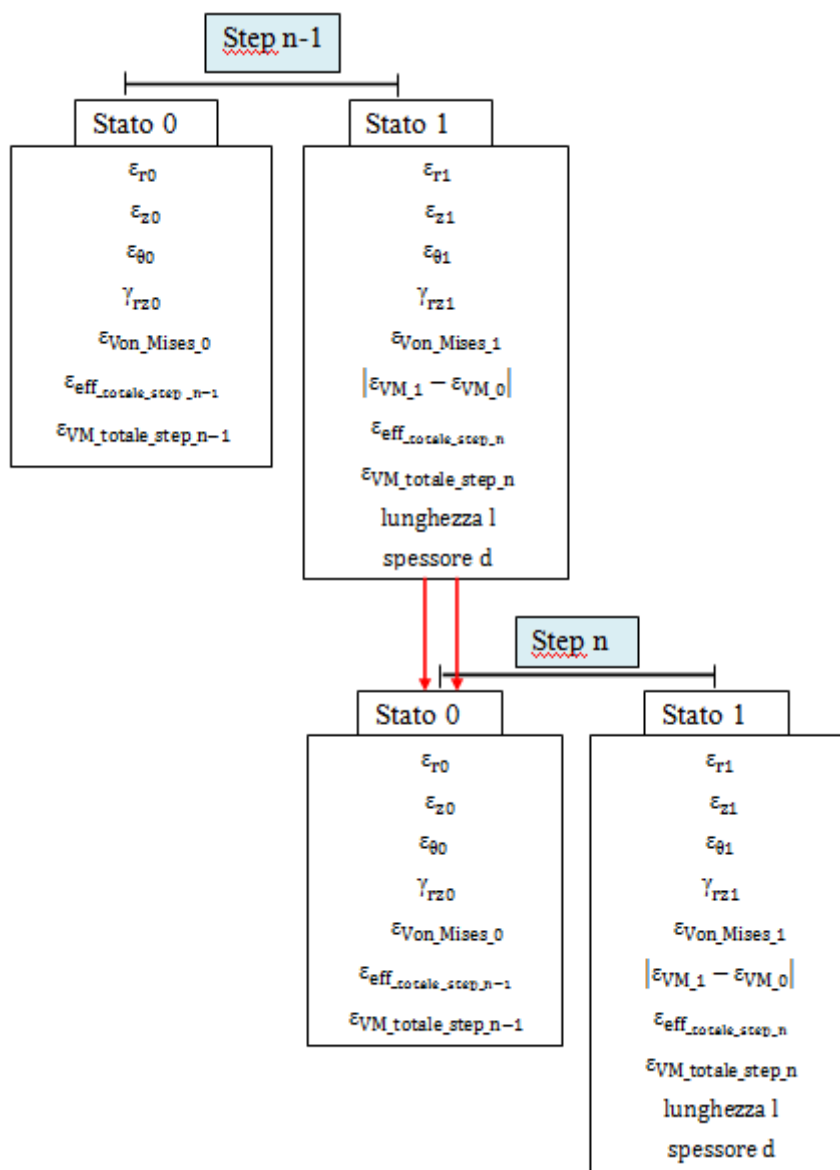


Fig. 4.2. Composizione step.

Nel passaggio dallo *stato 1* dello *step n-1* e lo *stato 0* dello *step n* le componenti di deformazione e le altre variabili sono le stesse.

In figura 4.3 è riportato lo schema a blocchi della subroutine per il problema in esame:

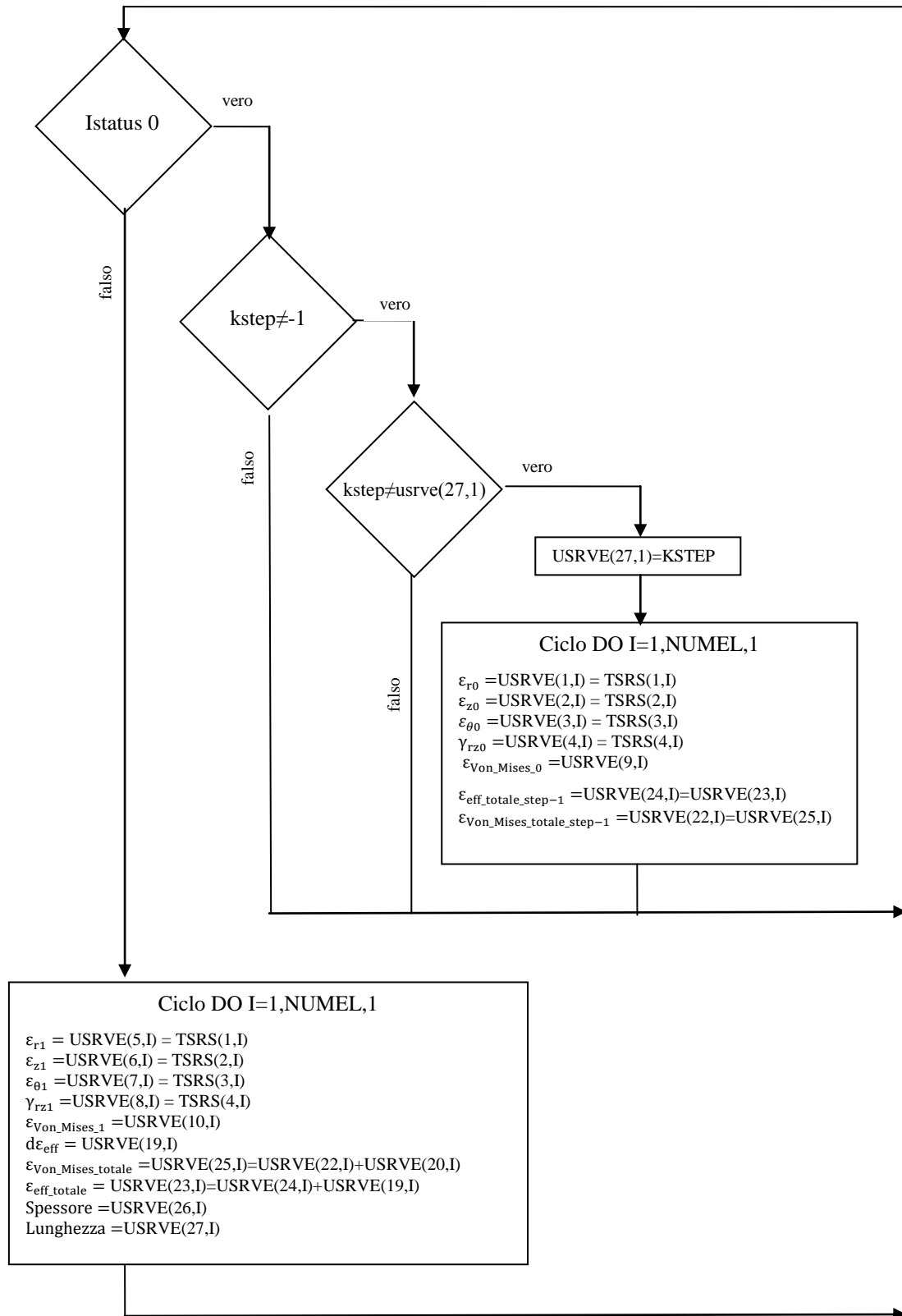


Fig. 4.3. Schema a blocchi Subroutine.

Per la soluzione di questo schema con le relative formule, nella subroutine USRMSH sono state inserite delle variabili sotto il nome di USRVE(NUSRVE,NUMEL) inizializzate con valore 0 nel *Pre-Processor* dove:

- NUSRVE è il numero della variabile definita nel pre-processor a cui può essere associato un nome;
- NUMEL è il numero totale di elementi dell'oggetto da analizzare.

L'introduzione di queste variabili ci consente, come riportato in seguito, di estrarre le singole componenti di deformazione e di eseguire calcoli per ogni step e per ogni stato.

Per lo stato 0 del singolo step definiamo il seguente blocco di istruzioni nella subroutine USRMSH:

```

      IF (ISTATUS.EQ.0.AND.NUMEL.GT.0) THEN
        A=0.8165=  $\sqrt{\frac{2}{3}}$ 
        C PER FAR COINCIDERE IL VALORE DELLA USRVE(9,I)=USRVE(10,I)
        C DELLA FASE PRECEDENTE TRA GLI STEP INSERIAMO IL
        C SEGUENTE CICLO IF:
        C IF (KSTEP.NE.(-1)) VUOL DIRE CHE SIAMO NELLA FASE DI prima o
        C seconda COMPRESSIONE (CMQ IN LAVORAZIONE)
        C USRVE(27,1) è UNA VARIABILE D'APPOGGIO CHE MI CONSENTE DI C CAPIRE SE
        C'è STATA UNA VARIAZIONE DELLO STEP E SE
        C ALL'INTERNO DEL SINGOLO STEP CI SONO DEI SUB-STEP

        IF (KSTEP.NE.(-1)) THEN

          IF (KSTEP.NE.USRVE(27,1)) THEN

            USRVE(27,1)=KSTEP
            DO I=1,NUMEL,1
               $\epsilon_{r0}$  =USRVE(1,I) = TSRS(1,I)
               $\epsilon_{z0}$  =USRVE(2,I) = TSRS(2,I)
               $\epsilon_{\theta0}$  =USRVE(3,I) = TSRS(3,I)
               $\gamma_{rz0}$  =USRVE(4,I) = TSRS(4,I)
              USRVE(11,I)=TSRS(1,I)**2+TSRS(2,I)**2
              USRVE(33,I)=TSRS(3,I)**2+0.5*TSRS(4,I)**2
              USRVE(34,I)=USRVE(11,I)+USRVE(33,I)
               $\epsilon_{Von\_Mises\_0}$  =USRVE(9,I) = A*(USRVE(34,I))**0.5
            C IN QUESTE ULTIME VARIABILI INSERIAMO I VALORI DELLO
            C STATO 1 DELLO STEP PRECEDENTE
               $\epsilon_{eff\_totale\_step-1}$  =USRVE(24,I)=USRVE(23,I)
               $\epsilon_{Von\_Mises\_totale\_step-1}$  =USRVE(22,I)=USRVE(25,I)
            ENDDO
          ENDIF
        ENDIF

```

```

ENDIF
ENDIF

```

Per lo *stato I* del singolo step definiamo sempre nella subroutine

USRMSH:

```

IF (ISTATUS.EQ.1.AND.NUMEL.GT.0) THEN
  IF (KSTEP.NE.(-1)) THEN
    A=0.8165=  $\sqrt{\frac{2}{3}}$ 
    DO I=1,NUMEL,1
       $\varepsilon_{r1}$  = USRVE(5,I) = TSRS(1,I)
       $\varepsilon_{z1}$  =USRVE(6,I) = TSRS(2,I)
       $\varepsilon_{\theta1}$  =USRVE(7,I) = TSRS(3,I)
       $\gamma_{rz1}$  =USRVE(8,I) = TSRS(4,I)
      USRVE(31,I)=TSRS(1,I)**2+TSRS(2,I)**2
      USRVE(12,I)=TSRS(3,I)**2+0.5*TSRS(4,I)**2
      USRVE(32,I)=USRVE(31,I)+USRVE(12,I)
       $\varepsilon_{Von\_Mises\_1}$  =USRVE(10,I) = A*(USRVE(32,I))**0.5
       $d\varepsilon_r^2$  = ( $\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r0}$ )2 =USRVE(13,I) = (USRVE(5,I)-USRVE(1,I))**2
       $d\varepsilon_z^2$  = ( $\varepsilon_{z1} - \varepsilon_{z0}$ )2 =USRVE(14,I) = (USRVE(6,I)-USRVE(2,I))**2
       $d\varepsilon_{\theta}^2$  = ( $\varepsilon_{\theta1} - \varepsilon_{\theta0}$ )2 =USRVE(15,I) = (USRVE(7,I)-USRVE(3,I))**2
       $d\gamma_{rz1}^2$  = ( $\gamma_{rz1} - \gamma_{rz0}$ )2 =USRVE(16,I) = 0.5*(USRVE(8,I)-USRVE(4,I))**2
      USRVE(17,I) = USRVE(13,I)+USRVE(14,I)
      USRVE(18,I) = USRVE(15,I)+USRVE(16,I)

       $d\varepsilon_{eff\_step\_n}$  = USRVE(19,I) = A*(USRVE(17,I)+USRVE(18,I))**0.5

      | $\varepsilon_{Von\_Mises\_1} - \varepsilon_{Von\_Mises\_0}$ | =USRVE(20,I) = ABS(USRVE(10,I)-USRVE(9,I))
       $\varepsilon_{Von\_Mises\_totale\_step\_n}$  =USRVE(25,I)=USRVE(22,I)+USRVE(20,I)
       $\varepsilon_{eff\_totale\_step\_n}$  = USRVE(23,I)=USRVE(24,I)+USRVE(19,I)
    ENDDO
  ENDIF
ENDIF
RETURN
END

```

Per il calcolo della deformazione totale consideriamo due casi distinti, secondo Von Mises ed equivalente:

### 1. CASO Def. Von Mises:

$$\varepsilon_{Von\_Mises\_totale\_step\_n} = \varepsilon_{Von\_Mises\_totale\_step\_n-1} + |\varepsilon_{Von\_Mises\_1} - \varepsilon_{Von\_Mises\_0}|_{step\_n}$$

Inserito nelle subroutine nella seguente stringa:

$$\varepsilon_{Von\_Mises\_totale\_step\_n} = \text{USRVE}(25,I) = \text{USRVE}(22,I) + \text{USRVE}(20,I)$$

Considerando l'inizio della lavorazione, al *primo step* la deformazione di Von Mises totale vale:

$$\varepsilon_{Von\_Mises\_totale\_step\_1} = 0 + |\varepsilon_{Von\_Mises\_1} - \varepsilon_{Von\_Mises\_0}|_{step\_1}$$

Al secondo step:

$$\varepsilon_{Von\_Mises\_totale\_step\_2} = \varepsilon_{Von\_Mises\_totale\_step\_1} + |\varepsilon_{Von\_Mises\_1} - \varepsilon_{Von\_Mises\_0}|_{step\_2}$$

2. CASO Def. equivalente:

$$\varepsilon_{eff\_totale\_step\_n} = \varepsilon_{eff\_totale\_step\_n-1} + d\varepsilon_{eff\_step\_n}$$

Inserito nelle subroutine nella seguente stringa:

$$\varepsilon_{eff\_totale\_step\_n} = \text{USRVE}(23,I)=\text{USRVE}(24,I)+\text{USRVE}(19,I)$$

Considerando l'inizio della lavorazione, al primo step la deformazione equivalente totale vale:

$$\varepsilon_{eff\_totale\_step\_1} = 0 + d\varepsilon_{eff\_step\_1}$$

Al secondo step:

$$\varepsilon_{eff\_totale\_step\_2} = \varepsilon_{eff\_totale\_step\_1} + d\varepsilon_{eff\_step\_2}$$

### 4.3-1 Simulazione di una doppia ricalcatura in assialsimmetria

Per facilitare lo studio deformativo e renderlo confrontabile con un caso reale di facile risoluzione matematica, la deformazione secondo Von Mises ed equivalente, precedentemente introdotte, sono state analizzate in una doppia ricalcatura.

Dall'applicazione DEFORM, una billetta inizialmente di altezza  $h_0$  e raggio  $r_0$  è stata compressa fino ad  $h_1$  in assenza di attrito. Sono stati disegnati gli utensili e la billetta con la rispettiva mesh, impostati i contatti tra questi in assenza di attrito e definiti i movimenti degli utensili. Gli attriti tra utensili e billetta sono stati eliminati per capire meglio come il codice esegue i calcoli per la valutazione delle deformazioni. In figura 4.4 è riportato il modello del problema nel pre-processor.

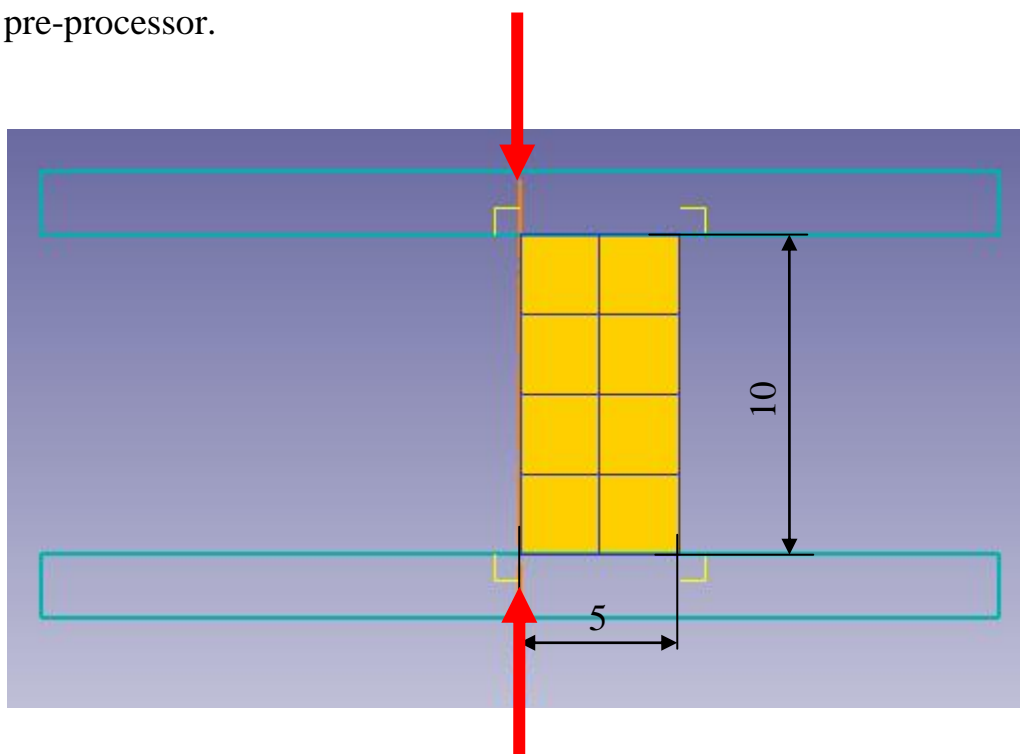


Fig. 4.4. Modello del problema.

Imponiamo, all'interno del *Simulation Controls* del pre-processor, lo spostamento verticale dell'utensile superiore Top Die eseguendo per ogni step uno spostamento di  $1\text{ mm/step}$  (Fig 4.5).



