UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Studio sui polimeri a memoria di forma: analisi del processo di stampaggio e proprietà meccaniche

Study on shape memory polymers: analysis of injection process and mechanical properties

Relatore:
Prof. Marco Sasso

Tesi di Laurea di:
Jacopo Spigarelli

A.A. *2019/2020*

Sommario

INTRODUZIONE **5**

CAPITOLO 1: I polimeri a memoria di forma **7**

1.1 Cenni ai micromeccanismi alla base della memoria di forma dei polimeri 7

1.2 Impieghi 10

1.3 Processi di produzione 10

CAPITOLO 2: Lo stampaggio dei polimeri a memoria di forma **12**

2.1 Componentistica di una pressa 12

2.2 Gruppo di plastificazione 13

2.3 Lo stampo 15

2.4 Fasi del processo di iniezione [5] 15

CAPITOLO 3: Materiale e procedure sperimentali **18**

3.1 Caratteristiche del polimero a memoria di forma DESMOPAN DP 3695 AU . 18

3.2 Pressa per lo stampaggio ad iniezione 20

3.3 Il software di simulazione MOLDEX 3D 23

CAPITOLO 5: Risultati sperimentali, confronto con i risultati della simulazione e discussione **25**

5.1 Misura sperimentale della pressione in cavità 25

5.2 Misura sperimentale della temperatura in cavità 26

5.3 Simulazione di processo tramite MOLDEX 3D: pressione e temperatura 26

5.4 Confronto fra dati sperimentali e eimulazione di processo tramite MOLDEX 3D

5.4.1 Confronto grafici pressione 30

5.4.2 Confronto grafici temperature 32

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI **35**

INTRODUZIONE

I polimeri a memoria di forma sono una classe di polimeri ad attivazione meccanica che sono in grado di cambiare la loro forma dopo aver ricevuto uno stimolo esterno. Questa tipologia di polimero è in grado di memorizzare la loro forma originale e mantenerla memorizzata. Un polimero a memoria di forma, dopo aver ricevuto uno stimolo, che può essere indotto da una fonte di calore, da un campo magnetico e in alcuni casi proveniente persino da un solvente, innesca un meccanismo meccanico che lo riporta alla sua forma originale.

Il ciclo classico dei polimeri a memoria è costituito da 3 fasi; la programmazione (programming) del polimero, l'archiviazione della forma e il recupero di forma. La fase di programmazione consiste nella deformazione del polimero, ottenuta applicando una forza meccanica spesso ad alte temperature, che altera la sua forma originale.

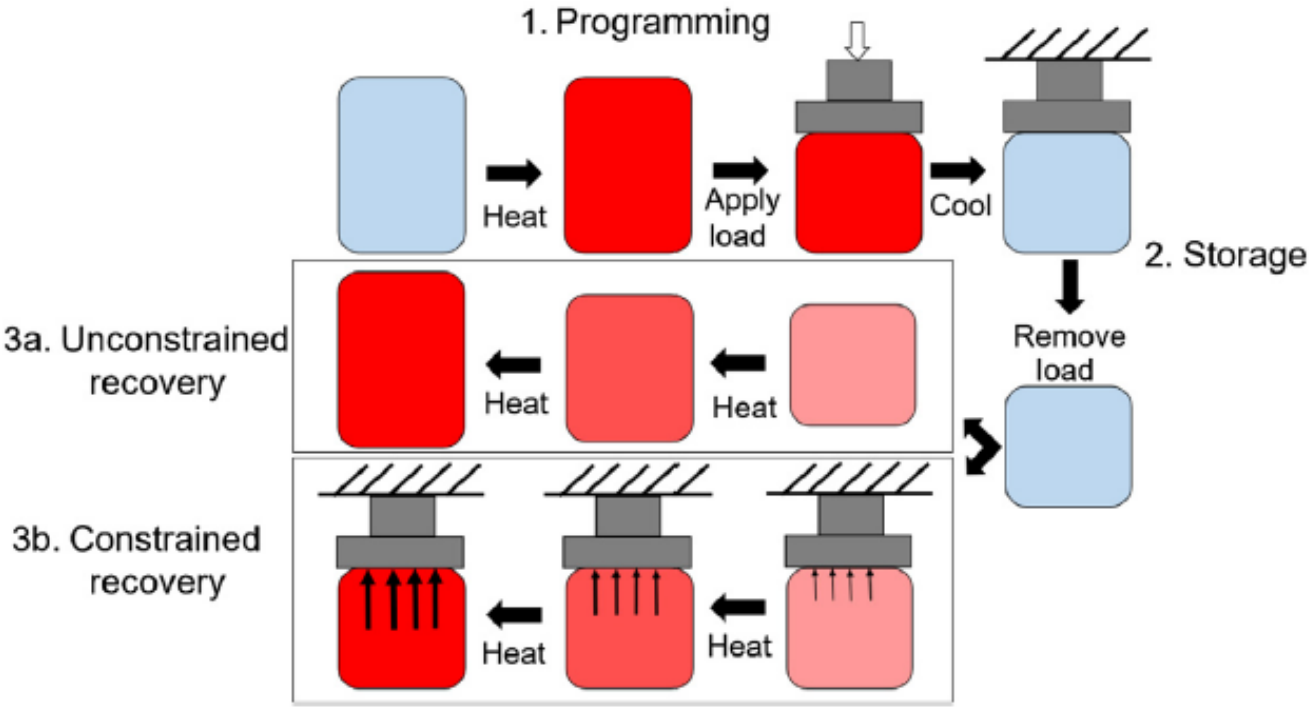


Figura I.1. Ciclo del polimero di memoria: (1) Programmazione (riscaldamento, applicazione del carico, raffreddamento), (2) Archiviazione della forma ed immagazzinamento dell'energia (storage); (3a) recupero libero (riscaldamento e progressivo recupero della geometria), (3b) recupero vincolato (riscaldamento sotto carico e parallelo recupero parziale della geometria). [1]

L’archiviazione della forma consiste in un congelamento della nuova geometria durante il raffreddamento del polimero, con seguente rimozione della forza meccanica applicata. La fase finale viene chiamata recupero di forma perché è lo stadio dove il polimero, sotto un impulso esterno, recupera (o tenta di recuperare) la sua geometria originale, cioè quella che possedeva prima della deformazione. Se in parallelo allo stimolo viene applicata una forza, questa viene in parte contrastata dalla risposta del polimero (Figura I.1).

CAPITOLO 1: I polimeri a memoria di forma

1.1 Cenni ai micromeccanismi alla base della memoria di forma dei polimeri

I polimeri esibiscono una certa varietà di strutture che possono essere lineari, ramificate o reticolate. Le microstrutture sono determinate principalmente dal tipo di monomeri che ne constituiscono la struttura. I polimeri lineari sono dunque quelli nei quali le unità ripetitive di una singola catena (monomeri) sono unite da un estremo all'altro. Tra queste catene si possono instaurare legami (di Van del Waals e a idrogeno). I polimeri ramificati invece hanno catene da cui si dipartono ramificazioni laterali. Ciò limita la mobilità e quindi la capacità di compattazione delle catene. I polimeri reticolati si definiscono tali se esistono almeno due cammini diversi per collegare due punti qualsiasi della loro molecola. Ciò non avviene nelle strutture "ramificate" o "lineari", che come abbiamo detto differiscono dal fatto che sulla catena principale siano innestate o meno catene laterali.

