

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9 – Ingegneria Industriale

ELABORATO FINALE DI LAUREA

in Tecnologia Meccanica

Analisi del processo di estrusione di leghe leggere con il
software Qform: validazione e previsione della
microstruttura

CANDIDATO
Pietro Albonetti

RELATORE
Chiar.mo Prof. Lorenzo Donati

CORRELATORE
Ing. Claudia Bandini

Anno Accademico 2013/2014
Sessione II

SOMMARIO

INTRODUZIONE	3
1 . I MODELLI DI ATTRITO DI SIEBEL E DI LEVANOV	5
2 . VALIDAZIONE SIMULAZIONI DELLE PROVE DI VISIOPLASTICITA'	11
2.1 DESCRIZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI	11
2.2 SIMULAZIONI DI VISIOPLASTICITA'	17
2.3 OTTIMIZZAZIONE DEI VALORI	29
2.4 DISCUSSIONE E CONDIZIONE MIGLIORE	47
3 . PREVISIONE DELLA MICROSTRUTTURA	55
3.1 DESCRIZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI	55
3.2 SIMULAZIONI DI MICROSTRUTTURA E SVILUPPO SUBROUTINE	60
3.3 CONFRONTO DATI E DISCUSSIONE	74
CONCLUSIONI.....	85
BIBLIOGRAFIA.....	87

INTRODUZIONE

L'utilizzo delle leghe di alluminio a livello industriale è ad oggi ampiamente diffuso. Infatti, già da decenni, tale materiale è stato utilizzato non solo in applicazioni di nicchia, ma anche in settori più diffusi, in virtù delle numerose proprietà che ne rendono vantaggioso, e in certi casi indispensabile, l'impiego. L'elevato livello di industrializzazione dei processi di lavorazione dell'alluminio, tra cui quelli di deformazione plastica come estrusione, forgiatura e stampaggio, ha reso necessario l'utilizzo di software che permettano di simularne tutte le fasi in modo sempre più accurato e veloce. Infatti, al fine di ridurre i tempi di industrializzazione legati alle lunghe campagne sperimentali per la messa a punto dei processi e dei macchinari, l'uso di programmi e modelli sempre più precisi può risultare vincente per garantire la competitività in un settore così concorrenziale. E' quindi fondamentale ricercare ed utilizzare software che svolgano simulazioni tramite modelli validati, quanto più simili alla realtà ed in grado di fornire il maggior numero possibile di informazioni sul pezzo finito. In particolare una delle caratteristiche che maggiormente influenza le proprietà meccaniche ed estetiche di un pezzo è la microstruttura, per cui poterne prevedere l'evoluzione comporta certamente notevoli vantaggi in fase di industrializzazione.

A tale fine il gruppo di tecnologie e sistemi di lavorazione del Dipartimento di Ingegneria Industriale D.I.N dell'Università di Bologna ha compiuto in collaborazione con il Dipartimento IUL della TU di Dortmund, negli ultimi anni, due campagne sperimentali effettuando processi di estrusione di leghe di alluminio. Nella prima, utilizzando leghe AA6060 e il metodo della visioelasticità, sono stati raccolti dati volti a ricavare le condizioni di attrito di tali processi, tramite confronto con valori ottenuti in simulazioni agli elementi finiti. Nella seconda, utilizzando invece una lega AA6082, è stata valutata la microstruttura al fine di permettere, tramite programmi agli elementi finiti, la determinazione di correlazioni fra variabili che prevedano la dimensione della microstruttura della lega stessa a seguito di lavorazioni per deformazione plastica.

Basandosi quindi su queste prove sperimentali e utilizzando il software "QuantorForm versione 7.2.4", è stato svolto il lavoro di tesi finalizzato a conseguire i seguenti obiettivi:

- individuare il modello di attrito che si sviluppa nei processi di estrusione analizzati per la lega di alluminio AA6060;
- determinare i parametri di settaggio ottimale del software, confrontando i risultati ottenuti nelle simulazioni con quelli sperimentali;
- determinare le curve che descrivono la dimensione di un grano cristallino di AA6082 in funzione della deformazione;
- implementare come subroutine in Qform, tramite l'uso del linguaggio "Lua", il modello di microstruttura ottenuto.

L'elaborato è stato suddiviso in tre sezioni. Nella prima si richiamano brevemente e vengono confrontati, ai fini del successivo utilizzo, i modelli di attrito presenti in letteratura proposti dal programma. Nella seconda vengono sviluppate in Qform le prove sperimentali di visioelasticità in modo da ottenere il modello di attrito maggiormente corrispondente alla realtà e una ottimizzazione dei parametri di simulazione. Infine nella terza, utilizzando i modelli di attrito e i parametri ottimizzati nella parte precedente, vengono determinate e implementate nel software le correlazioni "deformazione – spessore grano cristallino" e "deformazione – lunghezza grano cristallino" per leghe AA6082.

1 . I MODELLI DI ATTRITO DI SIEBEL E DI LEVANOV

Le indagini che sono state svolte nelle sperimentazioni riportate nei capitoli successivi si basano su modelli di attrito che è necessario richiamare, in maniera tale da permettere una migliore comprensione del lavoro svolto.

Durante i reali processi di estrusione si genera attrito tra le pareti della billetta e quella degli utensili (pistone, contenitore e matrice) che viene simulato sul codice impostando una certa condizione di lubrificazione; la corretta impostazione dell'attrito è fondamentale perché è fortemente condizionato da:

- Pressione di contatto
- Velocità relativa
- Materiali
- Rugosità
- Lubrificanti
- Temperatura
- Cambiamento di forma delle superfici

A sua volta la condizione di lubrificazione influenza invece:

- Scorrimento del materiale
- Generazione di calore sulle zone di scorrimento
- Carico di estrusione

Risulta quindi evidente come l'utilizzo di diversi modelli di attrito porti a risultati anche molto differenti tra loro. La loro analisi e la determinazione del modello più simile alla realtà è, per questo motivo, un punto fondamentale in ogni simulazione.

In processi in cui non si ha una deformazione plastica del materiale (quindi con basse pressioni in gioco) si utilizza generalmente il modello di Coulomb il quale ipotizza una dipendenza lineare tra la tensione tangenziale di attrito " τ " e la pressione normale " σ_n ":

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n \quad \mu = \text{coefficiente di attrito}$$

con $0 < \mu < \frac{1}{\sqrt{3}}$. Come mostra la “Figura 1.1”, in caso di basse pressioni, si ottengono microscopicamente delle zone puntuali di contatto che a causa della pressione in gioco si saldano. Qualora si cerchi di fare scorrere i due materiali, si generano delle tensioni tangenziali causate dalla rottura delle microsaldature generatesi che provocano quindi l’attrito.



FIGURA 1.1: SALDATURE PUNTUALI IN CASO DI BASSE PRESSIONI RECIPROCHE

Quando invece a causa della maggiore pressione normale agente sui due materiali le aree di contatto diventano estese, a causa della plasticizzazione del materiale, è necessario utilizzare differenti modelli di attrito. In questo caso infatti le saldature sono così forti che lo scorrimento non avviene più per la rottura delle microsaldature nella zona di contatto, ma per lo scorrimento dei piani reticolari del pezzo in lavorazione (in quanto molto più tenero dell’utensile) sotto la zona di contatto stessa.



FIGURA 1.2: AREA DI SALDATURA E ZONA DI SCORRIMENTO SOTTOSTANTE

In questo caso si utilizzano dei modelli di attrito che non dipendono più dalla pressione normale, ma dalla tensione equivalente del materiale “ $\bar{\sigma}$ ”. I modelli che per questo motivo vengono proposti dal software Qform per descrivere l’attrito nei processi di deformazione plastica, in cui la pressione raggiunge valori più elevati della resistenza a snervamento, sono due: il modello di attrito di Siebel e il modello di Levanov.

Secondo il modello di Siebel la tensione tangenziale che si genera tra la superficie dell’utensile e quella del pezzo dipende soltanto dal coefficiente di attrito “ m ” e dalla resistenza a taglio “ $\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$ ” del materiale del pezzo in lavorazione (quindi soggetto alla deformazione plastica), in cui “ $\bar{\sigma}$ ” indica il flusso plastico. L’equazione che quindi definisce il modello di Siebel è la seguente:

$$\tau_{Siebel} = m \cdot \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$$

con $0 < m < 1$ (coefficiente di attrito); se $m=0$ siamo in condizioni di assenza di attrito, mentre se $m=1$ siamo in condizioni di perfetta aderenza. Come si può dedurre dalla formula l’andamento descritto da tale modello non dipende dalla pressione, pertanto sul grafico $\sigma_n - \tau$ il modello è rappresentato da una retta parallela all’asse delle ascisse. In base a questo modello, la tensione tangenziale di attrito non varia appunto al variare della pressione presente all’interfaccia, in particolare si ritiene piuttosto impreciso quando è utilizzato per modellare condizioni di basse pressioni.

Invece secondo il modello di Levanov l’andamento che determina la tensione tangenziale non è costante, ma varia in funzione della pressione normale “ σ_n ”. In questo caso è possibile avere un modello di attrito valido anche laddove la pressione sia bassa e quindi le zone di contatto siano puntuali (infatti per pressioni basse l’andamento segue il modello di Coulomb). L’equazione che permette di determinare la tensione tangenziale è quindi la seguente:

$$\tau_{Levanov} = m \cdot \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 - e^{-n \frac{\sigma_n}{\bar{\sigma}}} \right)$$

con $m > 0$ (coefficiente di attrito) e $0 < n < 1,25$ (coefficiente di Levanov).

Al fine di operare un confronto, in “Figura 1.3” si riporta il grafico con gli andamenti dei vari modelli di attrito in caso di $m=0.8$; $n=1.25$; $\mu=0,4$; $\bar{\sigma}=300$ MPa. Si noti come il modello di Coulomb definisca una relazione lineare tra pressione normale e tensione tangenziale con inclinazione data da μ mentre il modello di Levanov approssimi per σ_n basse il modello di Coulomb tendendo poi asintoticamente al valore costante definito dal modello di Siebel per valori di σ_n crescenti. Si vede come i modelli di Siebel e di Levanov risultino equivalenti nel caso in cui i valori di σ_n siano elevati. Questa condizione sarà proprio quella che si avrà nelle prove riportate nei capitoli successivi. Per questo motivo, a parità di coefficiente “m”, l’utilizzo di modello di Siebel o Levanov sarà indifferente.

In “Figura 1.4” è possibile invece osservare il comportamento del modello di attrito di Levanov al variare dell’esponente n (in caso di valori negativi, maggiori e minori di 1) sempre per $\bar{\sigma}=300$ MPa.

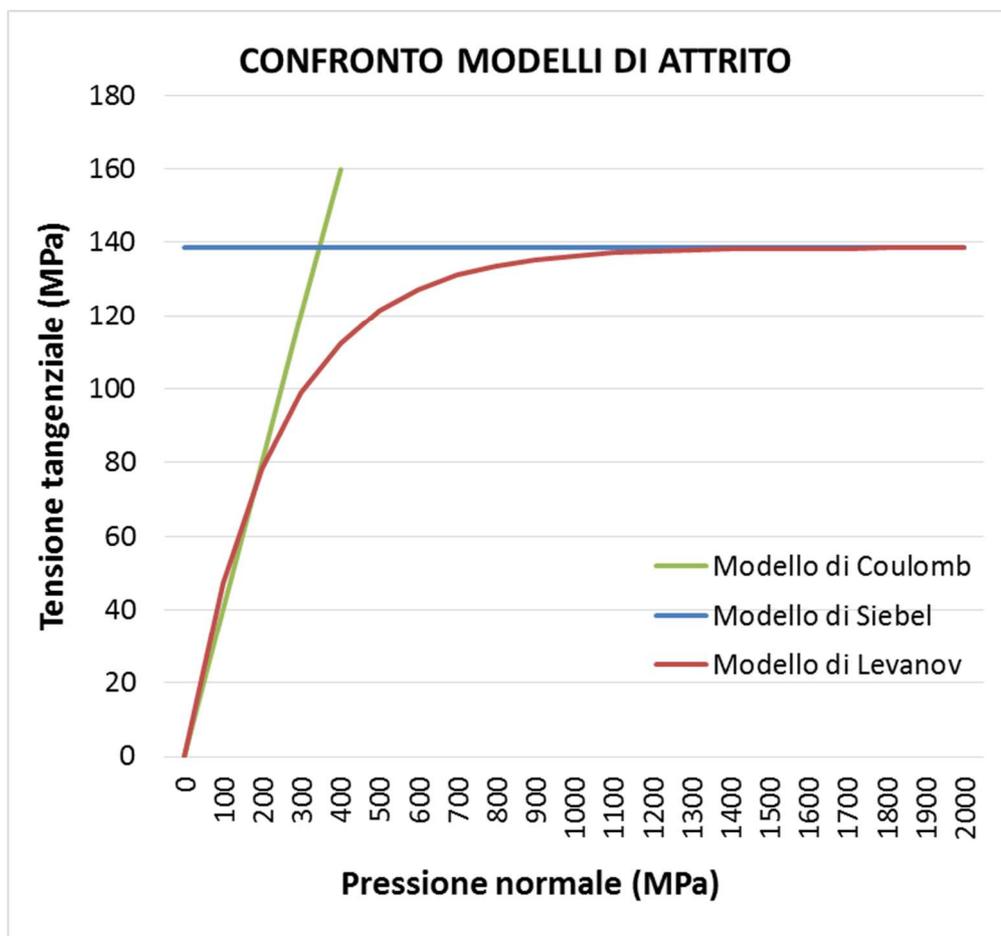


FIGURA 1.3: CONFRONTO TRA I MODELLI DI ATTRITO DI COULOMB, SIEBEL E LEVANOV

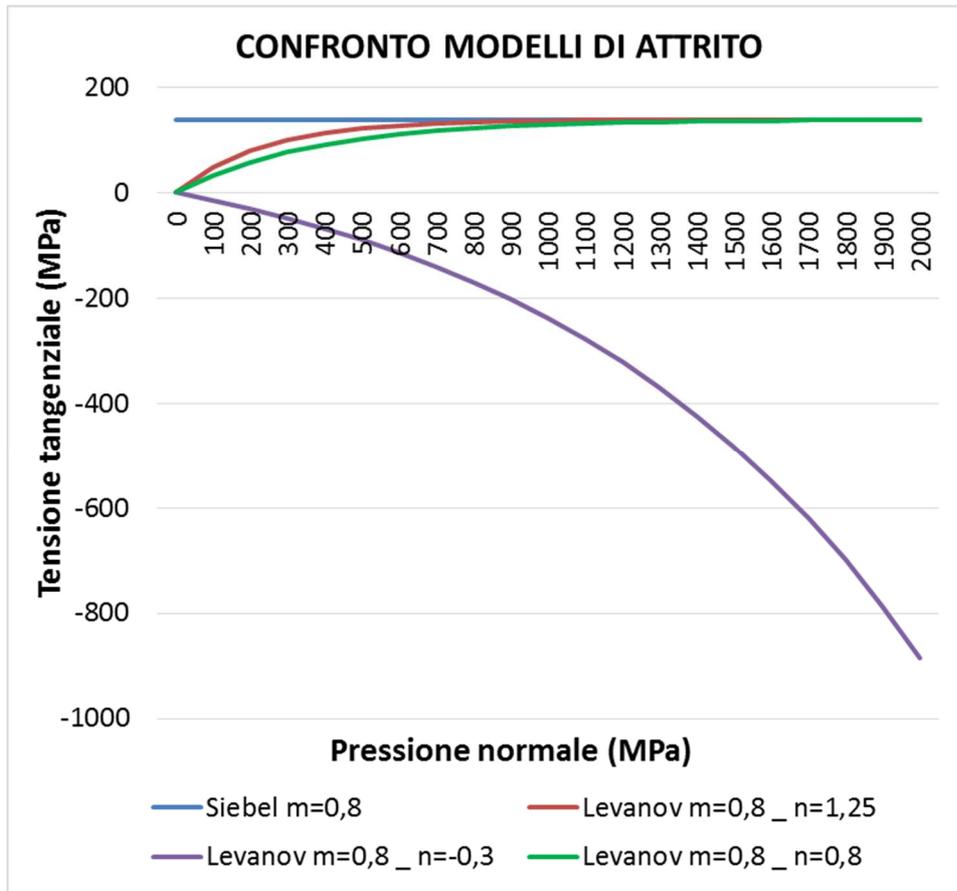


FIGURA 1.4: ANDAMENTO DEL MODELLO DI LEVANOV AL VARIARE DELL'ESPONENTE "N"

Seppur la formulazione matematica dei modelli implementati in Qform sia la stessa di quella presente in letteratura, il range di validità e utilizzo dei coefficienti non corrisponde. La "Figura 1.5" mostra infatti come variano le condizioni di attrito nel modello di Levanov implementato dal codice al variare del coefficiente m; se in letteratura a $m=1$ corrisponde completa adesione, in questo caso invece viene simulata una condizione di marcato scorrimento. Questo disallineamento implica appunto l'esigenza di validare il software.

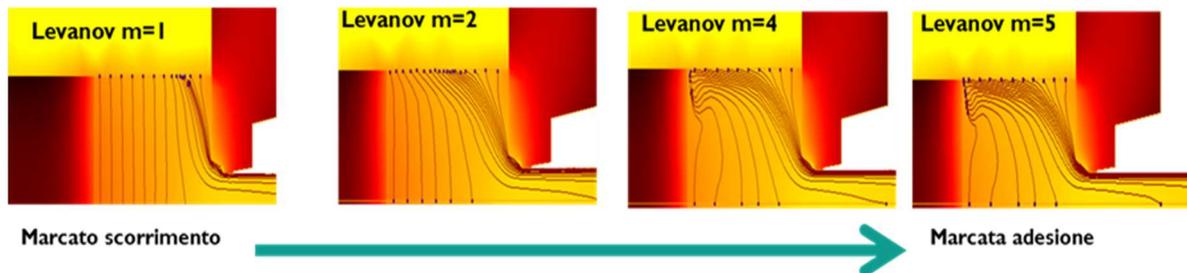


FIGURA 1.5: ANDAMENTO DELLE LINEE DI FLUSSO ALL'AUMENTARE DEL COEFFICIENTE DI ATTRITO

2 . VALIDAZIONE SIMULAZIONI DELLE PROVE DI VISIOPLASTICITA'

2.1 DESCRIZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI

Le prove sperimentali di visioelasticità, che sono state riprodotte tramite l'utilizzo del software Qform, sono state condotte nel 2006 dal gruppo di tecnologie e sistemi di lavorazione del Dipartimento di Ingegneria Industriale D.I.N dell'Università di Bologna presso "Institute of Forming Technology and Lightweight Construction" dell'Università di Dortmund (Germania). L'obiettivo è quello di ricavare dati sull'andamento del flusso del materiale nei processi di estrusione in modo da poter dedurre, tramite l'uso di codici di calcolo agli elementi finiti, i modelli di attrito all'interfaccia billetta-utensile che meglio rispecchino le condizioni reali. I modelli così validati potranno poi essere utilizzati per svolgere simulazioni di interesse industriale.

Tali prove consistevano nell'estrusione diretta, tramite una pressa SMS-Schoemann da 10 MN, di billette di AA6060 (AlMgSi 0.5) di 293mm di lunghezza e 138mm di diametro.



FIGURA 2.1.1: PRESSA UTILIZZATA PER L'ESTRUSIONE

Si parla di esperimento di visioelasticità perché ogni billetta presentava 19 fori di 5mm di diametro distribuiti in maniera equi-spaziata alla distanza reciproca di 15mm, riempiti con bacchette di AA4043 (AlSi 5.5). La scelta di tale materiale di riempimento è stata fatta in quanto la tensione di flusso dei due materiali alle elevate temperature dell'esperimento

risulta molto simile. E' stata utilizzata una matrice di profilo circolare di diametro di 36,5mm come si può vedere dalla "Figura 2.1.2".

Sono stati quindi condotti cinque esperimenti utilizzando i diversi parametri riportati in "Tabella 2.1.1".

Ogni billetta è stata prima preriscaldata per 10 ore in forno in modo da giungere all'omogena temperatura di 450°C ed è stata poi, a seguito del caricamento, 1 minuto in aria e successivamente 1 minuto a contatto con matrice, contenitore e pistone prima dell'inizio del processo di estrusione.

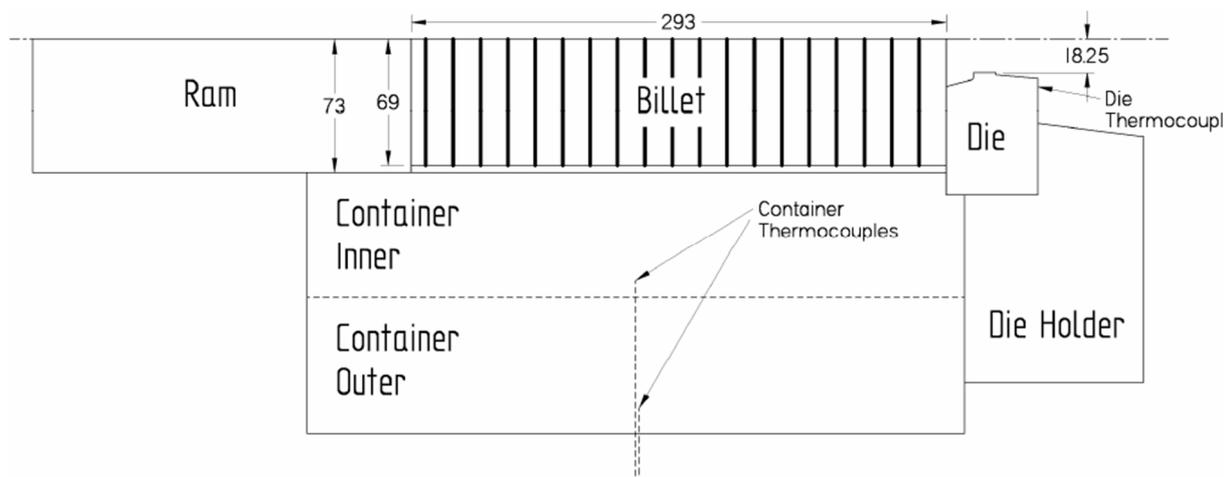


FIGURA 2.1.2: DISEGNO PRESSA E BIELLETTA (ASSIAL SIMMETRIA)

	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
BILLETTA UTILIZZATA	No bacchette	Billetta con bacchette	Billetta con bacchette	Billetta con bacchette	Billetta con bacchette
CORSA PISTONE	Corsa massima (290mm)	Corsa massima (290mm)	Metà corsa (150mm)	Metà corsa (150mm)	Corsa di 175mm
VELOCITA' PISTONE	2mm/sec	2mm/sec	2mm/sec	5mm/sec	2mm/sec

TABELLA 2.1.1: PIANO DELLE PROVE SPERIMENTALI

Durante ogni esperimento sono stati rilevati i seguenti dati, utili per la successiva validazione delle prove FEM, i cui andamenti nei differenti test sono visibili in "Figura 2.1.3":

- velocità del pistone;

- posizione del pistone;
- temperatura della matrice;
- temperatura del profilo, misurata a 1 metro di distanza dalla matrice tramite l'impiego di due termocoppie di 1mm di diametro a contatto con il profilo di uscita;
- carico del pistone.

Al termine di ogni test è inoltre stata misurata la temperatura del pistone che è risultata pari a $305 \pm 5^\circ\text{C}$.

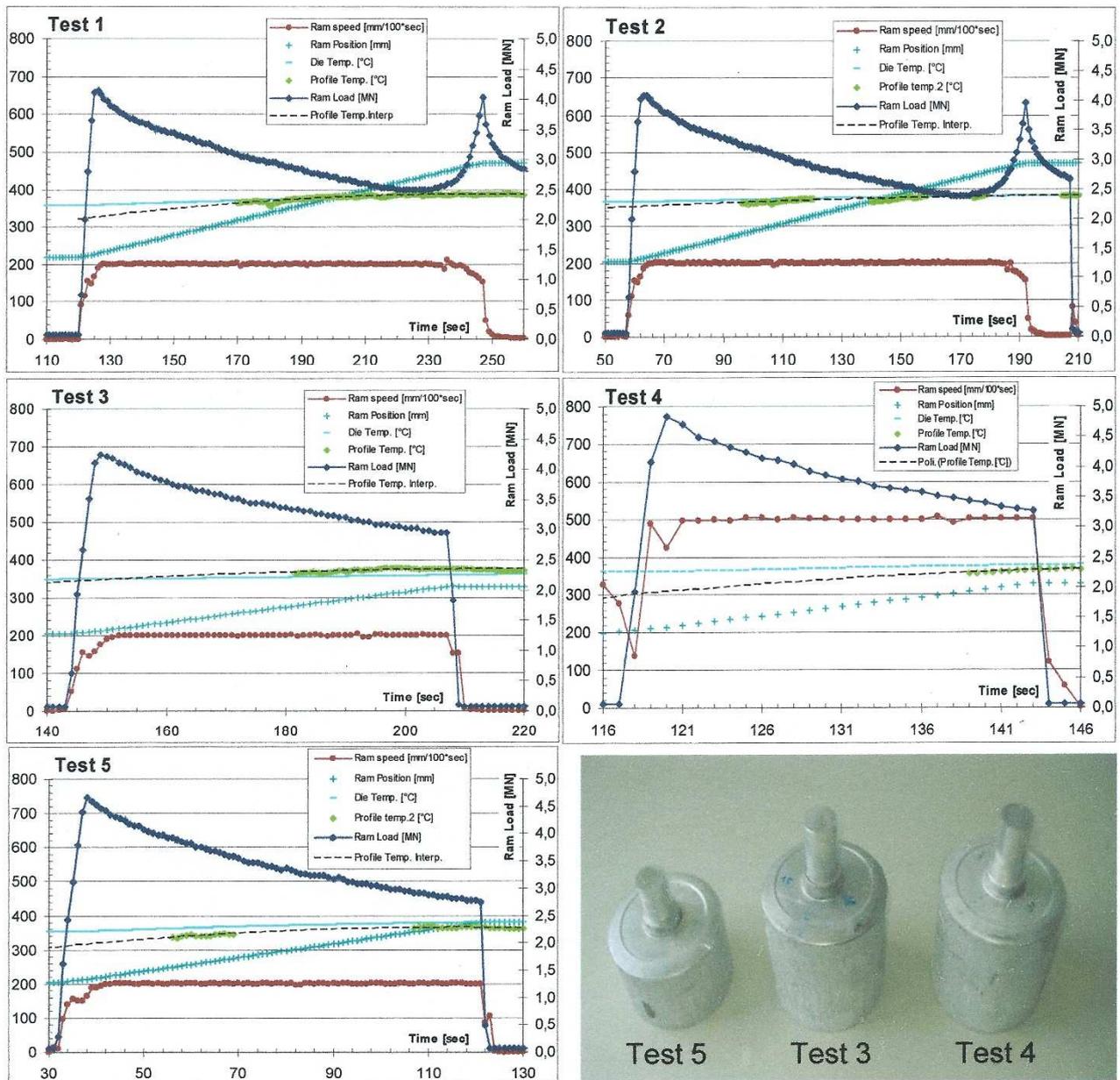


FIGURA 2.1.3: DATI SPERIMENTALI PROVE DI VISIOPLASTICITÀ

L'obiettivo delle differenti prove è il seguente. I TEST 1 e 2 dovevano validare il processo di visioelasticità cioè verificare che la presenza delle bacchette di AA4043 non alterasse il comportamento della billetta all'interno della quale erano inserite (verificato dalla coincidenza dei grafici rilevati nel corso delle due prove).

I TEST 3, 4 e 5 invece sono stati svolti per ricavare i dati utili per la successiva determinazione dei modelli di attrito che si hanno durante il processo in esame.

Nel processo di visioelasticità il modello di attrito si deduce dalla posizione delle linee di flusso del materiale in corrispondenza dei punti a contatto con le superfici di attrito (contenitore e matrice) alla fine del processo. Evidentemente, più l'attrito è elevato e maggiore sarà l'adesione tra billetta e contenitore. In questi esperimenti le linee erano visibili grazie alla presenza delle bacchette di un materiale differente. Al termine di ogni estrusione infatti la billetta è stata estratta dal contenitore e tagliata radialmente lungo il



FIGURA 2.1.4: BILLETTE DOPO IL TAGLIO E LA LUCIDATURA, BILLETTA PRIMA DEL PROCESSO DI ESTRUSIONE

piano delle bacchette. A seguito di una lucidatura di tale superficie è stato così possibile distinguere i diversi materiali e vedere le linee di flusso date dalle bacchette.

Una volta distinte le linee di flusso, per analizzare l'effetto dell'attrito, è stato definito un "indice di attrito R" dato dal rapporto tra la distanza finale tra bacchetta e base del contenitore e quella all'inizio del processo per la bacchetta considerata. In condizione di aderenza, tale parametro assume valore unitario in quanto la bacchetta non ha avuto

nessun movimento rispetto al contenitore; al contrario tale valore cala al calare dell'attrito tra billetta e contenitore per lo scorrimento della billetta.

Per i TEST 3, 4 e 5 sono state quindi misurate le posizioni finali delle bacchette nella parte a contatto con il contenitore ed è stato ricavato l'indice "R" il cui andamento nelle diverse prove è riportato in "Figura 2.1.5". Le bacchette sono state numerate a partire da quella più vicina alla matrice.

Come si può dedurre dai grafici, nel TEST 3 il valore di "R" per la prima bacchetta è 0.8 a causa dell'incremento del diametro della billetta sino al valore del diametro del contenitore (maggiore per permettere l'inserimento della billetta stessa grazie alla presenza di un minimo gioco). Dalla bacchetta 3 alla 6 si ha invece un valore unitario di "R" segno che le loro estremità non si sono mosse durante tutto il processo di estrusione. Dalla 7 alla 10 invece si nota un lieve calo dell'indice "R", per cui è avvenuto un piccolo scorrimento a causa dello spostamento imposto dal pistone. Infine dalla bacchetta 11 alla 19 notiamo, a causa della vicinanza con il pistone, un forte calo di "R" sino ad un valore pari a 0.5, indice un elevato scorrimento.