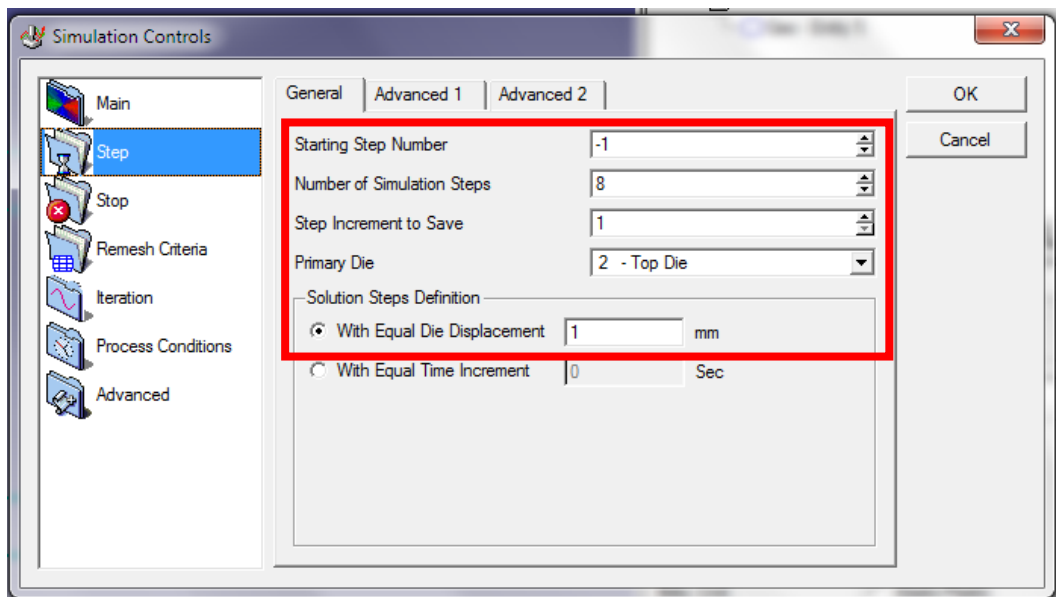


Fig. 4.5. Imposizione spostamento 1 mm / step.

Fino ad arrivare ad uno spostamento totale di 8 mm (Fig. 4.6).

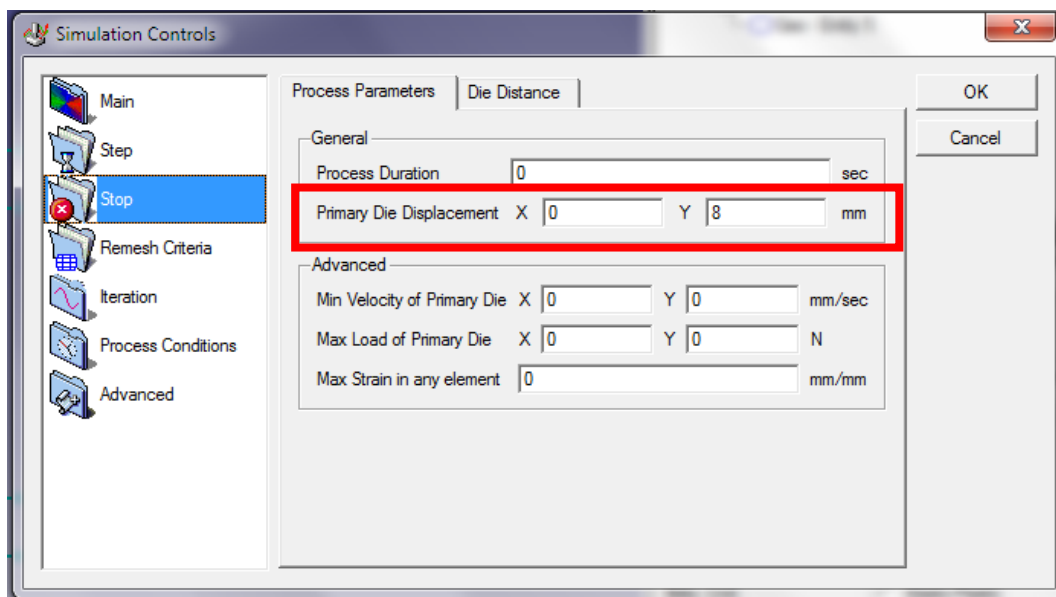


Fig. 4.6. Imposizione spostamento totale 8 mm.

Per poter visualizzare nel Post-Processor le variabili definite nelle subroutine dobbiamo iniziarle nel Pre-Processor nelle caratteristiche *Advanced* del *Workpiece* e aggiungendo le variabili nell'*Element Data* come in figura 4.7:

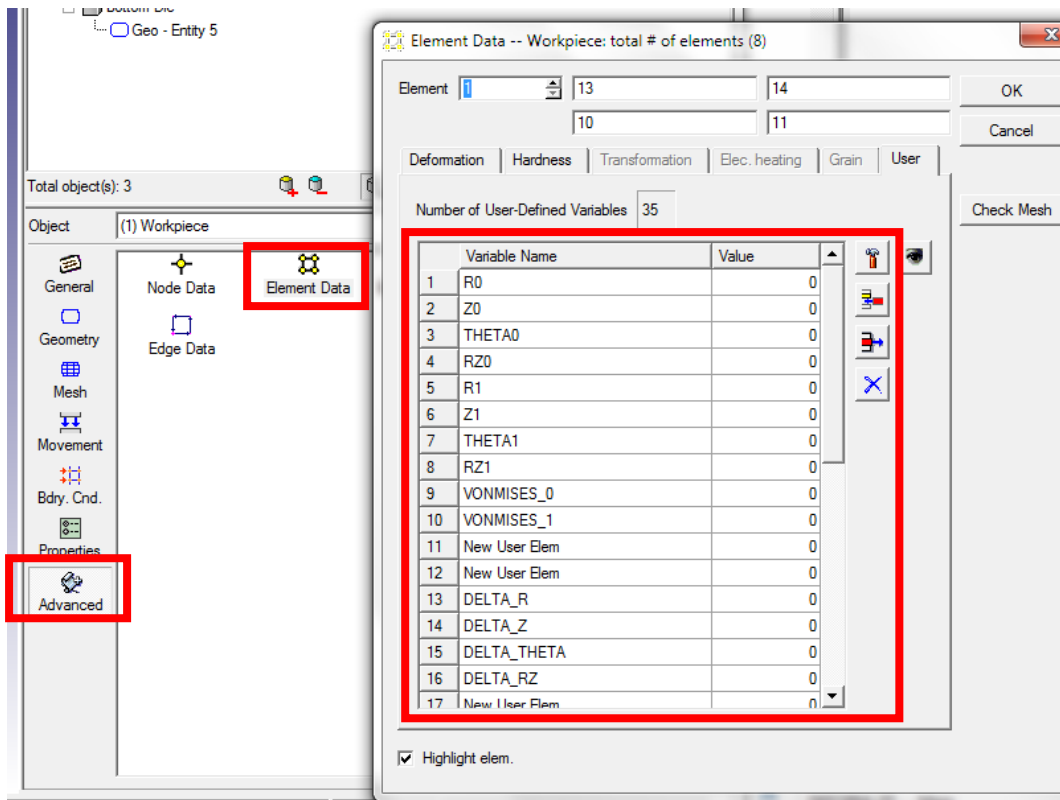


Fig. 4.7. Inizializzazione delle variabili per la subroutine.

Generiamo il *database* ed avviamo la simulazione. Terminata la quale, andiamo a visualizzare i risultati nel Post-Processor ottenendo alla fine della prima compressione la seguente figura 4.8:

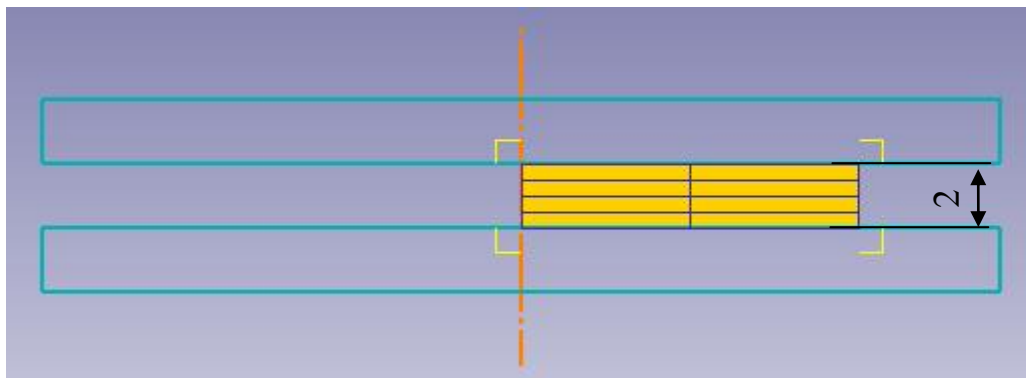


Fig. 4.8. Fine prima compressione.

Finita la simulazione apriamo nel Pre-Processor il *database* precedente all'ultimo step della prima compressione e ne eseguiamo una seconda per riportare il nostro provino allo stato iniziale. Per eseguire quest'ultima fase di lavorazione andiamo ad imporre sui nodi

esterni del nostro provino una condizione al contorno di  $-1 \text{ mm/sec}$  lungo l'asse x come riportato in figura 4.9:

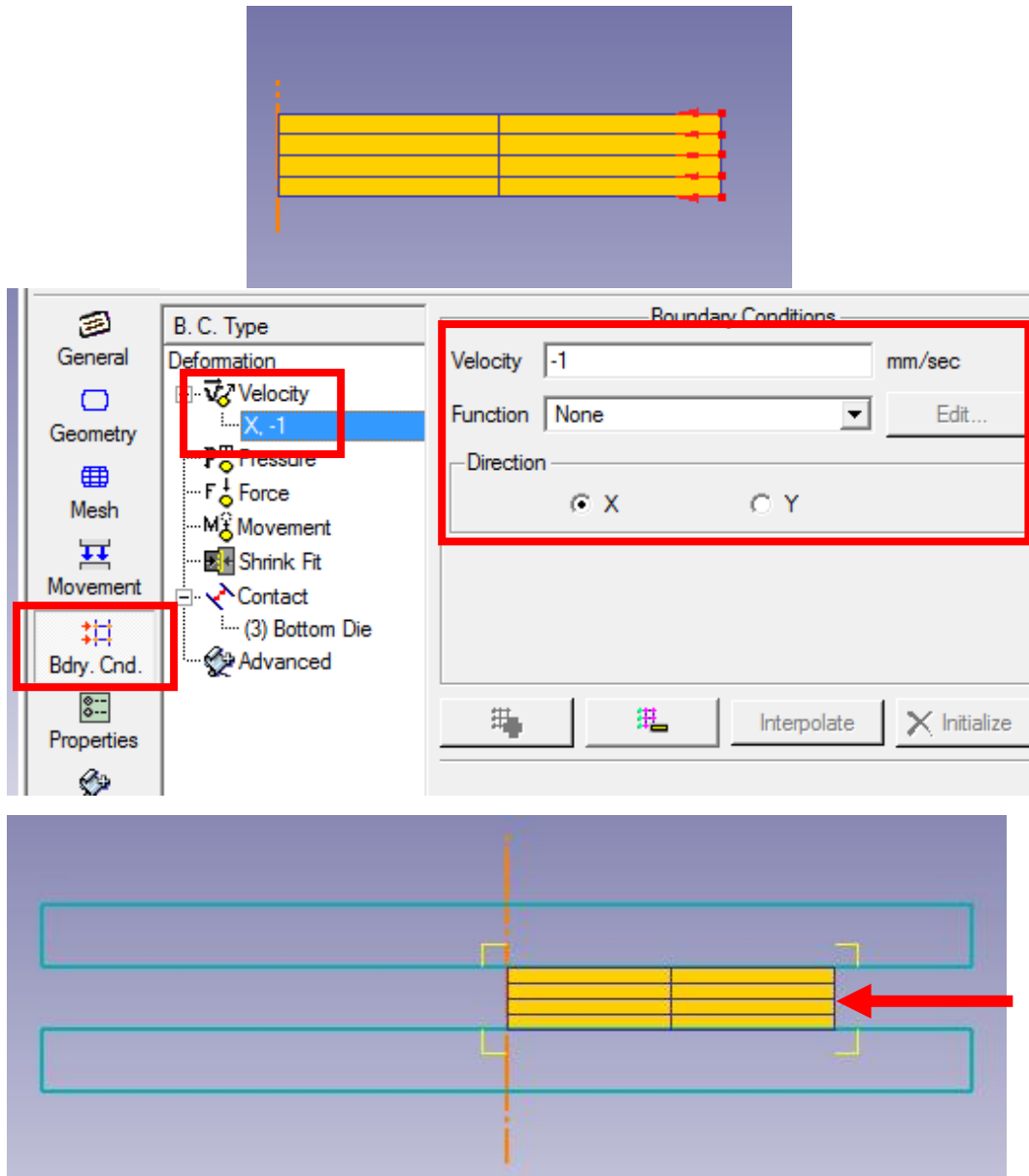


Fig. 4.9. Imposizione movimento per seconda compressione.

Avendo imposto una condizione al contorno di  $-1 \text{ mm/sec}$  imponiamo un nuovo *database* con 8 *step* e un avanzamento di  $1 \text{ mm/sec}$  per *step*, e lo stop della simulazione dopo 8 *sec* e dopo 8 *mm* di spostamento lungo l'asse delle ordinate come riportato in figura 4.10:

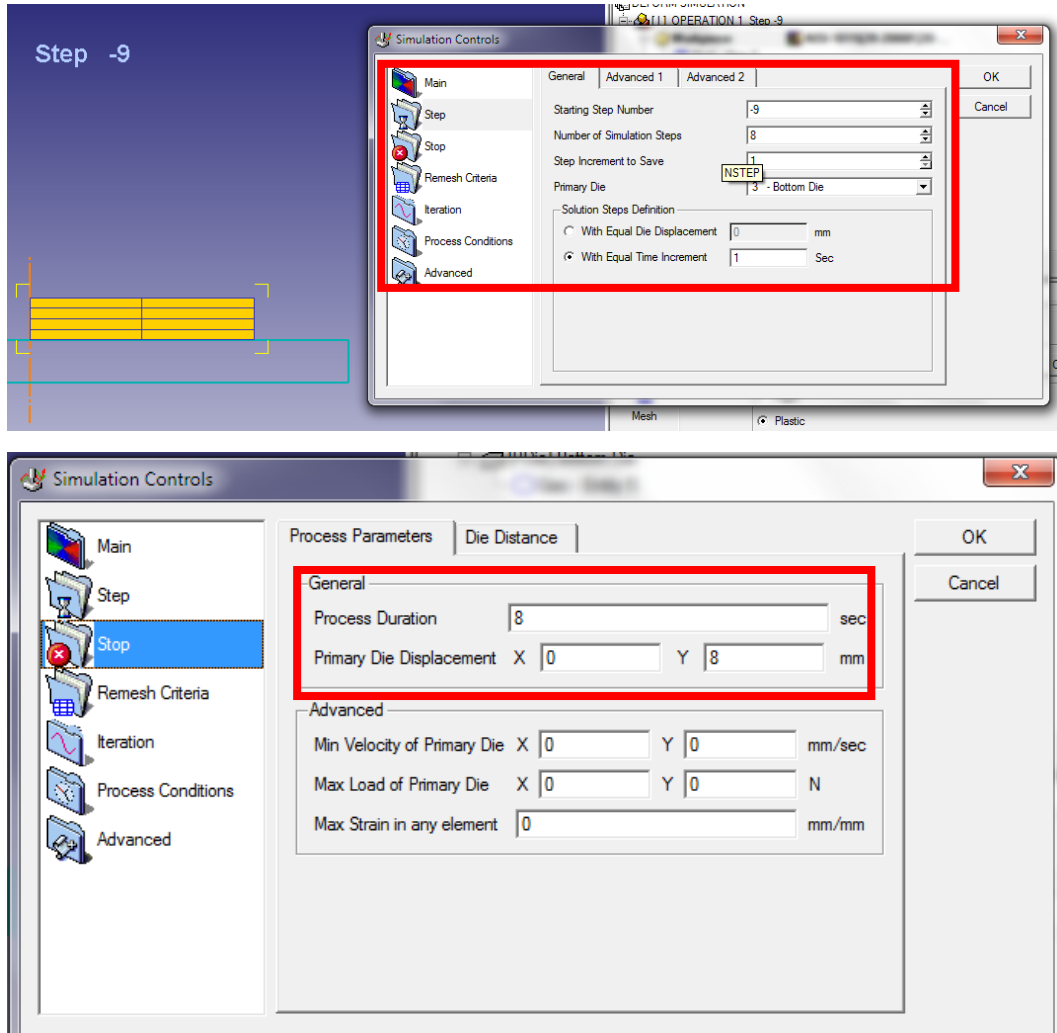
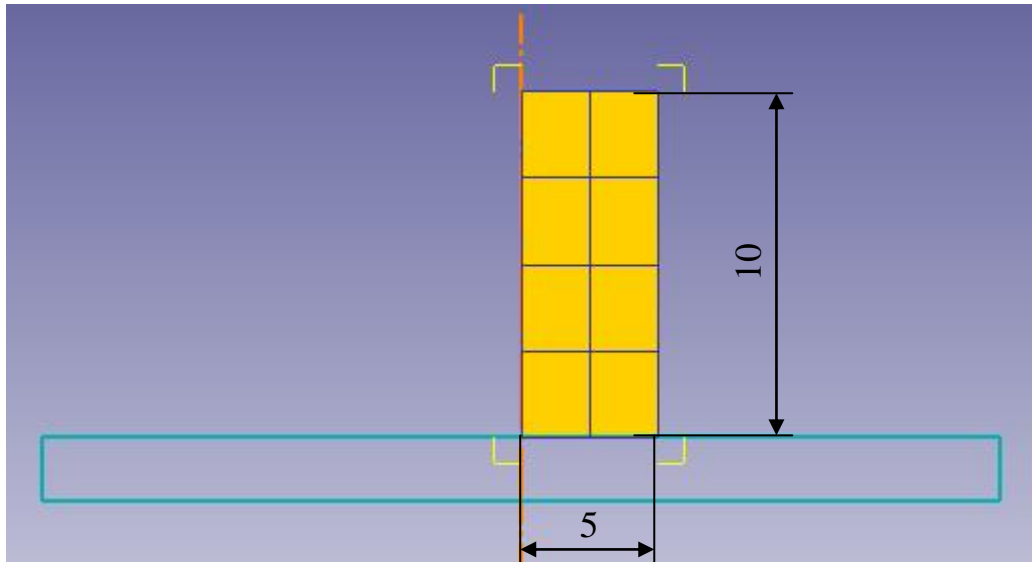


Fig. 4.10. Simulation control seconda compressione.