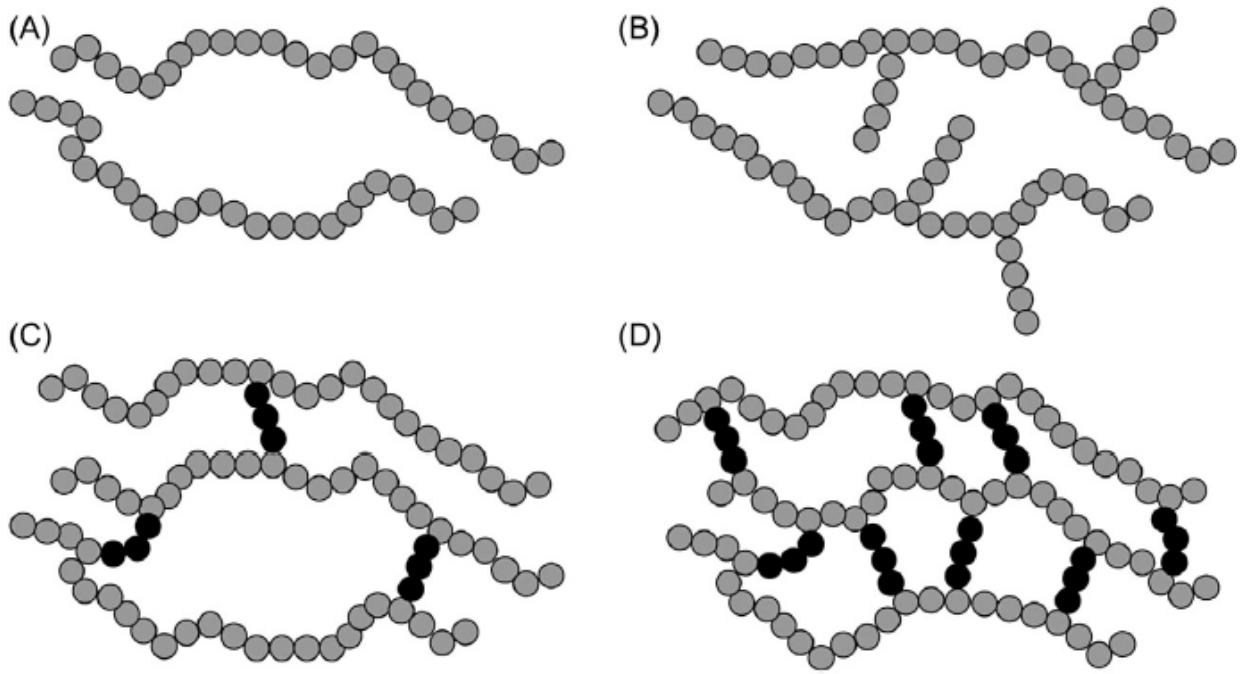


Figura 1.1. Nell'immagone possiamo vedere gli schemi delle strutture dei polimeri. (A) struttura lineare ,(B) struttura ramificata , (C) struttura con catene poco legate , (D) struttura con catene altamente legate [1]

I legami, dunque, limitano la mobilità delle catene, formando dei “nodi” permanenti e come vedremo caratterizzano la forma originale del polimemero a memoria di forma.

Se si analizza in maniera semplificata il micromeccanismo alla base delle peculiari propietà dei polimeri a memoria di forma dal punto di vista meccanico, si può pensare la struttura del polimero come costituita da due componenti, o segmenti, uno definito “elastico” e l’altro “di transizione”. Mentre il segmento elastico mantiene sempre un’elevata elasticità durante il ciclo di memoria, quello di transizione varia notevolmente la sua rigidezza se sottoposto allo stimolo esterno .

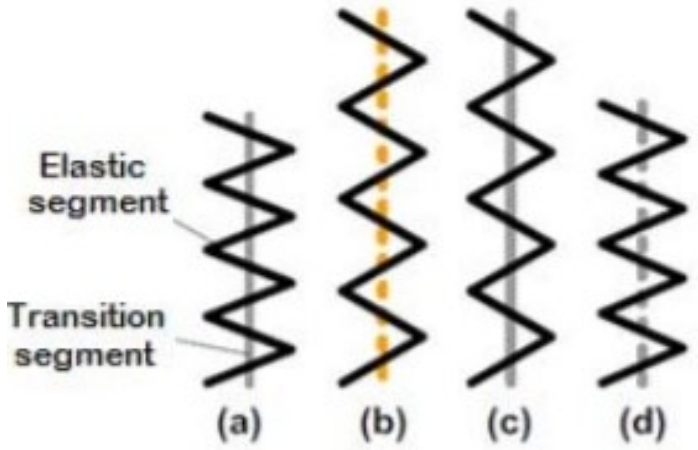


Figura 1.2 da: “Stimulus-responsive shape memory materials. A review . Materials and Design”di Sun L., Huang W.M.,Ding Z.,Zhao Y,Wangb C.C.,Purnawali H., TangC., Vol33 p. 577-640 “

Nel polimero, dopo un riscaldamento oltre la temperatura di transizione vetrosa, Tg, del segmento di transizione, esso diviene soffice e può essere deformato (b). Sotto alla Tg, infatti, le molecole di un polimero hanno una scarsa mobilità e si presentano in uno stato vetroso, con segmenti polimerici detti *frozen.* Sopra Tg invece, i legami tra le catene polimeriche diventano deboli e il polimero diventa gommoso . In quest’ultimo stato la rigidezza è bassa e l’energia di deformazione viene convertita in una variazione di entropia. Riscaldando il nostro polimero a memoria di forma al di sopra della transizione vetrosa del componente di transizione, dunque, questo diviene deformabile, mentre il componente elastico, che ha una temperatura di transizione più alta, rimane inalterato, e sotto l’effetto del carico si deforma elasticamente.

A causa del successivo raffreddamento, il segmento di transizione riacquista la sua rigidezza mantenendo la geometria deformata, mentre al componente elastico è impedito il ritorno alla forma originale anche dopo la rimozione del carico. Questa è la forma temporanea acquisita dal materiale (c in figura). L'energia elastica si mantiene all'interno del componente elastico rappresentando l'energia che controlla l'effetto di forma. Riscaldando il pezzo sopra Tg, il componente di transizione si addolcisce, ed il segmento elastico è capace di recuperare la forma originale, concludendo il ciclo (d) .