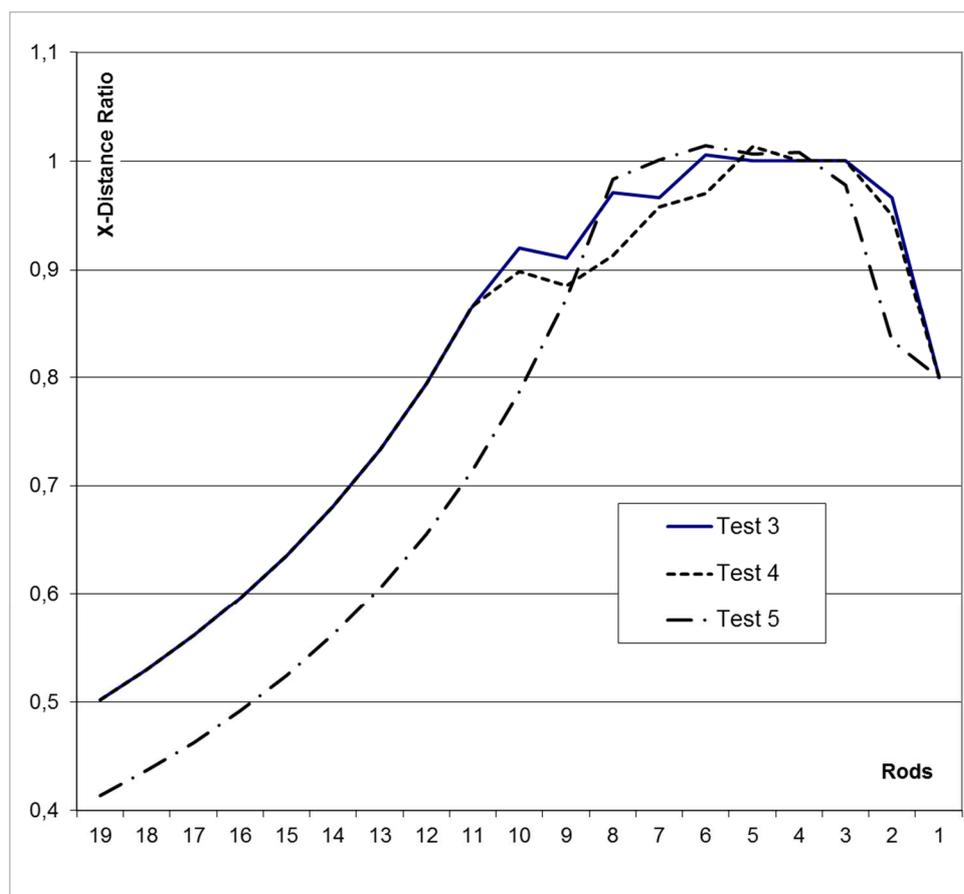


FIGURA 2.1.5: GRAFICO "NUMERO BACCHETTA (RODS)" - "R (X-DISTANCE RATIO)"

Confrontando i grafici relativi ai TEST 3 e 4 si nota come l'incremento della velocità di estrusione (passata da 2 a 5 mm/s) non abbia influenzato particolarmente "R".

Invece nel TEST 5, a causa dell'aumento di corsa, più bacchette sono state costrette a scorrere a causa della presenza del pistone. Si nota quindi per quelle dalla 9 alla 19 un calo di "R" di circa 0.1 rispetto agli altri due TEST.

Queste evidenze sperimentali hanno quindi permesso di generalizzare tali grafici per diverse corse del pistone ("Figura 2.1.6").

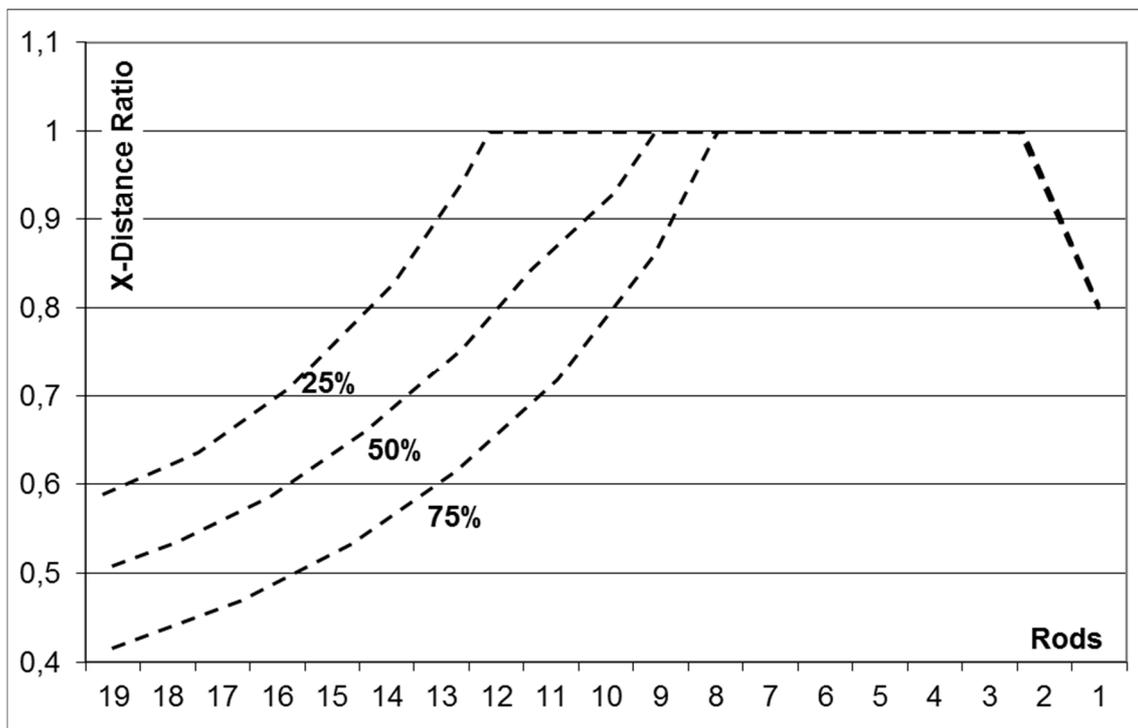


FIGURA 2.1.6: ANDAMENTO PREVISTO DI R AL VARIARE DELLA % DI CORSA DEL PISTONE

Grazie all'insieme di dati raccolti in queste prove è quindi possibile ricavare, tramite simulazioni FEM, i modelli di attrito che meglio riproducano l'andamento rilevato sperimentalmente.

2.2 SIMULAZIONI DI VISIOPLASTICITA'

Per determinare il modello di attrito che meglio approssima l'andamento rilevato nelle prove sperimentali precedentemente descritte, sono stati riprodotti tali esperimenti con l'utilizzo del software per la simulazione di processi di deformazione plastica "QuantorForm versione 7.2.4".

Di recente uscita e tutt'ora in fase di perfezionamento il software annovera tra le sue funzioni principali la possibilità di simulare processi di:

- laminazione;
- estrusione 3D;
- stampaggio 2D e 3D;
- forgiatura a matrice aperta o chiusa;
- forgiatura a caldo e a freddo;
- deformazione plastica congiunta di diversi corpi (es. rivetti);
- formatura di materiali porosi;
- idroformatura;
- trattamento termico e analisi microstrutturale.

Rispetto ad altri software concorrenti si distingue per la sua elevata flessibilità. Infatti, grazie alla divisione tra "pre e post processing" permette di effettuare simulazioni molto rapide in cui vengono ricavate prima le variabili fondamentali del processo (tensioni, temperature...) e, solo successivamente, dà all'utente la possibilità di calcolare ulteriori variabili. Ad esempio le linee di flusso del materiale vengono simulate in un secondo momento. In questa maniera, una volta effettuata una simulazione, è possibile ricavare da essa ulteriori variabili, senza bisogno di doverla rilanciare.

Inoltre, tramite l'utilizzo di "subroutine" permette di avere in uscita non solo le variabili di processo già presenti, ma anche quelle definite e implementate dall'utente.

Utilizza poi una potente interfaccia grafica che permette di visualizzare il processo e i risultati ottenuti con una elevata qualità e definizione.

Per ricavare a partire dai dati sperimentali il modello di attrito e conseguentemente i parametri di simulazione che ottimizzavano il funzionamento del software, è stato

effettuato un confronto tra i risultati delle simulazioni ottenuti con Qform e quelli sperimentali.

In particolare sono tre i fattori che sono stati presi in considerazione per validare il software: “R”, la curva di carico e le temperature di uscita del profilo a 1 metro dal bearing. Il confronto tra i grafici di “R” validava il modello di attrito: infatti la coincidenza tra valori sperimentali e quelli ottenuti con Qform indica che le condizioni di aderenza della billetta nelle due prove sono le medesime.

La curva di carico e le temperature di uscita invece confermavano che effettivamente il software, con le condizioni iniziali ed i parametri di simulazione impostati, ricreasse il processo in maniera quanto più possibile simile alla realtà.

Considerando la variabilità dei valori sperimentali (a parità di condizioni iniziali diverse estrusioni daranno risultati leggermente differenti) ci si è posti inizialmente dei range entro i quali considerare corretti i valori in uscita dati dal software relativamente alle varie prove di visioelasticità. Essi sono riassunti in “Tabella 2.2.1”.

Numero bacchetta - R	Carico di estrusione	Temperatura di uscita
±0%	±15%	±20%

TABELLA 2.2.1: TOLLERANZE RISPETTO AI DATI SPERIMENTALI

Punto di partenza delle prove è stata la creazione della geometria. Essendo il processo in esame assialsimmetrico, il disegno richiesto dal software è la sezione dell’insieme billetta, contenitore, matrice e pistone. Dopo varie prove, la scelta della geometria da utilizzare è ricaduta su di una precedentemente utilizzata dal DIEM per l’analisi di tale esperimento di visioelasticità su altri software (“Figura 2.2.1”), in modo da permettere un futuro confronto tra i risultati ottenuti. A partire quindi dal formato “.dxf” la geometria è stata importata su “Qdraft” (il software interno a QForm per la creazione delle geometrie) e sono stati quindi definiti i vari strumenti (TOOL) e il pezzo in lavorazione (WORKPIECE). Da notare che per effettuare questa operazione, dopo aver importato la geometria, è necessario verificare che i contorni siano perfettamente chiusi, altrimenti il programma non riuscirà a distinguere le varie parti del disegno.

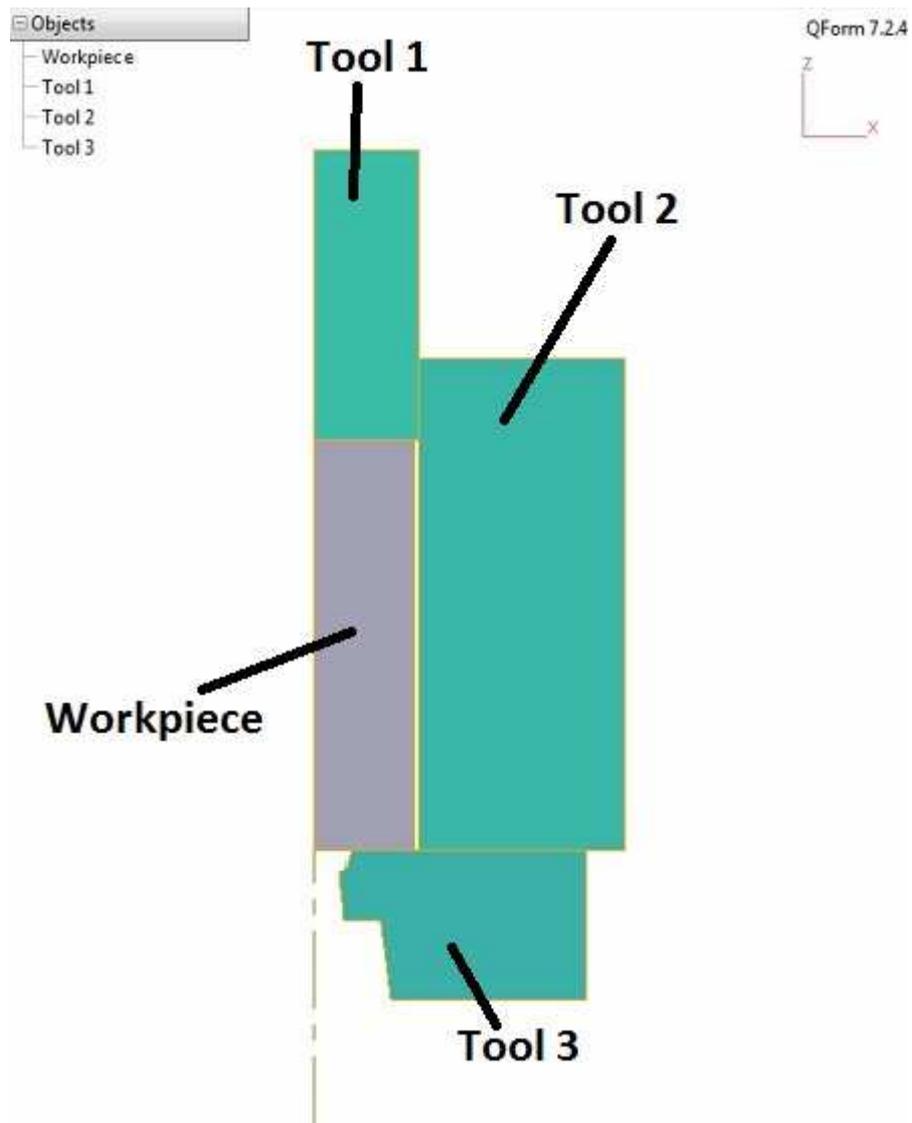


FIGURA 2.2.1: GEOMETRIA UTILIZZATA

Da notare che tale geometria presenta particolari accorgimenti:

- la matrice e il relativo afferraggio sono rappresentati come un unico pezzo per evitare complicazioni in fase di simulazione;
- è stato trascurato il gioco tra il pistone e il contenitore (che si ha nelle prove reali) per evitare trafilamenti di materiale durante la simulazione (entrambi sono stati posti a $\phi 146$ mm);
- è stato posto un raggio di raccordo sullo spigolo interno della matrice (pari a 0,20 mm) per evitare di ottenere un profilo dell'estruso non lineare.

Per rappresentare le bacchette di AA4043 e quindi per valutare lo scorrimento del materiale sono state disegnate nella billetta 19 linee tramite l'apposito comando "Create

lines array” presente nella sezione “Tracked point, lines” del menu di Qform (“Figura 2.2.2”).

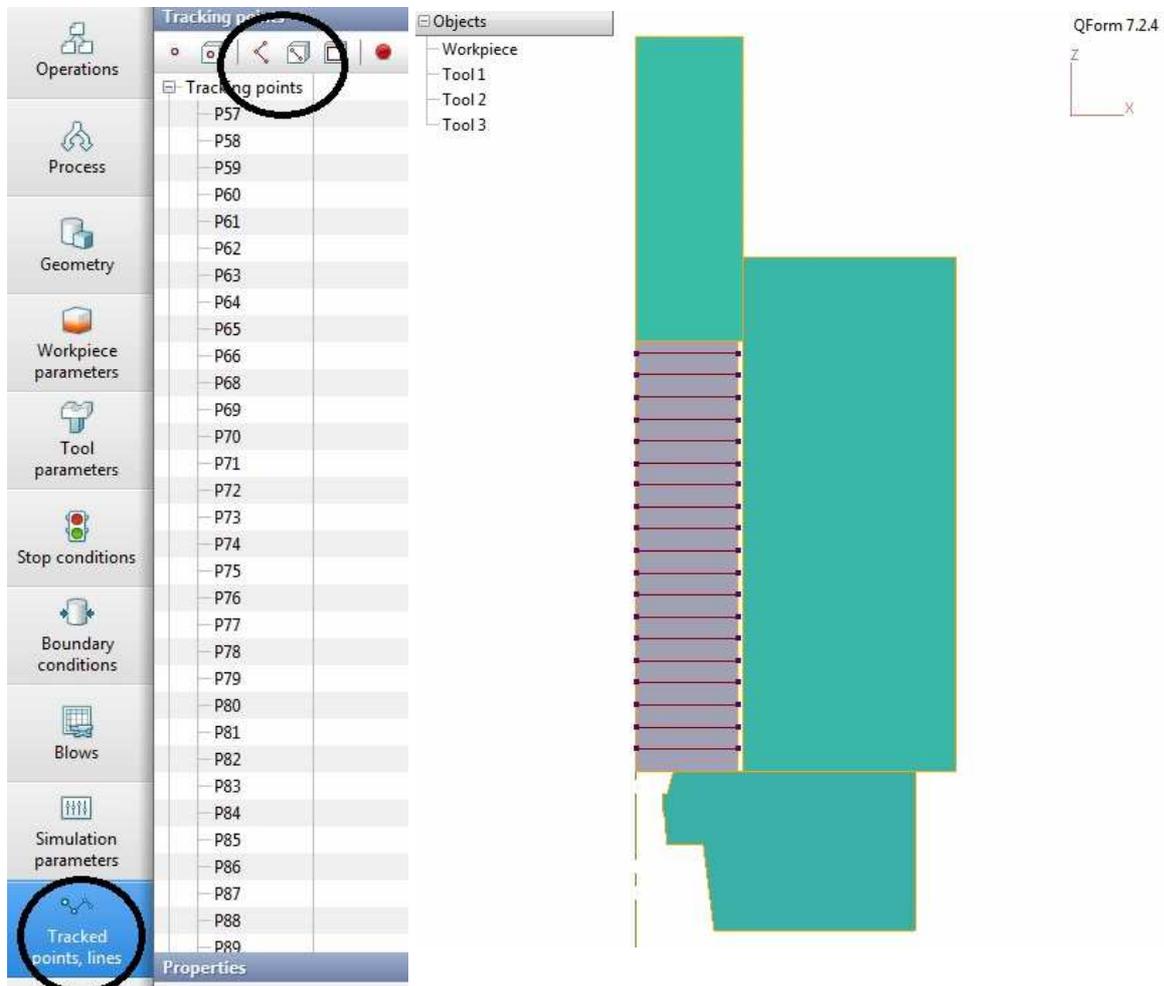


FIGURA 2.2.2: GEOMETRIA CON ARRAY DI LINEE

Ultimata quindi la geometria, sono state impostate le varie condizioni al contorno di seguito analizzate:

PROCESS (condizioni generali del processo in esame):

General forming with thermal process

Problem type 2D axisymmetric

WORKPIECE PARAMETERS (voci principali):

MATERIAL

Permette di impostare le caratteristiche del materiale tra cui la tensione di flusso (flow stress). Essa può essere inserita in due modi: o in maniera tabulata oppure tramite la formula di Hensel e Spittel (H-S).

Qualora si utilizzi il metodo tabulato è necessario creare tabelle tramite Excel che riportino, per il materiale considerato, i valori di deformazione in funzione della velocità di deformazione al variare della temperatura. Il formato della tabella è standardizzato e facilmente reperibile nel manuale del software.

400°C	0,1	1	10
0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
0,06	31,25	39,4	41,4
0,3	34,1	44	49,8
0,5	34,1	45,1	53,4
0,8	33,4	44,9	53,8
1	32,6	44,1	53,3
2	31	40,8	50,2
4,8	27,3	36,8	41,2

450°C	0,1	1	10
0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
0,06	21,5	19,5	27,6
0,3	22,1	24,4	33,22
0,5	21,84	24,8	37,3
0,8	21,1	25,7	37,9
1	21	23,1	36,1
2	19,4	21,5	34,3
4,8	18	19,8	30,7

500°C	0,1	1	10
0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
0,06	18,3	12,8	25,9
0,3	18,4	18,7	32,3
0,5	18	18,8	33,7
0,8	17,7	17,7	33,7
1	17,4	16,5	32,7
2	16,8	15,7	30,3
4,8	15,7	13,9	27,7

TABELLA 2.2.2: TENSIONE DI FLUSSO AA6060 IN FORMA TABULATA (STRAIN - STRAIN RATE [1/s])

Il programma, interpolando i valori inseriti, realizza il grafico dell'andamento della tensione di flusso ("Figura 2.2.3").

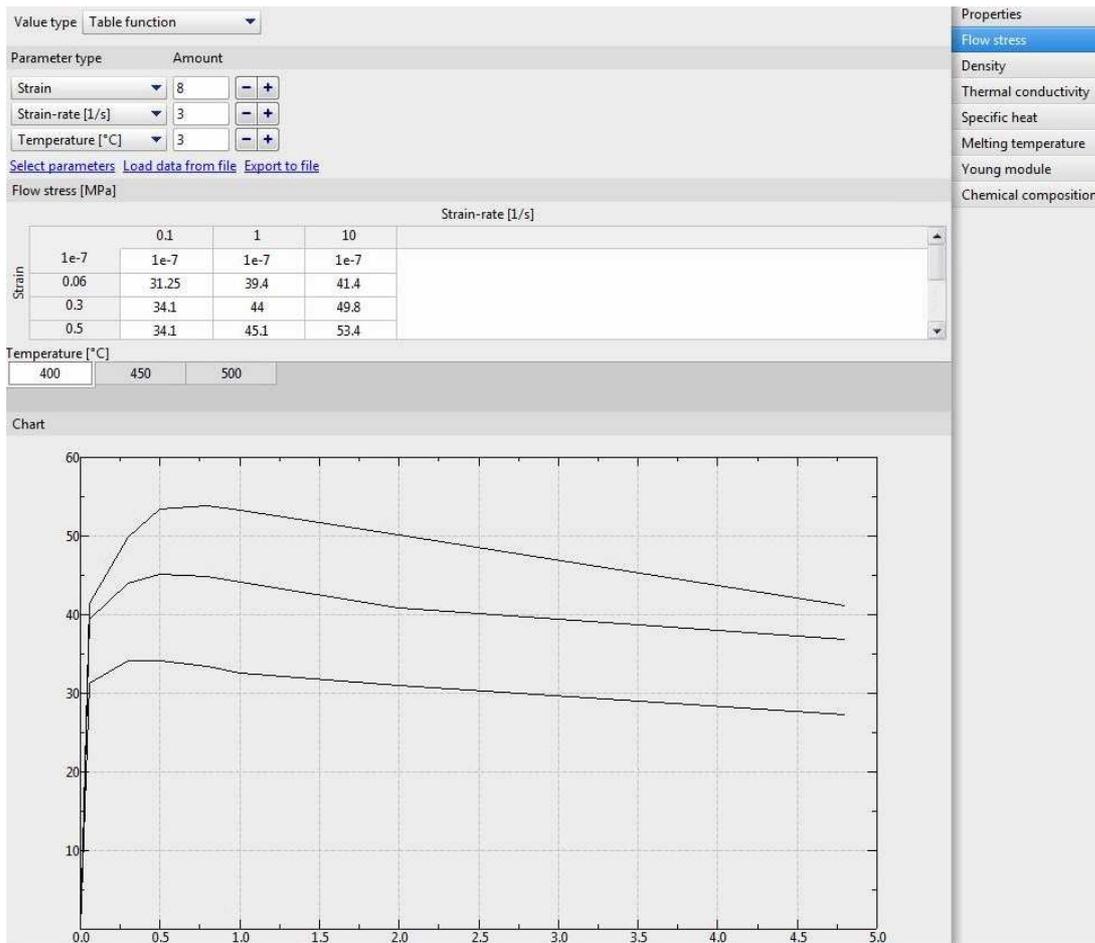


FIGURA 2.2.3: TENSIONE DI FLUSSO RILEVATA DA QFORM AA6060

Con il la formula proposta dai ricercatori Hensel e Spittel è invece necessario implementare la formula

$$\bar{\sigma} = A e^{m_1 T} T^{m_2} \bar{\epsilon}^{-m_3} e^{\frac{m_4}{\bar{\epsilon}}} (1 + \bar{\epsilon})^{m_5} T e^{m_7 \bar{\epsilon}} \dot{\bar{\epsilon}}^{m_3} \dot{\bar{\epsilon}}^{m_8} T$$

in linguaggio "Lua" (vedi capitoli successivi) e caricarla quindi nel programma. Utilizzando i parametri (che sono stati ricavati sperimentalmente per l'alluminio considerato) $A = 7148.40$, $m_1 = -0.0075$, $m_2 = -0.0155$, $m_3 = 0.1130$, $m_4 = -0.0138$, $m_5 = -0.0002$, $m_7 = 0.0036$, $k = 273.15$ e posti uguali a zero i rimanenti, lo script risulta:

```
-- Definizione dei coefficienti

A = parameter("A", 7148.40)*1e6 - valore richiesto in MPa

m1 = parameter("m1", -0.0075)
m2 = parameter("m2", -0.0155)
m3 = parameter("m3", 0.1130)
m4 = parameter("m4", -0.0138)
m5 = parameter("m5", -0.0002)
m7 = parameter("m7", 0.0036)
k= parameter ("k", 273.15)

-- Richiamo delle funzioni dalla libreria di LUA

pow = math.pow
exp = math.exp

-- Implementazione della formula H-S per il flowstress AA6060

function FlowStress (T, strain, strainRate)

F=A*exp(m1*(T+k))*pow(strain,m2)*exp(m4/strain)*pow(1+strain
, m5*(T+k))*exp(strain*m7)*pow(strainRate, m3)
return F
end

function InitFlowStress( T, strain, strainRate)
return FlowStress(T, strain, strainRate)
end
```

L'andamento che viene così definito è il seguente:

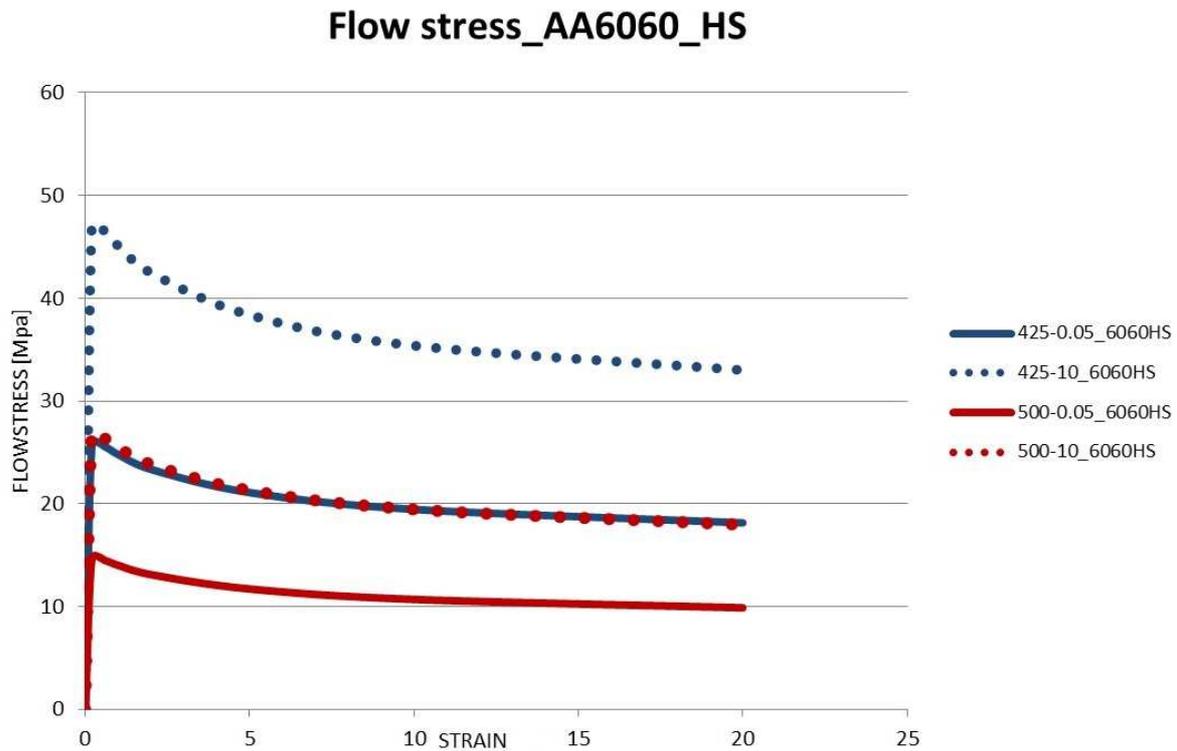


FIGURA 2.2.4: ANDAMENTO TENSIONE DI FLUSSO AA6060 CON FORMULA HENSEL-SPITTEL PER DIFFERENTI TEMPERATURE (425 – 500 °C) E VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE ($0.05 - 10 \frac{1}{s}$)

TEMPERATURE

Imposta la temperatura della billetta; posta a 450°C come in uscita dal forno nella prova sperimentale.

TOOL PARAMETERS

DRIVE

Vengono definiti i gradi di libertà dei vari componenti del disegno:

- Tool 1 (pistone): pressa idraulica con carico massimo di 50MN e velocità definita dal tipo di prova eseguita (2 o 5 mm/s) con spostamento consentito solo lungo la direzione “-Z” (“Motion direction Z=-1”) (si veda il sistema di riferimento di “Figura 2.2.1”)
- Tool 2 (contenitore): elemento fisso, nessun movimento concesso (“Drive type – Fixed – Motion direction X=0, Y=0, Z=0”)

- Tool 3 (matrice e relativo afferraggio): elemento fisso, nessun movimento concesso (“Drive type – Fixed – Motion direction X=0, Y=0, Z=0”)

LUBRICANT

Definisce il modello di attrito sui vari “TOOL” e i rispettivi coefficienti, è quindi il parametro che governerà l’andamento del grafico di “R”. I valori inseriti sono quindi stati variati sino ad individuare la condizione di attrito che desse un corretto grafico del parametro “R”.

I modelli di attrito disponibili nella libreria di Qform e utilizzati nelle prove di visioelasticità sono:

- modello di Siebel: è possibile variarne il fattore di attrito e il coefficiente di scambio termico (“Heat Transfer Coefficient” $[\frac{W}{m^2K}]$)
- modello di Levanov: è possibile variarne il fattore di attrito, il coefficiente e il coefficiente di scambio termico (“Heat Transfer Coefficient” $[\frac{W}{m^2K}]$)

(Nel capitolo successivo l’analisi dei risultati con i differenti valori utilizzati)

MATERIAL

Per tutti e tre i “TOOL” è stato utilizzato un acciaio H11 (preso dalla libreria di Qform), che essendo molto più rigido dell’alluminio permette di considerare trascurabile la deformazione degli utensili.

TEMPERATURE

Vengono definite le temperature dei vari utensili. Poste rispettivamente pari a:

- Tool 1: 305°C
- Tool 2: 450°C
- Tool 3: 350°C

Tali valori sono stati ricavati dalle prove sperimentali.

PUT IN CONTACT

Viene definito il movimento preliminare dei vari utensili. E’ stata sempre utilizzata l’opzione “Move backward first” che permette di arretrare il pistone (T1) prima di metterlo a contatto con il pezzo (W1). In questa maniera si garantisce che il pistone si trovi in una posizione corretta rispetto alla billetta ad inizio estrusione (“Figura 2.2.5”).