Generiamo il *database* di questa seconda compressione, partendo dall'ultima fase della prima compressione, ed avviamo la simulazione. Finita la simulazione andiamo a visualizzare i risultati nel Post-Processor (Fig. 4.11):



*Fig. 4.11: Fine seconda compressione*

Visualizziamo in figura 4.12 la deformazione equivalente e di Von Mises calcolate dal DEFORM ed in seguito (fig. 4.13) le nostre deformazioni per la prima e la seconda compressione:

1° COMPRESSIONE: dallo *step* -1 (stato iniziale) allo *step* 8 (fine prima compressione)

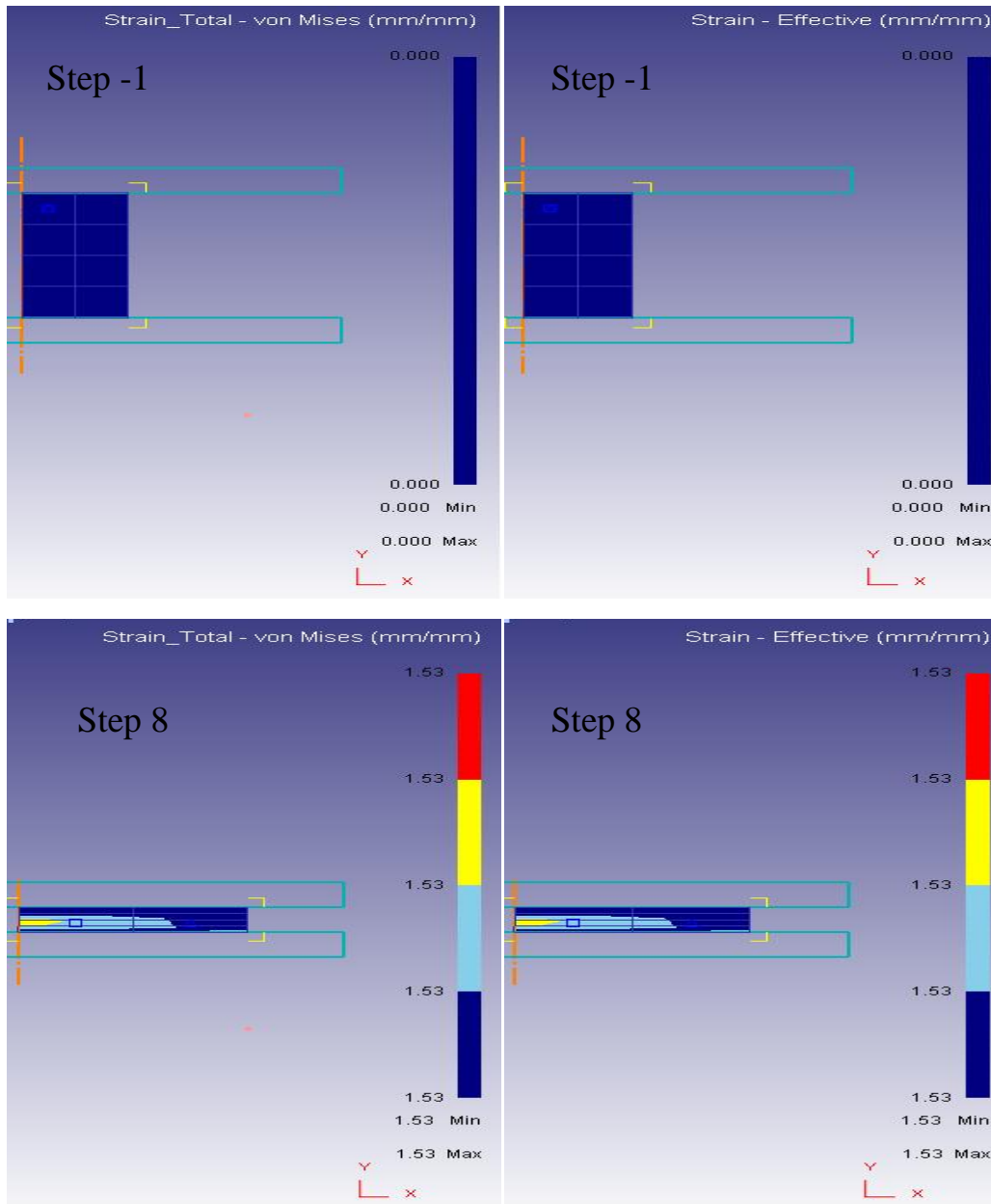
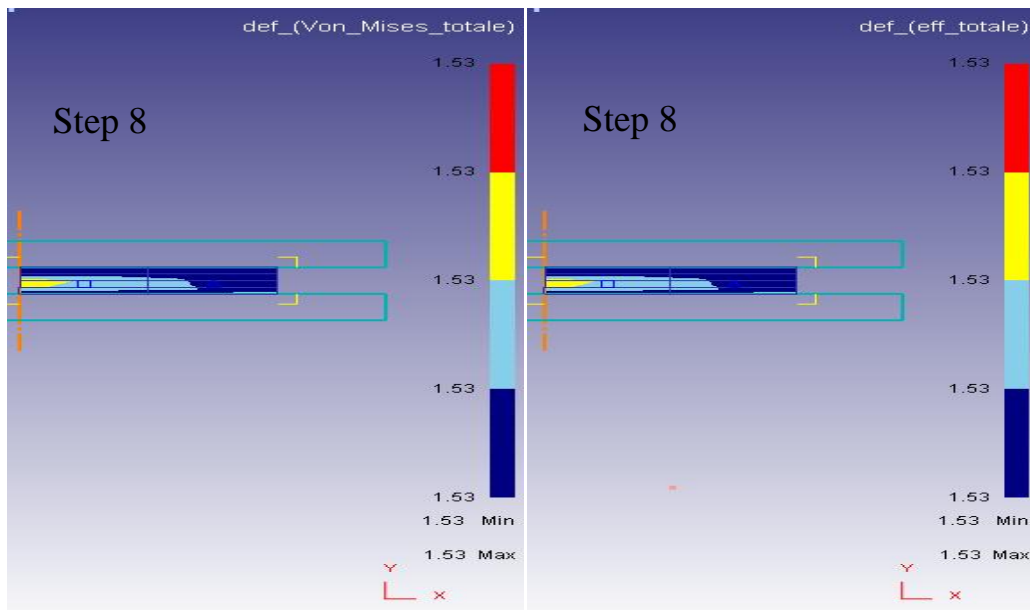


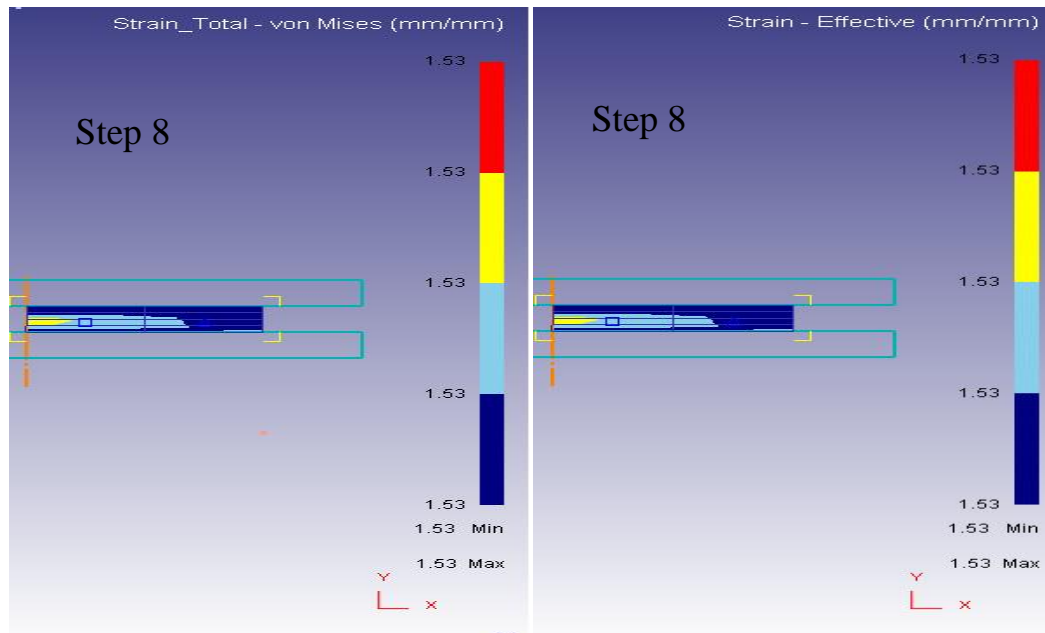
Fig. 4.12. Deformazione di Von Mises e equivalente calcolati dal DEFORM.



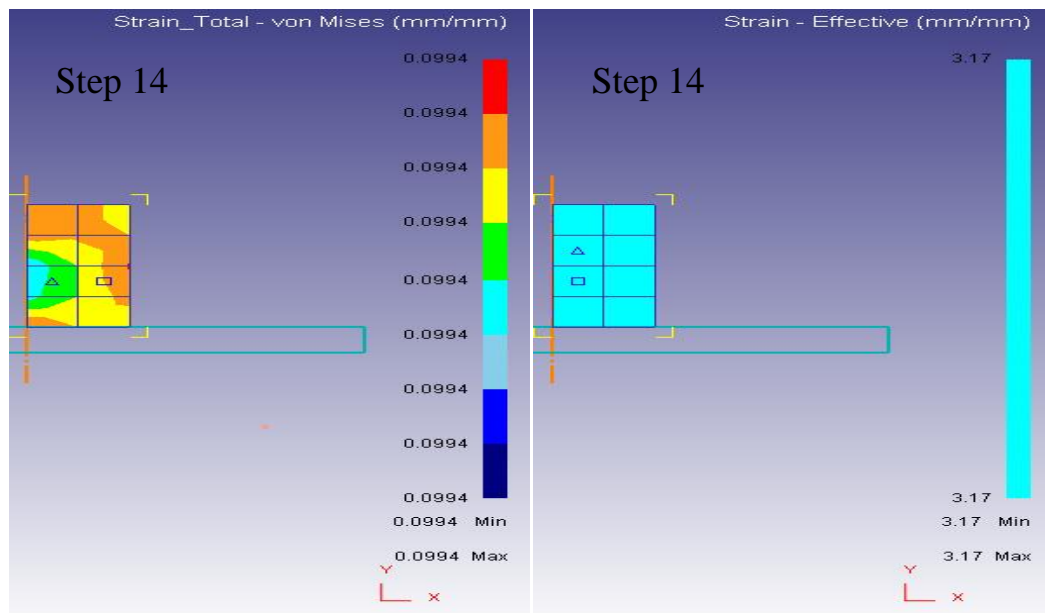
*Fig. 4.13. Deformazione di Von Mises e equivalente calcolati dalla subroutine definita da noi.*

Come possiamo notare per la prima compressione i valori della deformazione equivalente e di Von Mises, calcolati dal DEFORM, coincidono con i valori della def\_eff\_totale e con la def\_Von Mises\_totale calcolati con la nostra subruoutine. Quindi per la prima compressione c'è concordanza tra i risultati.

2°COMPRESSIONE: ripartiamo dallo *step* 8 (Fig 4.14) eseguendo la seconda compressione per riportare il provino all'altezza iniziale (Fig. 4.15):



*Fig. 4.14. Deformazione di Von Mises e equivalente all'inizio della seconda compressione calcolati dal DEFORM.*



*Fig. 4.15. Deformazione di Von Mises e equivalente alla fine della seconda compressione calcolati dal DEFORM.*



In questo caso notiamo che, nonostante l'elemento continui ad essere deformato dalla seconda compressione, la deformazione di Von Mises calcolata dal DEFORM decresce fino ad arrivare quasi a 0 (Fig. 4.16).

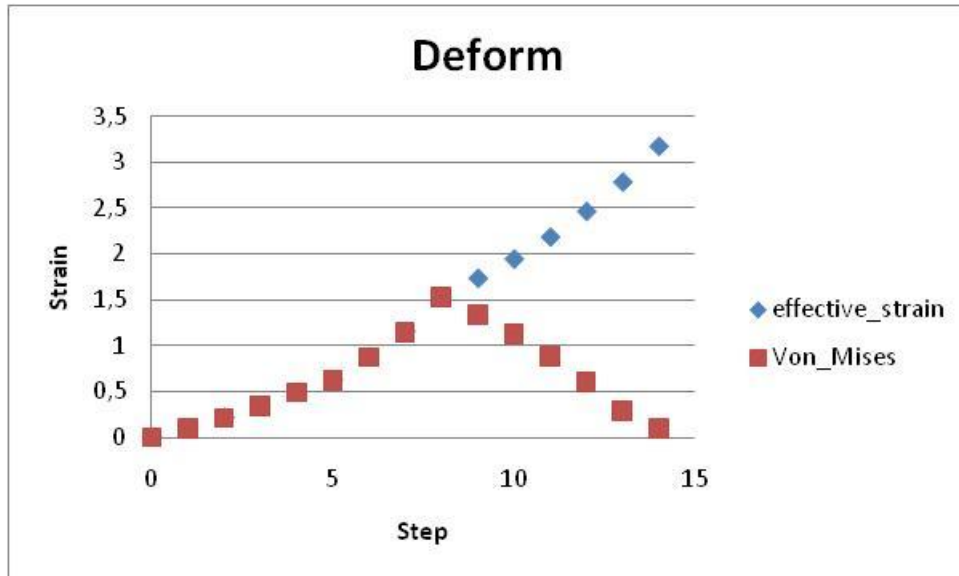


Fig. 4.16. Andamento Eff.Strain e Von-Mises Strain calcolati da Deform.

Questo avviene perché il codice per calcolare le componenti di deformazioni  $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  non fa riferimento alla lunghezza corrente tra una deformazione e l'altra ma alla lunghezza iniziale del provino  $h_0 = 10 \text{ mm}$ . Invece, la Effective Strain essendo calcolata con gli incrementi di deformazione descrive meglio lo stato deformativo.

Infatti:

1°COMPRESSIONE nella riduzione tra  $h_0=10 \text{ mm}$  e  $h_f=2 \text{ mm}$ :

$$\varepsilon_{z\_compressione\_1} = \ln \frac{h_f}{h_0} = \ln \frac{2}{10} = -1.6$$

2°COMPRESSIONE tra  $h_0=2 \text{ mm}$  e  $h_f=10 \text{ mm}$ :

$$\varepsilon_{z\_compressione\_2} = \ln \frac{h_f}{h_0} = \ln \frac{10}{2} = +1.6$$

Per porre rimedio a questa limitazione del programma secondo Von-Mises utilizziamo la subroutine definita in precedenza per implementare il calcolo della deformazione equivalente e di Von Mises totale, imponendogli di crescere invece di tornare a zero alla fine della seconda compressione (Fig. 4.17):

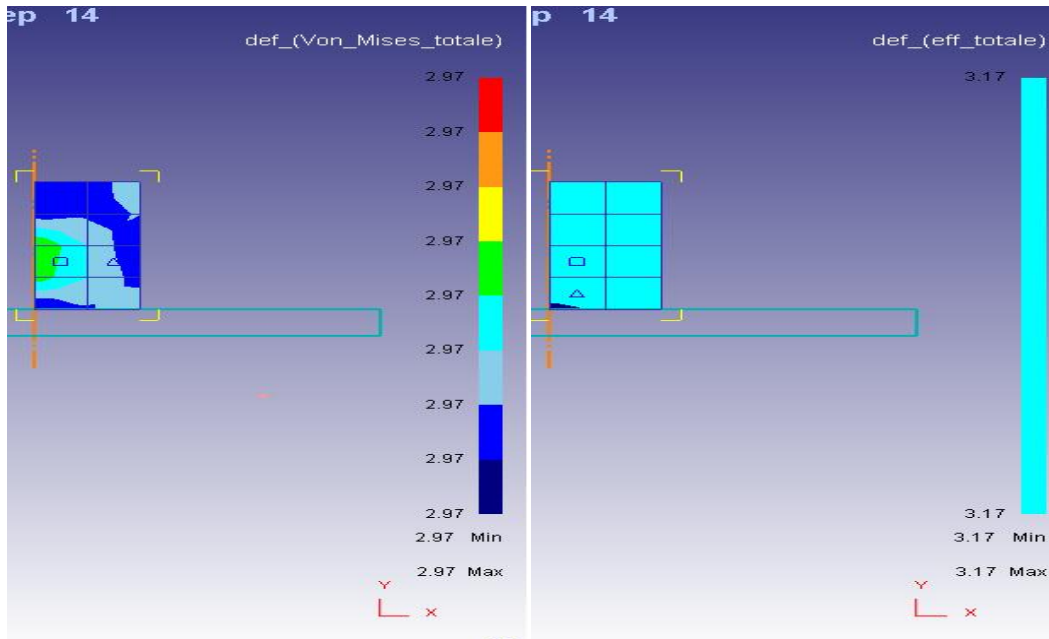


Fig. 4.17. Deformazione di Von Mises e equivalente alla fine della seconda compressione calcolati dal DEFORM.

Notiamo che la deformazione di Von-Mises non torna a zero alla fine della seconda compressione ed è circa pari alla deformazione equivalente (Fig. 4.18).

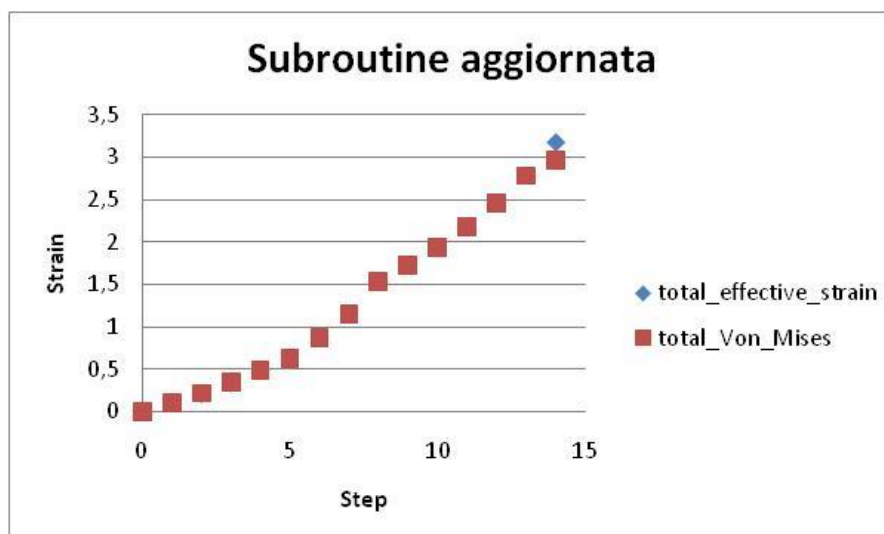


Fig. 4.18. Andamento Eff.Strain e Von-Mises Strain calcolati dalla subroutine.

Grazie all'implementazione della subroutine siamo riusciti ad ottenere una descrizione del problema considerando:

- i singoli incrementi di deformazione per ogni step  $d\varepsilon_{eff\_step\_n}$ ;
- la deformazione di Von-Mises  $\varepsilon_{Von\_Mises\_n}$  eliminando il problema del riferimento iniziale.