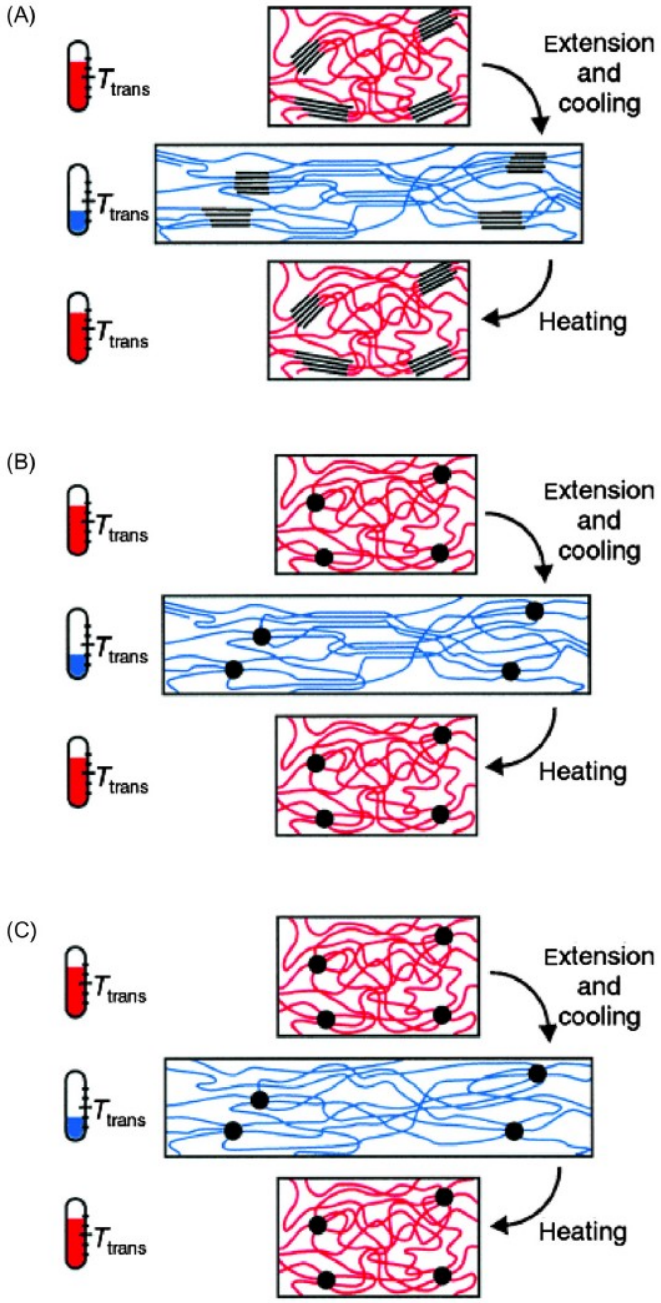


Figura 1.3 Schematizzazione del meccanismo termicamente indotto in diversi tipi di strutture di polimero. Il caso (A) è un copolimero a multi blocco con la Temperatura di transizione uguale a quella di vetrificazione. Il caso (B) è un polimero con le catene legate da un legame covalente (i punti neri sono degli intrecci fissi di queste catene)con una Temperatura di transizione uguale alla temperatura di fusione. Nell'ultimo caso invece di polimero con le catene legate con un legame covalente ma con la Temperatura di transizione uguale alla temperatura di vetrificazione [2].

Dal punto di vista dell'energia interna, l'effetto di memoria agisce sull'immagazzinamento e sul rilascio dell'energia di deformazione tramite una variazione dell'entropia. Quando un polimero a memoria di forma è nel suo stato originale, indeformato , il livello dell'entropia è basso. Quando il polimero viene riscaldato e deformato all'intorno alla temperatura di attivazione, l'entropia del sistema aumenta. Durante il raffreddamento, l'energia associata alla deformazione viene "congelata" all'interno del materiale ed il polimero si mantiene ad uno stato metastabile di alta energia. Per il materiale è impossibile tornare allo stato di bassa energia a causa dello temperatura inferiore a quella di transizione vetrosa, che rende le molecole di "transizione" rigide e indeformabili. In questa situazione il polimero non può dunque tornare al suo stato originario di entropia (rimanendo deformato) a meno che non venga riscaldato oltre alla temperatura di vetrificazione. In questo caso le catene del polimero diventano mobili e si ridistribuiscono come nella configurazione originaria riducendo l'entropia generale del polimero.

1.2 Impieghi

I polimeri a memoria di forma sono una tipologia di materiale che tutt'oggi viene ancora largamente studiata. Questa particolare classe di materiali, ad esempio, viene utilizzata nella robotica sfruttando i polimeri come grip per braccia del robot: infatti il materiale con il riscaldamento diventa morbido e può deformarsi intorno all'oggetto da afferrare, poi, tramite raffreddamento, il polimero si indurisce e così l'oggetto raffreddato rimane "incastrato" nella presa del robot [3] .

I polimeri a memoria di forma trovano impiego anche nel settore automobilistico: per esempio vengono impiegati nella costruzione di parafanghi autoriparanti . Con l'uso di una sorgente di calore si può restituire al parafanghi la sua forma originale eliminando qualsiasi tipo di ammaccatura [4].

Questi riportati sono solo alcuni degli impieghi dove vengono usati i polimeri a memoria di forma , ma ogni anno vengono trovati nuovi campi di impiego come per esempio nel campo aerospaziale, aereonautico, edile e persino sportivo.

1.3 Processi di produzione

Quello dei processi di produzione dei polimeri a memoria di forma è un campo ancora in via di sviluppo, e con il passare del tempo vengono scoperti nuovi tipi di processi che permettono di produrre sempre una gamma più ampia di oggetti in polimeri a forma di memoria a costi contenuti.

Il processo usato per questa tesi è lo stampaggio tramite iniezione con una pressa che è il processo che tutt'oggi è quello più comune.

CAPITOLO 2: Lo stampaggio dei polimeri a memoria di forma

Lo stampaggio ad iniezione è il processo di produzione più usato nella produzione di manufatti in polimeri a memoria di forma, ed è infatti conosciuto da più tempo.

La produzione per stampaggio ad iniezione in pressa presenta numerosi vantaggi, quali:

- Produzione di pezzi complessi
- Relativa velocità di produzione
- Buona qualità dei pezzi
- Basso costo di produzione

La produzione in pressa però ha anche diversi svantaggi come:

- Elevato costo degli stampi
- Presenza di bave se la pressione di serraggio dello stampo è minore della pressione del polimero fuso
- Possibili ritiri durante il raffreddamento dovuta ad un disomogeneo raffreddamento

2.1 Componentistica di una pressa

Una pressa per la produzione di manufatti in polimeri a memoria di forma è composta generalmente dai seguenti componenti (Fig.2.1):