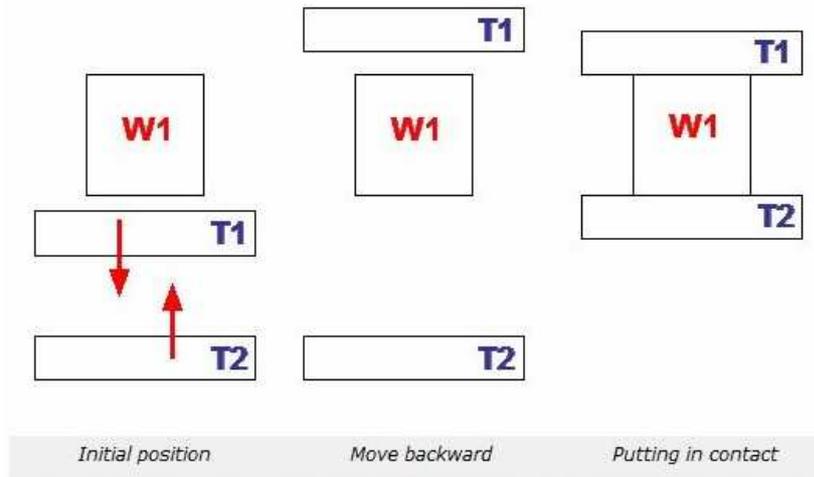


FIGURA 2.2.5: MOVIMENTO PRELIMINARE CON OPZIONE “MOVE BACKWARD FIRST”

FRICITION BETWEEN TOOLS

Definisce l’attrito tra gli utensili; è stata utilizzata l’opzione di default di Qform “Steel-steel without lubricant” che utilizza un modello di attrito Coulombiano con coefficiente pari a 0.3

HEAT TRANSFER TO WORKPIECE

Definisce lo scambio termico tra utensili e billetta. Quattro sono le opzioni disponibili:

- No transfer: nessuno scambio termico
- Simple: lo scambio termico con la billetta viene simulato solo sulla superficie dell’utensile
- Coupled: lo scambio termico con la billetta viene simulato su tutto il volume dell’utensile
- Constant temperature: la temperatura dell’utensile viene mantenuta costante

Nelle prove è stato utilizzato uno scambio di tipo “Coupled” per i Tool 1 e 3, “Simple” per il Tool 2, parametri ricavati da una analisi delle prove sperimentali.

STOP CONDITIONS:

Definisce le condizioni di arresto del pistone; è stato impostato imponendo la corsa del pistone, differente al variare della prova considerata.

BOUNDARY CONDITIONS:

Permette di definire le condizioni dell’ambiente circostante, cioè la temperatura e le caratteristiche dell’aria esterna. Inizialmente è stata utilizzata l’opzione di default “AIR

20°C” dalle caratteristiche indicate in “Figura 2.2.6”. Per una analisi dell’influenza di tale parametro si veda il capitolo successivo.

The image shows a software interface for setting simulation parameters. It consists of three vertically stacked sections, each with a checked checkbox on the left and a control element on the right. The first section is labeled 'Environment temperature' and has a dropdown menu set to 'Constant value' and a text box containing '20' followed by a degree symbol and 'C'. The second section is labeled 'Emissivity' and has a dropdown menu set to 'Constant value' and a text box containing '0.6'. The third section is labeled 'Heat transfer coefficient' and has a dropdown menu set to 'Constant value' and a text box containing '30' followed by the unit 'W/(m²·K)'.

FIGURA 2.2.6: CARATTERISTICHE AIR 20°C

BLOWS:

Definisce il numero di “colpi” del pistone, pari a 1 nel caso di una estrusione. Inoltre permette di definire il tempo di riposo della billetta in aria prima dell’inserimento all’interno della pressa e all’interno della pressa stessa prima dell’inizio del processo di estrusione. Tali parametri sono stati variati nelle diverse simulazioni, si veda quindi il capitolo successivo per i parametri utilizzati.

SIMULATION PARAMETERS:

Comprende l’insieme dei parametri di simulazione, che a differenza delle condizioni al contorno viste prima, variano caratteristiche quali la mesh, il tempo e la risoluzione della simulazione e il calore generatosi a seguito dell’attrito e della deformazione.

Infine va fatta un’ultima nota sul metodo utilizzato per la rilevazione della temperatura a 1 metro dal bearing in Qform. Grazie alla presenza all’interno del programma di uno strumento di misura, è stata determinata la posizione a cui rilevare la temperatura che è risultata, in base al posizionamento della geometria utilizzata, ad un valore di $Z=-775$. (“Figura 2.2.7”)

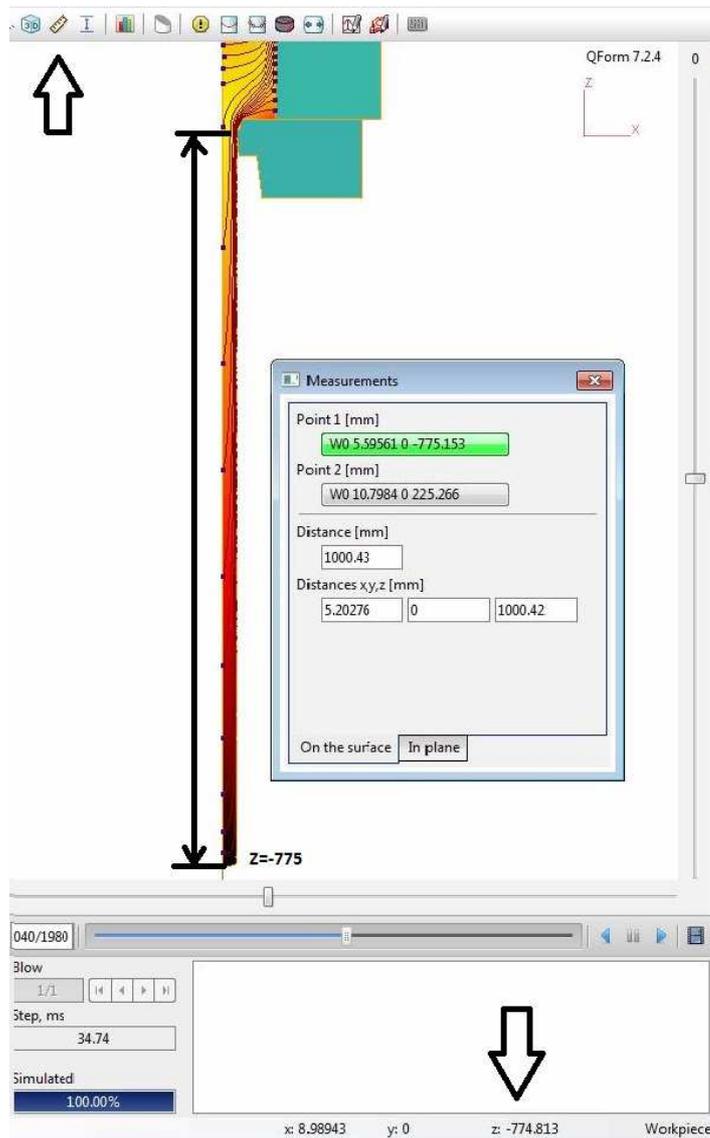


FIGURA 2.2.7: UTILIZZO DELLO STRUMENTO "MEASUREMENTS" DI QFORM PER LA DETERMINAZIONE DELLA QUOTA "Z" A 1 METRO DAL BEARING PER LA RILEVAZIONE DELLA TEMPERATURA DI USCITA

2.3 OTTIMIZZAZIONE DEI VALORI

I valori di simulazione elencati nel capitolo precedente sono stati ottimizzati, attraverso una serie di simulazioni. Per valutare l'ottimizzazione si è operato un confronto dei valori di riferimento (grafico di "R", carico di estrusione e temperatura a 1m dal bearing) tra i dati sperimentali e quelli ottenuti tramite Qform.

L'insieme delle simulazioni che sono state svolte in questa sezione (circa 40) ha inoltre permesso di valutare e studiare l'influenza dei parametri di simulazione sui risultati e quindi il comportamento del software stesso. Da osservare però che, non essendo questo lo scopo principale del lavoro, in una parte dei confronti che verranno successivamente analizzati, si ha la variazione di più di uno dei parametri. Infatti l'obiettivo principale delle varie simulazioni lanciate è stato, come precedentemente detto, quello di ottenere valori concordi con le prove sperimentali.

Punto di partenza è stata la determinazione dei parametri di mesh ottimali (SIMULATION PARAMETERS). Infatti, in assenza di una corretta impostazione della simulazione agli elementi finiti, sarebbe stato impossibile capire se eventuali discordanze con i valori sperimentali potessero essere riconducibili a errori di simulazione oppure a condizioni al contorno errate (come tensione di flusso, scambio termico...).

Nel momento in cui si deve impostare una mesh, è necessario fare attenzione principalmente a due aspetti: il tempo di simulazione (e il conseguente "peso" in MB) e la accuratezza.

I parametri di maggiore importanza su cui si può intervenire per modificare questi due aspetti sono i seguenti:

- MAXIMUM STRAIN INCREMENT: l'aumento di deformazione non può superare il valore impostato tra uno step di simulazione e il successivo. Il manuale di Qform consiglia di utilizzare il valore di 0.05 come ottimale. Sconsiglia inoltre di variare tale parametro.

- **MAXIMUM TIME STEP**: l'aumento di tempo in uno step di simulazione non può superare il valore impostato. Anche in questo caso è consigliato l'utilizzo di un valore pari a 0.5 secondi e di non modificarlo.

- **MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS**: definisce il numero massimo di iterazioni che possono essere fatte all'interno di uno step.

- **MAXIMUM NUMBER OF STEPS BETWEEN REMESHING**: definisce il numero massimo di step che possono essere svolti utilizzando la stessa mesh. Più è basso tale valore e più la soluzione sarà accurata in quanto la mesh verrà ricostruita molto più frequentemente.

Per individuare con quali parametri si ottenesse il miglior compromesso, sono state svolte una serie di prove grazie alle quali si è concluso che il parametro che maggiormente influenza l'accuratezza, la dimensione del file e il tempo della simulazione è il "**MAXIMUM NUMBER OF STEPS BETWEEN REMESHING**".

Per dimostrarne la cruciale influenza si riportano di seguito i risultati di due prove: una utilizzando parametri che dessero un risultato molto accurato (**MAXIMUM NUMBER OF STEPS BETWEEN REMESHING = 2**) e una utilizzando parametri volti a diminuire il tempo di simulazione e lo spazio occupato (**MAXIMUM NUMBER OF STEPS BETWEEN REMESHING = 8**). Si riportano poi in "Figura 2.3.1 e 2.3.2" gli altri parametri di simulazione ottimali per la mesh che sono stati individuati.

(Relativamente a "Deformation heat generation efficiency" e "Friction heat generation efficiency" si veda il seguito del capitolo)

Simulation parameters		MESH FINE
System	Manual positioning	<input type="checkbox"/>
Workpiece	Integration method	
	Explicit	<input checked="" type="radio"/>
	Implicit	<input type="radio"/>
	Step size	
	Maximum strain increment	0.05
	Maximum time step [s]	0.5
	Constant step size (strain) [s]	
	Constant step size (thermal) [s]	
	Constant step size (tool) [s]	
	Iteration	
	Velocity norm	0.03
	Stress norm	0.03
	Maximum number of iterations	20
	Mesh adaptation in workpiece	
	Adaptation factor	1
	Maximum adaptation	15
	Acceleration coefficient	1.2
	Adaptation due to velocity	<input checked="" type="checkbox"/>
	Adaptation due to strain	<input checked="" type="checkbox"/>
	Adaptation due to temperature	<input checked="" type="checkbox"/>
	Minimum element size [mm]	
	Maximum element size [mm]	
	Minimum number of elements layers	1
	Minimum thickness of material [mm]	
	Consider mass parameters	
	Weight	<input type="checkbox"/>
	Inertia	<input checked="" type="checkbox"/>
	Volume constancy	<input type="checkbox"/>
	Deformation heat generation efficiency	0.5
	Friction heat generation efficiency	0.5
	Minimum share of free surface [%]	
	Rotation	<input type="checkbox"/>
	Maximum number of steps between remeshing	2
	Multistep shift	
	Place upside down before operation	<input type="checkbox"/>
	Quenching/tempering	
	Save intermediate results	<input type="checkbox"/>
Tool	Movement of a tool by another connecting tool	<input type="checkbox"/>
	Iteration	
	Maximum number of iterations	40
	Relative simulation accuracy	0.001
	Mesh adaptation in tool	
	Adaptation factor	1
	Maximum adaptation	20
	Acceleration coefficient	1.4
	Minimum element size [mm]	
	Maximum element size [mm]	
	Abrasive tool wear simulation	<input type="checkbox"/>
	Direct deformation	<input checked="" type="checkbox"/>
	Ring rolling	
	General adaptation	5
	Geometric adaptation	5
	Simulation step multiplier	1
	Horizontal stabilization	<input checked="" type="checkbox"/>

FIGURA 2.3.1: PARAMETRI MESH FINE

Simulation parameters: MESH GROSSOLANA	
System	
Manual positioning	<input type="checkbox"/>
Workpiece	
Integration method	
Explicit	<input checked="" type="radio"/>
Implicit	<input type="radio"/>
Step size	
Maximum strain increment	0.05
Maximum time step [s]	0.5
Constant step size (strain) [s]	
Constant step size (thermal) [s]	
Constant step size (tool) [s]	
Iteration	
Velocity norm	0.03
Stress norm	0.03
Maximum number of iterations	20
Mesh adaptation in workpiece	
Adaptation factor	1
Maximum adaptation	15
Acceleration coefficient	1.4
Adaptation due to velocity	<input checked="" type="checkbox"/>
Adaptation due to strain	<input checked="" type="checkbox"/>
Adaptation due to temperature	<input checked="" type="checkbox"/>
Minimum element size [mm]	
Maximum element size [mm]	
Minimum number of elements layers	1
Minimum thickness of material [mm]	
Consider mass parameters	
Weight	<input type="checkbox"/>
Inertia	<input checked="" type="checkbox"/>
Volume constancy	<input type="checkbox"/>
Deformation heat generation efficiency	0.5
Friction heat generation efficiency	0.5
Minimum share of free surface [%]	
Rotation	<input type="checkbox"/>
Maximum number of steps between remeshing	8
Multistep shift	
Place upside down before operation	<input type="checkbox"/>
Quenching/tempering	
Save intermediate results	<input type="checkbox"/>

Tool	
Movement of a tool by another connecting tool	<input type="checkbox"/>
Iteration	
Maximum number of iterations	40
Relative simulation accuracy	0.001
Mesh adaptation in tool	
Adaptation factor	1
Maximum adaptation	20
Acceleration coefficient	1.4
Minimum element size [mm]	
Maximum element size [mm]	
Abrasive tool wear simulation	<input type="checkbox"/>
Direct deformation	<input checked="" type="checkbox"/>
Ring rolling	
General adaptation	5
Geometric adaptation	5
Simulation step multiplier	1
Horizontal stabilization	<input checked="" type="checkbox"/>

FIGURA 2.3.2: PARAMETRI MESH GROSSOLANA

Dai risultati ottenuti in queste due prove si è potuta notare la perfetta coincidenza dei valori di “R” e di temperatura di uscita del profilo.

E’ invece differente l’andamento delle curve di carico, riportate in “Figura 2.3.4”. Si nota come, nonostante i valori siano mediamente uguali, nel caso di mesh grossolana vi siano picchi attorno al valor medio, causati dal fatto che il software, non avendo in certi punti una mesh sufficientemente adattata, non riesca a trovare soluzione allo “step”. Questo

errore viene indicato da Qform con il messaggio “No solution found at the step XXX” (“Figura 2.3.3”).

```
12:15:54: No solution found at the step 177.  
12:15:56: No solution found at the step 178.  
12:15:58: No solution found at the step 179.  
12:16:00: No solution found at the step 180.  
12:16:02: No solution found at the step 181.
```

FIGURA 2.3.3: MESSAGGIO DI ERRORE IN CASO DI UTILIZZO DI “MAXIMUM NUMBER OF STEPS BETWEEN REMESHING” TROPPO ELEVATO

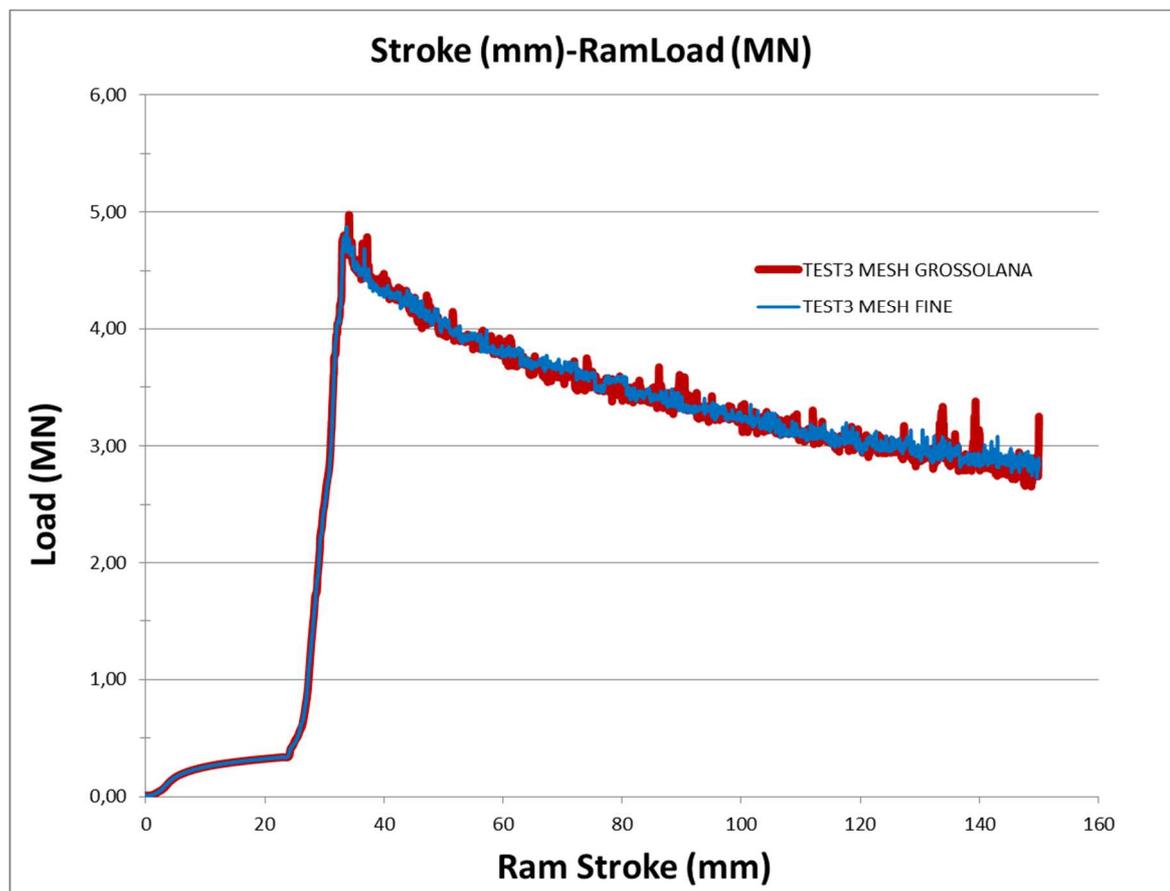


FIGURA 2.3.4: DIFFERENZE GRAFICI CARICO CON MESH FINE E GROSSOLANA

Inoltre nel caso di utilizzo di “mesh fine” la dimensione dei file di salvataggio della simulazione raddoppia (da 2 a 4 GB) così come il tempo di simulazione (da 25 a 60 minuti circa).

E' necessario infine notare che non in tutti i TEST effettuati si è assistito alla comparsa dell'errore precedentemente descritto, con conseguenti picchi nella curva di carico. Per questo motivo si è optato per l'utilizzo in prima approssimazione della mesh grossolana e, solo qualora nella simulazione fosse comparso l'errore, all'utilizzo dei parametri di mesh fine. In questo modo è stato possibile diminuire i tempi e le dimensioni di simulazione senza trascurare l'accuratezza dei risultati.

Una volta individuati i parametri di mesh, si è proseguito lanciando simulazioni volte a ricavare il modello di attrito che riproducesse i valori di "R" rilevati sperimentalmente. Nonostante nelle prime simulazioni che sono state effettuate i valori di carico di estrusione e di temperatura di uscita fossero molto differenti rispetto ai valori sperimentali, si è subito evidenziato come il grafico di "R" dipendesse esclusivamente dal modello di attrito e dai coefficienti utilizzati e non dai parametri di simulazione o dal tipo di implementazione della tensione di flusso utilizzata (si veda a tal proposito in "Figura 2.3.5" il confronto tra i valori di "R" ottenuti con il flow stress implementato in maniera tabulata o tramite la formula di Hensel-Spittel).

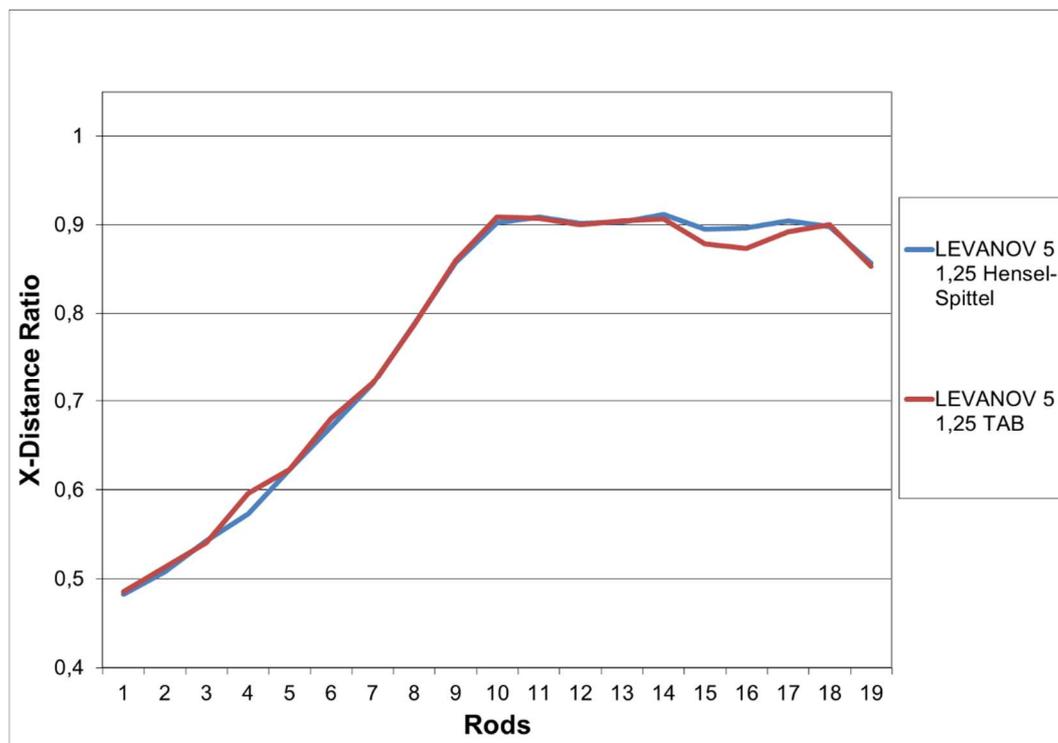


FIGURA 2.3.5: ANDAMENTO "R" CON FLOWSTRESS INSERITO CON FORMULA H-S E CON METODO TABULATO

Per questo motivo, una volta individuato il modello di attrito e i coefficienti corretti, anche variando gli altri valori di simulazione al fine di ottenere una corretta curva di carico e temperatura di uscita, il grafico di "R" rimaneva invariato.

Si riportano quindi in "Figura 2.3.6" gli andamenti di "R" al variare dei differenti coefficienti di attrito relativamente al TEST 3, che è stato utilizzato come riferimento. Le prove di seguito riportate sono quelle più significative per operare un confronto.

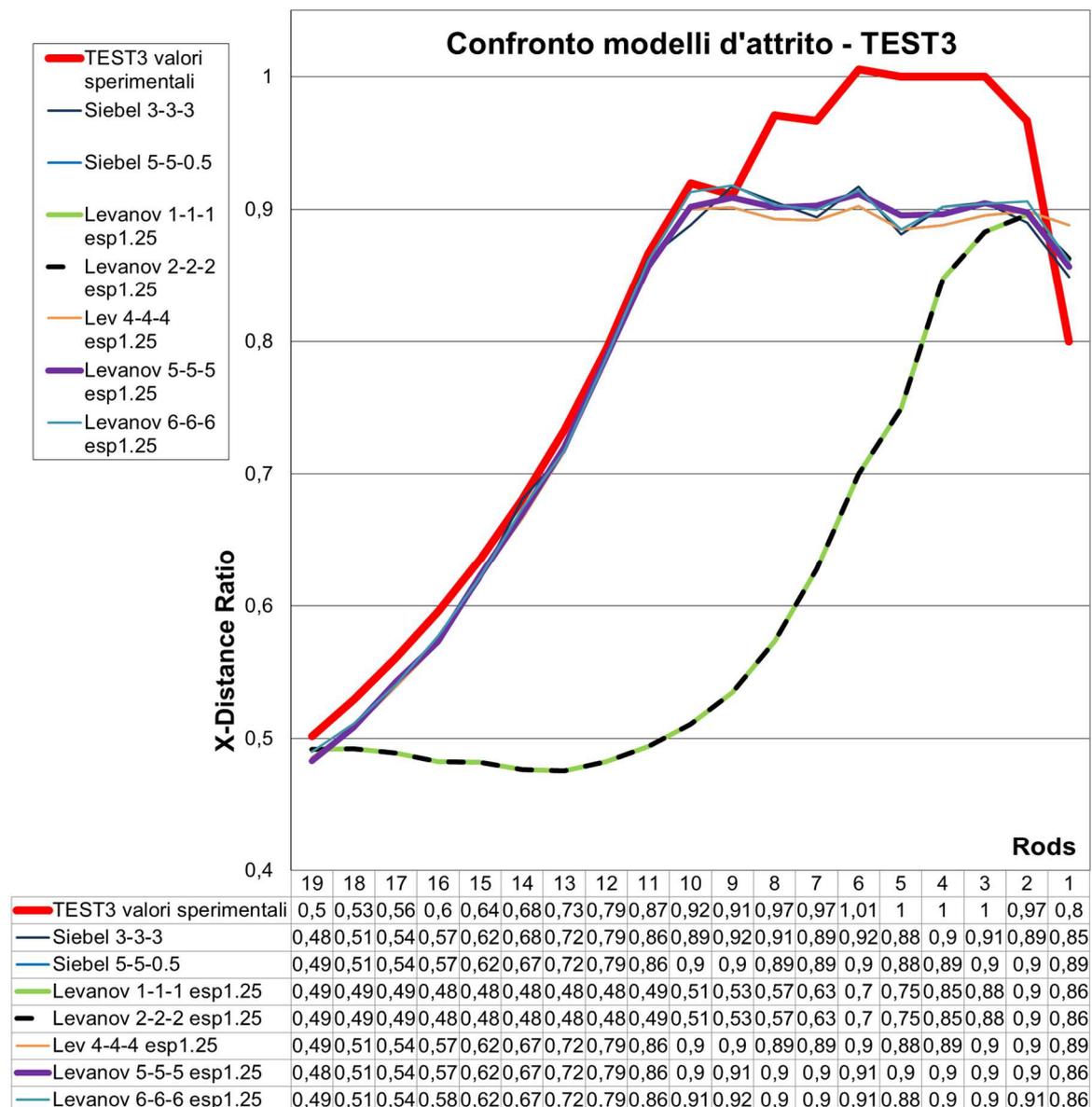


FIGURA 2.3.6: ANDAMENTO DI "R" CON L'UTILIZZO DI DIVERSI MODELLI DI ATTRITO

Considerando che è possibile inserire differenti modelli di attrito tra i diversi elementi a contatto con la billetta (pistone, contenitore e matrice) si è optato per l'utilizzo di un modello di attrito uguale su tutte e tre le superfici. Infatti non sarebbe logico porre un diverso valore di attrito sulla superficie del pistone, vista la sua modesta incidenza (gran parte dello scorrimento si ha su contenitore e matrice) e la mancanza di dati sperimentali (non si ha l'andamento del flusso in quella zona). E' inoltre ragionevole ipotizzare che le condizioni di attrito sulla superficie del contenitore e della matrice siano le medesime. Relativamente al modello di Siebel, è stato necessario forzare il codice utilizzando dei valori di $m > 1$ (si ricorda che da letteratura $0 < m < 1$) in quanto tale modello dava dei valori di "R" troppo bassi sottostimando quindi l'attrito.

Come si può osservare dal grafico di "Figura 2.3.6", non vi sono differenze sostanziali tra il modello di Siebel per valori circa uguali a 5 e modello di Levanov con valori circa uguali a 5 ed esponente pari a 1,25. La discrepanza che si ha tra i valori sperimentali e quelli ottenuti tramite Qform per le bacchette dalla 2 alla 8 è dovuta al fatto che nell'esperimento reale la billetta non fosse posizionata perfettamente in asse a causa della gravità e dei giochi. Infatti la pressa utilizzata aveva una direzione di estrusione parallela al suolo; per questo motivo, a seguito del caricamento, la billetta aveva l'asse più basso rispetto a quello della pressa di estrusione.

Si nota inoltre che per valori di attrito bassi (Levanov 1 e 2), il grafico di "R" sia molto più basso rispetto allo sperimentale a causa del maggiore scorrimento che si genera tra il materiale e gli utensili. Per questo si avrà un maggiore spostamento rispetto alla posizione iniziale della bacchetta considerata, con conseguente diminuzione del valore di "R". Si veda a tal proposito in "Figura 2.3.7" il confronto tra i differenti andamenti delle linee di flusso del materiale nel caso di Levanov 2 e Levanov 5 (esponente 1,25).