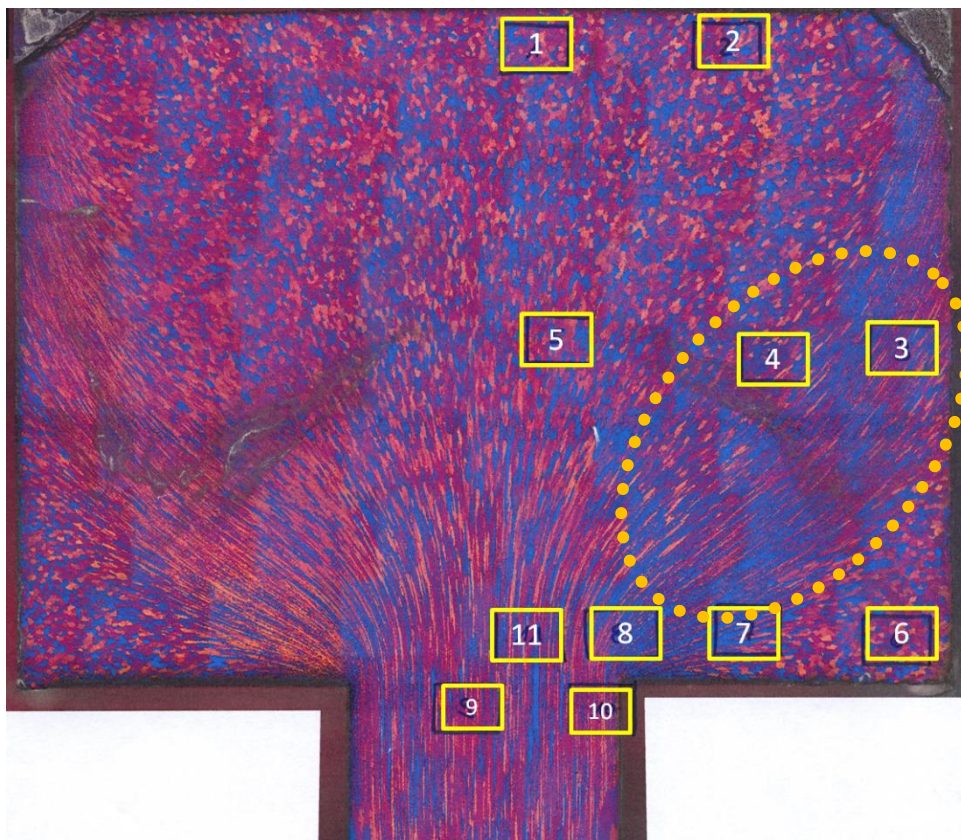
In questo modo riusciamo a descrivere meglio lo stato deformativo totale del singolo elemento della mesh che subisce una compressione prima rispetto all'asse  $y$  rispetto all'asse  $x$ , eliminando l'errore dovuto al calcolo delle singole componenti di deformazione rispetto alla lunghezza iniziale e non a quella corrente.

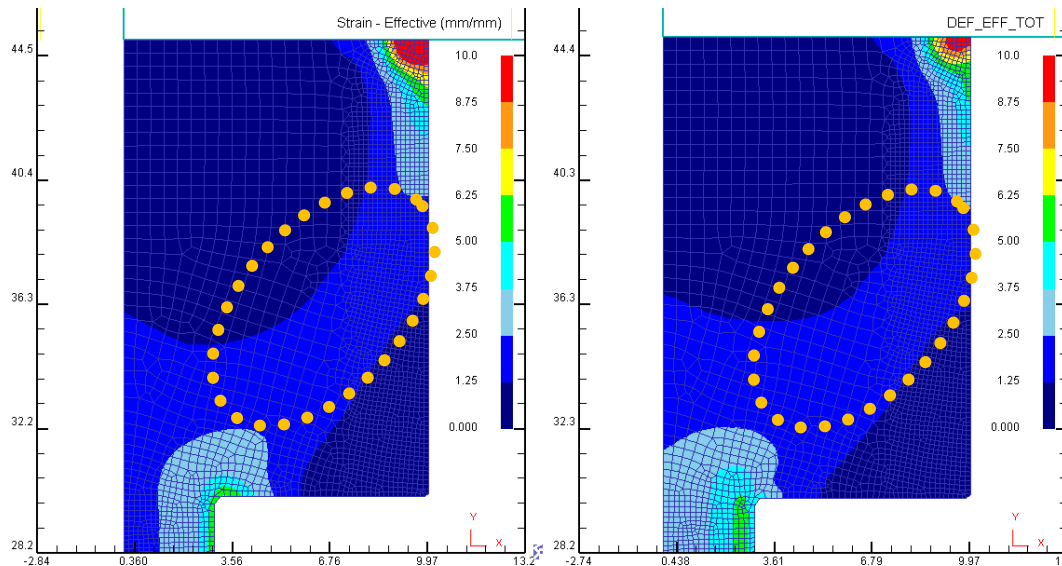
### 4.3-2 Simulazione dell'estrusione sperimentale

Dopo l'implementazione della subroutine USRMSH definita in precedenza, sono state riavviate le simulazioni relative ai nostri provino estrusi.

Nel caso dei provini aventi diametro finale  $d_f=6\text{ mm}$  la distribuzione della deformazione equivalente calcolata dal Deform, denominata *Strain Effective*, non varia di molto rispetto alla deformazione equivalente calcolata dalla nostra subroutine, denominata *DEF\_EFF\_TOT*.

Inoltre, lo stato deformativo calcolato rispecchia l'andamento della alterazione della dimensione del grano come evidenziato in figura 4.19:





*Fig. 4.19. Analisi metallografica estruso 8 520 6 5 e andamento Effective Strain (calcolata dal codice Deform) e DEF\_EFF\_TOT (calcolata con la nostra subroutine).*

Invece nel caso dei provini estrusi con diametro finale  $d_f=3$  e  $4$  mm notiamo come la nostra subroutine approssimi meglio la deformazione equivalente e la relativa alterazione delle dimensioni del grano.

Considerando il caso del provino 6 560 3 5 di figura 4.20, e confrontando l'analisi metallografica con la previsione della deformazione equivalente calcolata dal codice e la deformazione equivalente calcolata secondo la subroutine aggiornata, notiamo che la *DEF\_EFF\_TOT* descrive meglio l'andamento delle dimensioni del grano durante il processo di estrusione.

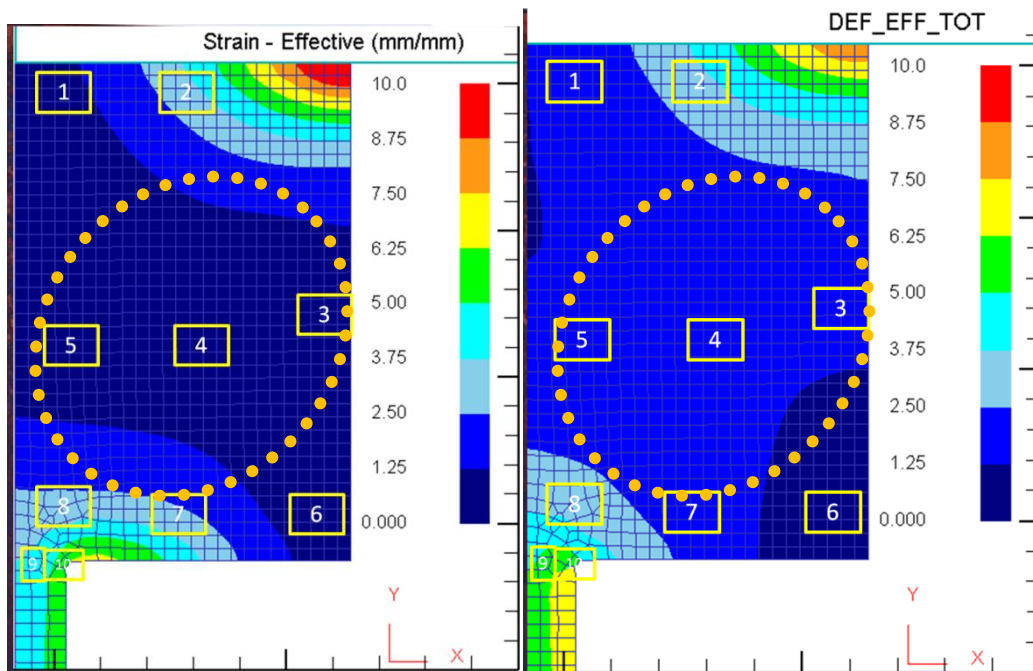
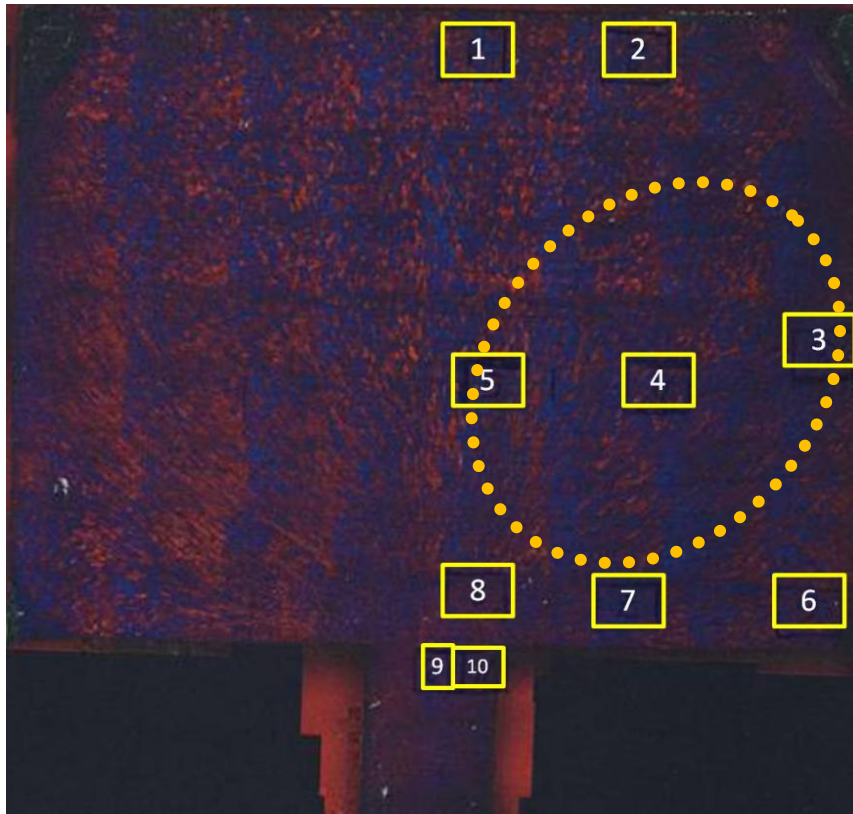


Fig. 4.20. Analisi metallografica estruso 6 560 3 5 e andamento Effective Strain (calcolata dal codice Deform) e DEF\_EFF\_TOT (calcolata con la nostra subroutine).

Infatti le zone 3, 4 e 5 riportate in figura 4.21 risultano molto deformate ma il codice vi associa una deformazione bassa, mentre la

deformazione equivalente calcolata con la nostra subroutine rispecchia meglio la realtà:

ZONE	STRAIN EFFECTIVE Deform	DEF_EFF_TOT Subroutine
3	0.215	1.5
4	0.425	1.3
5	0.6	1.4

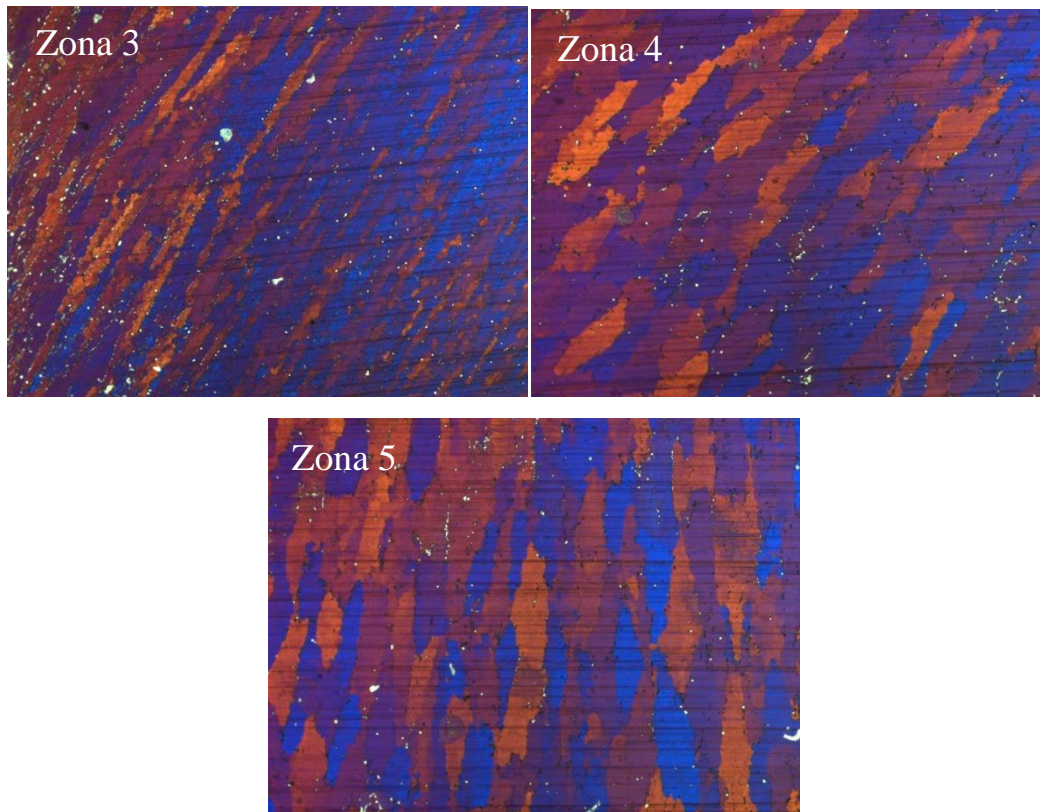


Fig. 4. 21. Zone 3,4 e 5 del provino 6 560 3 5 altamente deformate.

Anche nel caso del provino 14B 480 4 05, di figura 4.22, confrontando l'analisi metallografica con la previsione della deformazione equivalente calcolata dal codice e la deformazione equivalente calcolata secondo la subroutine aggiornata, notiamo che la *DEF\_EFF\_TOT* descrive meglio l'andamento delle dimensioni del grano durante il processo di estrusione.

specimen 14B: 480°C, d4, 0.5mm/s

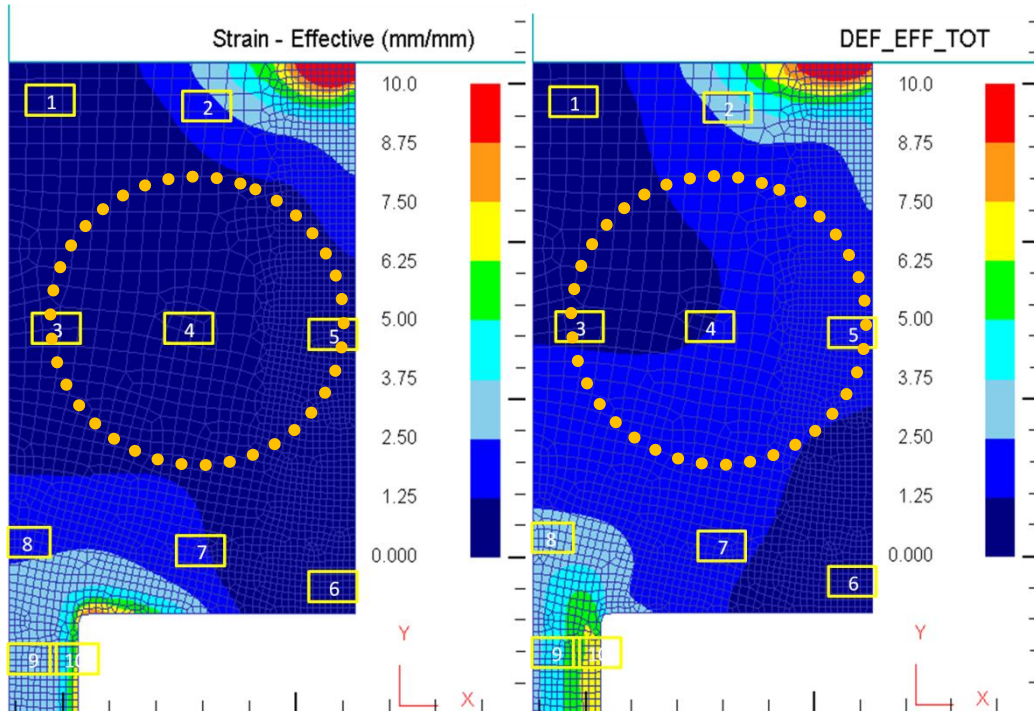
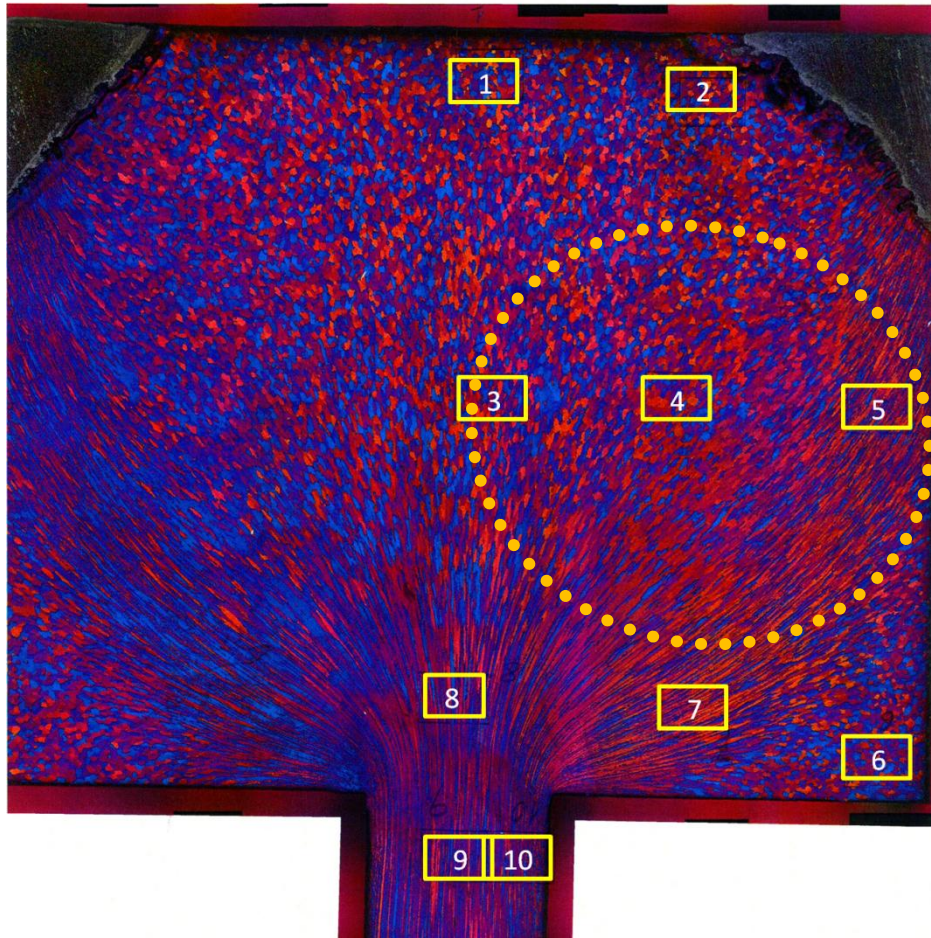
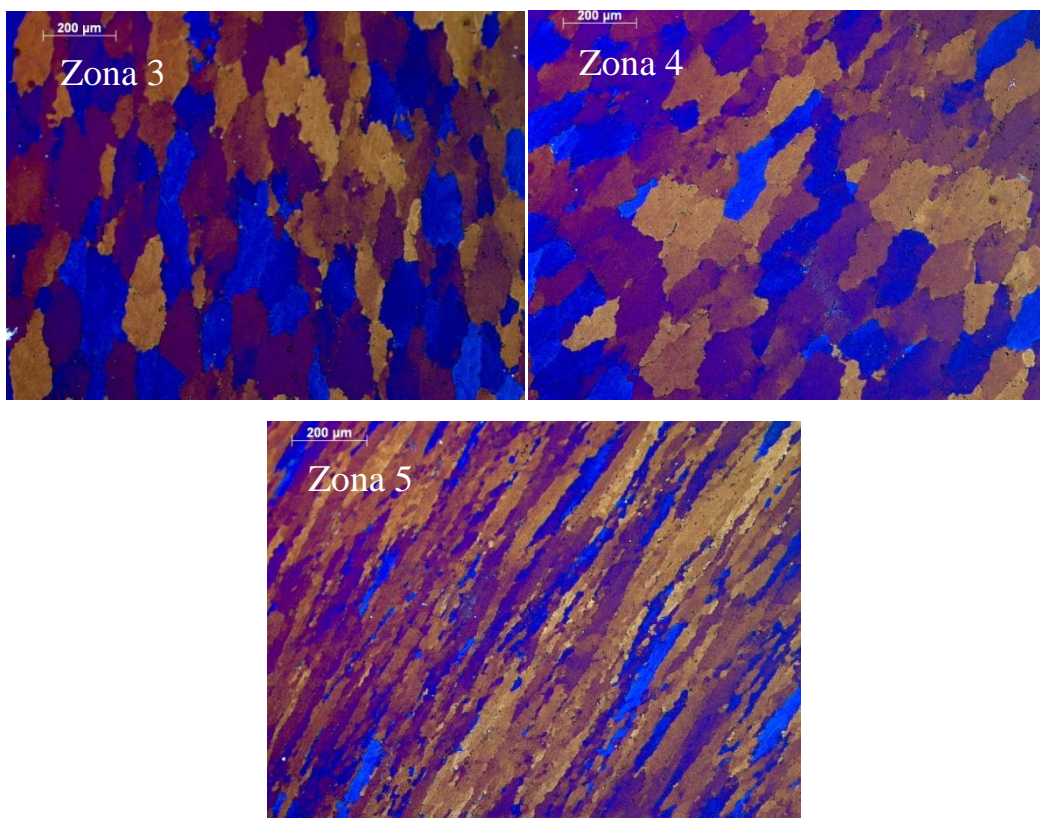


Fig. 4.22. Analisi metallografica estruso 14B 480 4 05 e andamento Effective Strain (calcolata dal codice Deform) e DEF\_EFF\_TOT (calcolata con la nostra subroutine).