- Un gruppo di plastificazione
- Uno stampo

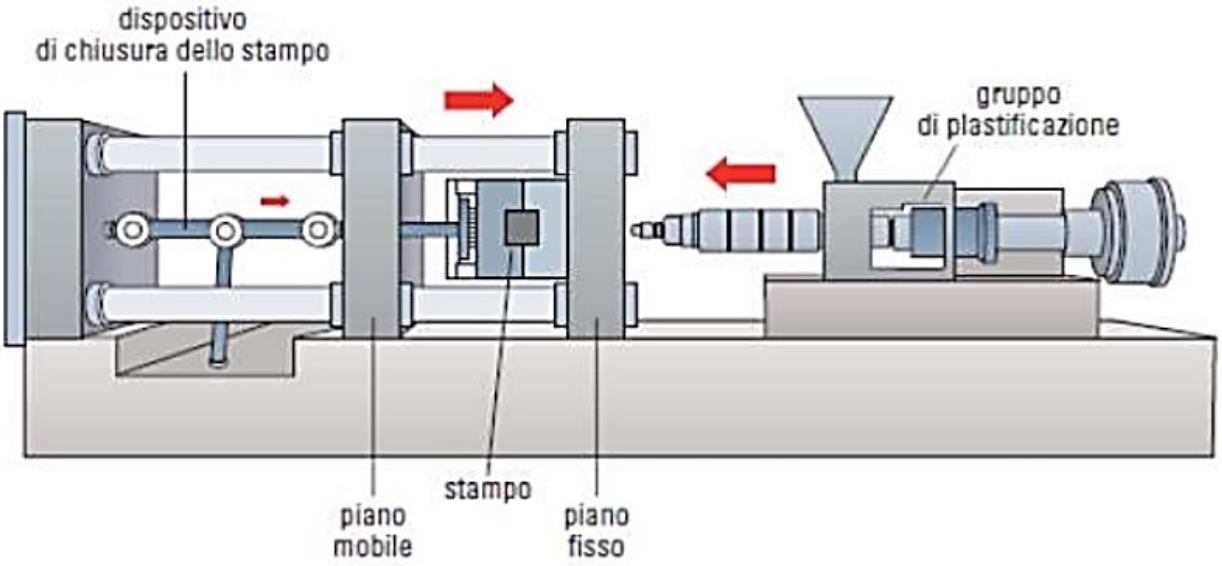


Figura 2.1: schematizzazione di una pressa per la produzione di manufatti in polimeri di memoria di forma.

2.2 Gruppo di plastificazione

Il gruppo di plastificazione è costituito da due componenti principali, un serbatoio per far introdurre il polimero in granuli e una vite a diametro decrescente.

Il serbatoio serve come magazzino e come rifornimento al macchinario; il polimero viene introdotto nel serbatoio essiccato per evitare che nei granuli rimangano tracce di umidità assorbita dall'ambiente. La presenza di umidità può creare difetti nel pezzo come creazione di bolle (dovute all'espansione delle micro goccioline di acqua) e scorretto riempimento dello stampo. L a parte del serbatoio che si collega alla vite viene preriscaldata per diminuire il lavoro nella parte iniziale della vite.

Dopo il serbatoio , il polimero entra nella parte a diametro più largo della vite . La zona iniziale della vite (quella in cui entra il polimero) è riscaldata ad alte per far si che il polimero si fonda. La caratteristica principale della vite è che ha un diametro decrescente, infatti il polimero fuso guidato dalla vite trova una sezione di passaggio sempre più piccola e questo fa aumentare la sua pressione. La vite ha un riscaldamento diversificato per far fondere in maniera omogenea il polimero.

Figura 2.2: *Granuli di Desmopan DP 3695 AU (polimero a memoria di forma usato per lo studio)*

Figura 2.3 : gruppo di plastificazione della pressa usata nello studio ;si può vedere il serbatoio e la zona dov'è posta la vite (zona grigia).

2.3 Lo stampo

Lo stampo è costituito usualmente da due parti; una parte con la forma e l'altra con i sensori e il punto di iniezione collegato all' ugello di iniezione. La parte con gli incavi della forma è mobile. Il movimento che determina l'apertura e la chiusura dello stampo è regolato da un dispositivo di chiusura. Il dispositivo di chiusura può variare da macchinario a macchinario ma più diffusi sono gli attuatori idraulici o elettrici.

Nella parte mobile dello stampo oltre al vuoto della forma, sono presenti degli espulsori: la loro funzione è quella di spingere il pezzo dall'incavo fuori dallo stampo, dopo che quest'ultimo si è aperto.

2.4 Fasi del processo di iniezione [5]

Il processo di produzione tramite iniezione può dividersi in 4 fasi:

- Il riempimento: questa è la fase più delicata poiché la vite deve dare la giusta pressione al fluido per riempire in maniera omogenea lo stampo. La pressione impressa dalla vite viene stabilita a seconda della pressione che si riscontrerà nell'area con pressione minima. In quest'area dello stampo la pressione di iniezione e la pressione di mantenimento sono minimizzate ed inoltre in questa zona si ha l'equilibrio tra il calore sviluppato dall' attrito del fluido e quello disperso per conduzione alle pareti dello stampo;
- Il mantenimento: questa fase viene chiamata anche fase di compattazione e avviene dopo il riempimento. In questa fase la vite continua ad iniettare il materiale necessario a compensare le contrazioni volumetriche dovute al raffreddamento. Durante questo stadio le zone più lontane dal punto di iniezione subiranno un raffreddamento più veloce e il pezzo rischierà di subire delle deformazioni dovute ad un disomogeneo raffreddamento. Affinché siano minimizzate queste differenze di raffreddamento, il posizionamento del punto di iniezione è di vitale importanza per il processo;
- Fase di passaggio di controllo volumetrico a quello di pressione: questa fase viene indicata in questo modo perché durante il riempimento dello stampo generalmente si imposta la portata di materiale da alimentare, mentre durante il mantenimento viene impostata la pressione. Il metodo più semplice prevede il controllo della posizione della vite. Quando la

vite ha eseguito una certa corsa, ossia è stata introdotta una certa quantità di materiale, si passa al mantenimento ; questo metodo è quello più usato per la sua semplicità;

- Fase di raffreddamento: questa fase del ciclo occupa circa il 50% del tempo totale ed ha un'elevata importanza in quanto incide sulla qualità del manufatto finale. In questa fase si il polimero passa allo stadio cristallino, fenomeno che dipende dalla velocità di raffreddamento. La quantità di materiale che solidifica formando una fase cristallina è tanto minore quanto più è veloce il raffreddamento. In alcuni casi il raffreddamento troppo veloce non permette la formazione della fase cristallina. Ci sono due parametri da tenere in considerazione in questa fase ; il calore da sottrarre e il tempo di raffreddamento;
- Fase di espulsione; in questa fase il pezzo è completamente raffreddato,l a pressa si apre e il pezzo viene espulso tramite gli espulsori posti nella parte mobile della pressa.

La Figura 2.4 illustra schematicamente le diverse fasi del processo di iniezione.