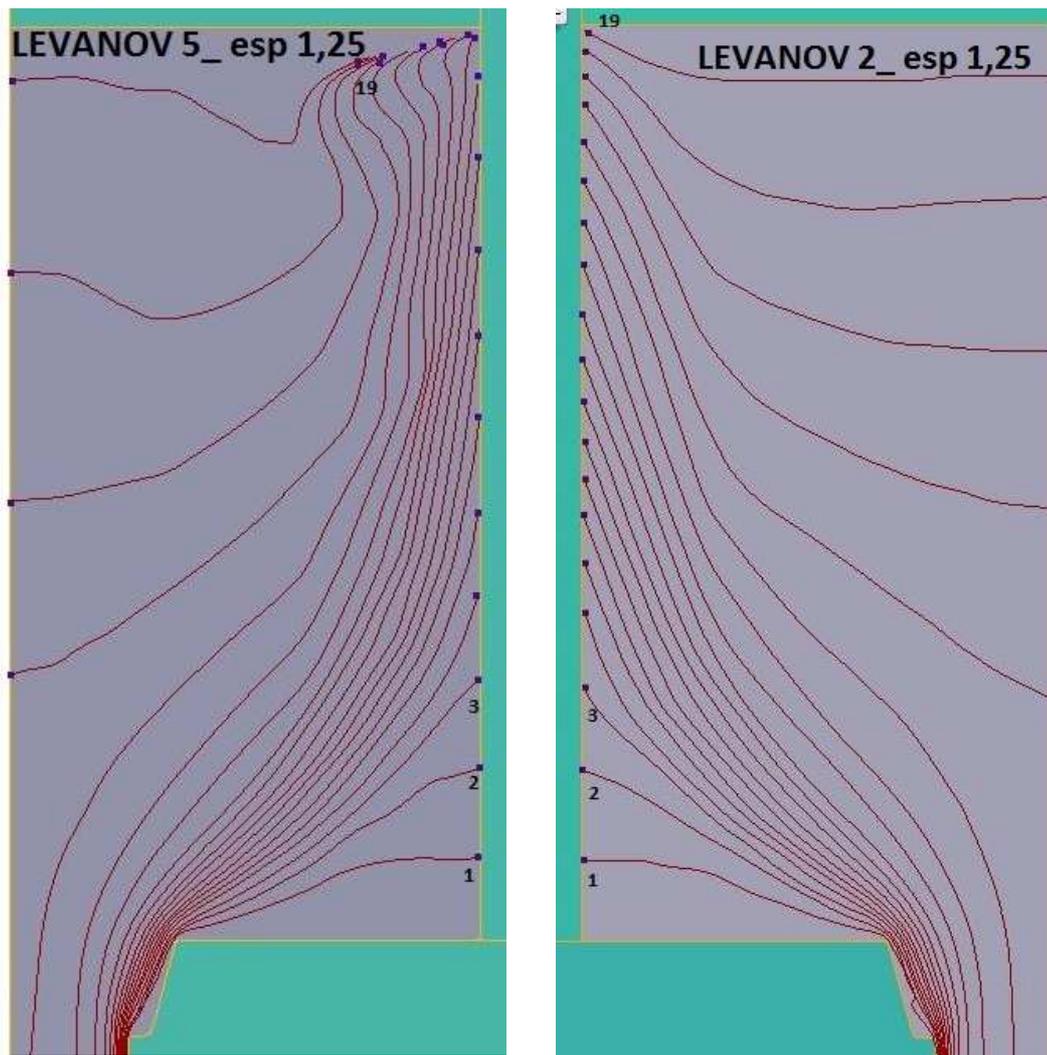


FIGURA 2.3.7: CONFRONTO LINEE DI FLUSSO LEVANOV 5 E LEVANOV 2 (ESPONENTE 1,25)

Tramite i confronti precedentemente descritti si nota quindi che diversi modelli d'attrito seguono gli andamenti desiderati per "R". Nel prossimo capitolo verrà quindi discussa la soluzione scelta per la successiva parte di microstruttura.

Nelle prove che seguono (e poi anche nella parte di microstruttura) è stato utilizzato il modello di Levanov con coefficiente 5 ed esponente 1,25.

Individuati i modelli di attrito che riproducessero "R" in maniera soddisfacente, l'attenzione si è quindi focalizzata sugli altri due parametri che validavano le prove di visioelasticità: la curva del carico di estrusione (in particolare il valore di carico massimo) e la temperatura dell'estruso a 1 metro dal "bearing" misurata appena l'estruso

raggiungeva la lunghezza di un metro (minima) e a fine estrusione, sempre alla distanza di un metro (massima).

Occorre notare che nella prova sperimentale, se il carico di estrusione veniva misurato tramite una cella di carico disposta nel pistone, la temperatura è invece stata misurata tramite una termocoppia (“Figura 2.3.8”) che presentava un ritardo nella misurazione.



FIGURA 2.3.8: TERMOCOPPIA A 1M DAL BEARING - VISIOPLASTICITÀ

Per questo motivo i valori di temperatura visti precedentemente in “Figura 2.1.3” sono leggermente minori dei valori che si hanno realmente. Quindi, nell’effettuare il confronto tra i valori di Q_{form} e le temperature sperimentali, è necessario considerare come riferimento temperature leggermente maggiori delle sperimentali. Per esempio per il TEST 3 si assumeranno i valori di 375°C e 360°C , rispettivamente massima e minima, come estremi inferiori cioè si considereranno accettabili temperature di qualche grado superiori a queste.

Nelle prime simulazioni lanciate si è sin da subito riscontrata una difficoltà nel riprodurre una curva di carico concorde, entro le tolleranze, con quella reale e conseguentemente corrette temperature di uscita. In particolare il problema che è stato riscontrato utilizzando delle condizioni al contorno ricavate dalla descrizione delle prove sperimentali, è una sovrastima del carico. In “Figura 2.3.9” è possibile vedere l’andamento del carico ottenuto nelle prime simulazioni effettuate, volte a ricavare “R”.

Come si può osservare nella curva “Levanov 5 – 1,25 180_60”, ottenuta utilizzando i vari parametri di simulazione consigliati dal manuale del programma (indicati nel capitolo

precedente) e un tempo di raffreddamento “cooling in air” = 180 secondi (sicuramente eccessivo) e “cooling in tool” = 60 secondi (valori ricavati basandosi su simulazioni precedentemente svolte da un altro gruppo di lavoro, rilevatesi poi molto discordanti dai valori sperimentali), si ha un andamento molto differente da quello sperimentale. Anche riducendo il sicuramente eccessivo tempo di raffreddamento in aria sino a 60 secondi (così come indicato nell’articolo scientifico in cui è presentato l’esperimento) si vede come non si ottenga una concordanza né sul valore di carico massimo né sulla inclinazione della curva.

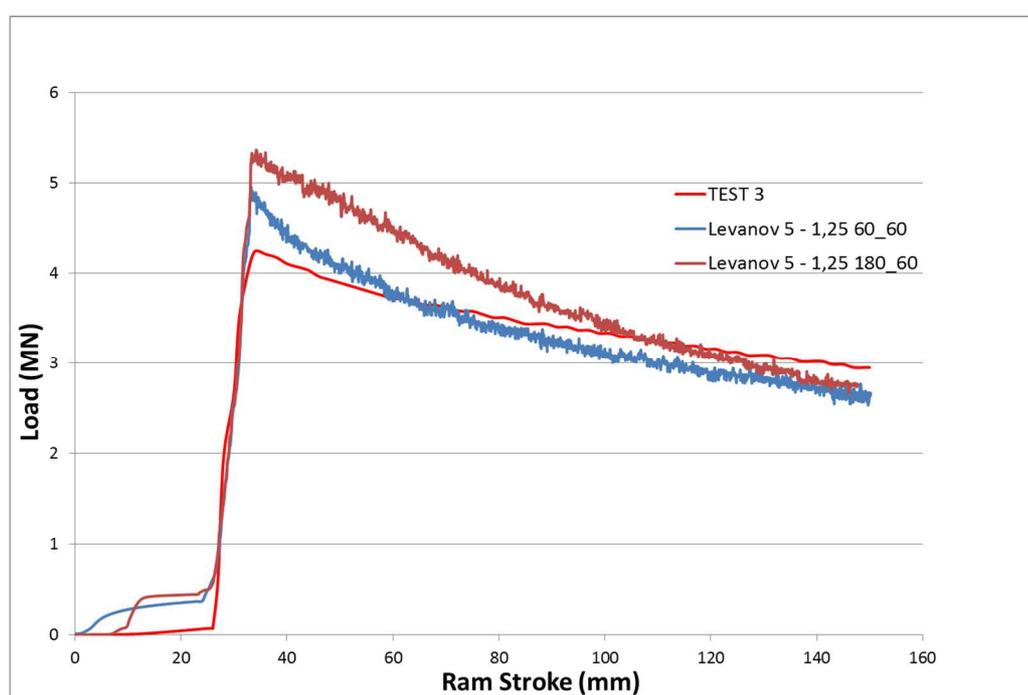


FIGURA 2.3.9: CURVE CARICO PER SIMULAZIONI TEST3 CON PARAMETRI DI DEFAULT

Per cercare di capire se tali discordanze fossero imputabili ad un problema intrinseco del programma o ad un errato settaggio delle simulazioni è stata quindi innanzi tutto effettuata una analisi “dell’User Manual” di Qform. Sono state così individuate le seguenti condizioni al contorno e parametri di simulazione come possibile causa di tale sovrastima e differente inclinazione, la cui influenza è analizzata nelle prove successivamente riportate:

- A. “Deformation heat generation efficiency” (nella sezione “Simulation Parameters”)
 - calore generatosi a causa della deformazione [%]

- B. “Friction heat generation efficiency” (nella sezione “Simulation Parameters”) – calore generatosi a causa dell’attrito [%]
- C. “Heat transfer coefficient” (nella sezione “Tool Parameters”) – coefficiente di scambio termico tra utensili e billetta, definito in Qform all’interno dei parametri del coefficiente d’attrito
- D. “Cooling in air” (nella sezione “Blows”) - v. capitolo precedente
- E. “Cooling in tool” (nella sezione “Blows”) - v. capitolo precedente
- F. “Environment”: AIR 20°C “Heat transfer coefficient” (nella sezione “Boundary Conditions”) – coefficiente di scambio termico dell’aria esterna [$\frac{W}{m^2K}$]

Vista la discordanza delle curve di carico ottenute, sono stati analizzati i possibili valori di “Cooling in air” e “Cooling in tool” (D-E). Si è così concluso, analizzando i plausibili tempi intercorsi tra uscita dal forno della billetta e contatto con la pressa a causa del meccanismo di caricamento, che il valore effettivo da utilizzare si dovesse aggirare attorno ai 30 secondi per entrambi. Tuttavia, così facendo, il risultato è stato un calo del carico massimo di estrusione, a causa della maggiore temperatura della billetta, con conseguenti temperature di uscita troppo elevate (di 30°C maggiori delle sperimentali). In aggiunta le curve di carico ottenute continuavano ad essere eccessivamente inclinate rispetto alle sperimentali. A tal proposito si veda in “Figura 2.3.10” una simulazione ottenuta utilizzando valori di raffreddamento in aria di 20 secondi e 30 nell’utensile.

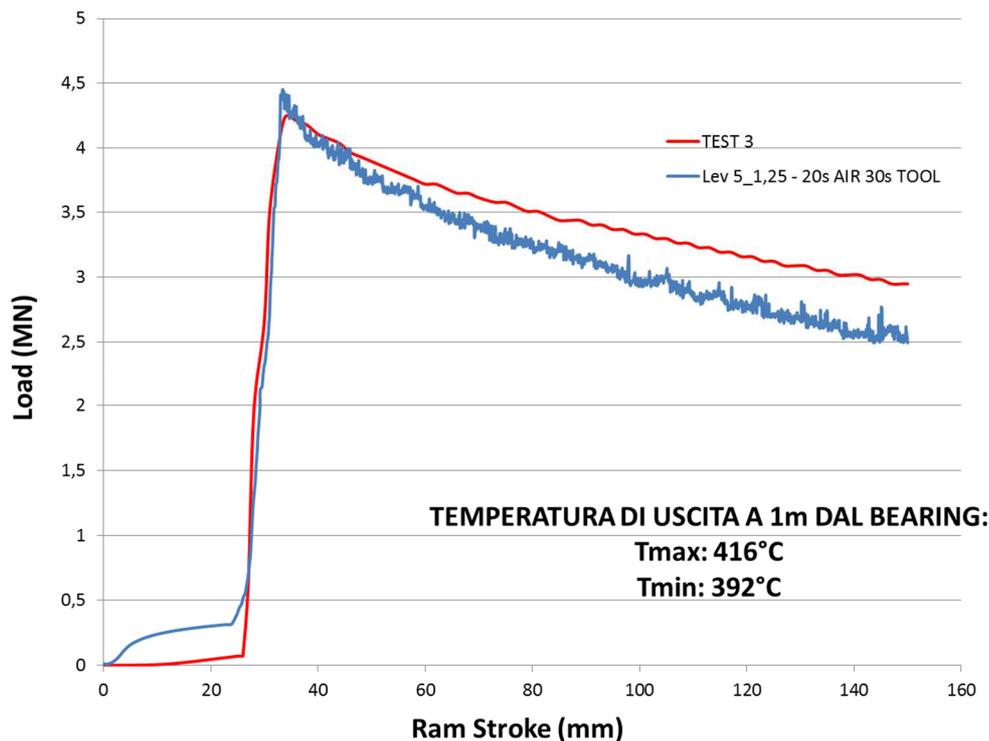


FIGURA 2.3.10: TEST 3 CON VALORI DI RAFFREDDAMENTO IN ARIA E NEGLI UTENSILI DI 20 E 30 SECONDI (D-E)

Considerando che tali tempi di raffreddamento, impostati come descritto sopra, erano concordi con l'effettivo svolgimento della prova, sono stati sempre mantenuti circa a quel valore. Non avrebbe infatti avuto senso modificarli ulteriormente dato che erano gli effettivi tempi impiegati.

Di seguito in "Figura 2.3.11" è riportato l'andamento rilevato variando invece, sino al valore estremo pari allo 0%, i parametri "Deformation heat generation efficiency" e "Friction heat generation efficiency" (A-B). Da notare che questi due parametri sono sempre stati fatti variare in maniera uguale nelle prove che seguono (si è dato ad entrambi lo stesso valore); tramite una prova che è stata svolta si è però notato che "Friction heat generation efficiency" (B) è pressochè influente sui risultati.

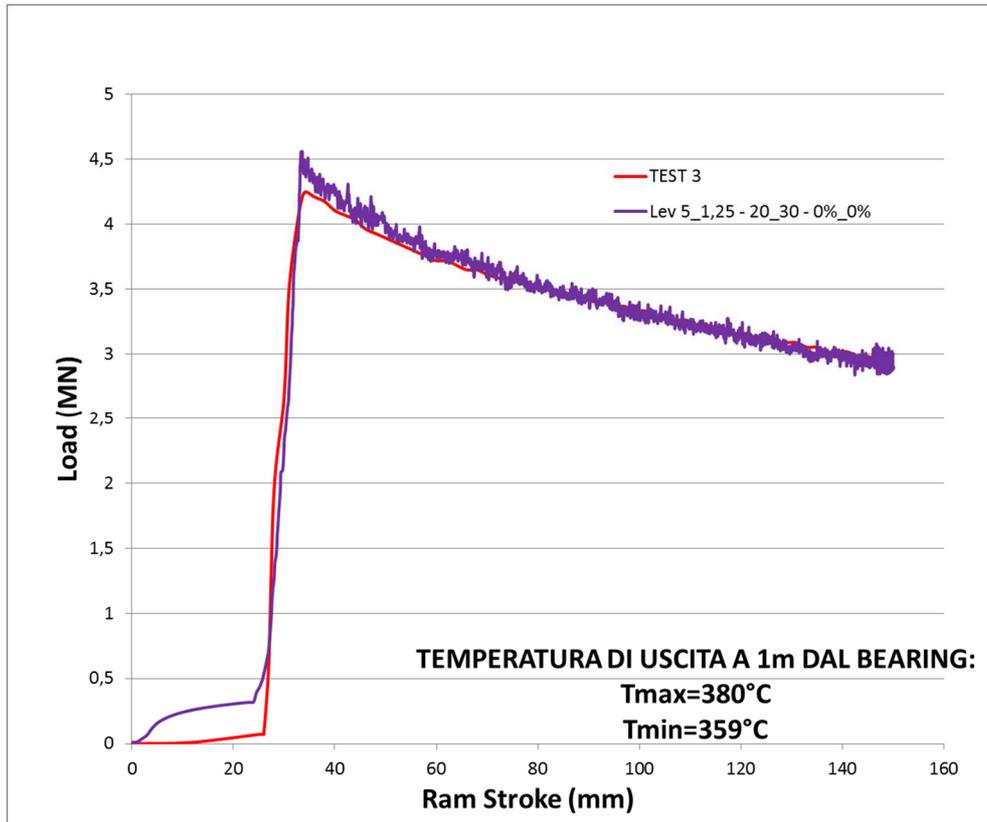


FIGURA 2.3.11: TEST 3 CON VALORI DI GENERAZIONE DI CALORE A CAUSA DI ATTRITO E DEFORMAZIONE PARI ALLO 0% (A-B)

Come si può osservare i risultati ottenuti, con un valore dello 0%, sono circa coincidenti con la prova sperimentale. Tuttavia non è fisicamente accettabile il fatto che l'attrito e la deformazione non sviluppino in alcun modo calore. Sono infatti fisicamente accettabili solo valori almeno superiori ad un 50%.

Prima di poter però concludere una sovrastima del calore generato, da parte del programma Qform, è necessario valutare anche l'influenza degli altri parametri (elencati sopra) che da manuale potrebbero causare tali discordanze sui risultati. Per questo si riportano in "Tabella 2.3.1" una serie di prove, significative a tal proposito, i cui risultati di carico e temperatura di uscita sono visibili in "Figura 2.3.12" e "Figura 2.3.13", che sono state effettuate per individuare la condizione migliore di settaggio dei parametri.

NUMERO PROVA - TEST3	H (C)	Air HTC (F)	Cooling in air [s] (D)	Cooling in tool [s] (E)	Heat generation efficiency (A-B)	Tmin [°C]	Tmax [°C]	ΔT	Load Max [MN]	Load Min [MN]	Δ Load [MN]
1 – Prova sperimentale di riferimento	--	--	--	--	--	360	375	15	4,3	2,95	1,35
2	500	30	20	30	0,8	411	427	16	4,08	2,38	1,7
3	7000	30	20	30	0,8	392	416	24	4,35	2,5	1,85
4	11000	30	20	30	0,8	392	416	24	4,5	2,41	2,09
5	14300	30	20	30	0,8	390	416	26	4,5	2,5	2
6	11000	65	20	30	0,8	365	393	28	4,78	2,6	2,18
7	11000	80	0	30	0,7	359	384	25	4,68	2,72	1,96
8	4000	80	10	30	0,7	361	385	24	4,59	2,56	2,03
9	3200	65	15	30	0,7	372	394	22	4,51	2,54	1,97
10	11000	30	20	30	0	357	380	23	4,5	2,94	1,56
11	11000	65	20	30	0,5	358	383	25	4,81	2,78	2,03
12	11000	30	30	30	0,5	385	407	22	4,53	2,79	1,74
13	11000	45	25	30	0,5	373	395	22	4,62	2,83	1,79
14	11000	55	20	30	0,5	366	389	23	4,85	2,74	2,11
15 – (come 14, ma con MESH FINE)	11000	55	20	30	0,5	366	389	23	4,65	2,79	1,86

TABELLA 2.3.1: LEGENDA PROVE PER CONFRONTO INFLUENZA DEI PARAMETRI A, B, C, D, E, F

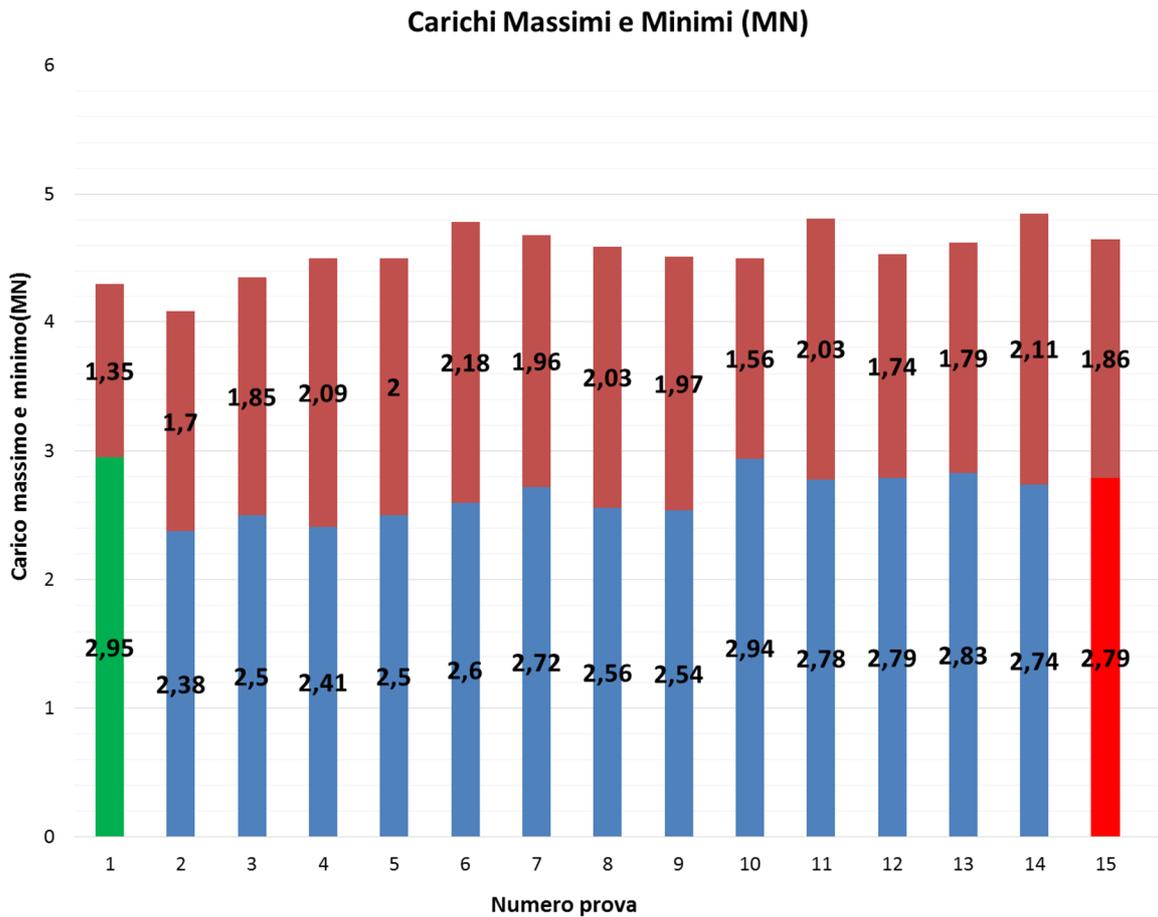


FIGURA 2.3.12: TEST 3 - ANDAMENTO DEI CARICHI MASSIMI E MINIMI AL VARIARE DEI PARAMETRI DI PROCESSO

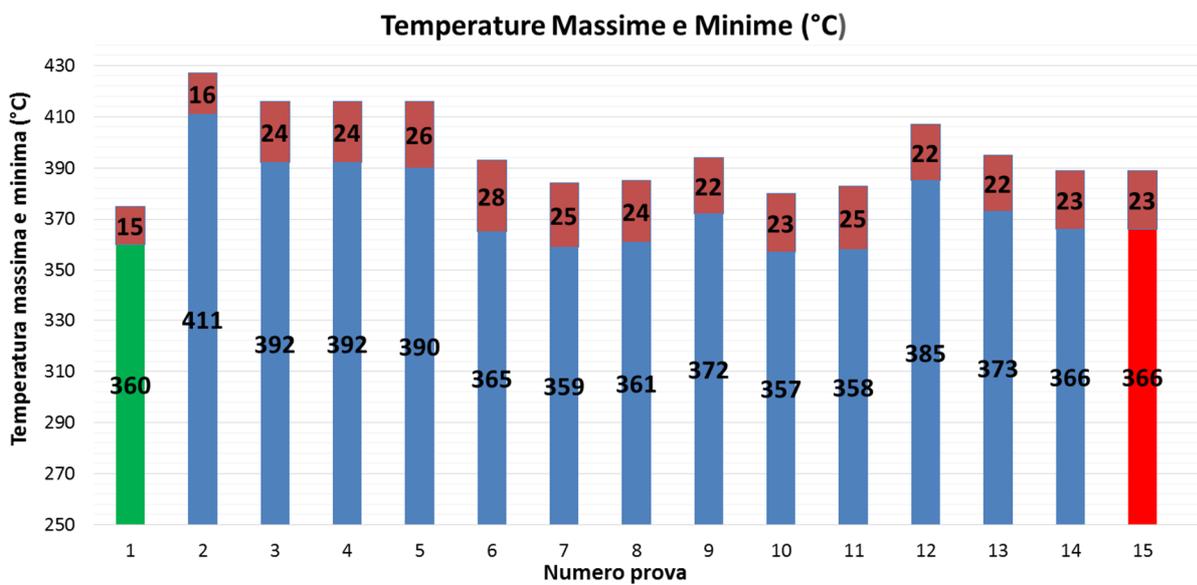


FIGURA 2.3.13: TEST 3 - ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE MASSIME E MINIME AL VARIARE DEI PARAMETRI DI SIMULAZIONE

Da tali grafici si può osservare che:

- confrontando le prove 2, 3, 4 e 5, effettuate variando solamente il valore di “Heat transfer coefficient” (C) a valori di 500, 7000, 11000 e 14300 $[\frac{W}{m^2K}]$, si nota che per le prove 3, 4 e 5, sia relativamente ai carichi che alle temperature di uscita, non si hanno variazioni sostanziali (vi è giusto un lieve calo del carico massimo al calare di tale coefficiente). Invece nella prova 2, effettuata con un valore di 500 $[\frac{W}{m^2K}]$ si assiste ad una diminuzione del carico a causa di un incremento della temperatura della billetta. Occorre notare che il valore impostato in tale prova è però molto minore del valore minimo fisicamente accettabile in tali processi circa uguale a 3000 $[\frac{W}{m^2K}]$.

- si nota, in particolare nelle prove 5 e 6, come l’aumento del coefficiente di scambio termico dell’aria (F) provochi un maggiore raffreddamento dell’estruso con conseguente calo delle temperature in uscita e anche un maggiore raffreddamento della billetta in ingresso che quindi, risultando più fredda, porta ad un maggiore carico di estrusione. Logicamente, per calare il carico massimo, un’opzione possibile è quella riportata nella prova 7 in cui, rispetto alla prova 6, è stato calato il tempo di raffreddamento in aria e ulteriormente incrementato il coefficiente di scambio termico dell’aria (da 65 a 80 $[\frac{W}{m^2K}]$) in modo da avere sia una billetta più calda in ingresso che un valore di temperature di uscita basse.

Le restanti prove riportate sono invece state svolte al fine di valutare il miglior compromesso tra carichi e temperature di uscita utilizzando dei parametri che fossero fisicamente accettabili.

Per concludere tale sezione, si riporta in “Tabella 2.3.2”, un riassunto indicativo dell’influenza dei vari parametri sugli output di simulazione “curva di carico” e “temperatura di uscita a 1 metro dal bearing”.

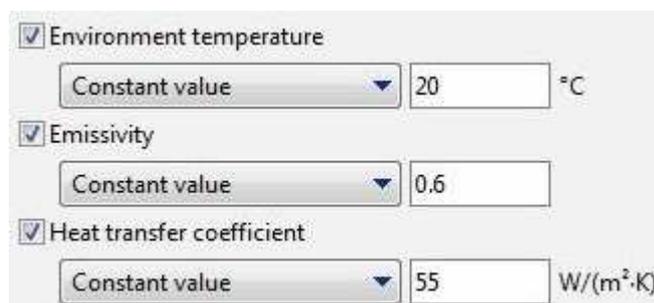
Variazione parametro	Tipo di variazione	Curva di carico	Temperatura 1m bearing	Motivazione
A) "Deformation heat generation efficiency"	↑	↓	↑	La billetta si riscalda molto a seguito della deformazione
B) "Friction heat generation efficiency"	↑	=	=	Vista l'elevata temperatura risulta ininfluente – predominano altri fattori
C) "Heat transfer coefficient" TOOL	↑	↑	=	Nel TEST3 considerato, la matrice risulta più fredda della billetta che è quindi in quella zona raffreddata
D) "Cooling in air"	↑	↑↑	↓	La billetta ad inizio processo risulta raffreddata
E) "Cooling in tool"	---	---	---	Il suo effetto dipende dalla temperatura degli utensili
F) "Heat transfer coefficient" AIR	↑	↑	↓↓	La billetta così come l'estruso risultano molto più raffreddati

TABELLA 2.3.2: RIASSUNTO INDICATIVO DELL'INFLUENZA DEI VARI PARAMETRI SULLA CURVA DI CARICO E SULLA TEMPERATURA DI USCITA IN CASO DI AUMENTO DEL PARAMETRO. IN CASO INVECE DI CALO, LA TABELLA RISULTA ESATTAMENTE L'OPPOSTO.

2.4 DISCUSSIONE E CONDIZIONE MIGLIORE

L'insieme delle prove effettuate (le più significative riportate nel capitolo precedente) ha permesso di valutare i parametri di simulazione migliori per riprodurre con Qform l'esperimento di visioelasticità. In particolare è stata individuata come condizione migliore l'insieme dei parametri usati per la "prova 15" di "Tabella 2.3.1". Di seguito si riportano commentati i parametri fondamentali utilizzati. Per tutti i rimanenti si faccia riferimento ai due capitoli precedenti.

- WORKPIECE PARAMETERS - "Material flow stress" formula Hensel-Spittel implementata tramite subroutine. E' stata scelta in quanto la curva di carico, in questo caso (nella parte di microstruttura era in certi casi il contrario), aveva un picco leggermente minore.
- TOOL PARAMETERS - "Lubrificant" modello di Levanov coefficiente 5 ed esponente 1,25. Permette infatti di ottenere una corretta curva di "R". La scelta del modello di Levanov rispetto a quello di Siebel è stata arbitraria dato che entrambi davano una corretta curva di "R".
- BOUNDARY CONDITIONS: "Environment" - "AIR 20°C" (F) ("Figura 2.4.1")



The image shows a software interface for setting boundary conditions. It contains three checked options, each with a dropdown menu set to 'Constant value' and a corresponding input field:

- Environment temperature: Constant value, 20 °C
- Emissivity: Constant value, 0.6
- Heat transfer coefficient: Constant value, 55 W/(m²·K)

FIGURA 2.4.1: CARATTERISTICHE DELL'ARIA DELL'AMBIENTE ESTERNO ALLA PRESSA

E' stato trovato un compromesso tra valori fisicamente ammissibili (per l'aria compresi tra 10 e 100 [$\frac{W}{m^2K}$]) e valori che dessero un corretto raffreddamento della billetta con un "Heat transfer coefficient" di 55 [$\frac{W}{m^2K}$]. La correttezza di tale valore è stata verificata in quanto esso permetteva di ottenere una corretta temperatura minima di uscita. Se infatti, a partire dai reali tempi di riposo in aria e in pressa prima dell'inizio del processo, si ottiene

una corretta temperatura minima di uscita (data dalla prima parte di estruso, “Figura 2.4.2”, che viene a contatto con la termocoppia), si può concludere un corretto scambio termico in quanto la prima parte dell’estruso in uscita non subisce né alcun riscaldamento a causa della deformazione né un significativo raffreddamento a causa della presenza della matrice più fredda. Tale raffreddamento sino alla temperatura minima si ha quindi solo a causa del raffreddamento causato dall’aria.