Anche in questo provino, nonostante le analisi metallografiche delle zone 3, 4 e 5 di figura 4.23 evidenziano un grano cristallino molto deformato, il codice vi associa una deformazione bassa, mentre la deformazione equivalente calcolata con la nostra subroutine rispecchia meglio la realtà dimensionale:

ZONE	STRAIN EFFECTIVE Deform	DEF_EFF_TOT Subroutine
3	0.4125	1.1
4	0.45	1.3
5	0.32	1.6



*Fig. 4. 23. Zona 3,4 e 5 del provino 14B 480 4 05 altamente deformato.*

Aggiorniamo, quindi, il file Exel con le relative nuove deformazioni effettive calcolate dalla nostra subrutine:

test	temp °C	diametro [µm]	speed [mm/sec]	scale mm→µm											
14b	400	4	0,5	7,692307692											
OLD STRAIN	NEW STRAIN	zone	grani circolari	dimensioni [µm]	ratio l/d	dim settore [µm]	media	numero di grani per ogni linea							
0	0		length	150											
			thickness	150											
0,6	0,6	1	length	131,1382456	1,085000784	1067,84	8,142857143	11	7	8	9	6	7	9	
			thickness	120,8646552		1402,03	11,6	11	11	11	12	13			
3	2,4	2	length	120,5219355	1,065934395	1067,48	8,857142857	8	8	9	8	7	12	10	
			thickness	113,0669355		1402,03	12,4	13	11	12	13	13			
0,4125	1,2	3	length	219,7752941	2,13186879	1067,48	4,857142857	6	7	6	3	4	4	4	
			thickness	103,0904412		1402,03	13,6	12	15	13	15	13			
0,45	1,3	4	length	178,1411565	1,503695209	scale 1mm=	24,9397619	18,85714	24	26,375	35,8	19,66667			
			thickness	118,468926		7,142857143	16,58564964	18	13,28571	12,41176	14,23077	25			
0,32	1,6	5	length	195,4761905	3,63097498	scale 1mm=	27,36666667	23,83333	14	26	30,33333	42,66667			
			thickness	53,83573051		7,142857143	7,537002271	5,761905	7,708333	7,774194	8,173913	8,266667			
0,6	0,9	6	length	88,95666667	0,71063293	1067,48	12	10	13	9	15	10	16	11	
			thickness	125,18125		1402,03	11,2	13	11	10	12	10			
1,85	1,7	7	length	357,1428571	10,23287724	scale 1mm=	50	46	41,8	45,2	61	56			
			thickness	34,90150899		7,142857143	4,886211259	4,294118	5,029412	5,181818	5,151515	4,774194			
2,4	2,8	8	length	533,74	11,11617298	1067,48	2	4	1	1	1	2	3	2	
			thickness	48,01472603		1402,03	29,2	26	28	27	33	32			
3	3,88	9	length	830,2622222	17,6471361	1067,48	1,285714286	2	1	2	1	1	1	1	
			thickness	47,04798658		1402,03	29,8	34	25	27	33	30			
7,5	5,63	10	length	62,79294118	2,511717647	1067,48	17	8	24	19					
			thickness	25		200	8	11	8	7	8	6			

Ripetendo questa operazione per tutti gli altri provini otteniamo un andamento generale della deformazione equivalente in relazione alle dimensioni del grano.

### 4.3-3 Elaborazione dati acquisiti

Dopo aver calcolato per ogni zona del singolo provino la lunghezza e lo spessore medio dei grani, le rispettive deformazioni equivalenti che vi agiscono, abbiamo graficato l'andamento della lunghezza e dello spessore medio del grano in relazione alla deformazione equivalente calcolata dal codice Deform e in relazione alla deformazione equivalente calcolata dalla nostra subroutine (Fig. 4.24, Fig. 4.25).

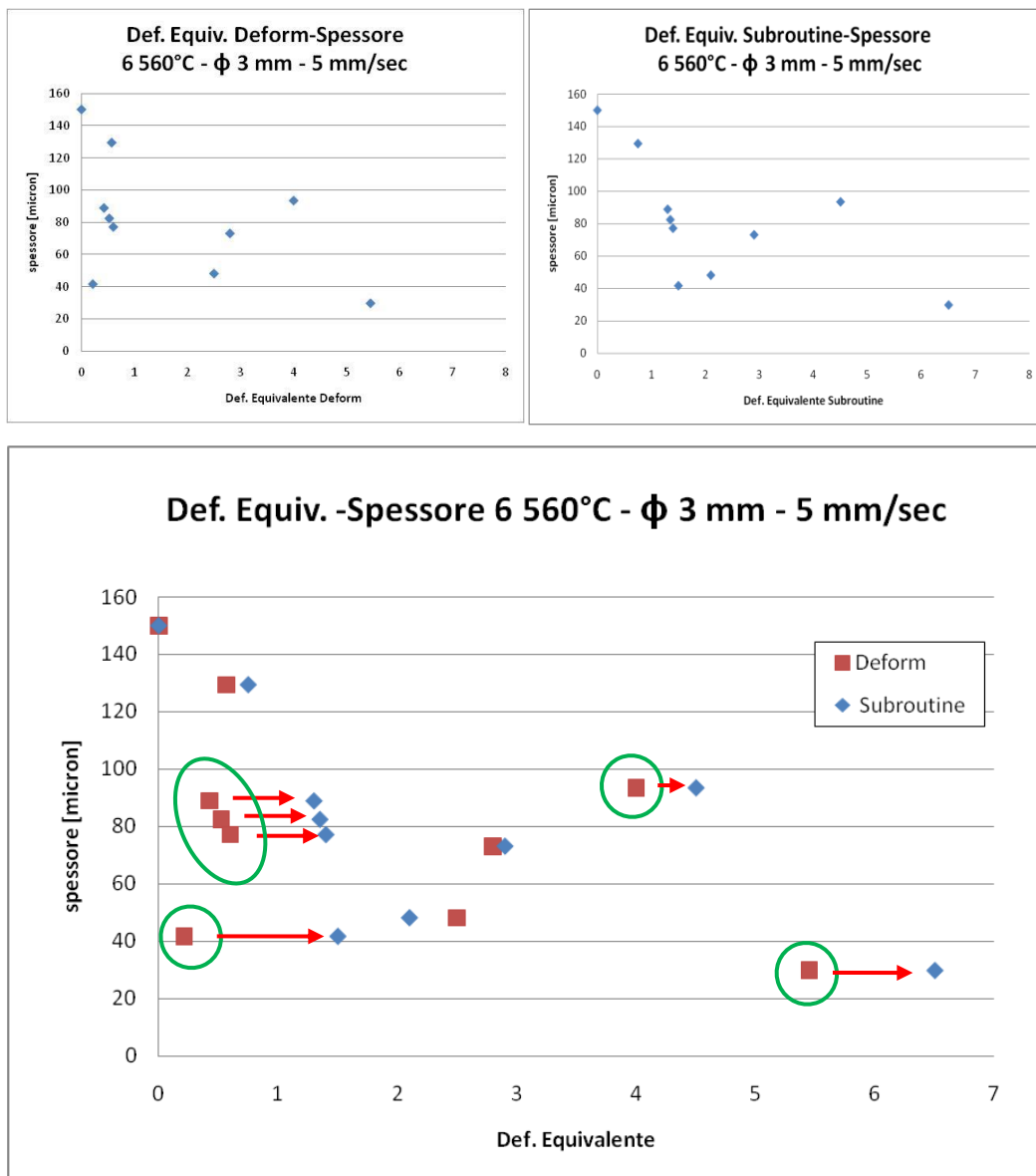


Fig. 4.24. Andamento dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform e dalla nostra Subroutine del provino 6 560 3 5.

Come possiamo notare dal grafico precedente è strano che un grano abbia ridotto il suo spessore passando da 150 a 40 micron con una deformazione equivalente piccolissima pari a 0.2. Invece, la nostra subroutine associa allo stesso spessore una deformazione equivalente pari ad 1.3. Quindi, a parità di spessore del grano della zona di riferimento, la nostra subroutine associa una deformazione equivalente maggiore rispetto a quella calcolata dal codice consentendoci di ottenere una migliore descrizione della realtà metallografica.

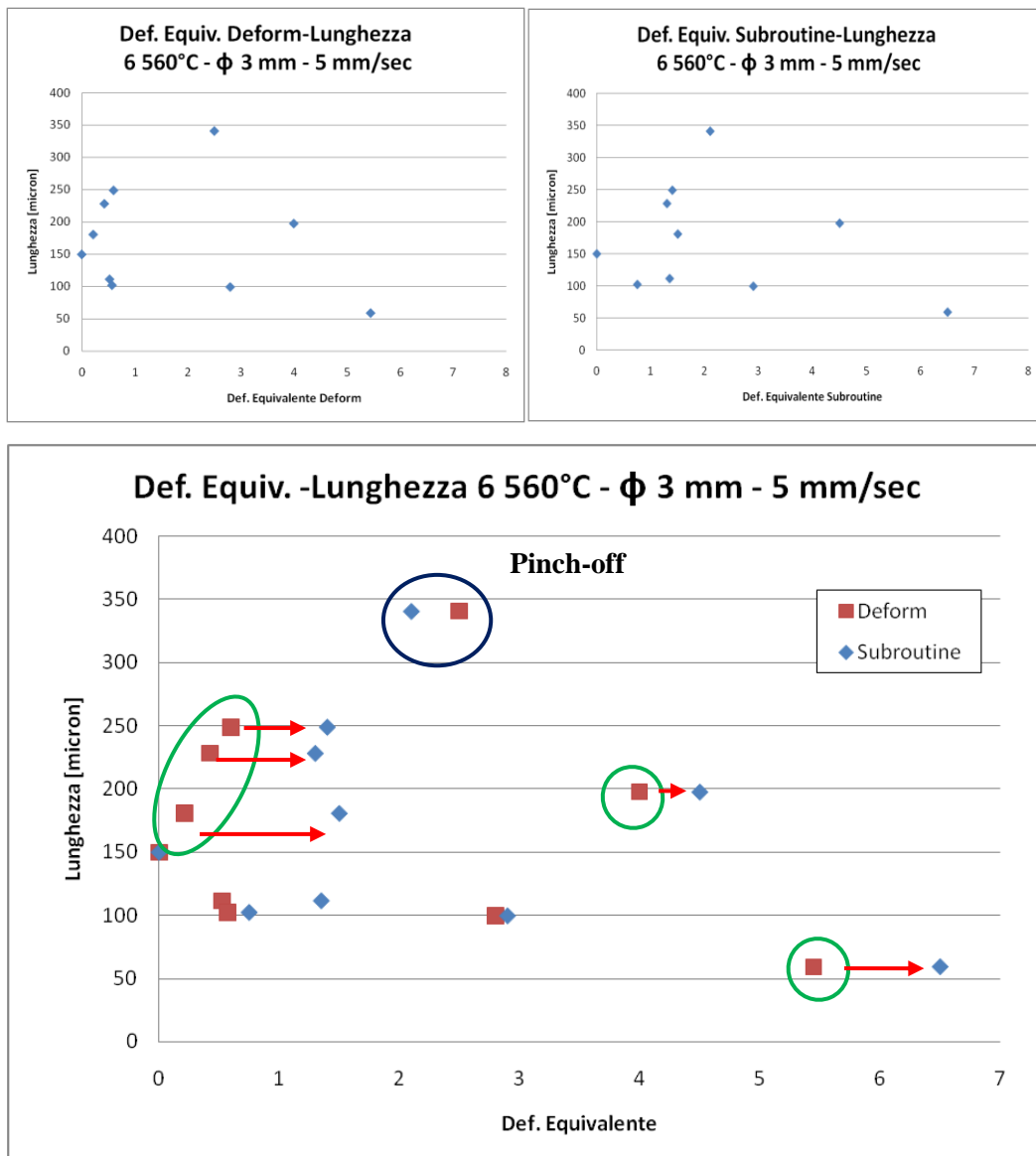
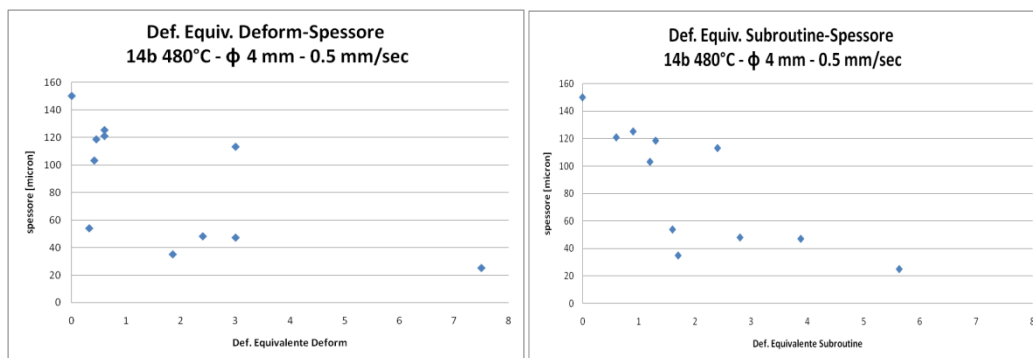


Fig. 4.25. Andamento della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform e dalla nostra Subroutine del provino 6 560 3 5.

Anche nel caso del provino 6 560 3 5 la lunghezza del grano aumenta passando dai 150 ai 250 micron ed il codice vi associa una deformazione equivalente pari a 0.6. La nostra subroutine, invece, per la stessa lunghezza associa una deformazione equivalente pari ad 1.5. A parità di lunghezza del grano della zona di riferimento, la nostra subroutine assegna una deformazione equivalente maggiore rispetto a quella calcolata dal codice. Confrontando queste deformazioni con le analisi metallografiche otteniamo una buona descrizione del caso reale. Inoltre, arrivati ad una deformazione equivalente pari circa a 3, notiamo il fenomeno del *pinch-off*, momento in cui il grano si divide in due nuovi grani passando da una lunghezza di 350 a 100 micron (evidenziato in nero in figura 4.25).

Consideriamo ora il caso il provino 14b 480 3 05 rappresentiamo sempre lo spessore e la lunghezza media dei grani di una determinata zona, rispetto alla deformazione equivalente calcolata dalla nostra subroutine (Fig. 4.26; Fig. 4.27):



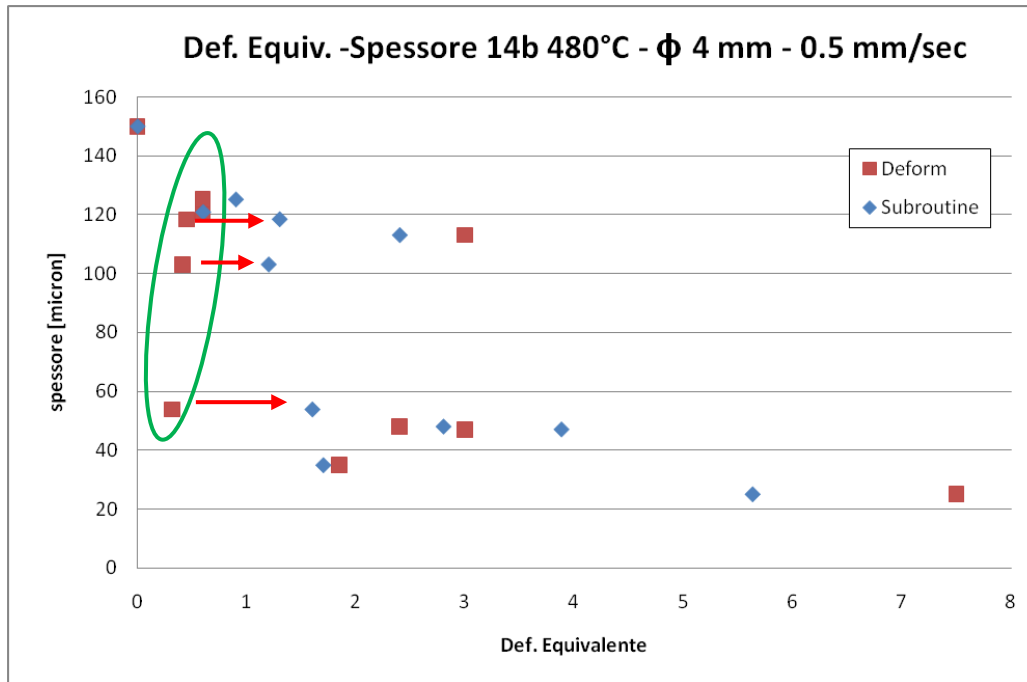
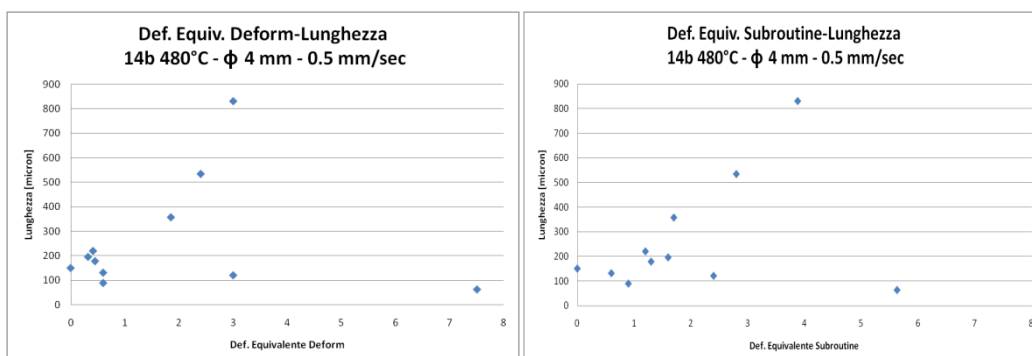


Fig. 4.26. Andamento dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform e dalla nostra Subroutine del provino 14b 480 4 05.