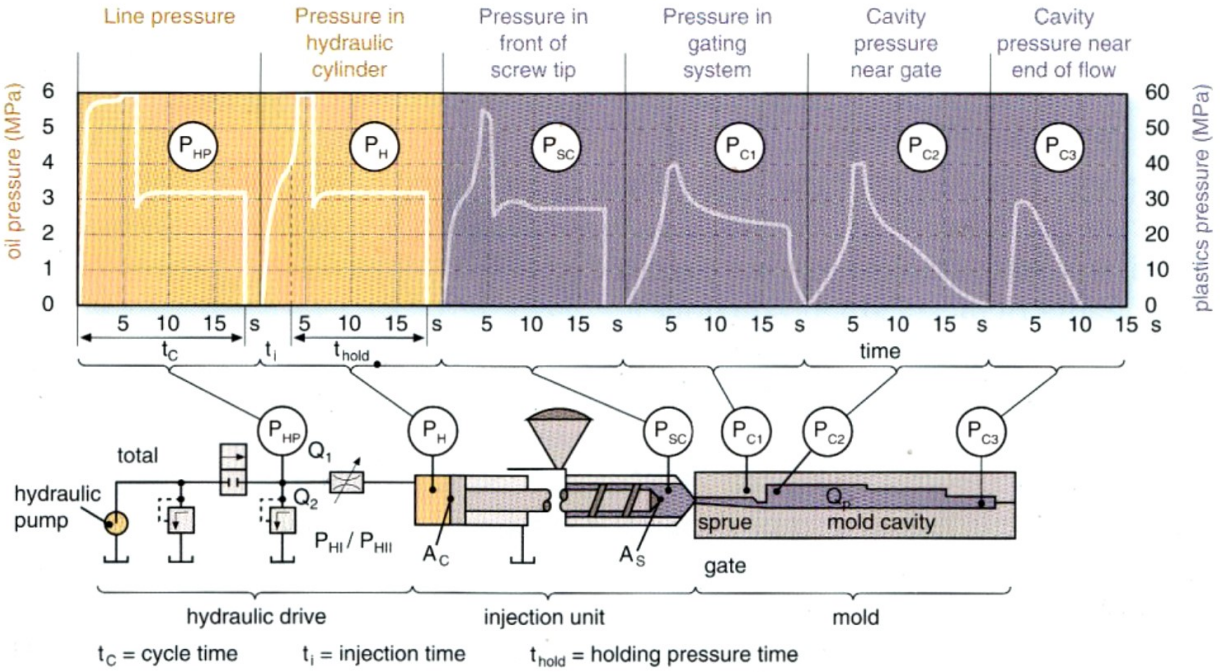


Figura 2.4 [5] : Andamento della pressione nei vari componenti della pressa durante il ciclo di produzione. Come si può notare i grafici sono stati divisi in 3 macro gruppi; il gruppo del sistema idraulico (PhP, Ph colorati in giallo), l'unità di iniezione (Psc in viola) e lo stampo (Pc1;Pc2;Pc3)

Nella figura, il grafico Php mette in evidenza la pressione dell'olio nel sistema idraulico mentre il Ph mette in evidenza la pressione dell'olio sul pistone della vite .Il Psc è il grafico della pressione esercitata sulla punta della vite, la Pc1 è la pressione nello stampo prima dell'iniezione ,la Pc2 è la pressione appena dopo il punto di iniezione ed infine il Pc3 è la pressione vicino al punto di fine flusso.

CAPITOLO 3: Materiale e procedure sperimentali

3.1 Caratteristiche del polimero a memoria di forma DESMOPAN DP 3695 AU

Il polimero usato nello studio è il Desmopan® DP 3695 AV , un polimero di natura poluretanica. Con il termine poliuretano (PU) si indica una vasta famiglia di polimeri in cui la catena polimerica è costituita di legami uretanici -NH-(CO)-O-. I polimeri uretanici sono largamente impiegati nella produzione di una grande varietà di materiali.

Il poliuretano termoplastico Desmopan® offre una elevata resistenza all'usura, una buona flessibilità in un range piuttosto ampio di temperature, ed un'ottima elasticità in tutta l'intervallo di durezze. Questo polimero è caratterizzato una eccellente resistenza agli oli, grassi, solventi; è buona anche la resistenza agli agenti ambientali e alle radiazioni. Inoltre, la gamma di poliuretani Desmopan® è caratterizzata da un basso livello di carbon footprint (emissioni di carbonio) senza peraltro compromettere qualità e prestazioni.

In linea generale un materiale termoplastico poliuretanico possiede una gamma di proprietà piuttosto ampia; il Desmopan® ha, in particolare, catene polimeriche linear che sono formate da segmenti alternati rigidi e flessibili. I segmenti elastici hanno una bassa temperatura di transizione vetrosa, mentre i segmenti rigidi cristallini hanno un punto di fusione molto alto. Una opportuna modifica delle proporzioni o natura di queste fasi rende possibile variare proprietà quali durezza, resistenza, rigidezza, elasticità e flessibilità a freddo.

Un altro interessante aspetto legato a questo materiale è che otre il 60% del suo contenuto di carbonio deriva da biomasse.

Per quanto riguarda il Desmopan 3695AU, osservando la tabella 3.1 si può notare dalla sigla che questo materiale ha le seguenti caratteristiche:

3:	materiale ottenuto interamente da grezzi provenienti da fonti rinnovabili
6:	appartenente al gruppo degli ibridi esteri-eteri
95A:	con durezza Shore pari a 95
V:	protetto da raggi AV

Le proprietà meccaniche sono riportate nelle tabelle 3.2-3.4 [6].