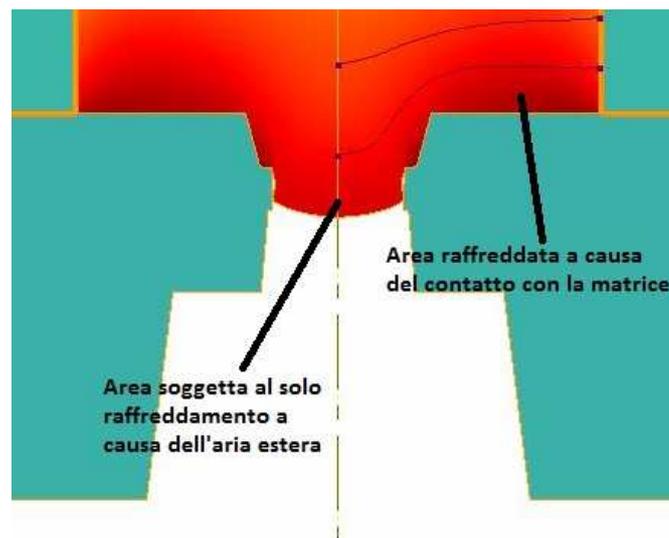


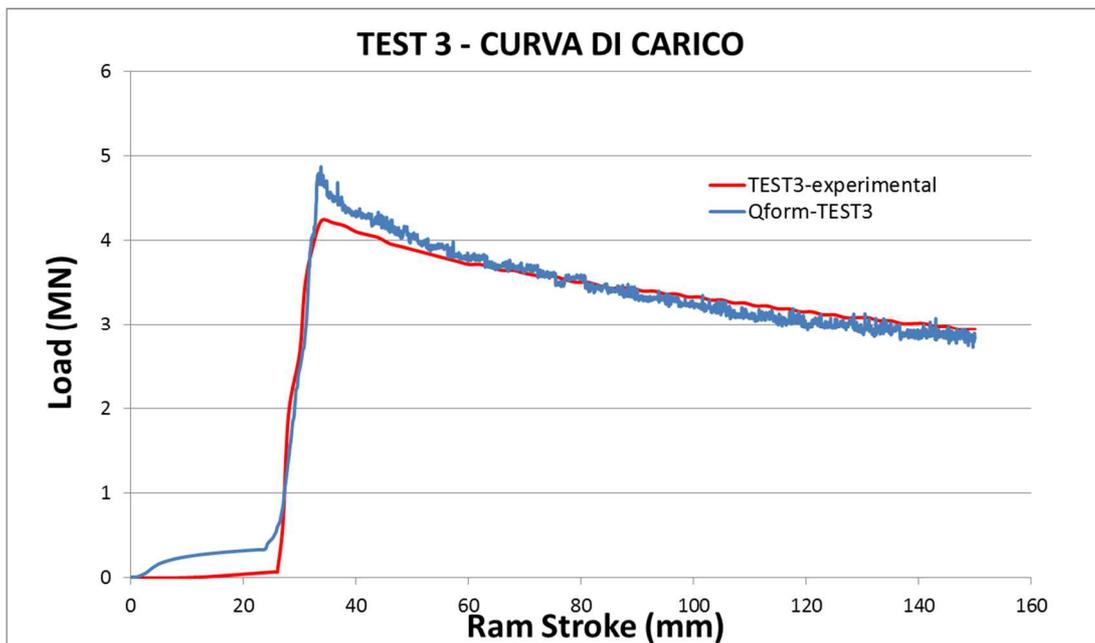
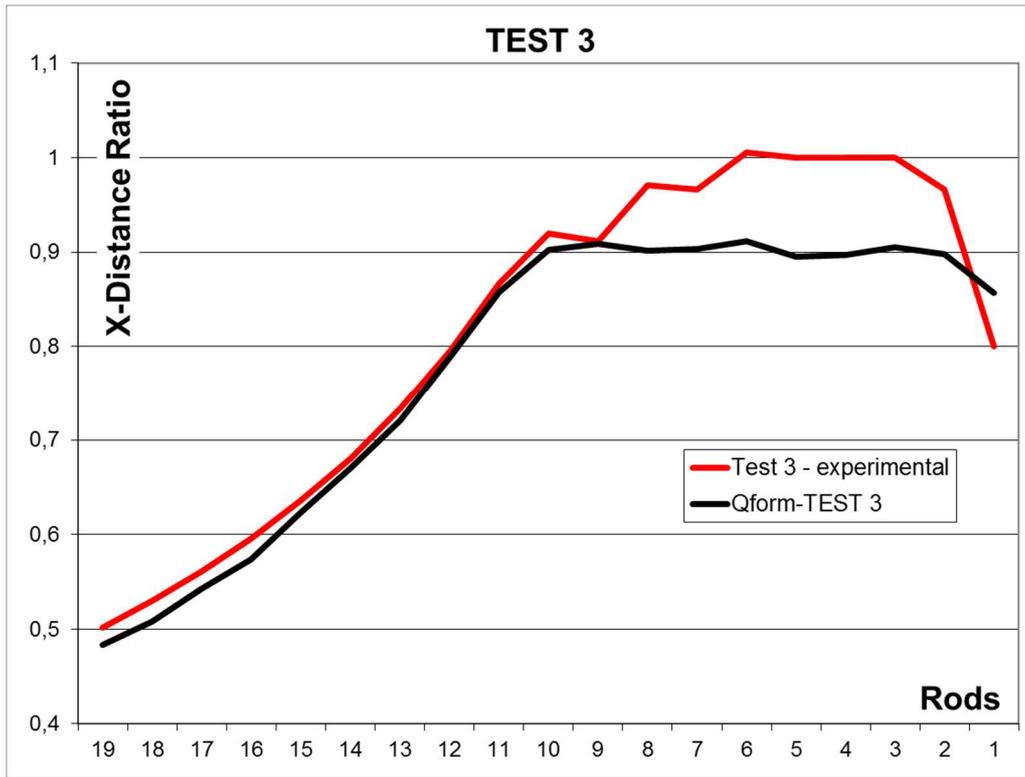
FIGURA 2.4.2: AREA SOGGETTA AL SOLO RAFFREDDAMENTO CAUSATO DALL’AMBIENTE ESTERNO

- BLOWS: “Cooling in air”: 20 secondi (D); “Cooling in tool”: 30 secondi (E). Ricavati valutando i tempi che potevano essere effettivamente impiegati e valori di carico concordi con gli sperimentali (il valore di raffreddamento in aria che plausibilmente è stato impiegato nella prova sperimentale è stato portato a 20 secondi in modo da avere un compromesso fisicamente accettabile che desse un corretto carico e una corretta temperatura di uscita).

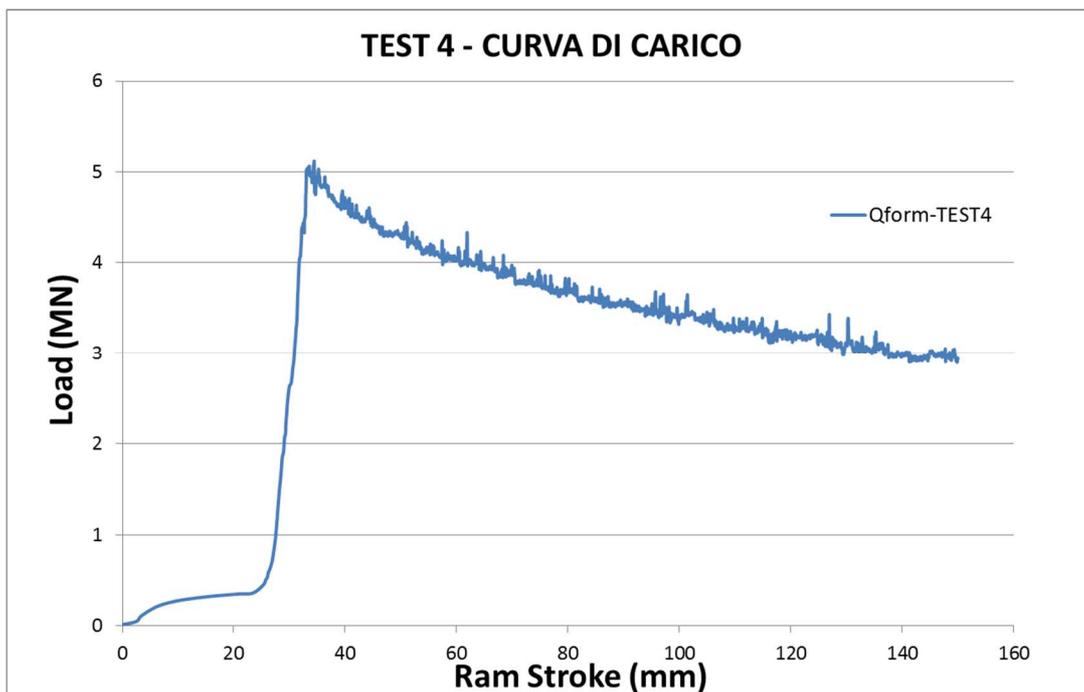
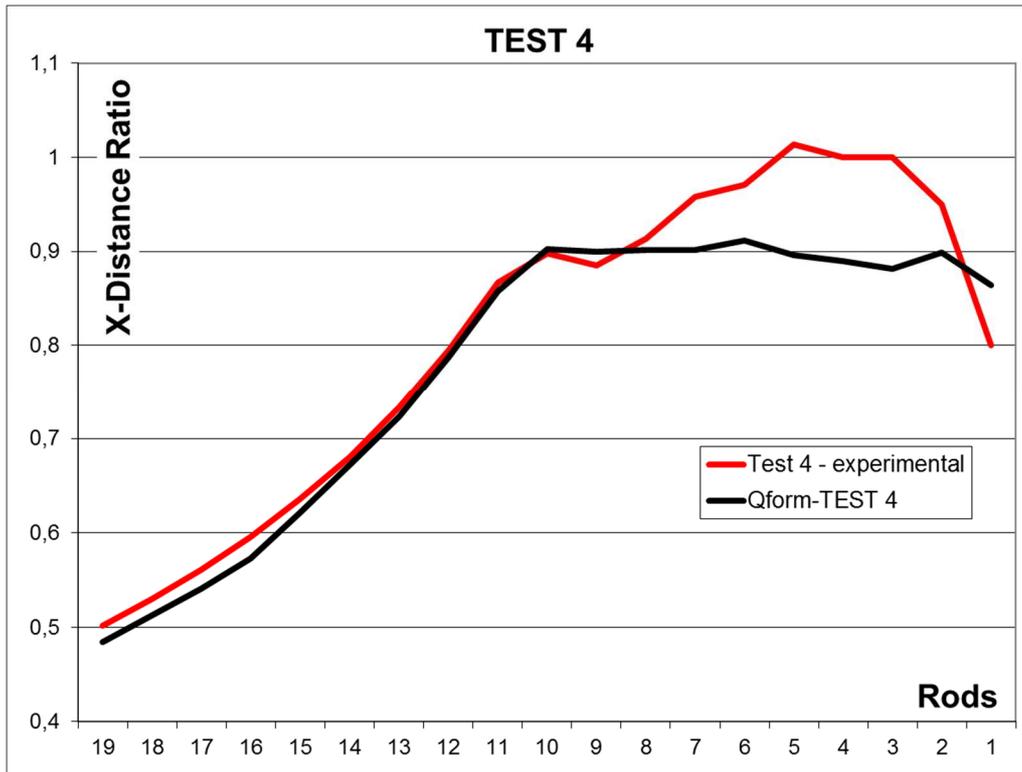
- SIMULATION PARAMETERS: “Deformation heat generation efficiency” = 0.5 (A); “Friction heat generation efficiency” = 0.5 (B). Tali valori sono stati portati al valore minimo ammissibile in quanto, nonostante l’analisi di tutti i parametri di simulazione, è risultato che il calore generatosi durante il processo a causa della deformazione (previsto dal software) fosse troppo elevato. Stando all’insieme delle prove svolte, tale problematica risulta riconducibile al programma Qform e non ad un errato settaggio dei valori. Tale sovrastima stando alle prove svolte risulta, almeno per i processi nelle condizioni in

esame, una possibile criticità di Qform che richiederebbe quindi una verifica da parte dei programmatori. A causa di questo problema nei TEST 4 e 5 il valore di temperatura in uscita risulta più elevato rispetto a quello sperimentale. Tuttavia, poiché sia la curva di “R” che le curve di carico sono concordi con quelle sperimentali in tutti e tre i TEST, tale discordanza non avrà alcuna influenza sulla parte di microstruttura. (analogamente il valore di “Heat transfer coefficient” (F) dell’aria non influenzerà i risultati di microstruttura, in quanto in quell’esperimento la billetta non riposa in aria ed è quindi un valore pari a zero).

In conclusione di tale sezione si riportano di seguito i risultati relativi ai tre test svolti e il confronto tra linee di flusso reali e ottenute con Qform.

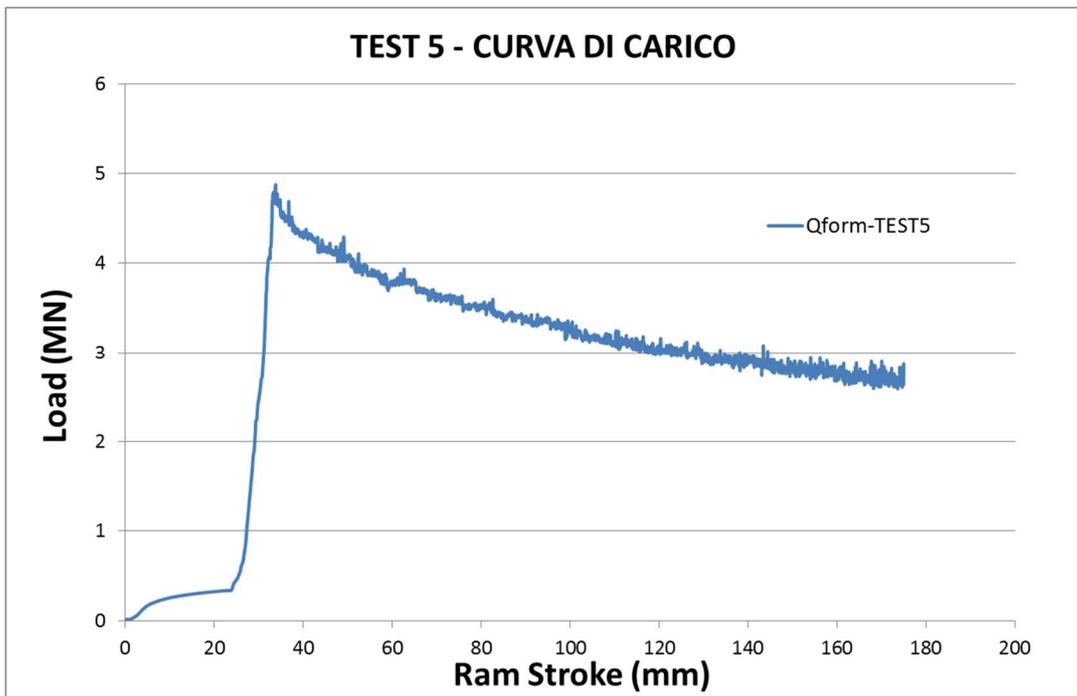
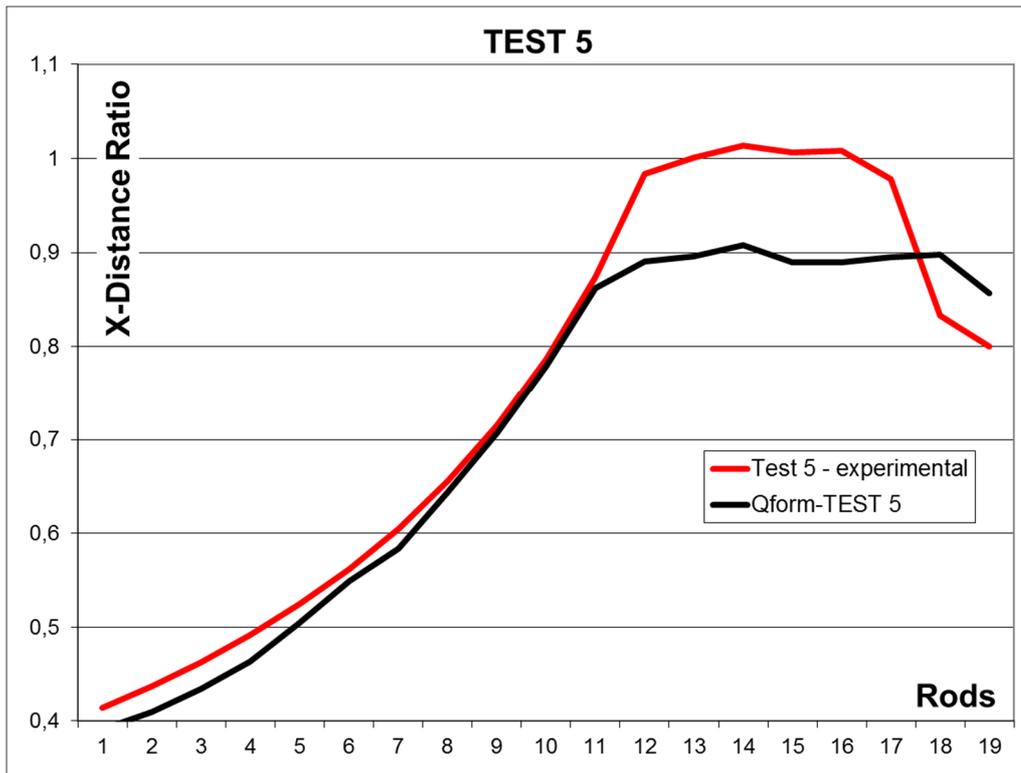


TEST 3	Temp. min (°C)	Temp. max (°C)
Experimental	≈360	≈375
Qform	366	389



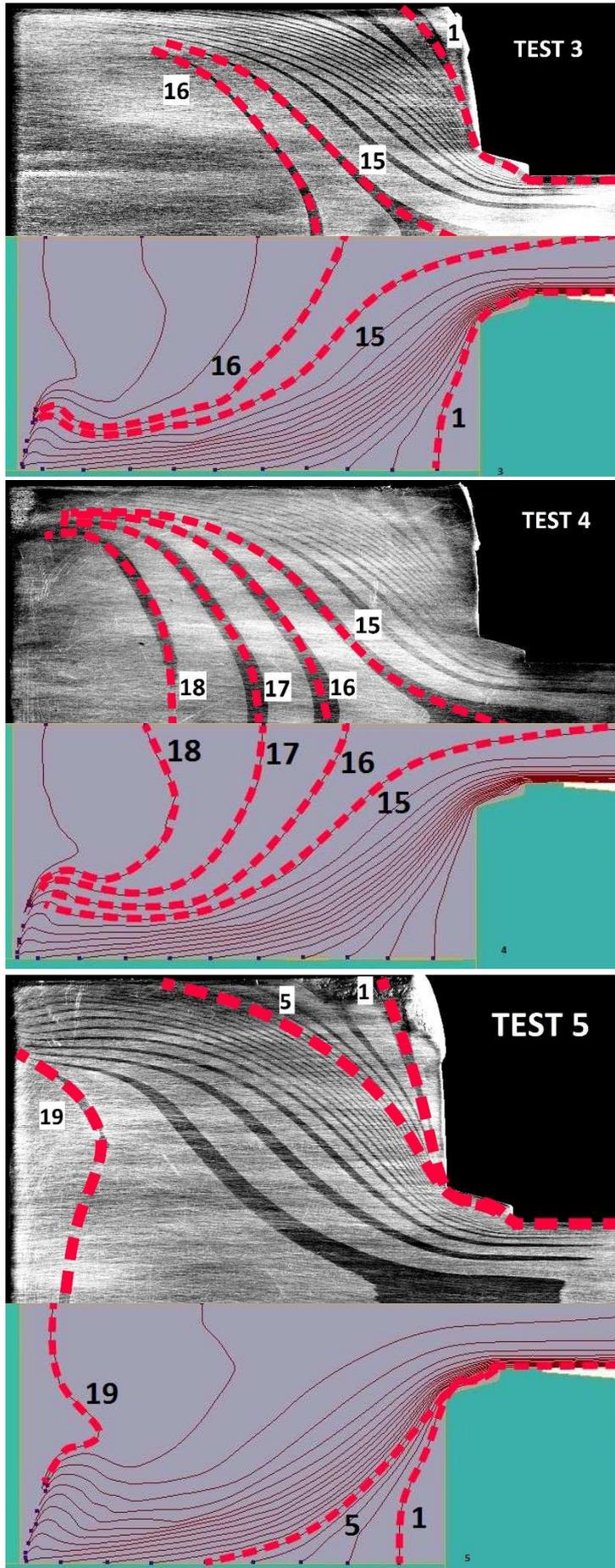
Valori di carico di sperimentali di riferimento TEST 4: MAX=4,9 MN – MIN=3,1MN

TEST 4	Temp. min (°C)	Temp. max (°C)
Experimental	≈360	≈375
Qform	397	424



Valori di carico sperimentali di riferimento TEST 5: MAX=4,75 MN – MIN=2,7 MN

TEST 5	Temp. min (°C)	Temp. max (°C)
Experimental	-	-
Qform	367	392



3 . PREVISIONE DELLA MICROSTRUTTURA

3.1 DESCRIZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI

Le prove sperimentali di microstruttura sono state svolte dal gruppo di tecnologie e sistemi di lavorazione del Dipartimento di Ingegneria Industriale D.I.N dell'Università di Bologna presso "Institute of Forming Technology and Lightweight Construction" dell'Università di Dortmund (Germania) e avevano come obiettivo quello di misurare la dimensione (lunghezza e spessore) dei grani cristallini della lega di alluminio AA6082 in varie condizioni di deformazione. Per conseguire il risultato atteso è stato individuato come ottimale il processo di estrusione diretta. Infatti durante tale processo si sviluppano, nelle varie aree della billetta, differenti valori di deformazione (anche molto diversi tra loro) e conseguentemente grani di diverse dimensioni.

E' stata quindi scelta una billetta di dimensioni riportate in "Figura 3.1.1" la quale veniva estrusa per 10 mm di corsa del pistone in una matrice di diametro variabile il cui schema è visibile di seguito.

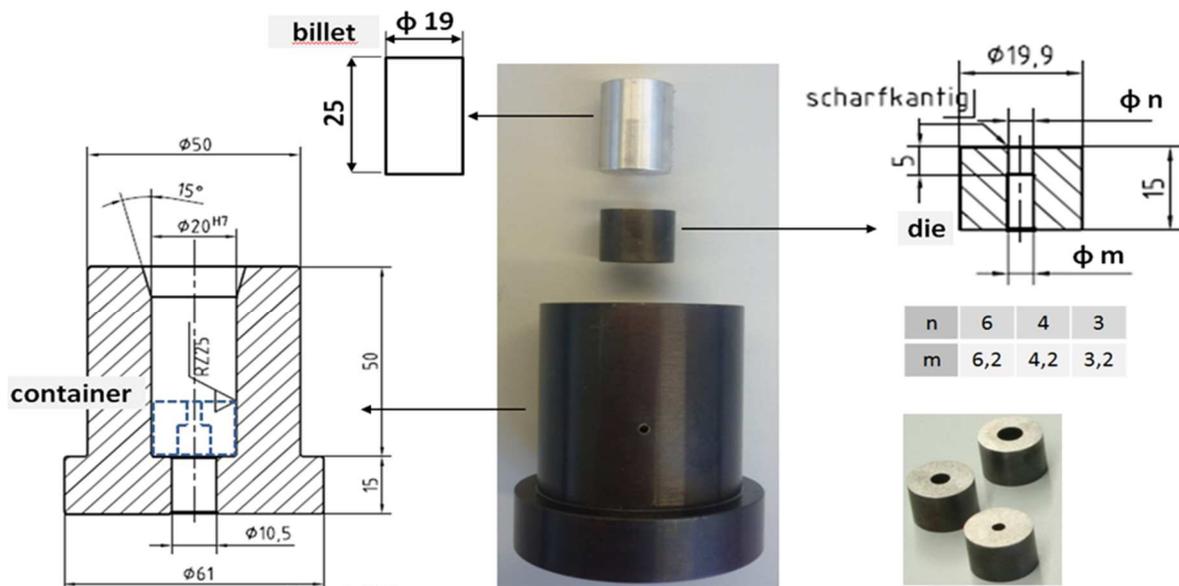


FIGURA 3.1.1: SCHEMA BILLETTA, CONTENITORE E MATRICE – PROVE DI MICROSTRUTTURA

Sono state quindi definite una serie di prove (18) da svolgersi sotto diverse condizioni operative in maniera tale da poter rilevare la dimensione del grano nelle condizioni di

interesse. Esse differiscono nei valori di temperatura della billetta (480, 520 e 560 °C), nei diametri della matrice ($\phi 3$, $\phi 4$ e $\phi 6$ mm) e nei valori di velocità del pistone (0.5 e $5 \frac{mm}{s}$). Lo schema riassuntivo dell'insieme delle prove svolte è riportato in "Figura 3.1.2".

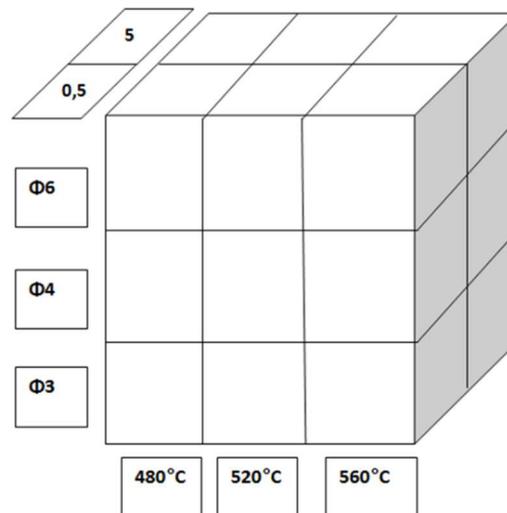


FIGURA 3.1.2: SCHEMA PROVE SPERIMENTALI DI MICROSTRUTTURA

Le temperature sopra indicate fanno riferimento alla temperatura della billetta a inizio estrusione. Infatti, viste le modeste dimensioni dell'apparecchiatura, l'insieme billetta-contenitore e matrice veniva preriscaldato in forno ad una temperatura leggermente superiore a quella richiesta dalla prova e caricata nella pressa. Si lasciava raffreddare il tutto fino alla temperatura desiderata, rilevata tramite termocoppie poste a contatto con la billetta, per poi iniziare il processo di estrusione.

Al termine di ogni prova, la billetta è stata estratta dalla pressa e immediatamente temprata in acqua al fine di raffreddarla ed evitare così una possibile evoluzione microstrutturale non causata dalla deformazione. Infatti, senza una immediata tempra, si avrebbe una ricristallizzazione dei grani.

Portata quindi a temperatura ambiente ogni billetta è stata sezionata lungo il piano contenente l'asse di simmetria e tramite un processo di "electroetching" sono stati messi in evidenza i grani cristallini. Successivamente sono state definite, per ciascuna prova, varie zone (in genere 10) in cui, grazie all'utilizzo di un microscopio ottico polarizzato, è stata misurata la lunghezza e lo spessore dei grani.

In "Figura 3.1.3" è visibile l'immagine di una delle billette sezionate in cui sono evidenziate le varie zone dove è stata effettuata la misura della dimensione. Come si può notare, la

forma dei grani è tutt'altro che omogenea, si notano in particolare varie zone in cui è presente un evidente allungamento dei grani stessi, causato dalla deformazione alla quale sono stati sottoposti. Inoltre si vede come la direzione di allungamento dei vari grani sia parallela al flusso del materiale in uscita.

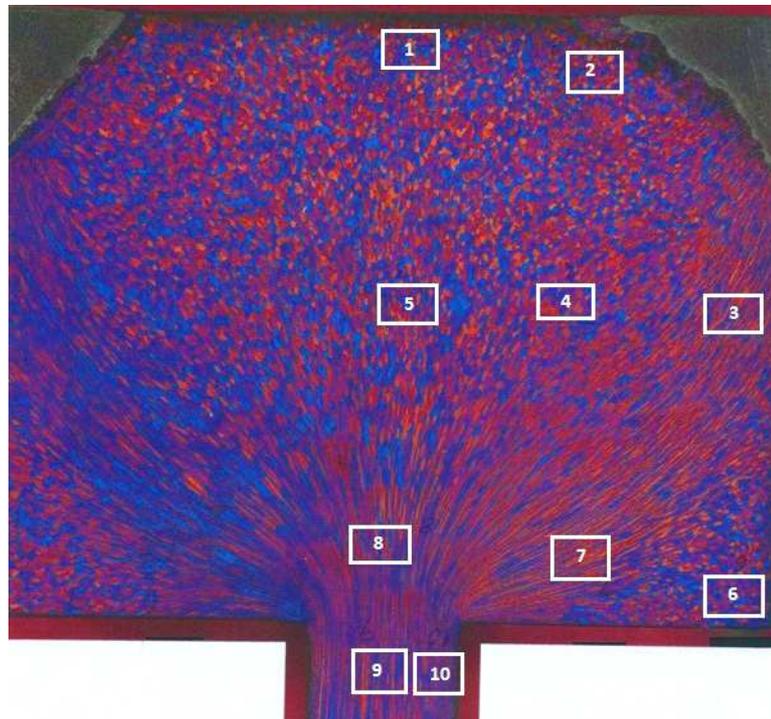


FIGURA 3.1.3: GRANI CRISTALLINI E ZONA DI RILEVAZIONE - BILLETTA DI PROVA
 480°C , $\phi 4$, $0.5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Il valore finale di dimensione dei grani è stato ricavato facendo la media dei valori rilevati all'interno di una determinata zona tramite il metodo dell'intercettazione lineare media: una griglia ortogonale è stata posta sulla zona di rilevazione scelta ed orientata quindi lungo la direzione dei grani. Il rapporto medio tra il numero di intercettazioni del bordo del grano e la lunghezza totale della linea permetteva di ricavare il valore medio della dimensione del grano nella direzione data ("Figura 3.1.4"). In questa maniera è stato possibile ricavare sia la lunghezza (d_l - length) che lo spessore del grano (d_t - thickness).