Come possiamo notare dalla zona evidenziata del precedente grafico, a parità di spessore il codice associa una deformazione minore nella maggior parte delle zone di riferimento. Infatti, considerando la deformazione equivalente calcolata dal codice, lo spessore del grano passa dai 150 ai 45 micron con lo 0.3 di deformazione equivalente. Mentre considerando la deformazione equivalente calcolata con la nostra subroutine per lo stesso spessore di 45 micron abbiamo una deformazione equivalente pari a 1.5. Otteniamo, quindi, una migliore descrizione della microstruttura.



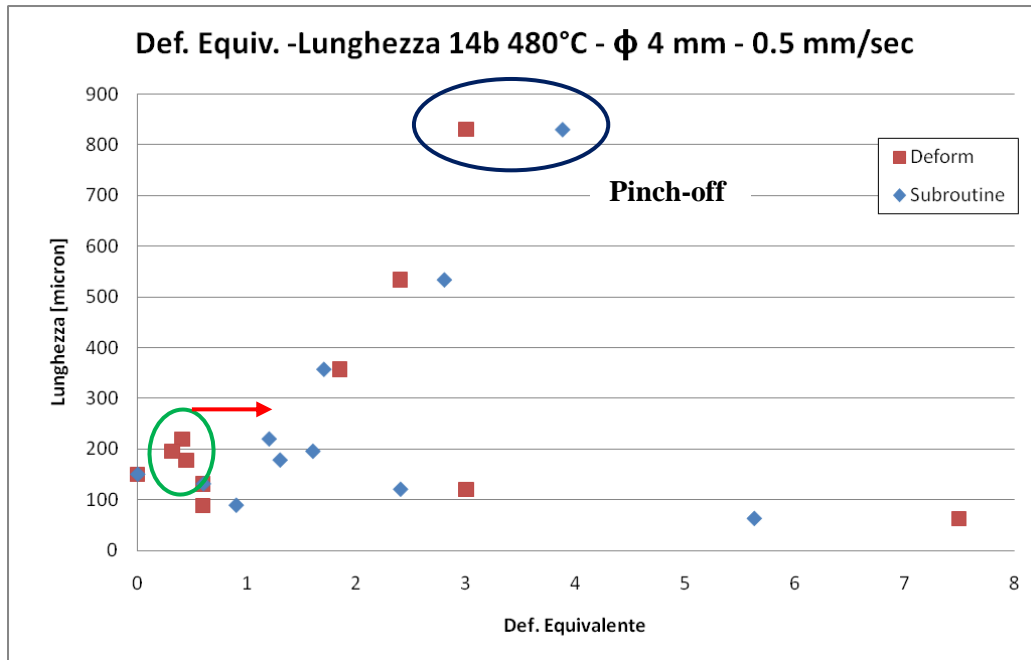


Fig. 4.27. Andamento della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform e dalla nostra Subroutine del provino 14b 480 4 05.

Anche nel caso della lunghezza dei grani del provino 14b 480 4 05 le zone evidenziate mostrano che il codice associa una deformazione minore rispetto al quella calcolata dalla nostra subroutine a parità di lunghezza. Quando la deformazione equivalente assume un valore circa pari a 3, si verifica il fenomeno del *pinch-off*. Cioè il grano si divide in due nuovi grani passando da una lunghezza di 850 a 90 micron (evidenziato in nero in figura 4.27).

#### 4.3-4 Regressione dell'andamento generale della deformazione equivalente rispetto alle dimensioni del grano

Ripetendo questo procedimento per ogni provino, che è stato realizzato con diversi parametri di estrusione, come temperatura, velocità del pistone e diametro luce della matrice, otteniamo l'andamento della lunghezza e dello spessore del grano in relazione:

- alla *Deformazione Equivalente* calcolata dal codice Deform (Fig. 4.28; Fig. 4.32);
- alla *Deformazione Equivalente* calcolata dalla nostra subroutine (Fig. 4.29; Fig. 4.33).

In riferimento al diametro del grano consideriamo i seguenti grafici:

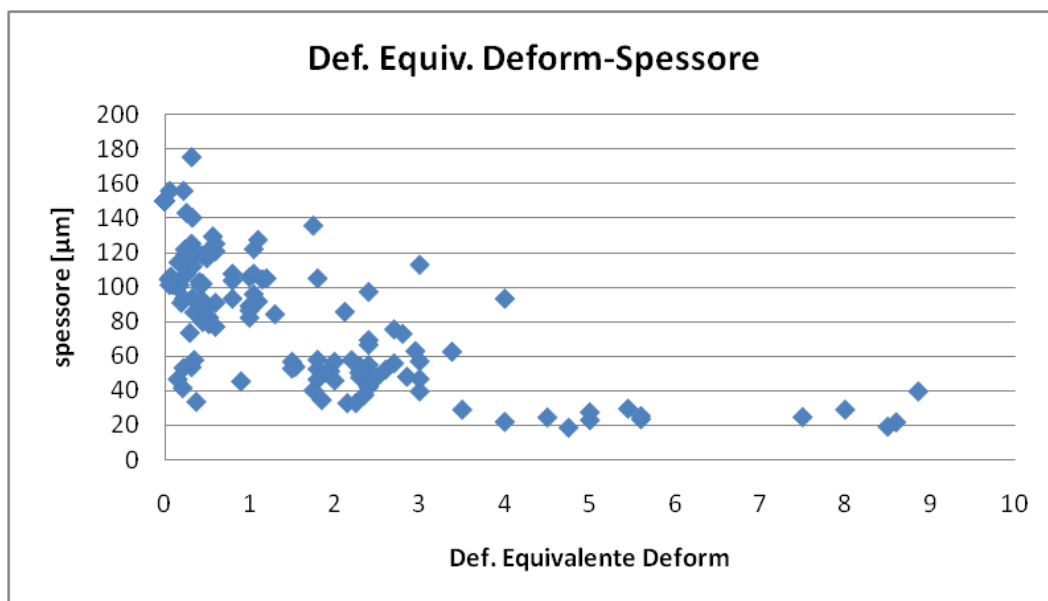


Fig. 4.28. Andamento generale dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform.



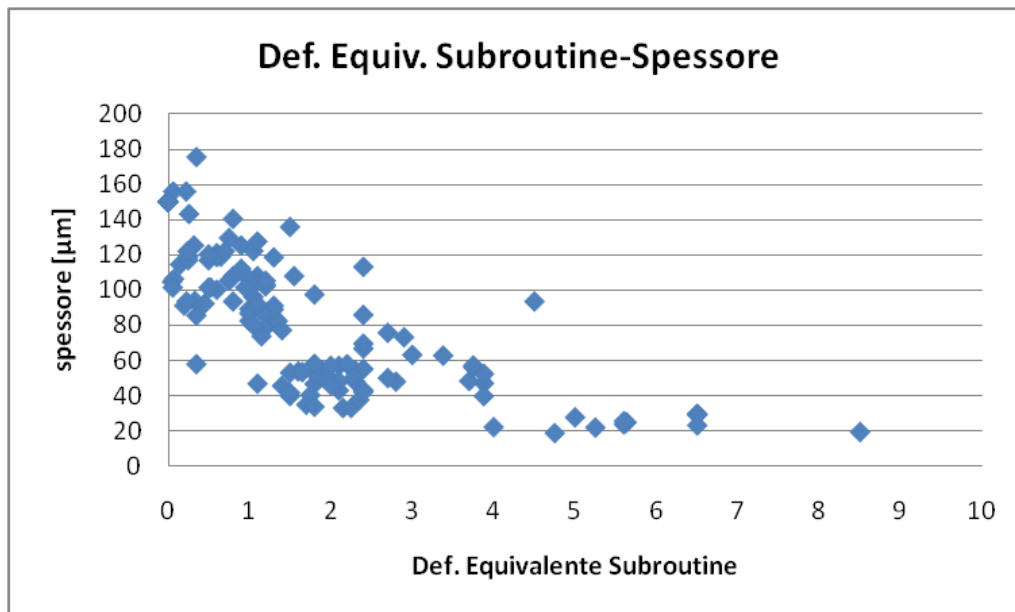


Fig. 4.29. Andamento generale dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine

Confrontando gli andamenti precedenti in un unico grafico di figura 4.30, notiamo che la nostra subroutine produce un addensamento di punti nella zona centrale generando una migliore descrizione dell'evoluzione dello spessore del grano in relazione alla deformazione equivalente. Cioè all'aumentare della deformazione lo spessore diminuisce in maniera graduale e proporzionale alla deformazione.

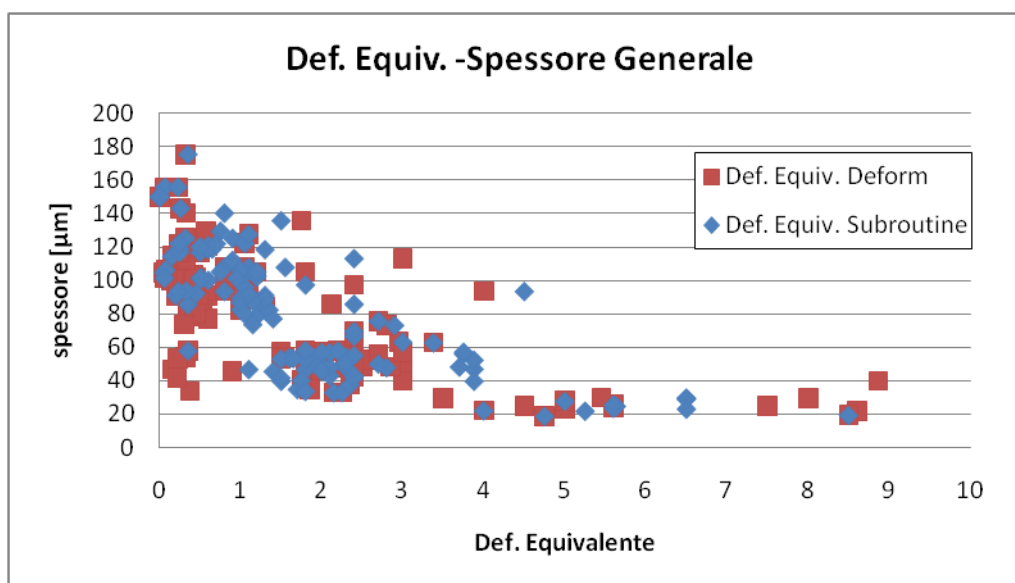


Fig. 4.30. Confronto dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform e dalla nostra Subroutine.

Considerando l'andamento generale della Effective Strain della nostra subroutine in relazione allo spessore del grano, andiamo ad eseguire una regressione di quest'ultima distribuzione di punti ottenendo una equazione che possa descrivere al meglio lo spessore del grano in relazione alla Effective Strain calcolata dalla nostra subroutine (Fig. 4.31). Fino ad una deformazione pari a 4 eseguiamo la regressione della distribuzione di punti con un esponenziale e poi con una retta:

$$d = 150 * 0.4^{Eff.Strain} + 21 \quad 0 \leq Eff.Strain \leq 4$$

$$d = 25 \quad Eff.Strain > 4$$

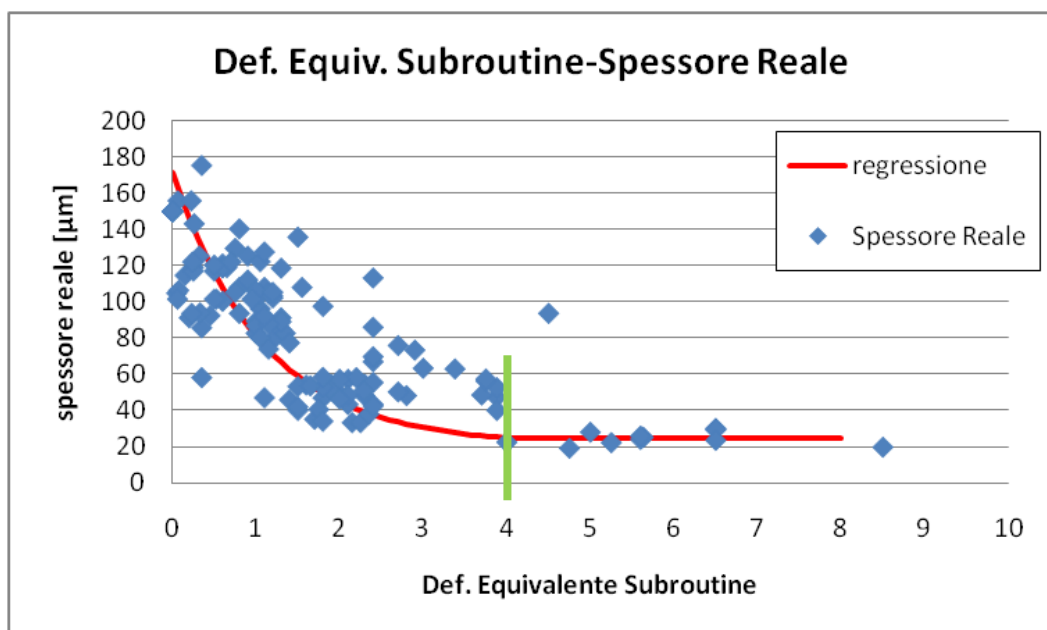


Fig. 4.31. Approssimazione dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine.

In riferimento alla lunghezza del grano consideriamo i seguenti grafici:

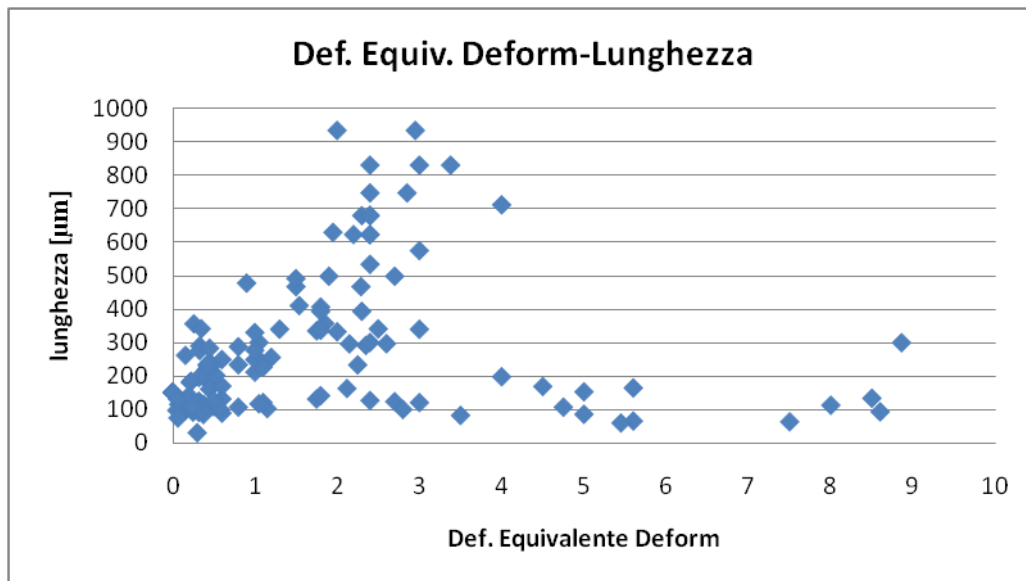


Fig. 4.32. Andamento generale della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform.

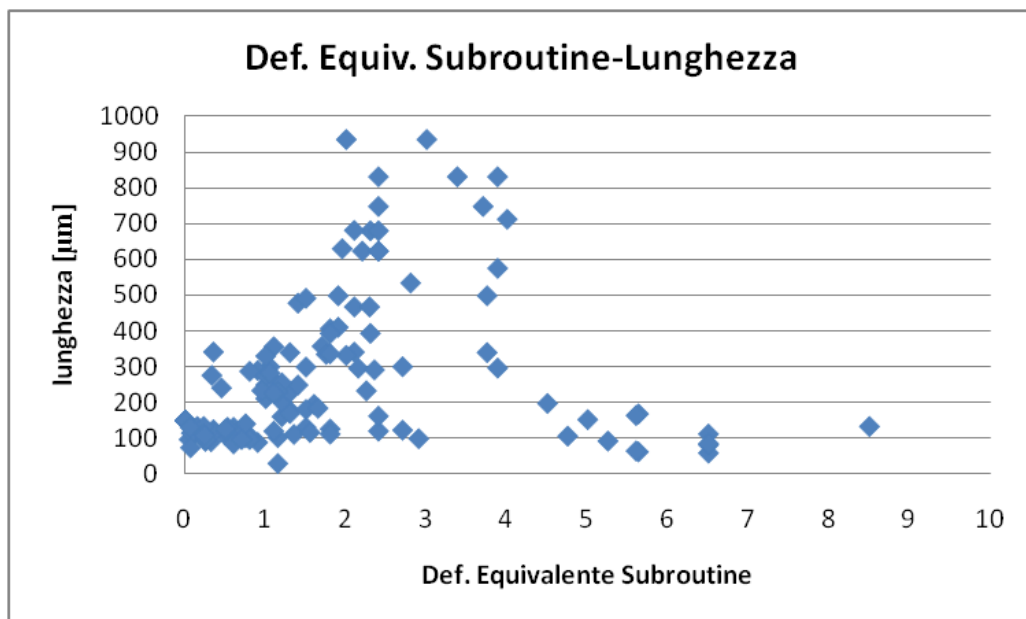


Fig. 4.33. Andamento generale della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine.

Confrontando gli andamenti precedenti in un unico grafico di figura 4.34, notiamo che la nostra subroutine produce un addensamento di punti nella zona centrale ed evidenzia il fenomeno del *Pinch-off* ottenendo una migliore descrizione dell'evoluzione della lunghezza

del grano in relazione alla deformazione equivalente. Cioè, all'aumentare della deformazione la lunghezza del grano aumenta fino ad arrivare circa a *900 micron*. Superata questa deformazione critica, la lunghezza diminuisce a causa della divisione del grano, fino ad arrivare sui *90 micron*.