Tabella 2.1. Schema per la nomenclatura dei prodotti della sere Desmopan

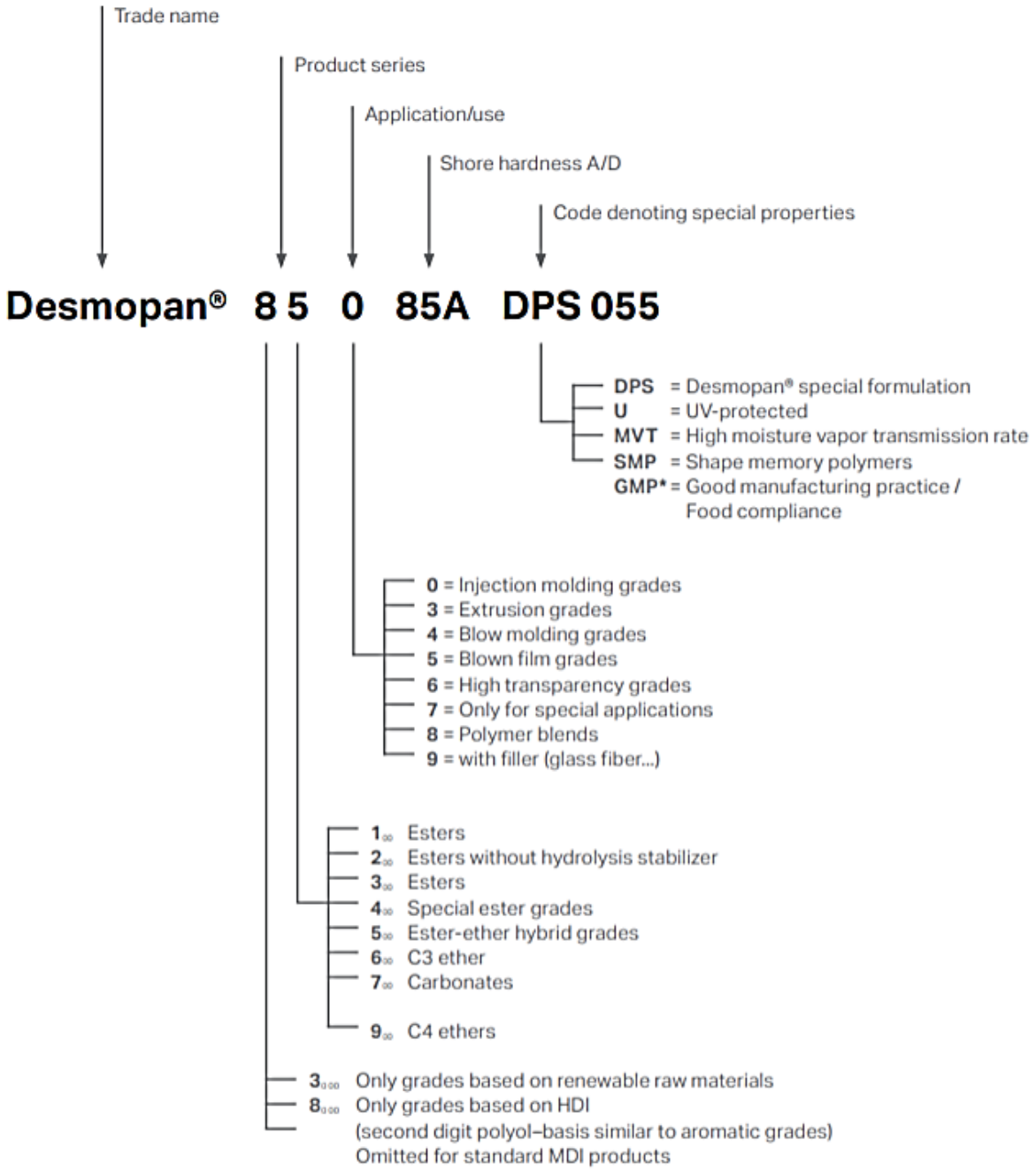


Tabella 3.2 Proprietà meccaniche (23°C/ 50 % r.h.) [6]

Proprietà	Condizione di test	Unità di misura	Valore
Resistenza ultima a trazione	200 mm/min	MPa	69
Defromazione a rottura	200 mm/min	%	389
Tensione al 10%	200 mm/min	MPa	5,7
Tensione al 50%	200 mm/min	MPa	11,0
Tensione al 100%	200 mm/min	MPa	14,2
Tensione al 300%	200 mm/min	MPa	38,8
Compression set*	24h;70°C	%	52
Compression set*	72h;23°C	%	22
Resistenza ad abrasione		mm^3	23

**Il Compression Set è la misura della deformazione permanente residua dopo che il materiale è stato sottoposto ad un carico di compressione. Esso viene calcolato come la percentuale di deformazione residua in relazione alla deformazione applicata (generalmente il 25% delle dimensioni originali).*

Tabelle 3.3 Proprietà Termiche

Proprietà	Condizione di test	Unità di misura	Valore
Modulo di trazione immagazzinata	-20°C	MPa	1670
Modulo di trazione immagazzinata	20°C	MPa	139
Modulo di trazione immagazzinata	60°C	MPa	66

Tabella 3.4 Altre proprietà

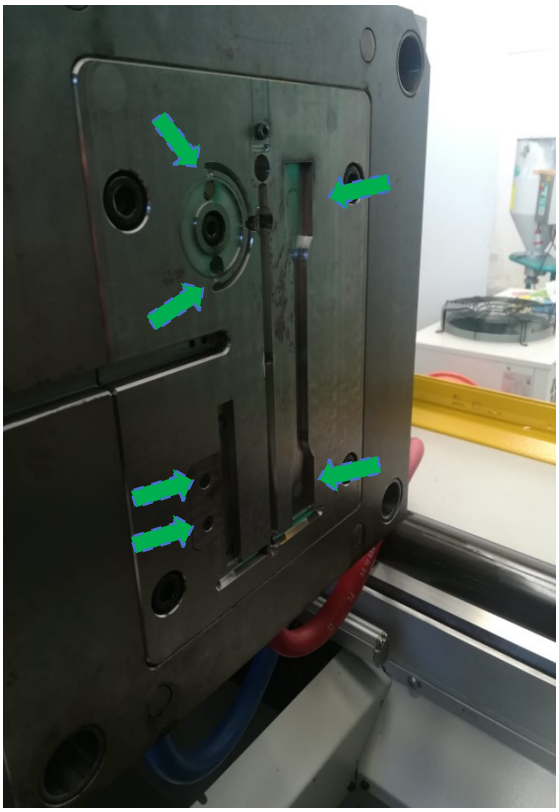
Propietà	**Unità**	**Valore**
Densità	Kg/m^3	1218

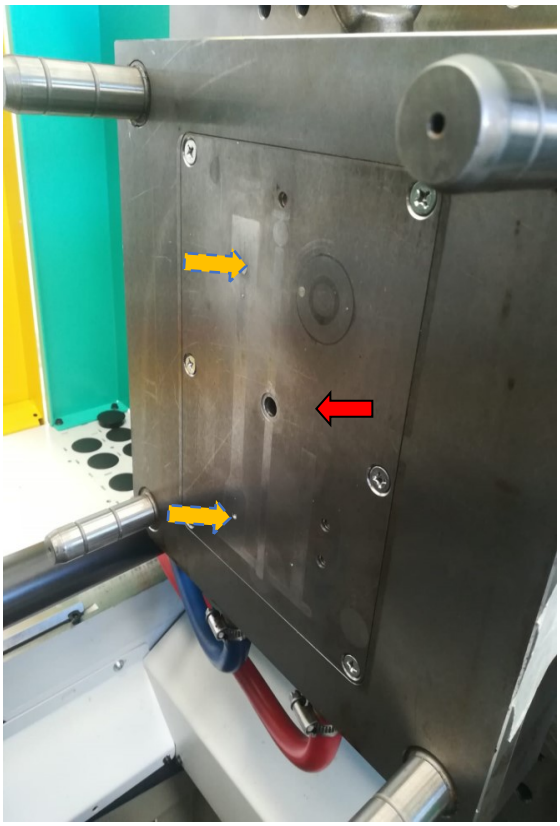
3.2 Pressa per lo stampaggio ad iniezione

Per lo svolgimento di questo studio si è usata una pressa AMBURG (Figura 3.1).

Le temperature impostate erano di 200-190 °C per la zona iniziale e di 240 per la zona finale della vite (Tabella 3.5). Nella zona finale è posto l'ugello di iniezione che entra in azione nel momento in cui la pressa chiude lo stampo .

Figura 3.1 Pressa utilizzata per lo studio





a *b*

Figura 3.2 : (a) parte mobile dello stampo con l'incavo della forma con in evidenza gli espulsori (frecce verdi); (b) parte fissa dello stampo ,in evidenza il punto di iniezione (freccia rossa) e i sensori di temperatura e pressione (freccia gialla).

Per quanto riguarda lo stampo utilizzato, nella sua parte fissa erano presenti il punto di iniezione del fluido e due sensori che misurano temperatura e pressione del fluido all'interno dello stampo. Nella Figura 3.2 si può osservare la forma del campione stampato, con la classica geometria "dog bone". La Figura 3.3 mostra un provino stampato.