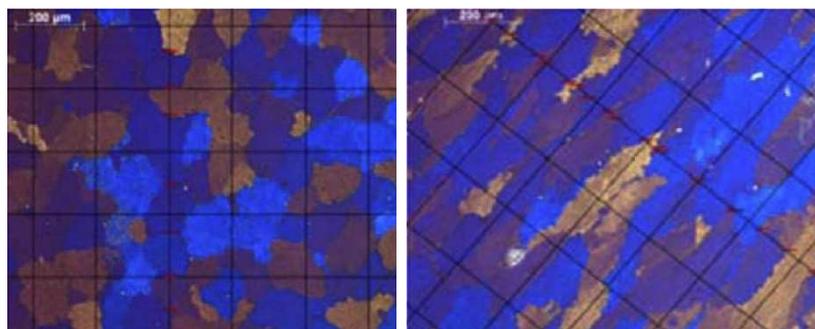


FIGURA 3.1.4: GRIGLIA PER RILEVAZIONE LUNGHEZZA E SPESSORE DEL GRANO MEDIA

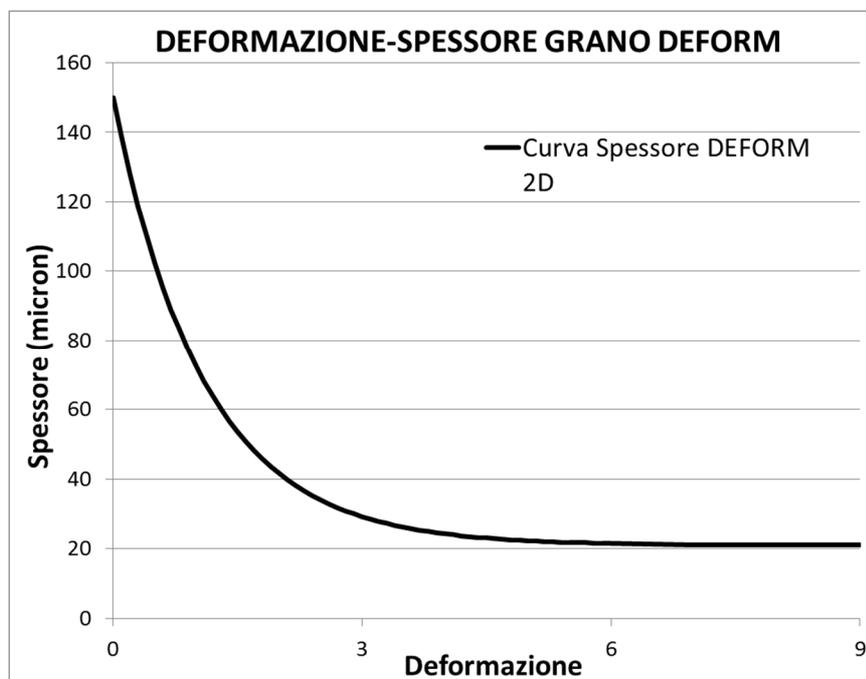
A questo punto è stata svolta una attività, tramite l' utilizzo del software DEFORM 2D volta a valutare il valore della deformazione nelle varie zone di rilevazione di ogni billetta. In questo modo è stato possibile correlare alla deformazione il relativo valore di lunghezza e spessore del grano cristallino. Sono state così individuate le seguenti curve ("Figura 3.1.5") che rappresentano l'andamento dei valori lunghezza e spessore in funzione della deformazione. Tali curve, utili ai fini industriali in quanto permettono di prevedere, data la deformazione in un punto, la conseguente dimensione del grano, sono rappresentate dalle seguenti equazioni:

$$d_t = (d_0 - 2.5 \cdot \delta_{ss})(k_1)^{\bar{\epsilon}} + 2.5 \cdot \delta_{ss}$$

$$d_l = k_2 \cdot \bar{\epsilon}^2 - k_3 \cdot \bar{\epsilon} + d_0 \quad \text{per } \epsilon < \epsilon_p$$

$$d_l = k_4 \cdot \bar{\epsilon}^{-m} + 10 \cdot \delta_{ss} \quad \text{per } \epsilon > \epsilon_p$$

Con $d_0 = 150 \mu\text{m}$ (dimensione iniziale del grano), $\delta_{ss} = 8.4 \mu\text{m}$ (dimensione del subgrano in dimensioni statiche), $\epsilon_p = 3$ (livello critico di deformazione), $k_1 = 0.4$, $k_2 = 85.192$, $k_3=14.88$, $k_4 = 1.68 \times 10^5$, $m = 4,75$.



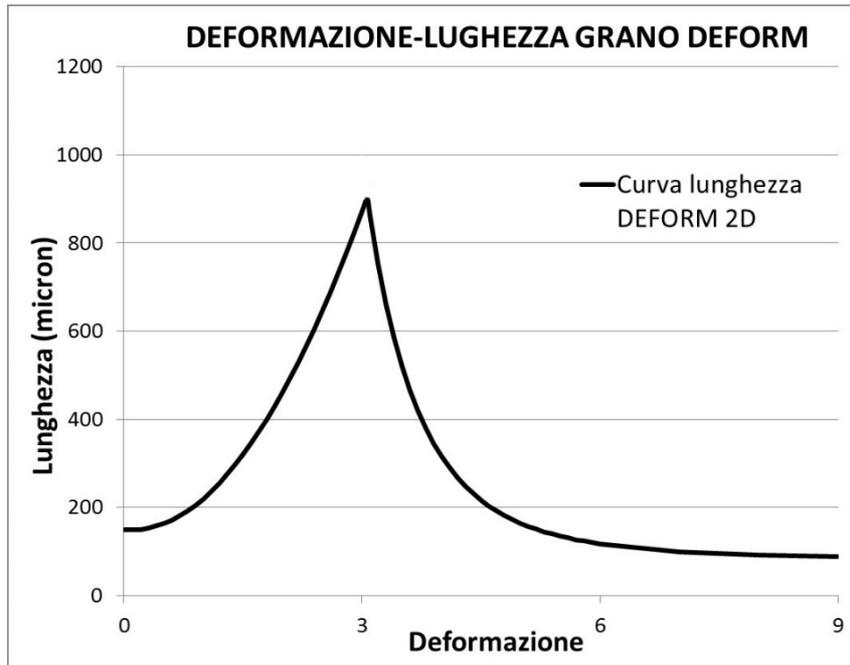


FIGURA 3.1.5: CORRELAZIONE DEFORMAZIONE-SPESSORE E DEFORMAZIONE-LUNGHEZZA OTTENUTA CON DEFORM 2D

Come si può osservare nel grafico di “deformazione-spessore”, l’andamento dello spessore del grano è decrescente, assestandosi al valore minimo pari a 20 μm circa.

Invece nel grafico “deformazione-lunghezza” si nota che, oltre al valore di deformazione $\epsilon_p = 3$, si assiste ad un calo della lunghezza dei grani, il cui valore massimo è di circa 880 μm . Questo fenomeno, denominato “pinch-off”, è causato, citando la teoria gDRX (Geometrical Dynamic Recrystallization), dal fatto che oltre ad un valore di deformazione critico i bordi del grano cristallino a causa della formazione di subgrani diventano così vicini da entrare in contatto e dare origine a due grani differenti (“Figura 3.1.6”).



FIGURA 3.1.6: SCHEMA DEL FENOMENO DEL PINCH-OFF NELLA TEORIA gDRX

Sulla base quindi di queste rilevazioni e prove sperimentali si ricaverà una nuova curva di correlazione tra deformazione e dimensioni del grano cristallino mediante l’uso del software Qform.

3.2 SIMULAZIONI DI MICROSTRUTTURA E SVILUPPO SUBROUTINE

L'insieme delle prove eseguite dal team di ricerca con DEFORM 2D per ottenere la correlazione tra deformazione e spessore-lunghezza del grano sono state nuovamente svolte con l'utilizzo del software Qform al fine di ottenere una correlazione più precisa e simile alla realtà. Questo è stato possibile in quanto le prove, di seguito riportate, si basano sulla fase di ottimizzazione del software e validazione dei modelli di attrito precedentemente analizzata.

Infatti, come successivamente descritto, è stato utilizzato il modello di attrito ricavato dalla parte di visioelasticità. In questa maniera l'intero processo simulato ha utilizzato un modello validato e quindi ha permesso di ottenere un risultato sicuramente molto più attendibile.

Da notare inoltre che tramite un esperimento condotto sempre dal "Dipartimento di Ingegneria Industriale (D.I.N.)" dell'Università di Bologna è stato verificato che il modello di attrito che si sviluppa nel caso dei processi in esame con una lega di alluminio AA6060 o con una lega AA6082 risulta il medesimo. E' per questo motivo possibile estendere i risultati di visioelasticità alle simulazioni di microstruttura.

Le simulazioni di microstruttura eseguite con Qform sfruttano i dati forniti relativi a 13 delle prove sperimentali. Così come per la parte di visioelasticità, il punto di partenza per l'impostazione della simulazione è la preparazione delle geometrie. Realizzate basandosi sui disegni di "Figura 3.1.1" tramite l'utilizzo del software "SolidWorks 2014" (vista la difficoltà nel creare geometrie utilizzando il programma "Qdraft" interno a Qform), sono state poi importate in Qform. Di seguito in "Figura 3.2.1" si riporta la geometria utilizzata; il diametro della matrice varierà a seconda della prova considerata. Così come per la parte di visioelasticità, dato che il processo in questione è assialsimmetrico, il software ha richiesto in ingresso il disegno della sezione dell'insieme billetta, contenitore, matrice e pistone. Particolare attenzione è stata posta al posizionamento reciproco degli utensili. Infatti è stato necessario disegnare i contorni dei vari elementi già collocati come ad inizio estrusione (come in figura) in quanto Qform non riusciva a posizionare correttamente il

pistone tramite l'utilizzo dei comando "Put in contact". Analogamente alla parte di visioelasticità sono stati presi alcuni accorgimenti nel disegno della geometria:

- è stato trascurato il gioco tra il pistone e il contenitore (che si ha nelle prove reali) per evitare trafiletti di materiale durante la simulazione (entrambi sono stati posti a $\phi 19$ mm);
- è stato posto un raggio di raccordo sullo spigolo interno della matrice (pari a 0,20 mm) per evitare di ottenere un profilo dell'estruso non lineare;
- a differenza della parte di visioelasticità non è stato necessario semplificare il disegno;
- una volta caricata la geometria, l'origine del sistema di riferimento utilizzato da Qform è stato posizionato nel centro della circonferenza del diametro interno della matrice al fine di semplificare la rilevazione delle deformazioni nelle varie aree.

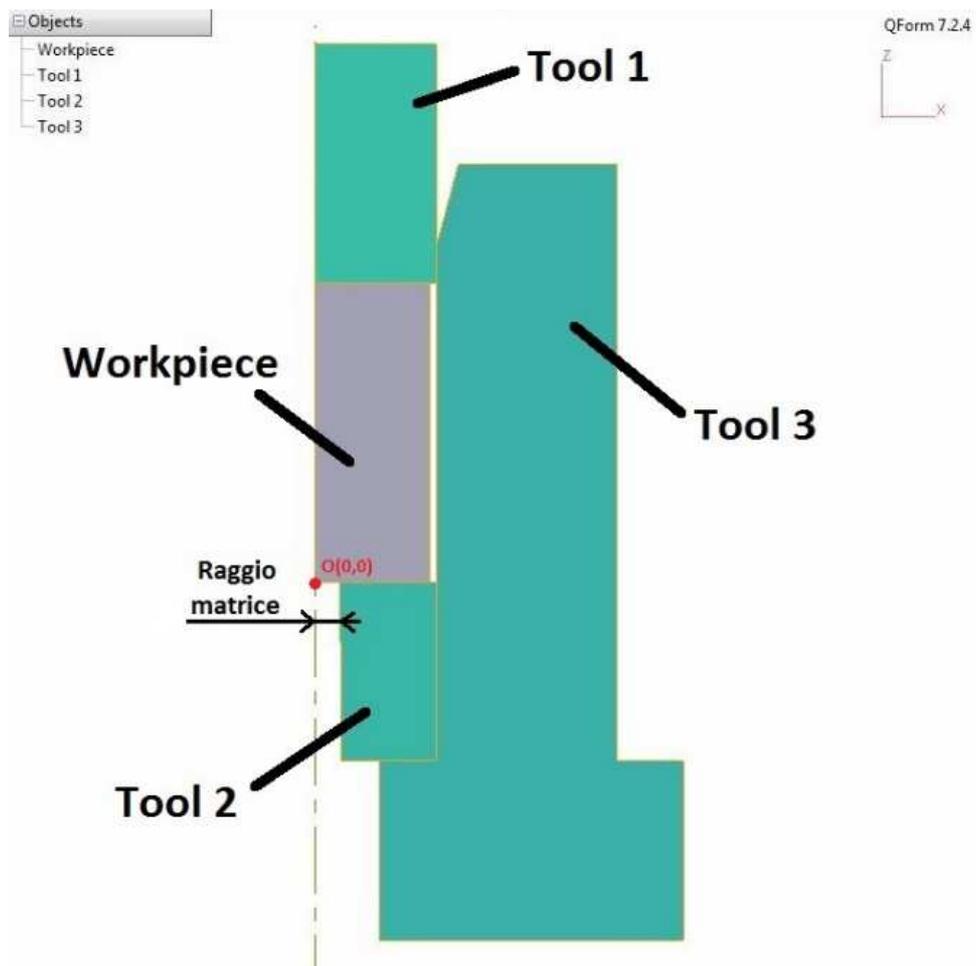


FIGURA 3.2.1: GEOMETRIA PROVE DI MICROSTRUTTURA, $\phi = 3, 4$ O 6 MM
A SECONDA DELLA PROVA CONSIDERATA

Dopo aver definito la geometria, sono state impostate le condizioni al contorno per i processi in esame. Sono quindi di seguito riportati i valori impostati; per l'analisi del significato dei parametri stessi si faccia riferimento alla parte di visioelasticità.

PROCESS (condizioni generali del processo in esame):

General forming with thermal process

Problem type 2D axisymmetric

WORKPIECE PARAMETERS (voci principali):

MATERIAL

E' stato impostato il flow stress relativo alla lega AA6082. Dopo una serie di prove per valutare in questo esperimento quale fosse il modello ottimale, si è optato per il modello tabulato in quanto con esso si ottenevano dei valori di carico leggermente maggiori rispetto al modello di Hensel e Spittel. Si riportano di seguito sia i valori impostati nel modello tabulato, sia l'equazione H-S relativa alla lega in esame.

425°C	0,05	0,2	1	3	10	20
1E-7	36	41	45	53	56	58
0,2	37,5	44	48,5	59,1	61	62
0,6	40,3	46,3	51,1	60,9	64,5	65,5
1	40,8	47,2	53	60,8	66	67
2	38,4	45,6	53	58,9	65,6	68
5	28	38	46	51,5	62	64,6
10	18	26	33	40	50	52
20	17	25	32	39	49	51

450°C	0,05	0,2	1	3	10	20
1E-7	29	36	41	48	52	54
0,2	32	38	44	52	55	58
0,6	35,9	41,8	47,4	55,5	59	61
1	36,2	42,5	49,1	55	62	63
2	33,2	40,2	48	52,3	61,4	64,5
5	24	30	40,5	45,7	56,5	62,3
10	15	20	26	32	44	50
20	14	19	25	31	43	49

475°C	0,05	0,2	1	3	10	20
1E-7	25	30	40	46	48	50
0,2	28	33,5	42	49	52	54
0,6	31,8	37,6	45,5	52,1	55	57
1	31,9	38,1	47,2	52,2	56	58
2	28,5	35,3	46,2	50	56	58,3
5	21	26	37,2	41,6	49,9	55,5
10	12	15	21	25	36	40
20	11	14	20	24	35	39

500°C	0,05	0,2	1	3	10	20
1E-7	22	27	32	40	44	46
0,2	25	30	34,6	45	47,5	50
0,6	28,1	33,8	39,5	47,5	52	54
1	28	34,1	39,8	47,9	52,5	55,3
2	24,3	30,8	36	44,3	50	53,4
5	16	20	27	33,8	41	43,5
10	9	11	15	17	23	27
20	8	10	14	16	22	26

520°C	0,05	0,2	1	3	10	20
1E-7	20	24	27	34	37	40
0,2	23	27	32	39	42	44
0,6	25,45	31	37	42,5	47,8	50,9
1	25,27	31,1	38,2	43,2	48,8	52
2	21,3	27,5	35,5	41,1	47,3	51
5	13	16	23	29	36	41
10	8	10	13	14	17	20
20	7	9	12	13	16	19

540°C	0,05	0,2	1	3	10	20
1E-7	18	21	25	32	35	38
0,2	20	24	29	35	39	42
0,6	23	28,38	35,01	39,7	44,99	48
1	22,7	28,34	35,34	40,3	45,8	49
2	18,6	24,5	32,23	37,77	43,98	47,6
5	11	13,5	20	25	33	37
10	7	9	11	12	15	17
20	6	8	10	11	14	16

560°C	0,05	0,2	1	3	10	20
1E-7	15	18	22	29	32	35
0,2	17	22	26	33	36	39
0,6	20,77	25,94	32,46	37,1	42,3	45,3
1	20,37	25,78	32,62	37,5	42,99	46,18
2	16,28	21,83	29,23	34,65	40,79	44,39
5	9	11	17	21	28	33
10	6	7,5	9	10	12	14
20	5	6,5	8	9	11	13

TABELLA 3.2.1: TENSIONE DI FLUSSO AA6082 IN FORMA TABULATA (STRAIN - STRAIN RATE [1/s])

Il grafico dell'andamento della tensione di flusso è quindi il seguente ("Figura 3.2.2").

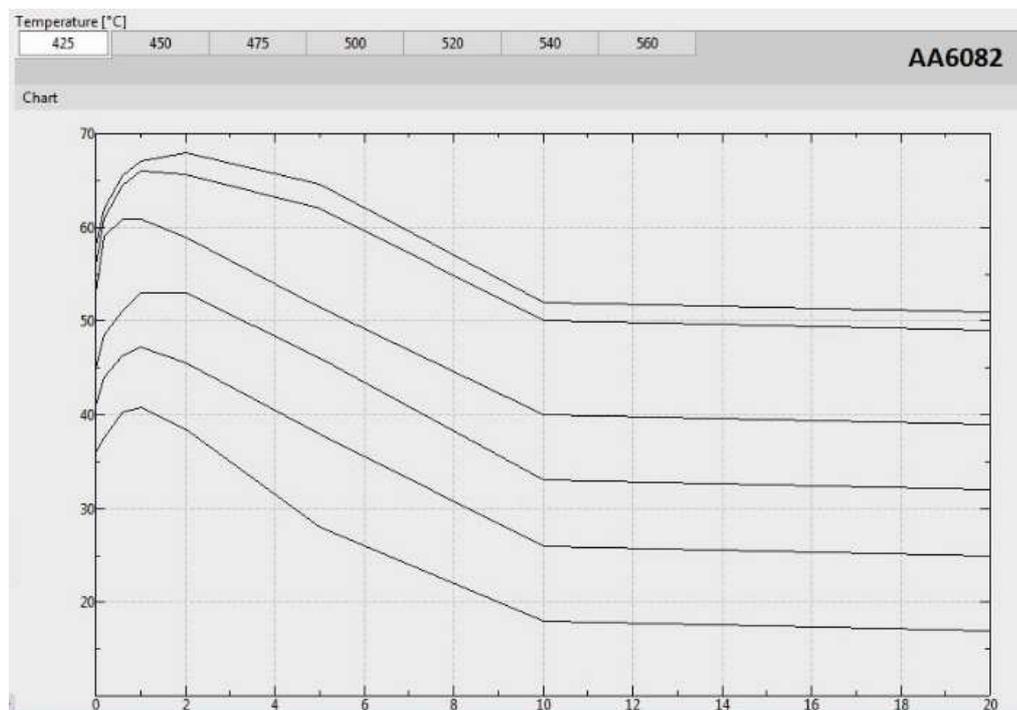


FIGURA 3.2.2: TENSIONE DI FLUSSO RILEVATA DA QFORM AA6082

Invece con il metodo H-S la formula da implementare in “Lua” (in maniera analoga a quella vista nella parte di visioelasticità) è stata la seguente:

$$\bar{\sigma} = A e^{m_1 T} T^{m_2} \bar{\epsilon}^{m_3} e^{\frac{m_4}{\bar{\epsilon}}} (1 + \bar{\epsilon})^{m_5} T e^{m_7 \bar{\epsilon}} \dot{\bar{\epsilon}}^{m_3} \dot{\bar{\epsilon}}^{m_8} T$$

utilizzando i parametri (che sono stati ricavati sperimentalmente per l'alluminio considerato) $A = 568$, $m_1 = -0.00371$, $m_2 = 0.0439$, $m_3 = 0.118$, $m_4 = -0.00279$, $m_5 = -0.000295$ e posti uguali a zero i rimanenti.

TEMPERATURE

Temperatura della billetta: posta a 480, 520 e 560°C a seconda della prova considerata.

TOOL PARAMETERS

DRIVE

- Tool 1 (pistone): pressa idraulica con carico massimo di 120MN e velocità definita dal tipo di prova eseguita (0.5 o 5 mm/s) con spostamento consentito solo lungo la direzione “-Z” (“Motion direction Z=-1”) (si veda il sistema di riferimento di “Figura 3.2.1”)
- Tool 2 (matrice): elemento fisso, nessun movimento concesso (“Drive type – Fixed – Motion direction X=0, Y=0, Z=0”)
- Tool 3 (contenitore): elemento fisso, nessun movimento concesso (“Drive type – Fixed – Motion direction X=0, Y=0, Z=0”)

LUBRICANT

E' stato utilizzato il modello di attrito ricavato dalla “Condizione migliore” delle prove di visioelasticità: Levanov 5 esponente 1,25.

MATERIAL

Per tutti e tre i “TOOL” è stato utilizzato un acciaio H11 (preso dalla libreria di Qform) per motivazioni analoghe alla parte precedente.

TEMPERATURE

Sono stati utilizzati i seguenti valori di temperatura, definiti dalle prove sperimentali:

- Tool 1: 400°C
- Tool 2: 480, 520 e 560°C (a seconda della prova considerata)
- Tool 3: 480, 520 e 560°C (a seconda della prova considerata)

PUT IN CONTACT

“Move backward first”

FRICITION BETWEEN TOOLS

“Steel-steel without lubricant” (modello di attrito Coulombiano con coefficiente pari a 0.3)

HEAT TRANSFER TO WORKPIECE

- Tool 1: coupled
- Tool 2: coupled
- Tool 3: coupled

(Lo scambio termico con la billetta viene simulato su tutto il volume degli utensili)

STOP CONDITIONS:

Impostata la corsa massima per il pistone (Tool 1) pari a 10mm.

BOUNDARY CONDITIONS:

AIR 20°C: è stato lasciato il valore di default del software visto che ai fini delle prove di microstruttura tale parametro risulta ininfluenza dato che la billetta non riposa in aria prima del caricamento e dato che non sono stati rilevati dati sulle temperature in uscita durante le prove sperimentali.

BLOWS:

BLOWS: 1 (estrusione)

COOLING IN AIR: 0 secondi; la billetta non riposa in aria.

COOLING IN TOOL: 0 secondi; impostando le temperature di billetta ed utensili già al valore di temperatura di inizio estrusione non è necessario utilizzare tale parametro, posto quindi a 0 secondi.

SIMULATION PARAMETERS:

Sono stati utilizzati i valori ricavati dalla “condizione migliore” della parte di visioelasticità. Si ricorda quindi che per le considerazioni fatte precedentemente è stato utilizzato un valore di “Deformation heat generation efficiency” = 0.5 - “Friction heat generation efficiency” = 0.5 e parametri di mesh analoghi alla parte precedente (impostando mesh fine o grossolana a seconda della presenza o meno dell’errore “No solution found at the step XXX”)

Utilizzando i parametri sopra elencati sono state svolte le seguenti 13 prove delle quali erano disponibili i dati sperimentali:

ϕ (mm)	Temperatura (°C)	Velocità (mm/s)
3	560	5,00
4	480	0,05
4	520	0.05
4	560	0,05
4	480	5,00
4	520	5,00
4	560	5,00
6	480	0,05
6	520	0,05
6	560	0,05
6	480	5,00
6	520	5,00
6	560	5,00

TABELLA 3.2.2: ELENCO DELLE 13 PROVE SIMULATE CON QFORM, OGNUNA PRESENTA CIRCA 10 AREE IN CUI È STATA EFFETTUATA LA RILEVAZIONE DELLA DEFORMAZIONE

Una volta eseguite tutte le singole simulazioni, sono stati rilevati i valori di deformazione ("Plastic Strain" in Qform) con il metodo di seguito riportato, al fine di effettuare una rilevazione delle deformazioni esattamente nelle aree in cui era stata valutata sperimentalmente la dimensione dei grani.

Dato che erano state fornite le immagini delle varie billette sezionate, sono state create delle griglie da sovrapporre all'immagine stessa in maniera tale da poter avere le coordinate quanto più esatte delle varie aree. Come si può vedere in "Figura 3.2.3" infatti a partire dalla sezione della billetta sono state individuate dall'immagine sperimentale le aree e vi è stata sovrapposta una griglia con quadretti di 1mm in maniera tale da ottenere le esatte coordinate delle diverse aree. Per esempio si vede che con questo metodo l'area "5" sarà a coordinate (1,5; 7,5). Avendo poi posto in maniera analoga l'origine del sistema di riferimento nella geometria caricata su Qform è stato possibile effettuare una rilevazione delle deformazioni esattamente nelle aree considerate sperimentalmente.

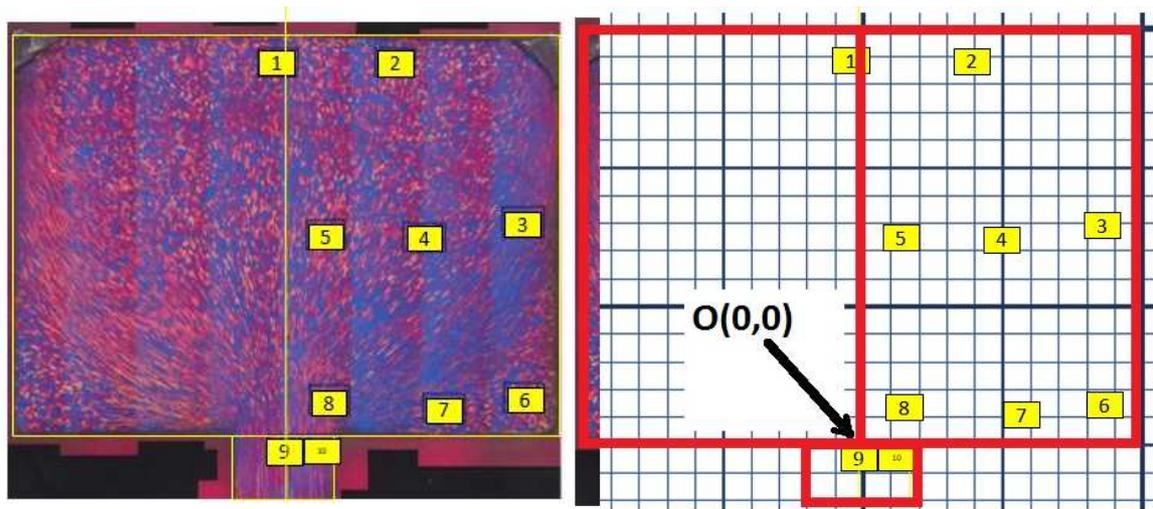
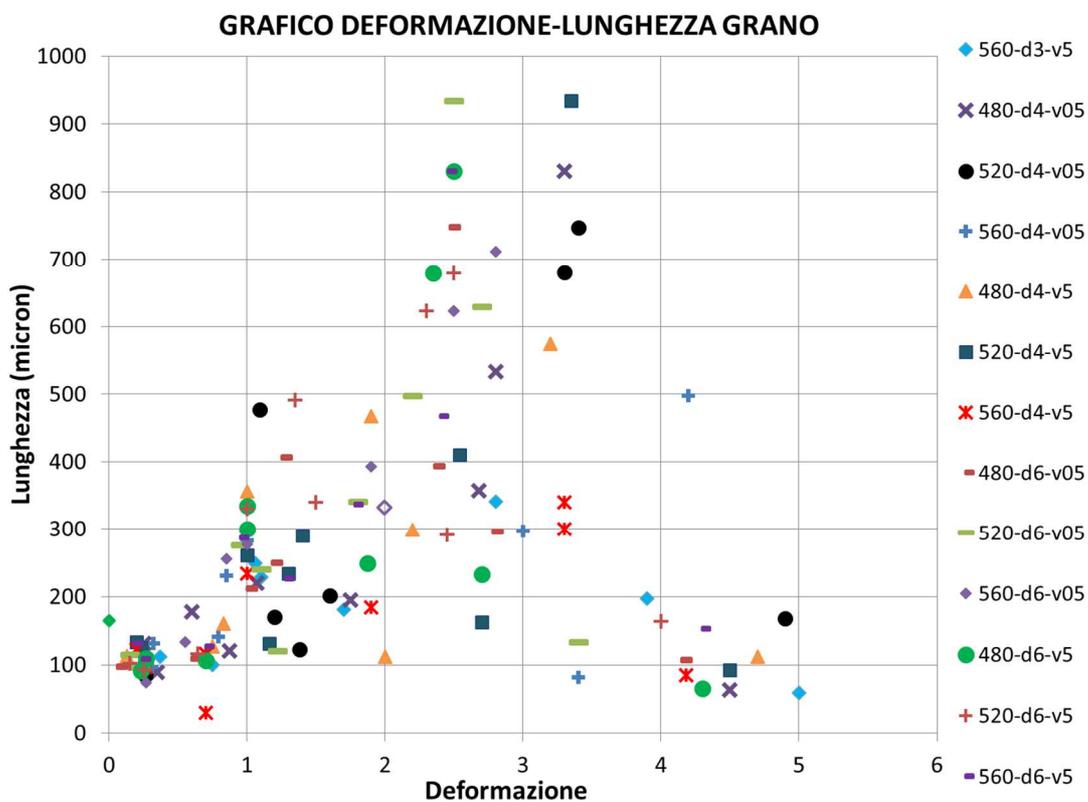


FIGURA 3.2.3: METODO CON “GRIGLIA” PER LA RILEVAZIONE DELLE DEFORMAZIONI NELLA PROVA $\phi 4 - 560^{\circ}\text{C} - 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Rilevata così in Qform la deformazione nelle varie aree e nota a partire dai dati sperimentali la dimensione del grano nelle varie zone, sono stati creati i grafici “deformazione - spessore del grano” e “deformazione – lunghezza del grano”. La nuvola di punti così ottenuta è visibile in “Figura 3.2.4” e “Figura 3.2.5”. Nel capitolo successivo verrà poi presentata la curva che meglio approssima il nuovo andamento dei punti.