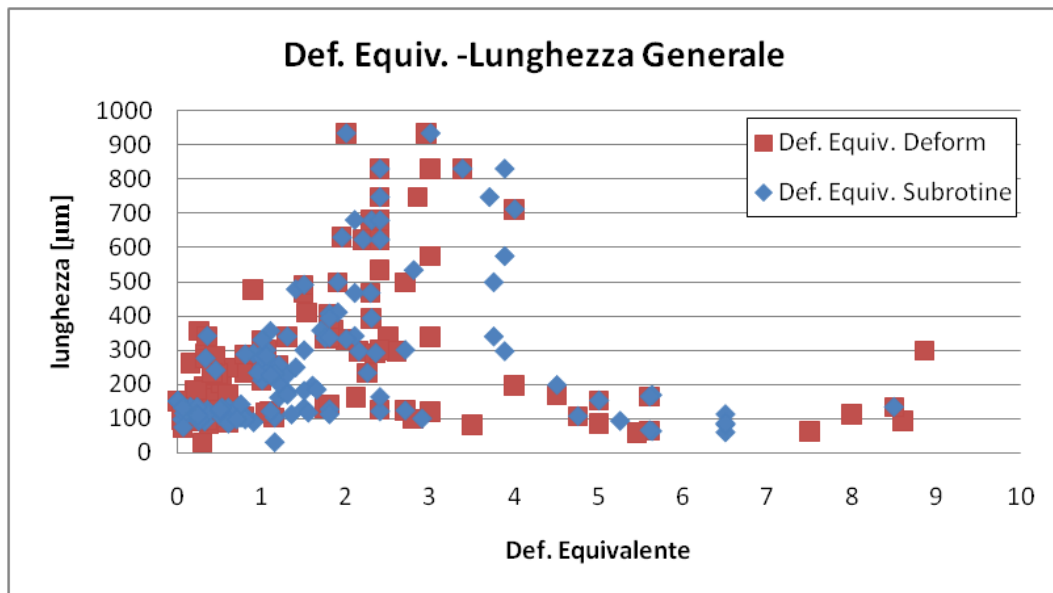


Fig. 4.34. Confronto della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dal Deform e dalla nostra Subroutine.

Dall'andamento generale della Effective Strain calcolata dalla nostra subroutine in relazione alla lunghezza del grano, andiamo ad eseguire una regressione di quest'ultima distribuzione di punti ottenendo una equazione che possa descrivere al meglio la lunghezza del grano in relazione alla Effective Strain (Fig. 4.35). Arrivati ad una deformazione equivalente all'incirca pari a 3 la lunghezza del grano si riduce drasticamente. Questo è il punto in cui si verifica la **Geometric Dynamic Recrystallization** ovvero avviene il **pinch-off**, in cui il grano dopo essersi allungato durante l'estrusione, raggiungendo una deformazione critica si divide in due nuovi grani di dimensioni inferiori (Fig. 4.35).

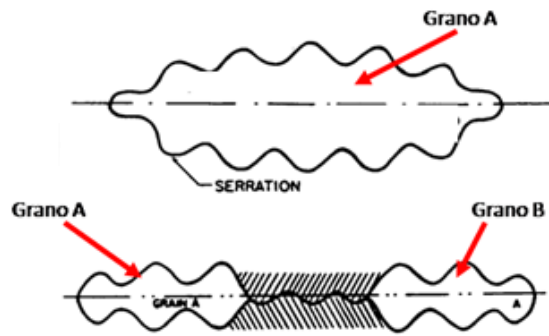


Fig. 4.35. Geometric Dynamic Recrystallization and pinch-off.

Andiamo quindi ad eseguire una regressione per stimare quest'ultima distribuzione di punti con una serie di equazione che possano descrivere al meglio la lunghezza del grano in relazione alla Effective Strain calcolata dalla nostra subroutine (Fig. 4.36). Fino ad una deformazione pari a 2.73 eseguiamo la regressione della distribuzione dei punti con una parabola poi con una retta, una potenza ed infine una retta:

$$\begin{aligned}
 l &= 85.192 * (Eff.Strain)^2 - 14.88 * (Eff.Strain) + 150 & Eff.Strain \leq 2.73 \\
 l &= 930 & 2.73 < Eff.Strain \leq 3.25 \\
 l &= 80001 * (Eff.Strain)^{-3.8} & 3.25 < Eff.Strain \leq 6 \\
 l &= 90 & Eff.Strain > 6
 \end{aligned}$$

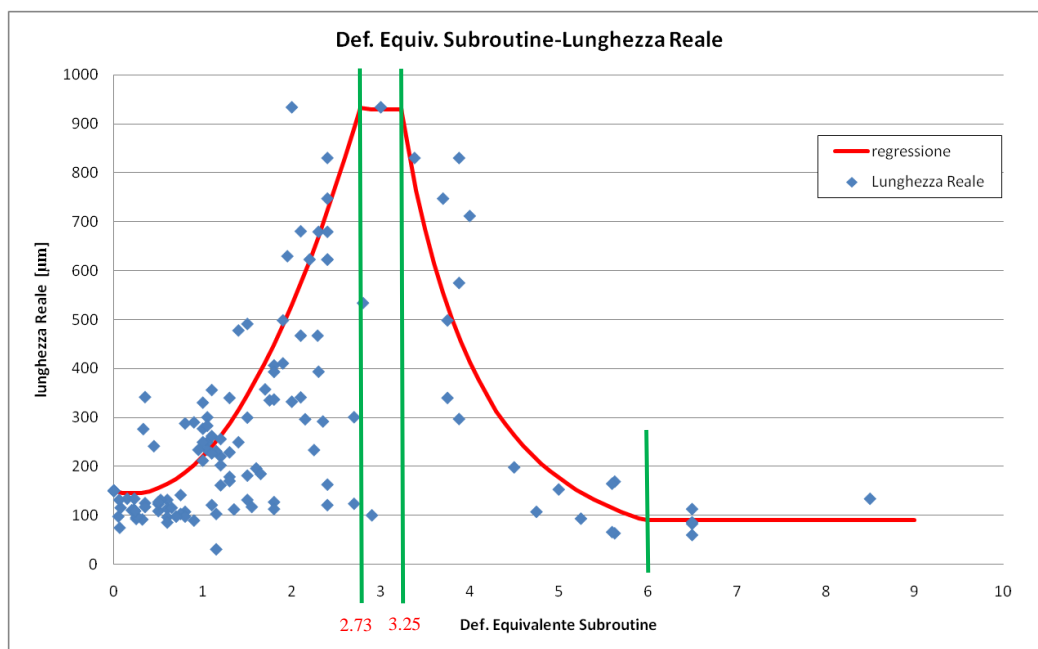


Fig. 4.36. Approssimazione della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine.

### 4.3-5 Implementazione subroutine per il calcolo delle dimensioni del grano

Stimate le dimensioni del grano rispetto alla deformazione equivalente calcolata con la nostra subroutine, andiamo ad implementare nuovamente la subroutine. Inseriamo nel codice le equazioni precedentemente calcolate che mettono in relazione lo spessore e la lunghezza del grano in relazione alla deformazione equivalente calcolata dalla nostra subroutine:

```
CXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX LUNGHEZZA
      DO I=1,NUMEL,1
        IF(USRVE(23,I).LE.2.73) THEN
          Eff. Strain ≤ 2.73
          lunghezza =USRVE(27,I)=120*(USRVE(23,I))**2-50*USRVE(23,I)+150
        ENDIF
        IF(USRVE(23,I).GT.2.73) THEN
          IF(USRVE(23,I).LE.3.25) THEN
            lunghezza = USRVE(27,I)=930
            2.73 < Eff. Strain ≤ 3.25
          ENDIF
        ENDIF
        IF(USRVE(23,I).GT.3.25) THEN
          IF(USRVE(23,I).LE.6) THEN
            lunghezza =USRVE(27,I)=80001*(USRVE(23,I))**(-3.8)
            3.25 < Eff. Strain ≤ 6
          ENDIF
        ENDIF
        IF(USRVE(23,I).GT.6) THEN
          lunghezza = USRVE(27,I)=90
          Eff. Strain > 6
        ENDIF
      ENDDO
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX SPESSORE
      DO I=1,NUMEL,1
        IF(USRVE(23,I).LE.4) THEN
          spessore = USRVE(26,I)=150*0.4**USRVE(23,I)+21
          Eff. Strain ≤ 4
        ELSE
          spessore =USRVE(26,I)=25
          Eff. Strain > 4
        ENDIF
      ENDDO
```

#### 4.3-6 Affidabilità della subroutine

Analizzando i risultati delle simulazioni, eseguite con la nostra subroutine aggiornata per il calcolo delle dimensioni del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata sempre dalla nostra subroutine, notiamo che il nostro algoritmo esegue una buona approssimazione delle dimensioni rispetto a quelle reali delle analisi metallografiche. Inoltre, riusciamo ad individuare il fenomeno della *Geometric Dynamic Recrystallization* ed il conseguente punto di *pinch-off* in cui il grano si divide in due nuovi grani.

Infatti, considerando il provino 19 480 4 5 (Fig. 4.37):

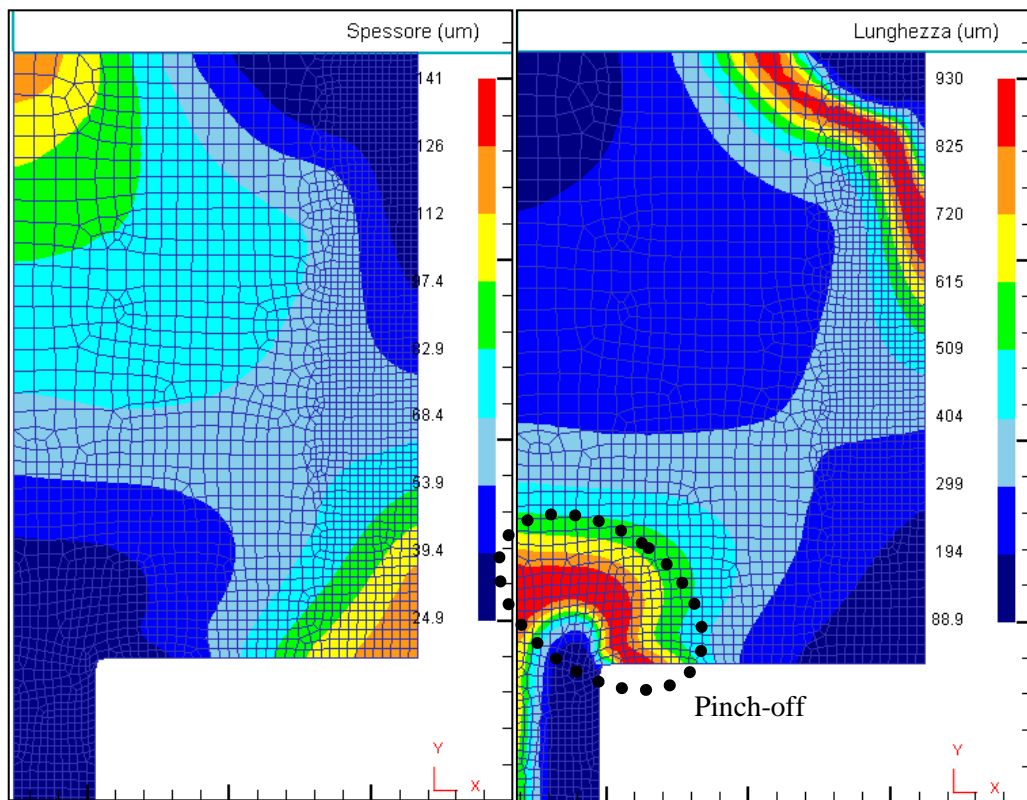
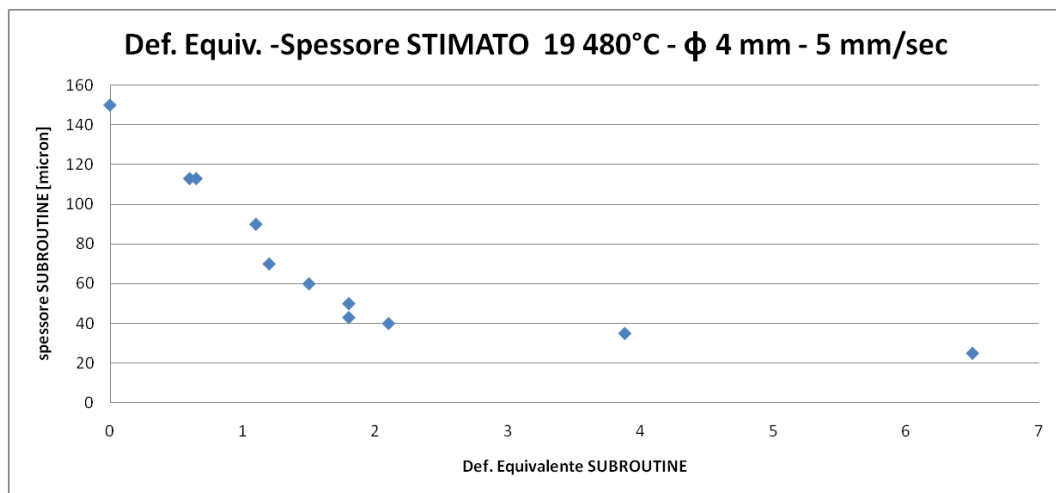
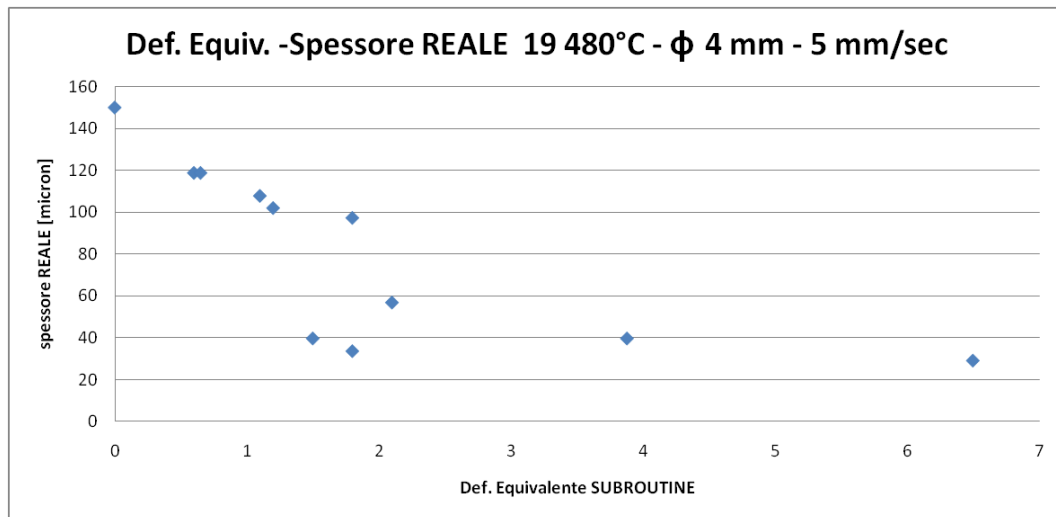


Fig. 4.37. Risultati delle simulazioni per il calcolo dello spessore e della lunghezza del grano. Fenomeno del Pinch-off.

Inseriamo in tabella i rispettivi dati di lunghezza e spessore estratti dalle simulazioni ed otteniamo gli andamenti di figura 4.38 e 4.39:

test	temperature °C	diametro [mm]	speed [mm/sec]		
19	480	4	5		
Strain Subroutine	zone	dimensioni REALI		dimensioni APPROSSIMATE	
		length [μm]	thickness [μm]	length [μm]	thickness [μm]
0		150	150	150	150
0,6	1	113,2557576	118,8161017	160	113
1,8	2	126,6501695	97,36319444	400	50
1,1	3	355,8266667	107,8484615	240	90
1,2	4	161,0117346	102,0709793	250	70
1,8	5	112,3911565	33,79939399	400	43
0,65	6	114,9593846	118,8161017	170	113
1,5	7	299,3571429	39,85021677	300	60
2,1	8	467,0225	56,99308943	450	40
3,88	9	574,7969231	39,83039773	550	35
6,5	10	112,3663158	29,26829268	90	25





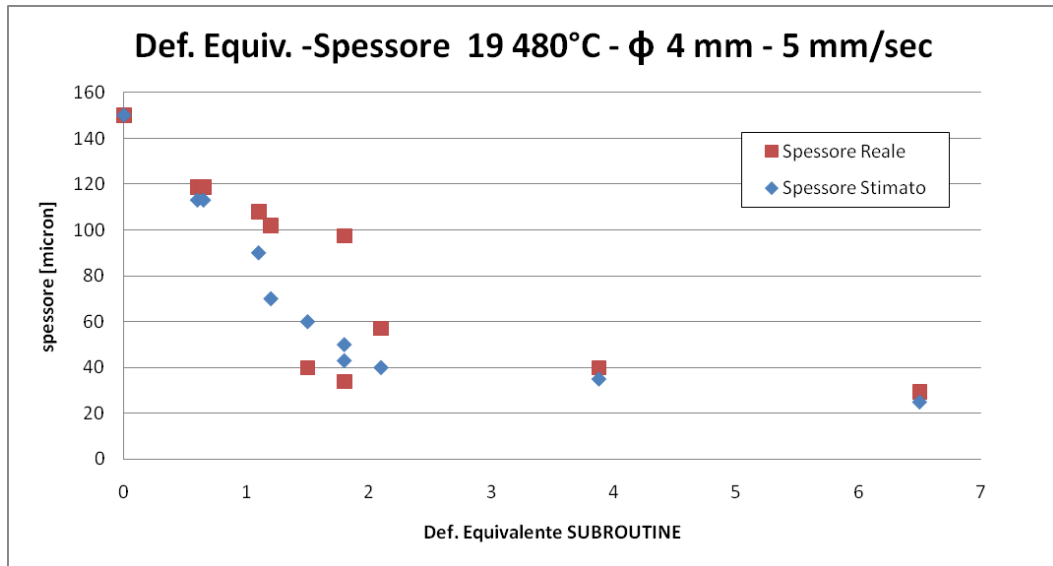
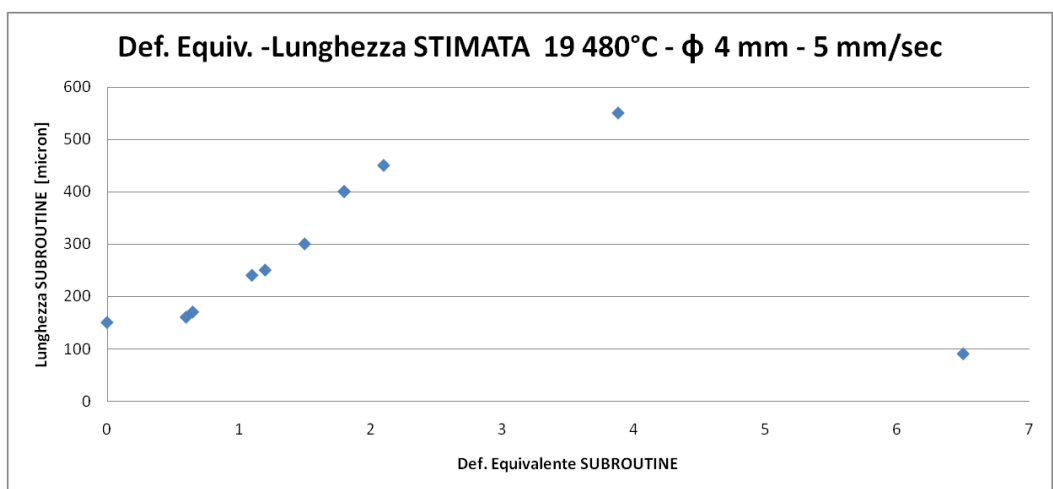
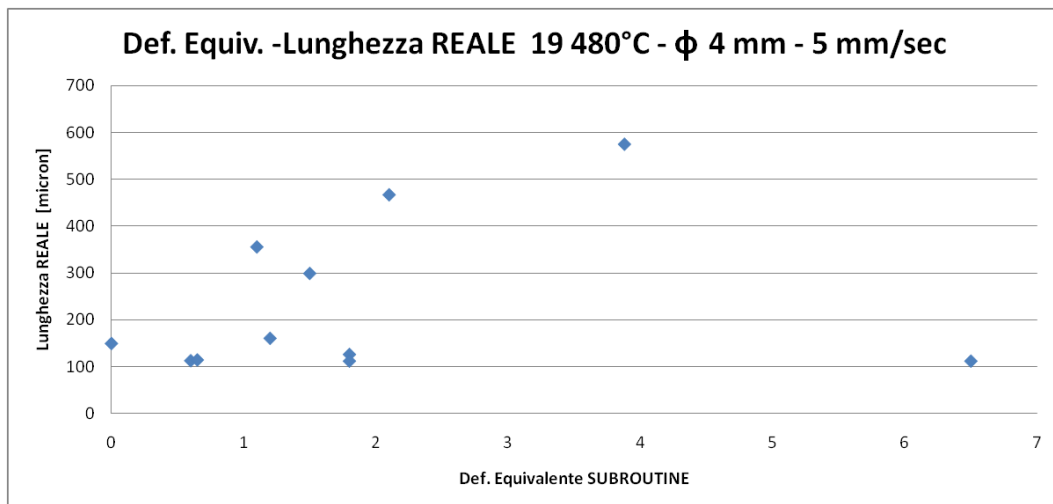


Fig. 4.38. Andamento reale e stimato dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine.