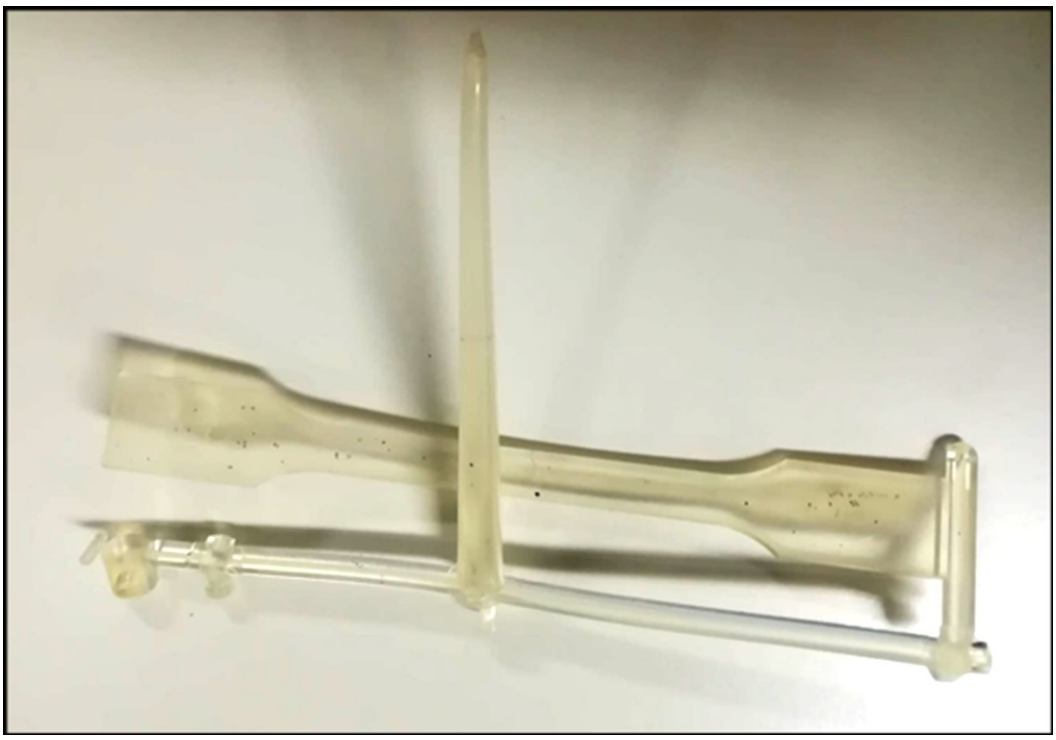


Figura 3.4 : Provino ad "osso di cane" ottenuto dalla pressa

I sensori installati nella parte fissa per registrare la temperatura e la pressione sono dei sensori della ditta PRIAMUS, specificamente sviluppati per lo stampaggio ad iniezione.

Tabella 3.5 I parametri utilizzati per la produzione

Parametro	Valori			Unità
Temperatura di fusione	ugello	Sezione di transizione	Sezione del serbatoio	
	240	Tra 230 e i 220	Tra i 200 e i 190	°C
Portata volumetrica	25	35	200	Cm^3/s
Pressione di mantenimento		80		MPa
Tempo di mantenimento		12		s
Temperatura di solidificazione		25		°C
Tempo di raffreddamento		60		s

3.3 Il software di simulazione MOLDEX 3D

Moldex 3D è un software della casa sviluppatrice della CoreTech System Co. E' usato per la simulazione del comportamento del fluido all'interno dello stampo.

Il programma utilizza i disegni provenienti da CAD come Rhinoceros o Autocad (Figure 3.4-3.5), e partendo da questi, il software viene poi fonito di dati di imput quali:

- Materiale del pezzo stampato
- Pressione di iniezione
- Temperatura del fluido
- Tipologia della pressa usata
- Geometria dei canali di raffreddamento
- Gestione dei tempi delle varie fasi del processo
- Punto di iniezione
- Velocità di iniezione
- Grandezza e materiale dello stampo.
- Posizionamento dei sensori e tipologia di sensore usato

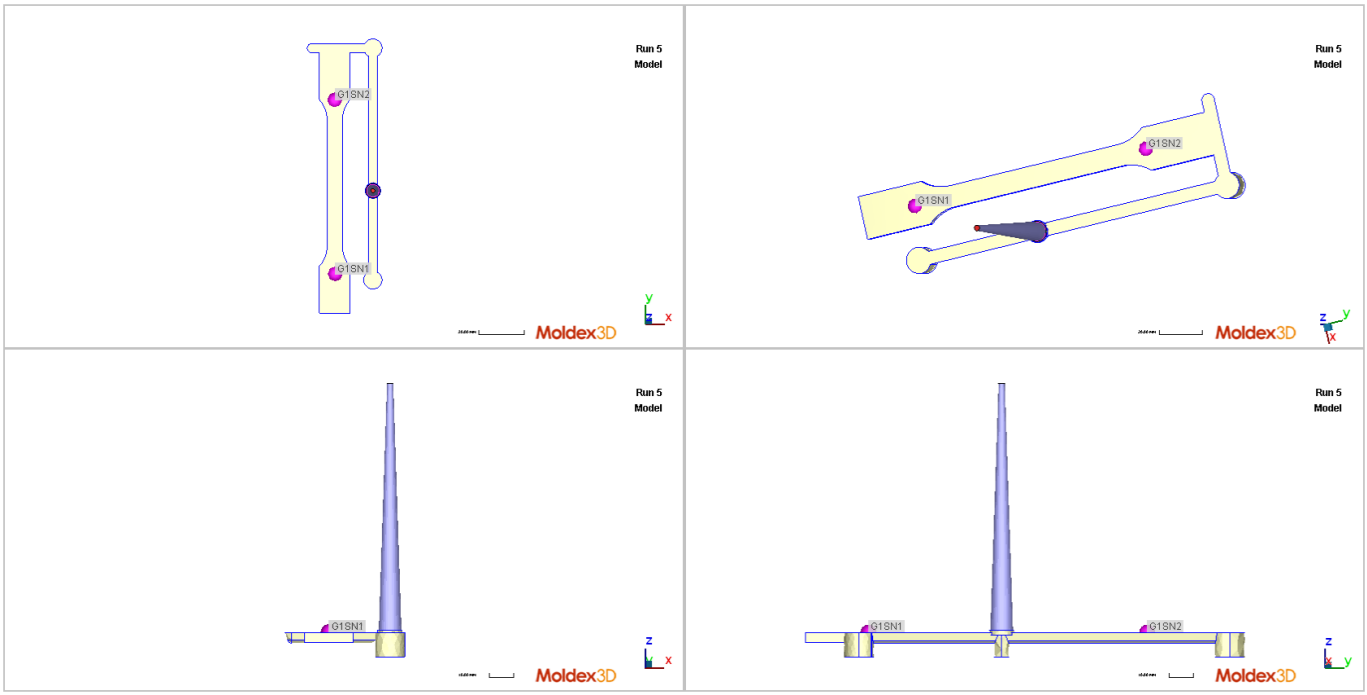


Figura 3.4 : Prospetti del provino (a forma di "dogbone"), il disegno è stato elaborato su rhinoceros e poi importato in moldex 3d