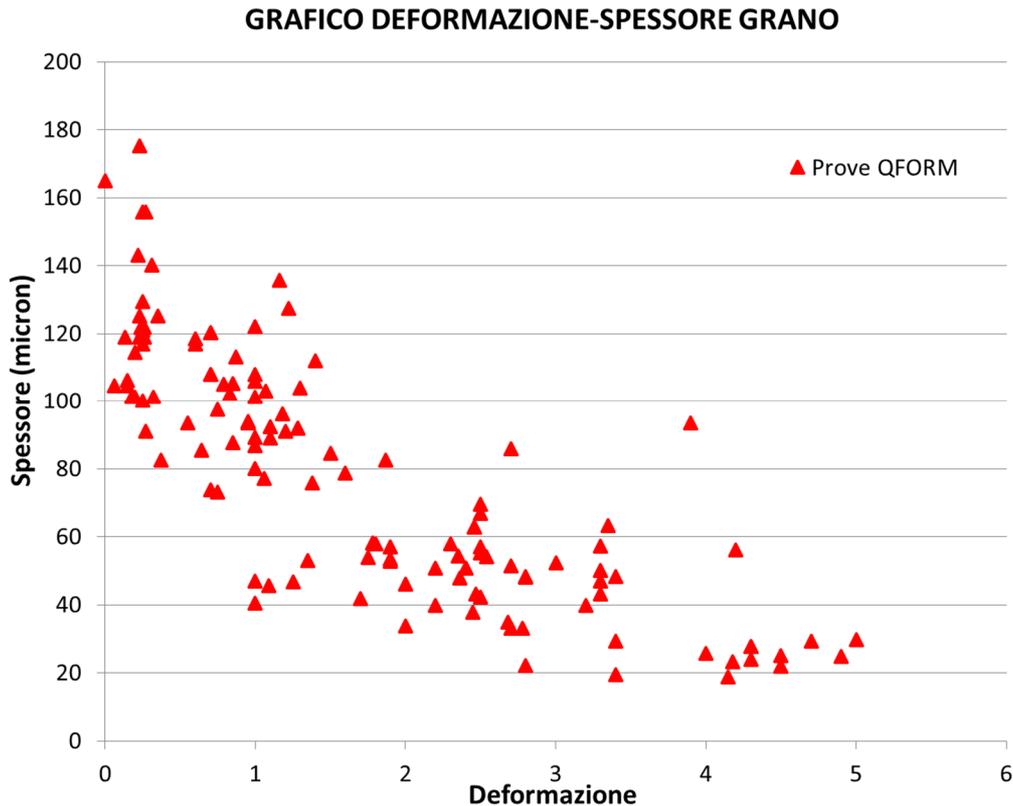


FIGURA 3.2.5: GRAFICO “DEFORMAZIONE-SPESSORE GRANO” RICAVATO TRAMITE LE SIMULAZIONI CON QFORM

Come accennato precedentemente nei capitoli di visioelasticità, una delle caratteristiche peculiari del software Qform è la possibilità poter di aggiungere al programma delle voci definite dall’utente. Tali implementazioni (subroutine), che vanno scritte in “Lua”, sono di due tipi:

1. SUBROUTINE DI PROCESSING: eseguite durante la simulazione. Un esempio possono essere le formule della tensione di flusso del materiale che viene implementata con i valori inseriti dall’utente semplicemente variando gli script in “Lua” già presenti nel manuale del programma Qform.
2. SUBROUTINE DI POSTPROCESSING: variabili calcolate dopo la simulazione. Servono per poter ottenere output diversi da quelli già interni a Qform. Per sfruttare tale potenzialità è necessario scrivere in linguaggio “Lua” il programma che implementa le funzioni desiderate.

Proprio sfruttando le variabili di postprocessing è stato possibile implementare nel programma le correlazioni trovate con DEFORM 2D e successivamente anche le nuove ottenute con Qform.

Prima di andare nel dettaglio di come è stata effettuata tale implementazione è utile accennare ai motivi che rendono vantaggioso l'utilizzo del linguaggio "Lua" rispetto ad altri.



FIGURA 3.2.6: LOGO DEL LINGUAGGIO "LUA"

Di seguito sono riportati i principali aspetti positivi di tale linguaggio rilevati nel corso del lavoro con Qform.

- E' un linguaggio gratuito. Tutta la documentazione (come manuali o esempi di utilizzo) è disponibile online nel sito degli sviluppatori e quindi facilmente reperibile.
- E' molto più veloce e semplice da utilizzare rispetto a gran parte degli altri linguaggi. Questo è stato confermato anche da numerosi test condotti da esperti del settore.
- Non richiede di essere precompilato dall'utente come per esempio accade per il linguaggio "C". Il programma per la compilazione è interno al programma ospite (Qform in questo caso) e opera automaticamente in maniera "just-in-time" (cioè prima di eseguire lo script stesso).
- Nonostante la semplicità con cui è scritto permette di svolgere le stesse funzioni che anche linguaggi più complessi hanno.
- Essendo molto diffuso (numerosi programmi e videogiochi lo utilizzano) è facile trovare materiale utile alla programmazione.
- Tra le sue caratteristiche permette di richiamare "librerie" di funzioni in maniera molto semplice così da velocizzare la scrittura svolta dall'utente.

Per lo sviluppo delle funzioni in Qform tramite subroutine bisogna quindi seguire la seguente procedura.

Innanzitutto è necessario scrivere lo "script" del programma in un "text editor" (si consiglia l'utilizzo di "Scintilla -SciTE" in quanto appositamente studiato per "Lua").

All'interno dello script che verrà poi utilizzato da Qform è indispensabile, come prima cosa, indicare su quale elemento deve essere calcolata la subroutine. Per fare ciò si utilizza:

- `set_target_workpiece()` nel caso del pezzo in lavorazione
- `set_target_tool()` nel caso degli utensili

Successivamente è necessario definire il parametro in uscita (l'output desiderato) e i parametri costanti interni alla subroutine stessa tramite le seguenti righe di comando:

```
nomeoutput = result("nomeoutput")
nomeparametro1 = parameter("nomeparametro1")
. . . . .
```

Solo a questo punto è possibile richiamare con il comando `function UserFields(XXX)` il parametro necessario nella funzione che si vuole implementare che va preso dai valori calcolati puntualmente dalla simulazione svolta da Qform nel "processing". Il nome del parametro in ingresso da inserire dentro le parentesi (`XXX`) si trova in un elenco presente nel manuale di Qform ("List of standard variables available in use subroutines for a workpiece/tool"). Per esempio `density` se si vuole richiamare la densità del materiale, `T` per la temperatura o, come nel caso in esame, `strain` per la deformazione.

Si possono a questo punto scrivere le funzioni precedute da `local` (eventualmente con cicli "if" se richiesto), ricordando di inserire al termine dello script, prima dell'`end` che conclude la function, l'indispensabile comando `store(nomeoutput, nomefunzione)` che serve a salvare i valori calcolati puntualmente dalla subroutine.

Si riportano quindi di seguito i due script sviluppati per implementare le curve relative alla correlazione "deformazione - spessore del grano" e "deformazione - lunghezza del grano". In questo esempio vengono utilizzati i parametri ricavati con DEFORM 2D; per avere lo script relativo alle nuove curve sviluppate con il lavoro di microstruttura svolto su Qform (vedi capitolo 3.3) è sufficiente variare il valore impostato per i parametri costanti.

DEFORMAZIONE-SPESSORE DEL GRANO

--Grain thickness AA6082 DEFORM 2D

```
set_target_workpiece()
```

```
d_t = result("d_t")
```

```
d_0 = parameter("d_0", 150) --valore iniziale della  
dimensione del grano (micrometri)
```

```
d_ss = parameter("d_ss", 8.4) --micrometri
```

```
k1 = parameter("k1", 0.4) --coeff
```

```
function UserFields(strain)
```

```
    local d_thickness = ((d_0-  
2.5*d_ss)*(k1)^(strain))+2.5*d_ss
```

```
    store(d_t, d_thickness)
```

```
end
```

DEFORMAZIONE-LUNGHEZZA DEL GRANO

--Grain lenght AA6082 DEFORM 2D

```
set_target_workpiece()
```

```
d_l = result("d_l")
```

```
d_0 = parameter("d_0", 150) --valore iniziale della  
dimensione del grano (micrometri)
```

```
d_ss = parameter("d_ss", 8.4) --micrometri
```

```
k2 = parameter("k2", 85.192) --coeff
```

```
k3 = parameter("k3", 14.88) --coeff
```

```
k4 = parameter("k4", 168000) --coeff 1.68E05
```

```
m = parameter("m", 4.75) --coeff
```

```
e_p = parameter("e_p", 3) --critical level of strain
```

```
function UserFields(strain)
```

```
    local d_lenght
```

```

if (strain<e_p)
then
    d_lenght = (k2*strain^(2))-k3*strain+d_0
else
    d_lenght = (k4*strain^(-m))+10*d_ss
end
store(d_l, d_lenght)
end
end

```

Per rendere quindi operativa la funzione scritta, una volta salvato lo script in formato “.txt” è sufficiente cambiarne l’estensione in “.lua”. Per verificare poi in prima approssimazione di non avere commesso errori di scrittura è sufficiente cliccare sopra al file “.lua” creato e controllare che non vengano segnalati errori nella schermata che temporaneamente viene visualizzata (“Figura 3.2.7”)

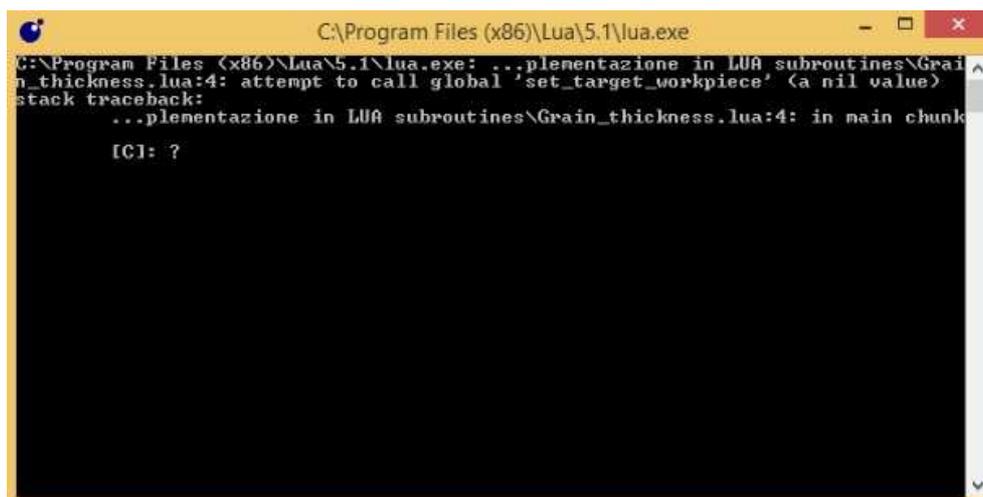


FIGURA 3.2.7: FINESTRA SENZA SEGNALAZIONE DI ERRORI IN CASO DI CORRETTA SCRITTURA IN LUA DI UNA SUBROUTINE

Per finire, si apre il programma sviluppato nella sezione SUBROUTINES di Qform e lo si esegue. Come si può vedere in “Figura 3.2.8” si possono controllare e variare i parametri inseriti anche dall’interfaccia proposta da Qform senza dover andare a modificarne direttamente lo script. I nuovi output saranno quindi disponibili nella sezione “Workpiece fields”. Se selezionati, verranno quindi visualizzati direttamente sul pezzo così come accade per i parametri già interni a Qform.

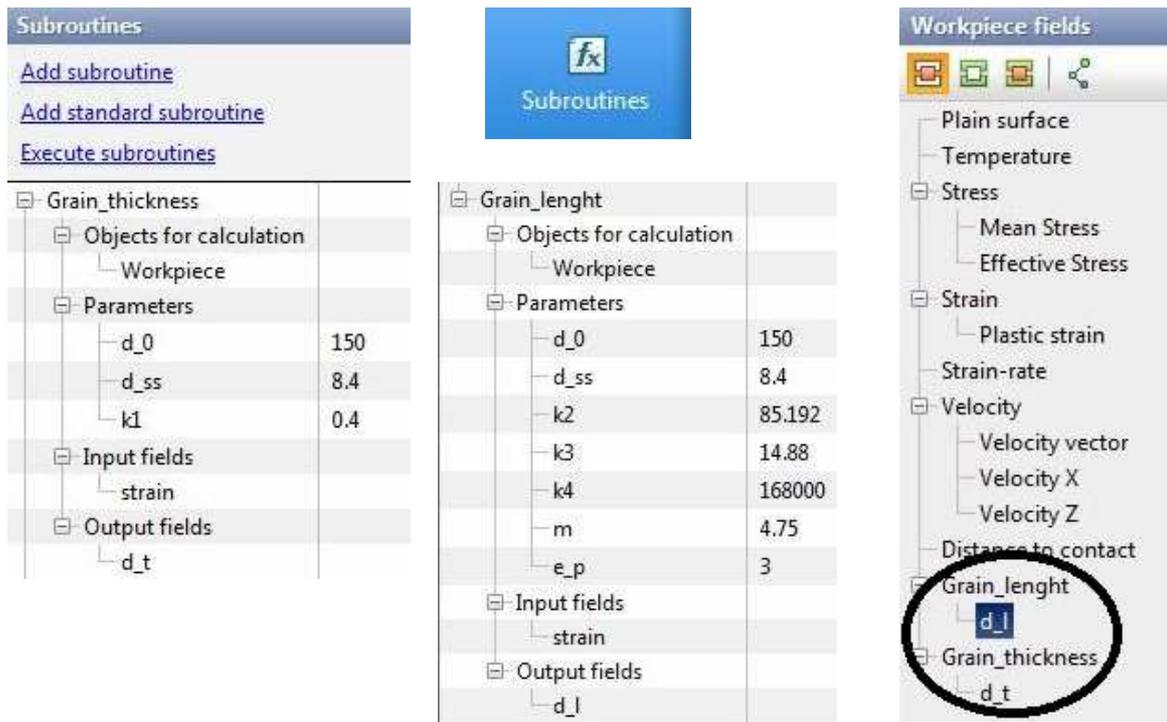


FIGURA 3.2.8: ESEMPIO SUBROUTINE CORRETTAMENTE CARICATA SU QFORM. NELLE DUE FIGURE DI SINISTRA SONO VISUALIZZATI I PARAMETRI, NELLA FIGURA DI DESTRA I NUOVI OUTPUT DEFINITI

Qualora quindi si desideri visualizzare la lunghezza del grano implementata con la procedura precedentemente descritta, si ha il seguente andamento:

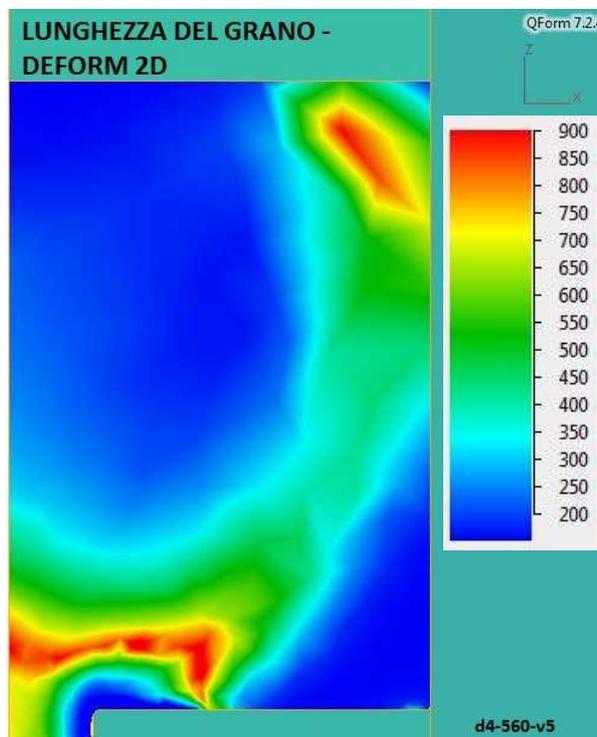


FIGURA 3.2.9: LUNGHEZZA DEL GRANO (MICRON) SECONDO LA CORRELAZIONE RICAVATA CON DEFORM 2D PER IL TEST $\phi 4 - 560^{\circ}\text{C} - 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

3.3 CONFRONTO DATI E DISCUSSIONE

Sulla base dei dati raccolti nelle 13 prove di microstruttura è stata determinata, come visibile nel capitolo precedente, la nuvola di punti che è stata trovata misurando i valori di deformazione ottenuti con Qform e correlandoli al rispettivo valore di dimensione del grano. Basandosi quindi sui punti ottenuti, è stato possibile determinare una nuova curva che definisse appunto la correlazione tra deformazione – spessore del grano e deformazione – lunghezza del grano. Questo andamento così definito è stato ottenuto variando i parametri delle formule già trovate con la campagna sperimentale svolta con DEFORM 2D in maniera tale da avere sempre equazioni che contenessero al loro interno i fattori costitutivi del fenomeno in esame cioè d_0 (dimensione iniziale del grano), δ_{SS} , (dimensione del subgrano) e ε_p (valore di deformazione di pinch off).

I parametri sono quindi stati modificati come segue:

$$d_t = (d_0 - 2.5 \cdot \delta_{SS})(k_1)^{\bar{\varepsilon}} + 2.5 \cdot \delta_{SS}$$

$$d_l = k_2 \cdot \bar{\varepsilon}^2 - k_3 \cdot \bar{\varepsilon} + d_0 \quad \text{per } \varepsilon < \varepsilon_p$$

$$d_l = k_4 \cdot \bar{\varepsilon}^{-m} + 10 \cdot \delta_{SS} \quad \text{per } \varepsilon > \varepsilon_p$$

PARAMETRO	DEFORM 2D	QFORM
d_0	150 μm	150 μm
δ_{SS}	8,4 μm	8,4 μm
ε_p	3	2,6
k_1	0,4	0,475
k_2	85,192	115
k_3	14,88	25
k_4	$1,68 \times 10^5$	9×10^4
m	4,75	4,9

TABELLA 3.3.1: VARIAZIONE PARAMETRI CURVE DEFORMAZIONE-DIMENSIONE GRANO

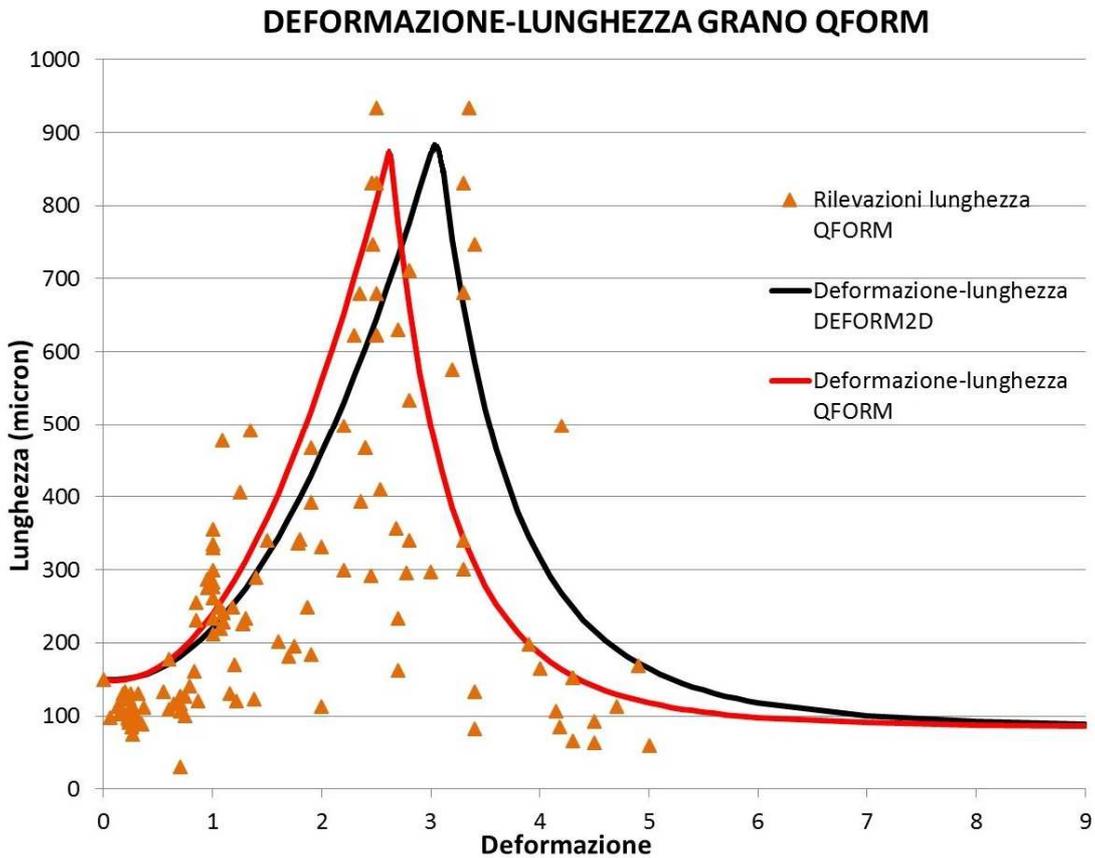
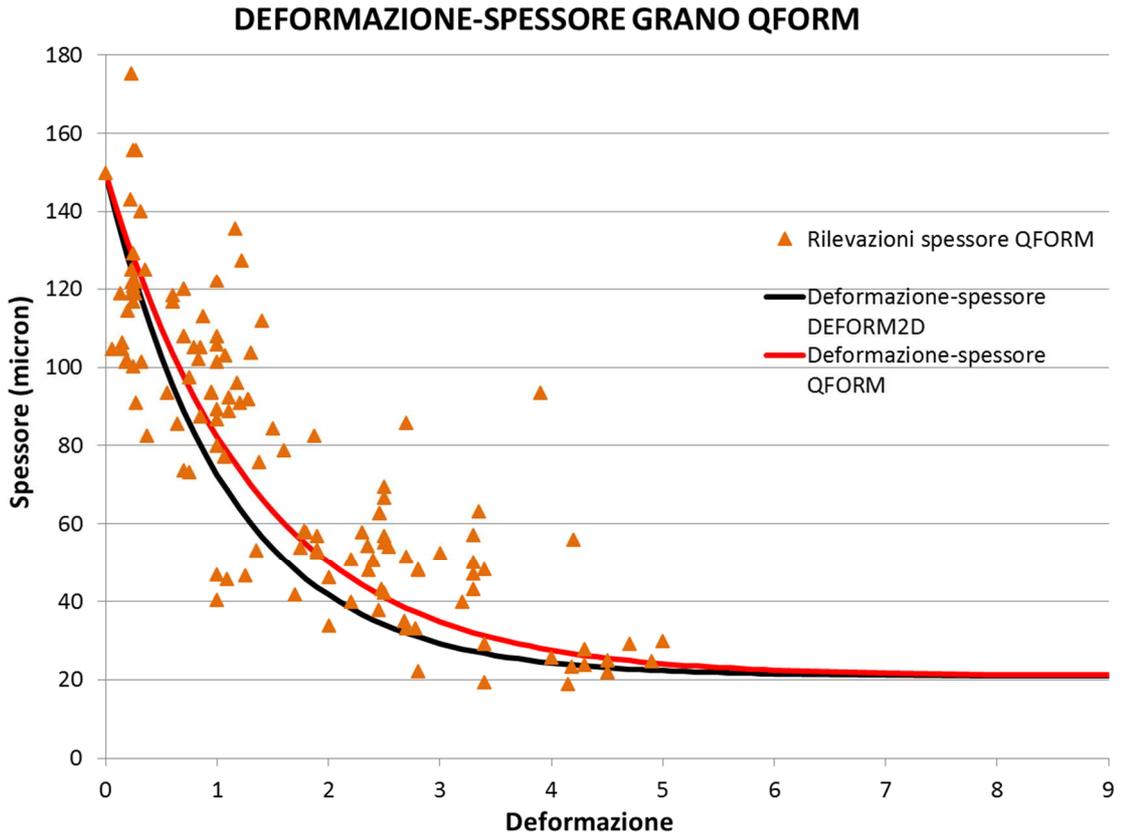


FIGURA 3.3.1: CONFRONTO CORRELAZIONE DEFORMAZIONE-SPESSORE E DEFORMAZIONE-LUNGHEZZA OTTENUTA CON DEFORM 2D E QFORM – AA6082

Come si può osservare da “Tabella 3.3.1” e “Figura 3.3.1”, relativamente alla curva “deformazione-spessore del grano”, il nuovo andamento che è stato determinato è simile a quello ricavato con DEFORM 2D, ma con valori di spessore leggermente più elevati a parità di valore di deformazione. Ciò è dovuto dal fatto che la nuvola di punti determinati con le simulazioni su Qform, si trova spostata verso valori maggiori di spessore, rispetto a quella ottenuta con DEFORM. Il valore asintotico pari a 20 μm al quale essa tende per valori di deformazione crescenti è stato mantenuto.

Relativamente alla curva “deformazione-lunghezza del grano” ottenuta mediante le prove con Qform si osserva come, per seguire l’andamento della nuvola di punti, sia stato necessario abbassare il valore di deformazione critico " ϵ_p " da 3 a 2,6. Infatti, rispetto all’andamento ottenuto con DEFORM 2D, sono stati misurati valori di deformazione mediamente inferiori a parità di lunghezza. Ovviamente il valore di deformazione al quale si ha il pinch off non è univocamente definito. Tuttavia 2,6 risulta un buon compromesso sia perché gran parte dei valori rilevati sono in un suo intorno sia perché con tale valore è possibile mantenere le equazioni sopra riportate, ma con parametri modificati. Inoltre utilizzando il valore pari a 2,6 è rispettato anche il valore di lunghezza massima del grano pari a 880 μm . Si nota inoltre che è stato in questo modo mantenuto il valore asintotico pari a circa 90 μm a cui tende la lunghezza del grano per valori elevati di deformazione. Infine occorre fare presente il motivo per cui siano presenti rilevazioni sperimentali che danno valori di lunghezza anche molto più bassi di quelli previsti dalla curva ottenuta (per esempio per valori di $\epsilon=2,6$ alcune rilevazioni danno lunghezze del grano molto inferiori a quelle definite dalla curva). Questo è causato dal fatto che il fenomeno del pinch off, che si sviluppa circa al valore di deformazione critico scelto, non necessariamente si ha esattamente a metà della lunghezza del grano, ma con una sua distribuzione si potrà verificare anche in altre zone. Per questo motivo, anche se con probabilità minore, è possibile avere anche grani che a valori elevati di deformazione hanno lunghezze molto basse. In “Figura 3.3.2” è sinteticamente rappresentato tale fenomeno.