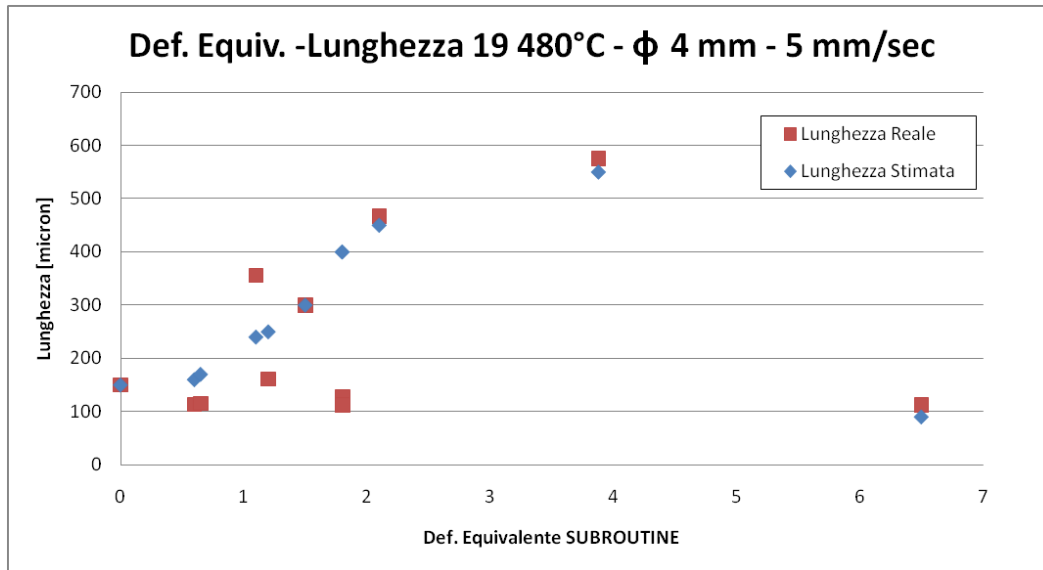
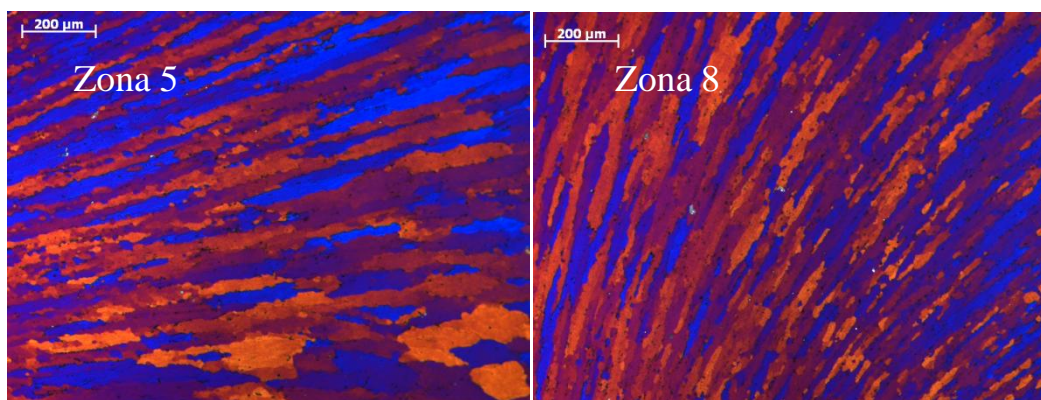
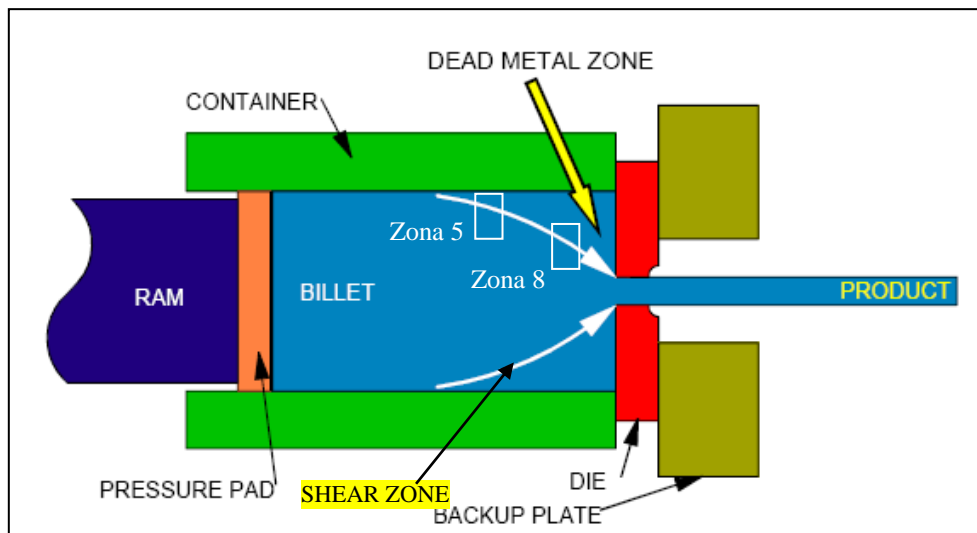


Fig. 4.39. Andamento reale e stimato della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine.

Il codice esegue una buona stima delle dimensioni del grano in riferimento alla deformazione equivalente. Eventuali scostamenti tra i valori stimati del codice e quelli reali sono dovuti al gradiente di deformazione all'interno di ogni singola zona di riferimento dell'analisi metallografica. Infatti, in una zona di riferimento situata lungo la *shear zone*, dove è concentrato il flusso di materiale deformato che viene compresso verso la matrice, si ha una parte di grani molto deformati ed un'altra parte poco deformati (fig 4.40) rendendo difficile quindi la valutazione reale della dimensione del grano.



*Fig 4.40. Shear zone e gradiente di deformazione equivalente all'interno delle zone 3 e 8.*

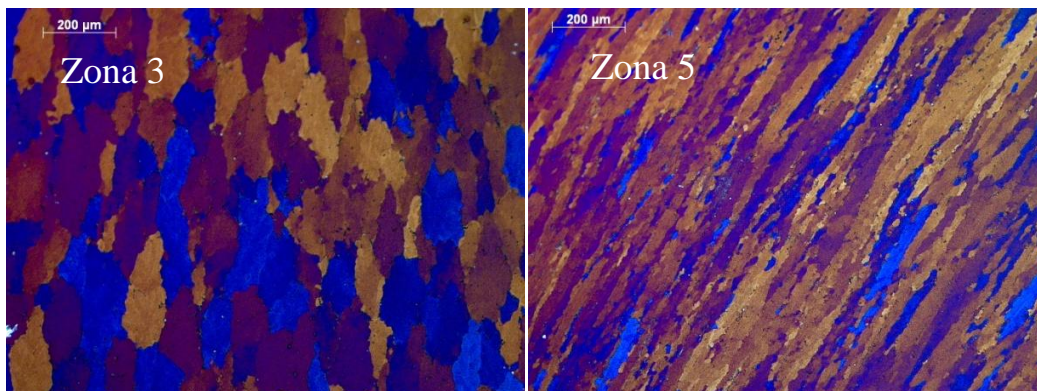
## CONCLUSIONI

È stata eseguita una sperimentazione con lo scopo di indagare l'evoluzione della micro struttura di una lega di alluminio durante un processo di estrusione.

In un lavoro pregresso sono stati realizzati degli estrusi variando i parametri di produzione, eseguite delle simulazioni FEM riproducendo il processo di lavorazione ed effettuate delle analisi metallografiche per analizzare lo stato dimensionale del grano cristallino.

Considerando che i risultati delle simulazioni eseguite dal codice non rispecchiavano la realtà metallografica degli estrusi, si è deciso di implementare il codice Deform per ottenere una correlazione tra le dimensioni del grano cristallino e la deformazione equivalente.

Infatti, dalla figura 5.1 notiamo che a fronte di un grano cristallino molto deformato (zona 5 del provino) ed uno meno deformato (zona 3 del provino) il codice vi associa circa la stessa deformazione equivalente come riportato in tabella 5.1.



*Fig. 5.1. Analisi metallografiche zone 3 e 5.*

ZONE	Effective Strain Deform	Effective Strain Subroutine
3	0.4125	1.1
5	0.32	1.6

*Tab. 5.1. Deformazione equivalente per le zone 3 e 5.*

A tal proposito è stata implementata una subroutine del codice con lo scopo di ottenere durante la lavorazione:

- descrizione della deformazione equivalente;
- descrizione della lunghezza e spessore del grano;
- verifica dell'affidabilità di previsione del codice.

L'implementazione è stata eseguita inizialmente valutando la deformazione equivalente in un semplice caso di doppia ricalcatura in modo tale da confrontare i risultati ottenuti della nostra subroutine con quelli reali ricavabili analiticamente e successivamente, vista l'affidabilità riscontrata della nostra subroutine in relazione a questo semplice caso, si è deciso di utilizzarla anche per le simulazioni dei provini estrusi. Sempre in tabella 5.1, in cui abbiamo riportato l'andamento della deformazione equivalente calcolata dal codice e quella calcolata dall'esecuzione della nostra subroutine, notiamo che quest'ultima assegna una deformazione equivalente maggiore rispetto a quella del codice riuscendo a distinguere le due zone con diverse alterazioni dimensionali del grano cristallino (Fig. 5.1). Siamo riusciti, quindi, ad ottenere una descrizione dello stato deformativo in maggior accordo con la realtà metallografica.

Una nuova implementazione è stata eseguita per stimare la lunghezza e lo spessore del grano cristallino di tutti i provini in relazione alla deformazione equivalente calcolata dalla nostra subroutine. Sia per lo spessore che per la lunghezza del grano è stata eseguita una regressione in modo da ottenere delle equazioni che ci permettessero di stimare queste dimensioni in relazione alla deformazione

equivalente. Dalla figura 5.2 e 5.3 è possibile notare che la nostra subroutine descrive abbastanza bene l'evoluzione delle dimensioni del grano durante l'estrusione.

Infatti, al crescere della deformazione equivalente:

- lo spessore decresce;
- la lunghezza aumenta fino ad un certo punto, superato il quale presenta un calo drastico individuando il fenomeno del *pinch-off* in cui il grano si divide in due nuovi grani.

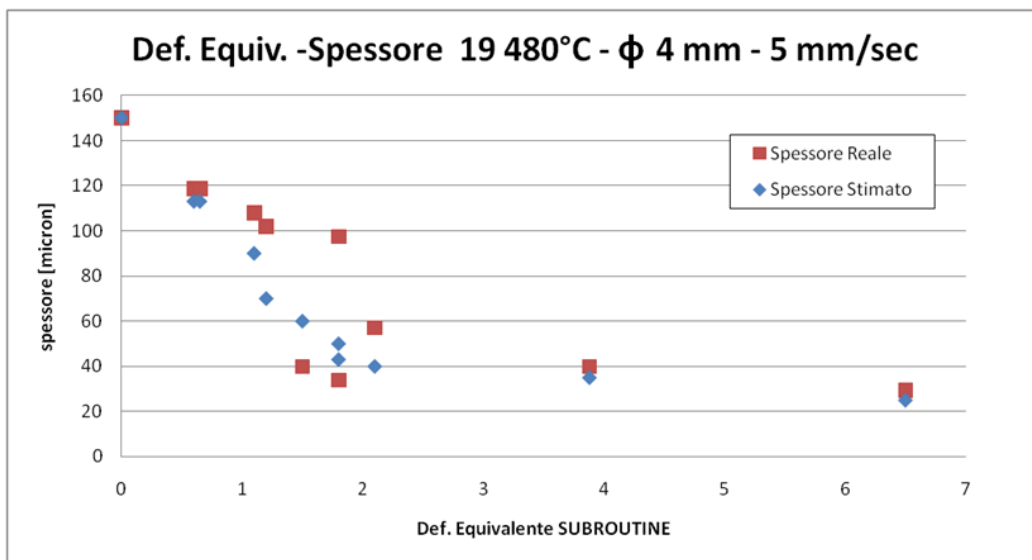


Fig. 5.2. Andamento reale e stimato dello spessore del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine.

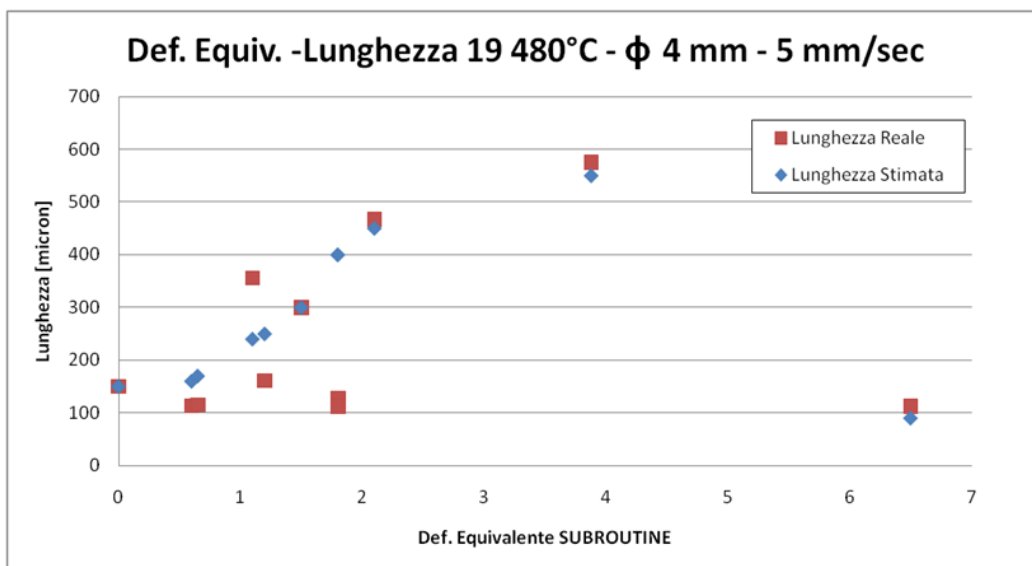


Fig. 5.3. Andamento reale e stimato della lunghezza del grano in relazione alla Deformazione Equivalente calcolata dalla nostra Subroutine.

Eventuali scostamenti tra i valori stimati del codice e quelli reali sono dovuti al gradiente di deformazione contenuto in una singola zona dell'analisi metallografica. Infatti, internamente alle singole zone di riferimento situate lungo la *shear zone* del processo di estrusione avremmo una parte di grani molto deformati ed un'altra parte poco deformati rendendo difficile la valutazione delle dimensioni reali dei grani.

La sperimentazione eseguita è stata dunque appropriata al problema in studio ed ha permesso di ottenere risultati significativi, consentendoci di avere una migliore descrizione della deformazione equivalente ed una stima dell'evoluzione delle dimensioni del grano cristallino durante il processo di estrusione.

## Bibliografia

- [1] Appunti di Sistemi di Lavorazione Luca Tomesani pag. 124-132.
- [2]  
<http://www.ing.unitn.it/~luttero/TecnologieSistemiLavorazione/EstrusioneTrafilatura.pdf>
- [3] Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione pag. 201-256.
- [4]  
<http://my.liuc.it/MatSup/2004/Y70750/Corso%20di%20Tecnologia%20Meccanica%20-%20Mod.3.3%20Deformazione%20plastica.pdf>
- [5] [http://www.metra.it/italiano/alluminio/estrusione\\_file/frame.htm](http://www.metra.it/italiano/alluminio/estrusione_file/frame.htm)
- [6] [http://digilander.libero.it/paoloperucci/matrici\\_di\\_estrusione.htm](http://digilander.libero.it/paoloperucci/matrici_di_estrusione.htm)
- [7] [http://www.simpalluminio.it/alluminio\\_02.htm](http://www.simpalluminio.it/alluminio_02.htm)
- [8] <http://www.aec.org/techinfo/alloys.html>
- [9]  
<http://www.emmegi.com/Sezione.jsp?idSezione=70&idSezioneRif=68>
- [10] R. D. Doherty, D. A. Hughes, F. J. Humphreys, J. J. Jonas, D. Juul Jensen, M. E. Kassner, W. E. King, T. R. McNelley, H. J. McQueen and A. D. Rollett “Current issues in recrystallization: a review” *Materials Science and Engineering A*, Volume 238, Issue 2, 15 November 1997, Pages 219-274.
- [11] T. Pettersen, B. Holmedal, E. Nes, “Microstructure development during hot deformation of aluminum to large strains” *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, v 34, n 12, December, 2003, p 2737-2744.
- [12] R.D. Doherty, D.A. Hughes, F.J. Humphreys, J.J. Jonas, D. Juul Jensen, M.E. Kassner, W.E. King, T.R. McNelley, H.J. McQueen, A.D. Rollett “Current issues in recrystallization: a review”.



[13] Lezioni di metallurgia Vol.1 struttura, proprietà e comportamento dei materiali metallici, pag 277-284.

[14] C:\DEFORM2D\V9\_0\MANUALS\HTML\DEFORM-2D.htm

[15] Mechanics of plastic deformation in metal processing. Thomsen, Yang, Kobayashi pag.57.