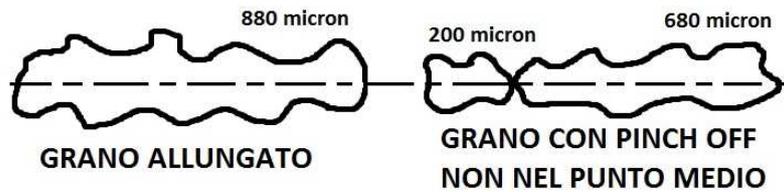
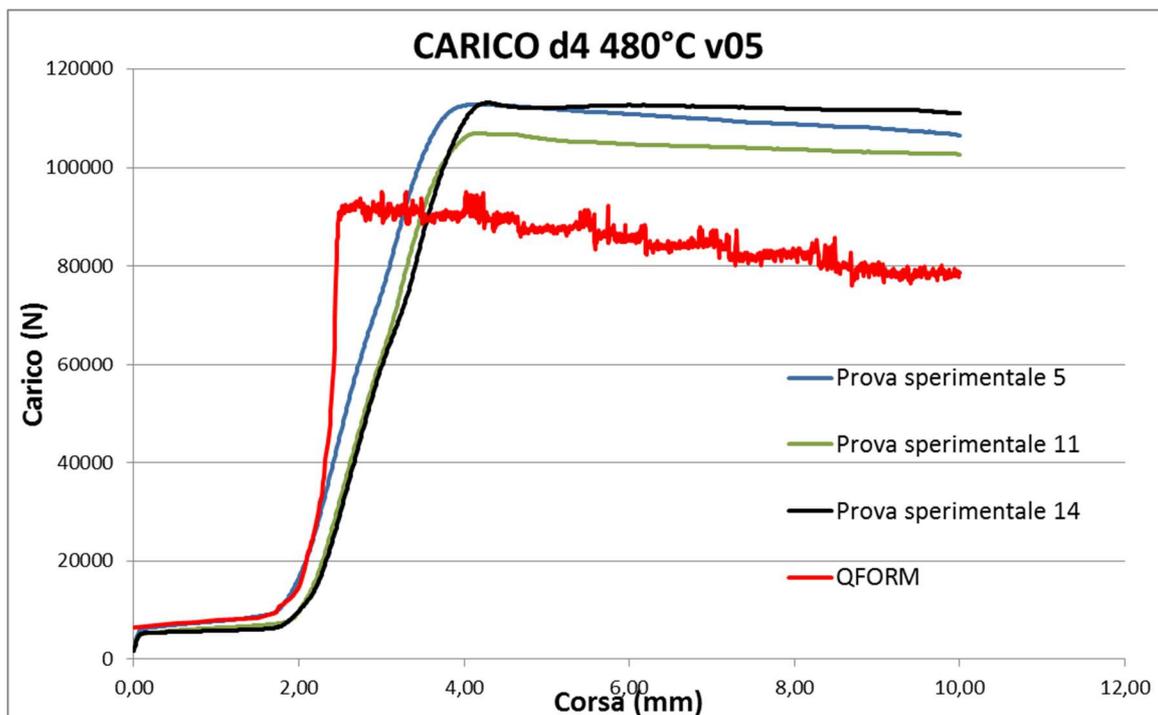
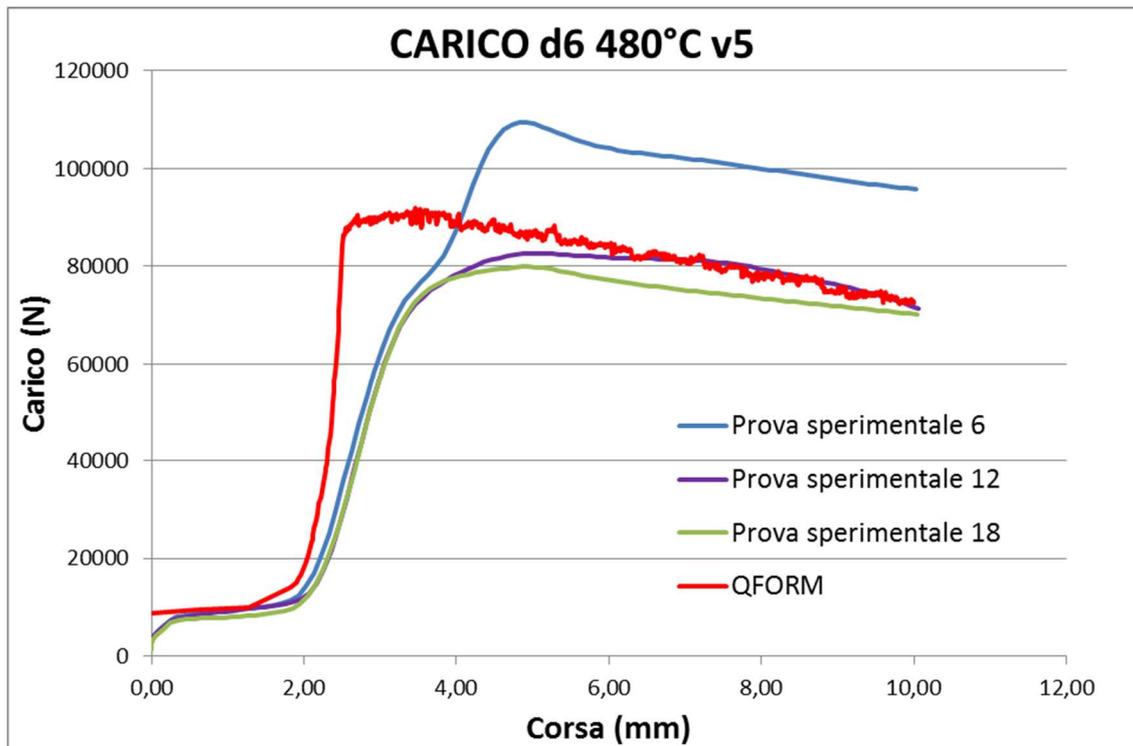
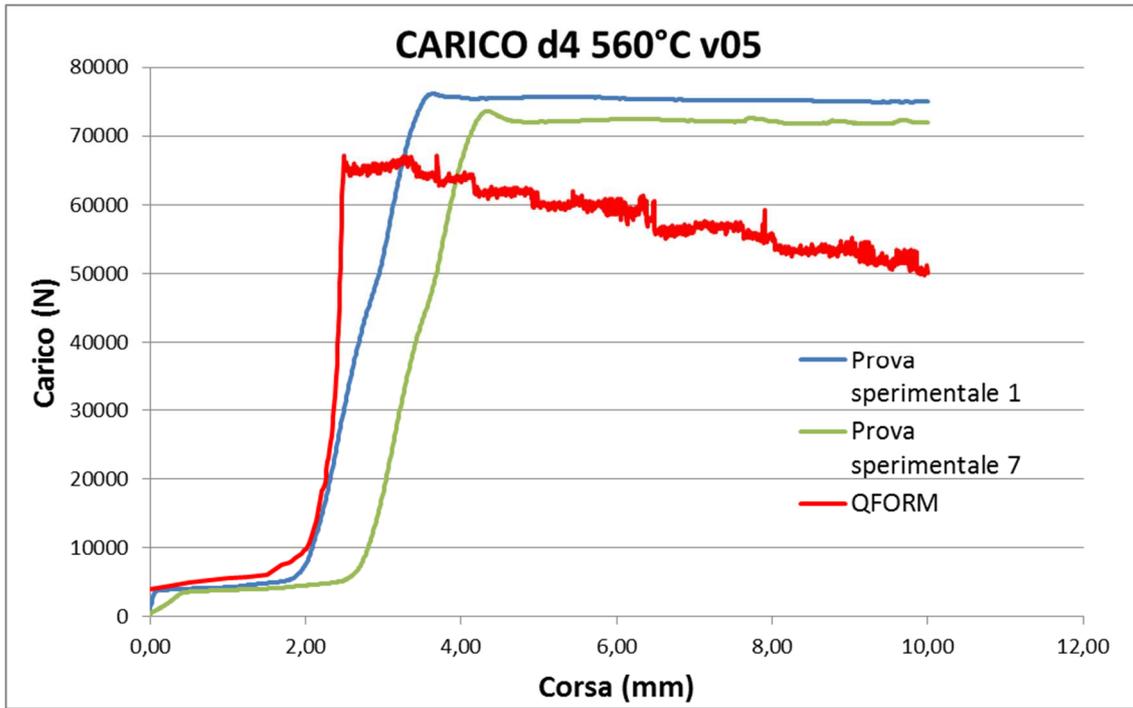


FIGURA 3.3.2: ESEMPIO FENOMENO DEL PINCH OFF NON NEL PUNTO MEDIO DEL GRANO

L'insieme delle prove svolte con Qform al fine di ottenere i valori di deformazione nelle varie aree e quindi la curva sopra riportata presentavano inoltre delle curve del carico di estrusione simili a quelle rilevate sperimentalmente a conferma della correttezza delle prove svolte. Si riportano di seguito in "Figura 3.3.3" il confronto tra le curve di carico rilevate sperimentalmente e con Qform. A differenza della parte di visioelasticità si hanno tolleranze maggiori sui carichi visto che la minor quantità di dati rilevati sulle estrusioni condotte sperimentalmente non permette di avere parametri di confronto utili ad una ulteriore ottimizzazione del software. Infatti ai fini dell'ottenimento della correlazione deformazione-dimensione del grano, vista la variabilità dei valori misurati, non avrebbe avuto senso restringere ulteriormente le tolleranze sui carichi. Occorre inoltre notare come, anche ripetendo le prove sperimentali per dati valori di diametro, temperatura e velocità di estrusione si ottengano valori di carico anche molto diversi tra loro come si può osservare dai grafici (per esempio tra la prova sperimentale 6 e la 12 in "d6 480°C v5").





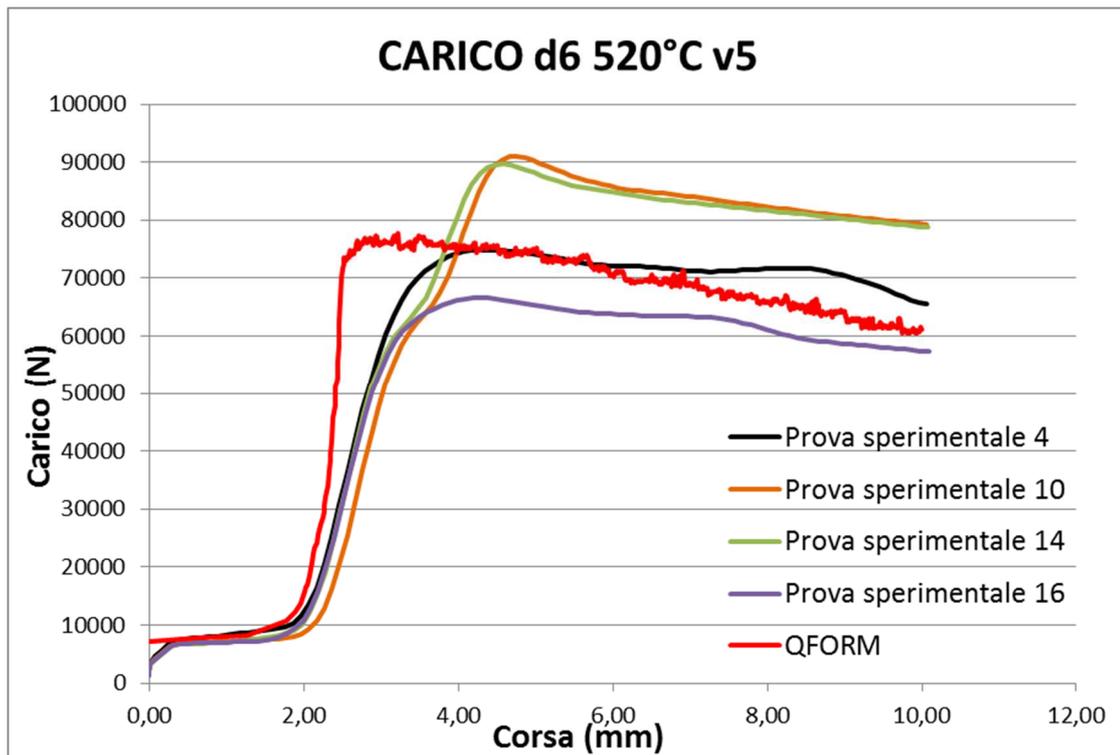


FIGURA 3.3.3: CONFRONTO TRA CURVE DI CARICO RILEVATE SPERIMENTALMENTE E CON QFORM PER ALCUNE DELLE PROVE DI MICROSTRUTTURA SVOLTE

Stando quindi alle considerazioni precedenti, le nuove correlazioni tra deformazione e dimensione del grano ottenute sono state implementate in “Lua” con il metodo descritto nel “Capitolo 3.2” ed eseguite su Qform. Al fine di effettuare un confronto sono successivamente riportati per la prova “ $\phi 6 - 480^{\circ}\text{C} - 5 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ ” in “Figura 3.3.4” il valore di deformazione ottenuto con Qform e in “Figura 3.3.5” l’andamento dello spessore e della lunghezza del grano ottenute implementando la nuova correlazione. Come si può quindi osservare, relativamente allo spessore del grano si assiste ad un calo sino al valore minimo di $20 \mu\text{m}$ nelle zone soggette a maggiore deformazione (2 e 4); nelle zone 1 e 3 invece, visto che il livello di deformazione è molto basso, il valore dello spessore risulta quasi invariato rispetto all’iniziale. L’andamento della lunghezza del grano invece risulta differente a causa del fenomeno del pinch off. Infatti come si può vedere nelle zone 1 e 3, cioè quelle soggette a bassissime deformazioni, la lunghezza è circa pari a quella iniziale; invece nelle zone 2 e 4 a causa dell’elevato valore di deformazione si ha un superamento del valore di pinch off con conseguente dimensione del grano circa pari a $100\text{-}150 \mu\text{m}$. I valori massimi di lunghezza del grano si hanno nelle zone 5 e 6 poiché il livello di deformazione è vicino a quello critico pari a 2,6.

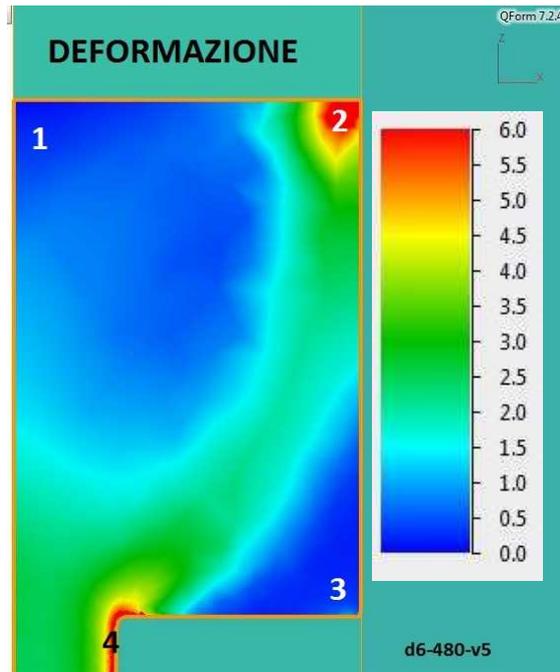


FIGURA 3.3.4: ANDAMENTO DELLA DEFORMAZIONE PER LA PROVA $\phi 6 - 480^{\circ}\text{C} - 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

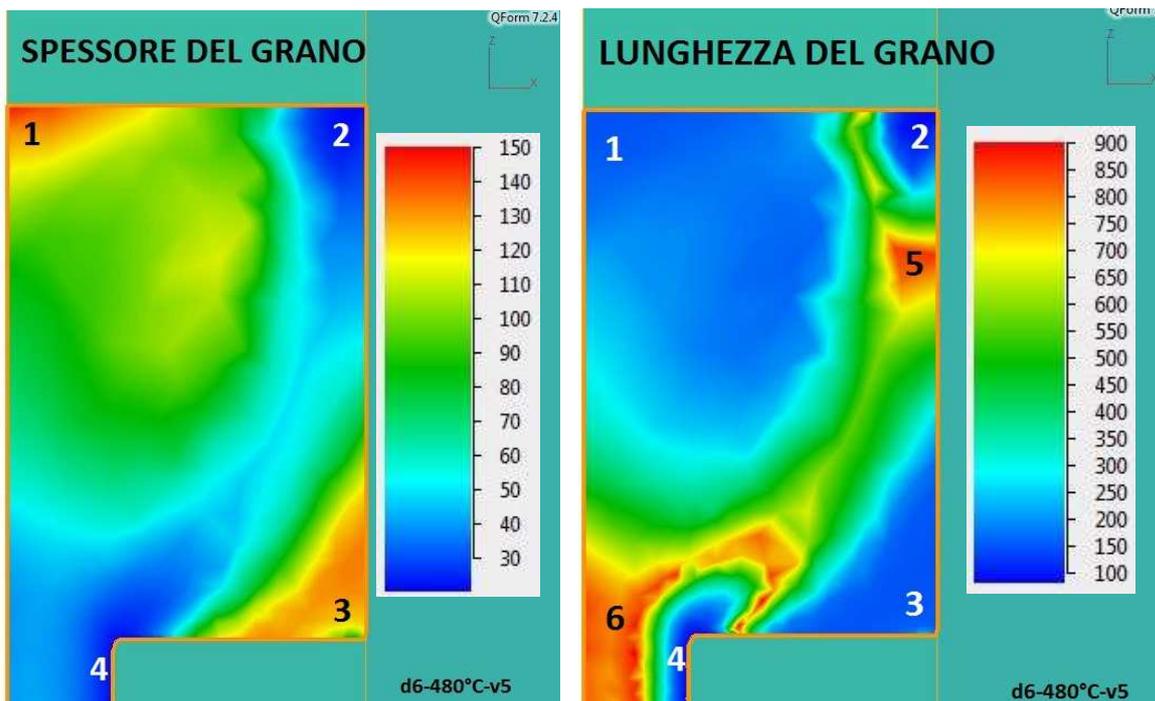


FIGURA 3.3.5: ANDAMENTO SPESSORE E LUNGHEZZA GRANO (MICRON) PER LA PROVA $\phi 6 - 480^{\circ}\text{C} - 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Si fa quindi notare che l'andamento che si ha nelle altre prove che non sono qui riportate risulta circa il medesimo.

In conclusione di seguito viene riportato un ultimo confronto tra i valori di dimensione del grano reali (misurati sperimentalmente) e quelli ottenuti mediante l'implementazione della subroutine in Qform.

In "Figura 3.3.6" sono visibili l'immagine con in evidenza i grani cristallini (ottenuta sezionando la billetta sperimentale) e l'immagine con l'andamento delle dimensioni dei grani previste con le curve ottenute con Qform.

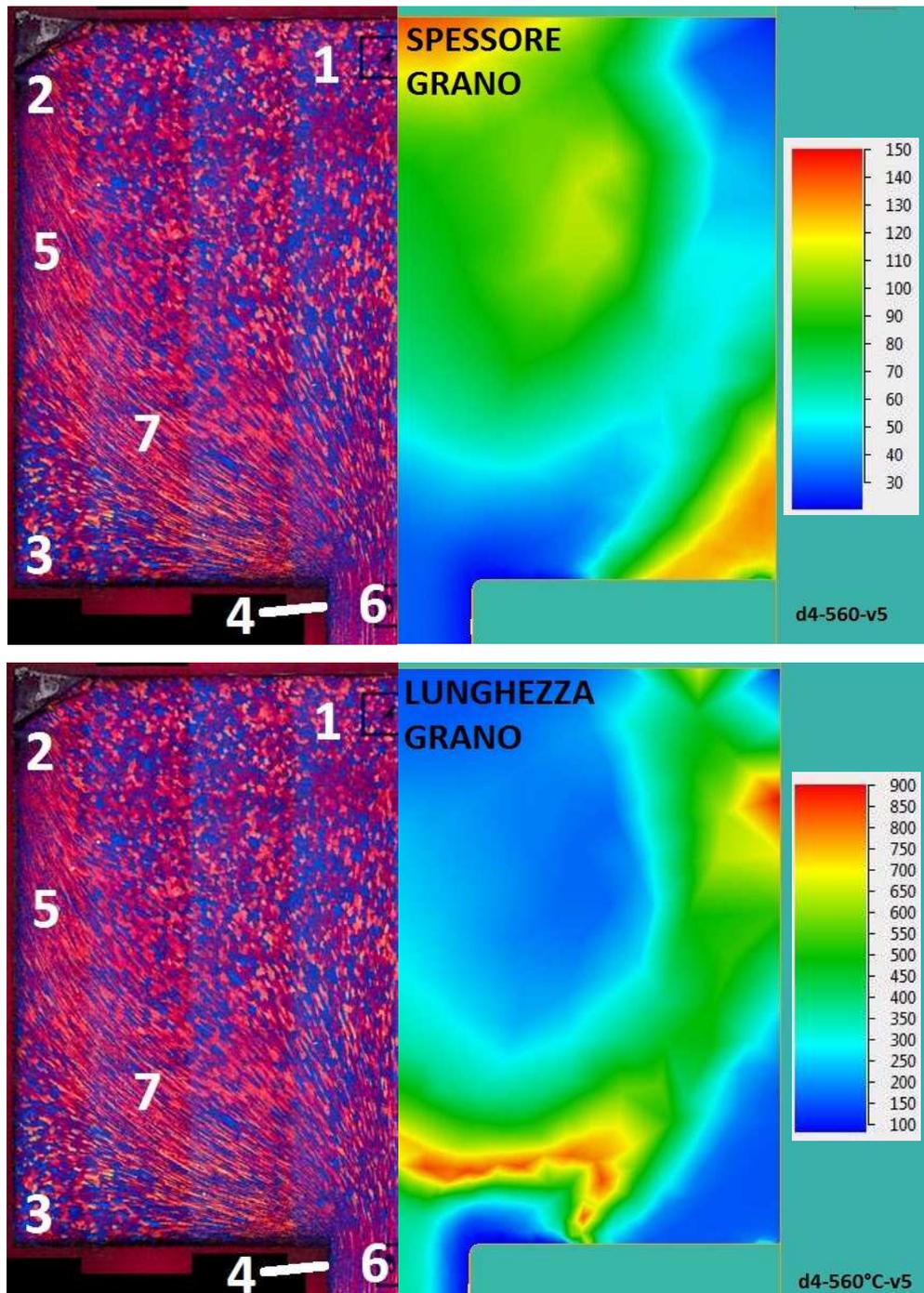


FIGURA 3.3.6: CONFRONTO TRA MICROSTRUTTURA REALE E PREVISTA CON QFORM PER LA PROVA $\Phi 4 - 560^{\circ}\text{C} - 5 \frac{\text{mm}}{\text{s}} - \text{AA6082}$

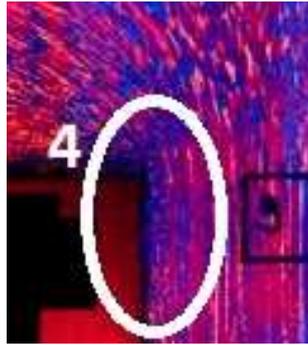


FIGURA 3.3.7: INGRANDIMENTO ZONA 4

Come si può osservare la previsione effettuata mediante Qform rispecchia gli andamenti reali. Infatti per lo spessore del grano si nota che nelle zone 1 e 3 risulta quasi invariato esattamente come previsto dal software; nelle zone 2, 5, 7, 4 e 6 si ha un assottigliamento dei grani cristallini così come visibile nell'immagine sperimentale a sinistra. Relativamente alla lunghezza invece si osserva che nelle zone 1 e 3 non si ha una deformazione dei grani, la lunghezza risulta quindi circa uguale a quella iniziale; nelle zone 5, 7 e 6 si ha un allungamento del grano mentre nella zona 2 e in particolar modo nella 4 (visti gli elevati valori di deformazione raggiunti) nei grani si sviluppa il fenomeno del pinch off con conseguente diminuzione della lunghezza. Si nota infatti da "Figura 3.3.7" come nella zona 4 i grani non siano più "continui" in quanto si sono frammentati in grani più corti.

In "Figura 3.3.8" sono visibili invece due grafici in cui si evidenzia la discrepanza tra la previsione effettuata con l'implementazione in Qform e i dati sperimentali. Infatti, poiché negli assi è posta la dimensione del grano rilevata in Qform e quella reale, è possibile vedere di quanto i risultati previsti si discostino da quelli effettivi. Tanto più un punto è vicino alla retta centrale (che indica una perfetta corrispondenza dei due valori) e tanto più la previsione per la data zona è corretta. Come si può osservare la previsione dello spessore si discorda in gran parte delle rilevazioni non più del 20% dai dati reali. Invece per la lunghezza del grano lo scostamento risulta leggermente maggiore a causa dello svilupparsi del fenomeno del pinch off non a metà grano (come già visto in "Figura 3.3.2"). Mediamente, considerando i molteplici fenomeni che possono provocare scostamenti rispetto ai valori reali, la correlazione ottenuta si può considerare molto valida.

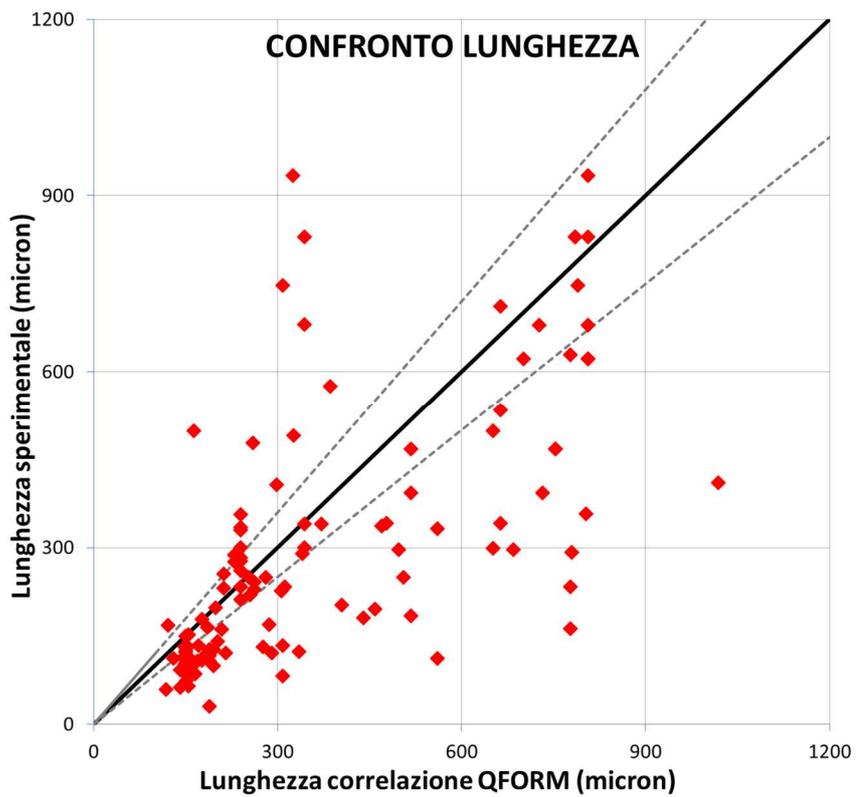
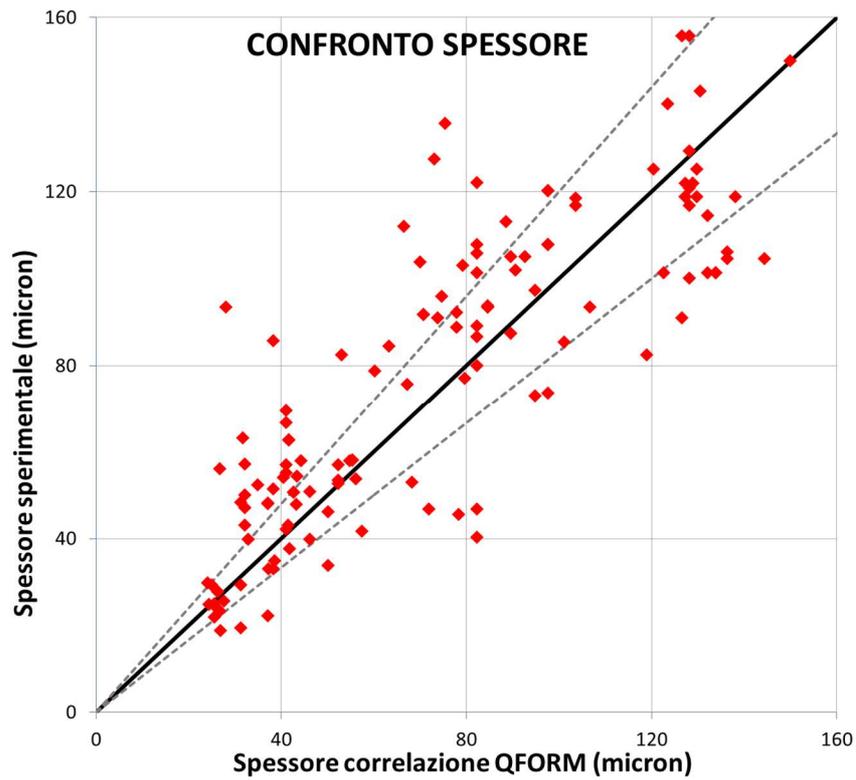


FIGURA 3.3.8: CONFRONTO TRA LA DIMENSIONE DEL GRANO MISURATA IN QFORM, IMPLEMENTANDOVI LA CORRELAZIONE OTTENUTA, E QUELLA REALE MISURATA SPERIMENTALMENTE; TRATTEGGIATE SONO RIPORTATE LE RETTE DI ERRORE AL 20%

CONCLUSIONI

Questo lavoro ha trattato l'analisi dei processi di estrusione di leghe di alluminio al fine di determinarne i modelli di attrito e sviluppare un modello per prevedere la microstruttura. Il metodo seguito è basato sul confronto tra i dati sperimentali ottenuti in due serie di prove di estrusione e simulazioni eseguite con il software Qform.

I risultati ottenuti nelle due parti sviluppate hanno permesso di conseguire gli obiettivi che ci si era inizialmente posti.

Nella parte di visioelasticità, è stato ricavato il modello che descrive l'attrito che si sviluppa nei processi di estrusione di leghe AA6060 analizzati grazie ad una coincidenza delle curve di "R". Sono stati successivamente ottenuti i valori dei parametri di simulazione che validano, entro le tolleranze poste, anche gli altri output di simulazione come curva di carico e temperatura di uscita dell'estruso. In questa sezione del lavoro sono stati anche raggiunti due ulteriori risultati: la valutazione dell'influenza dei vari parametri di simulazione al fine di ottimizzare il funzionamento di Qform e la determinazione di una possibile criticità del programma inerente la sovrastima delle temperature di uscita per un eccessivo riscaldamento del pezzo a causa della deformazione (relativamente al processo e alle condizioni analizzate).

Nella parte di microstruttura, sulla base dei risultati precedentemente ottenuti, sono state ricavate le correlazioni tra deformazione-spessore del grano e deformazione-lunghezza del grano per la lega AA6082. Sono state poi implementate in "Lua" le curve ottenute in modo da ricavare nuovi output dalla simulazione con Qform.

Il lavoro svolto ha permesso di ottenere risultati utili ad una maggiore conoscenza dei fenomeni di estrusione di leghe leggere; inoltre ha permesso di raccogliere dati e valutazioni sul programma Qform per consentirne un utilizzo più consapevole e preciso nei processi industriali di lavorazione dell'alluminio.

BIBLIOGRAFIA

Comparisons of friction models in bulk metal forming – Xincal Tan, 2002, Tribology International 35

Experimental analysis and FE modeling of aluminum alloys microstructural evolution in extrusion – Antonio Segatori, 2012, dottorato di ricerca

Extrusion - Sigurd Støren and Per Thomas Moe, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

Friction analysis in cold forging - Ömer Necati, December 2004, METU Department of Mechanical Engineering

Grain evolution analysis and experimental validation in the extrusion of 6XXX alloys by use of a lagrangian FE code - Lorenzo Donati, Antonio Segatori, M. El Mehtedi, Luca Tomesani, July 2013, International Journal of Plasticity 46

Improvement of metal forming processes by means of useful effects of plastic friction - A.N. Levanov, 1997, Journal of Materials Processing Technology 72

Lua 5.1 Reference Manual - Roberto Ierusalimschy, Luiz Henrique de Figueiredo, Waldemar Celes, 2006–2012 Lua.org

Prediction of fibrous and recrystallized structures in 6XXX alloy extruded profiles - Antonio Segatori, Barbara Reggiani, Lorenzo Donati, Luca Tomesani, M. El Mehtedi

Programming in Lua Second Edition – Roberto Ierusalimschy, 2006

Programming in QForm 7 – 2012, QuantorForm LDT

QuantorForm 7 users manual - 2014, QuantorForm LDT

The role of friction in the extrusion of AA6060 aluminum alloy: process analysis and monitoring (PART I) - M. Schikorra, L. Donati, L. Tomesani, M. Kleiner

The role of friction in the extrusion of AA6060 aluminum alloy: process analysis and monitoring (PART II) - M. Schikorra, L. Donati, L. Tomesani, M. Kleiner