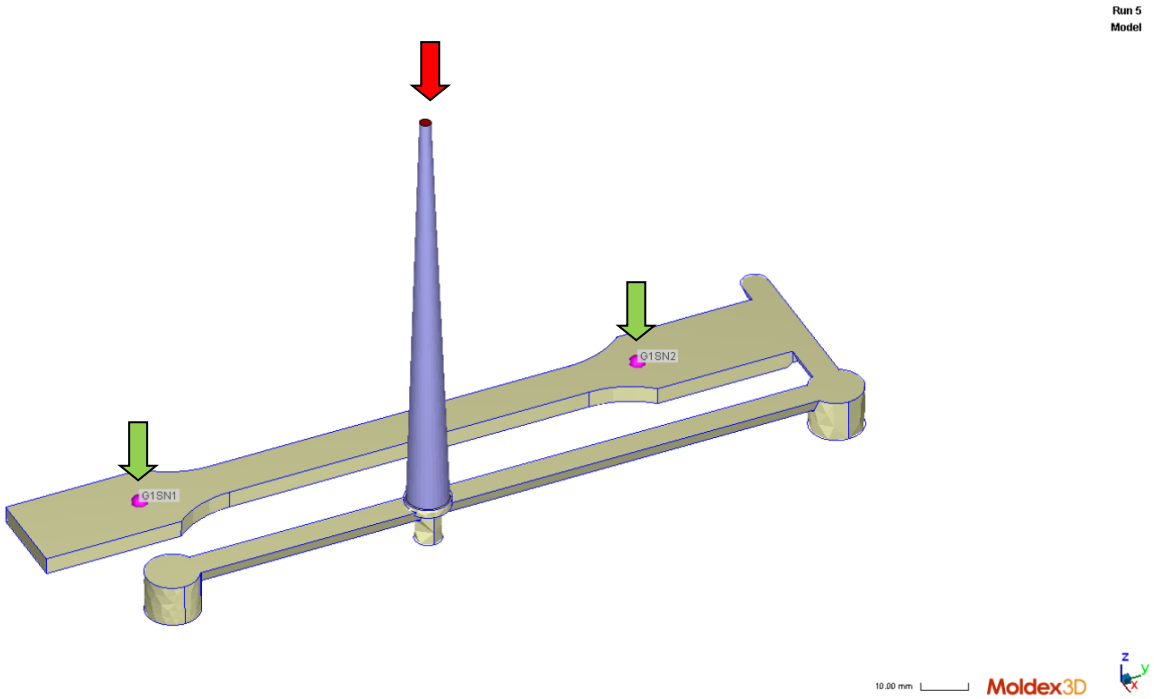


Figura 3.5 Vista tridimensionale del provino, in evidenza ci sono il punto di iniezione (freccia rossa) e la posizione dei sensori (freccia verde) .

CAPITOLO 5: Risultati sperimentali, confronto con i risultati della simulazione e discussione

In questo capitolo verranno riportati i risultati sperimentali ottenuti dalla misura diretta di pressione e temperatura, nonché i risultati della simulazione, con l'obiettivo di verificare l'effettiva aderenza dell'output del software con quanto si riscontra sperimentalmente.

5.1 Misura sperimentale della pressione in cavità

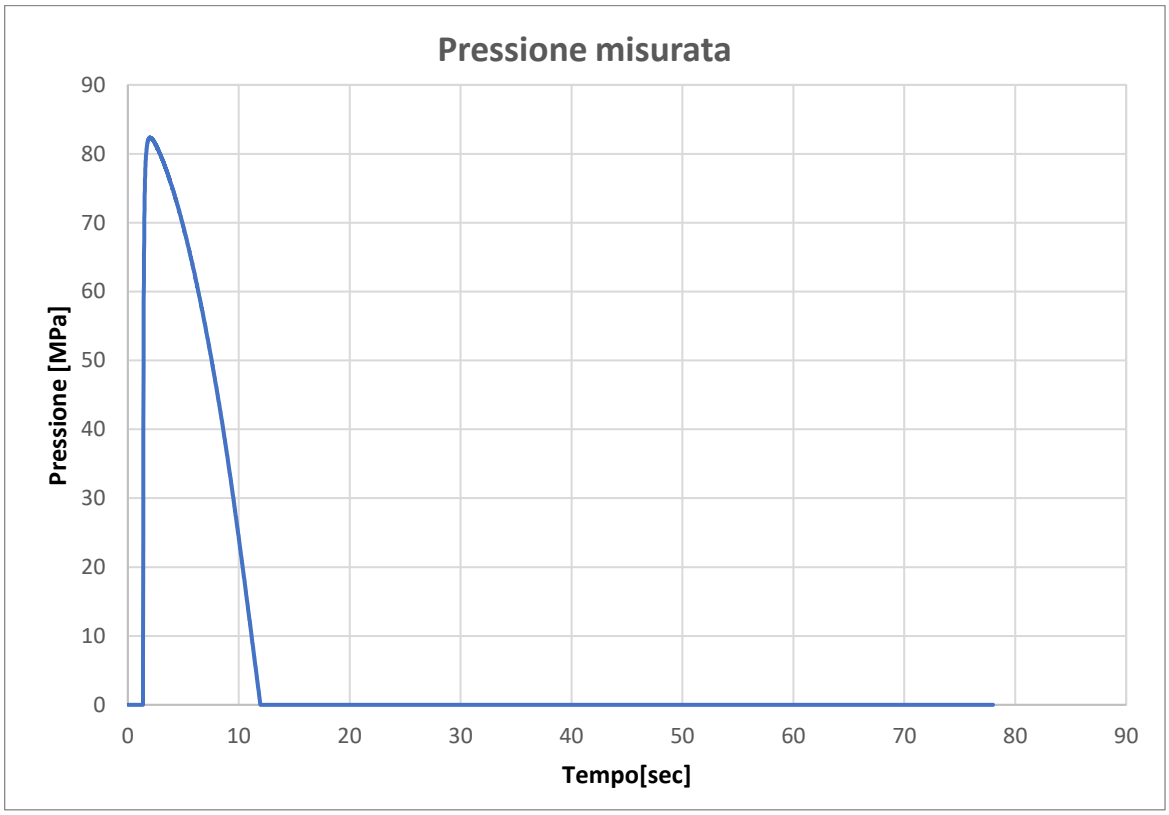


Figura 5.1 Andamento della pressione misurata dai sensori

Come si può osservare, il picco di pressione di circa 80 MPa, come specificato dalla tabella dei parametri utilizzati per il processo. La veloce crescita e decrescita è dovuta al fatto che il fluido riempie lo stampo in pochissimo tempo per l'elevata velocità del fluido, a sua volta dovuta

all'elevata pressione. Il processo termina dopo circa 12 secondi (tempo impostato di mantenimento) e la pressa si apre per espellere il provino.

5.2 Misura sperimentale della temperatura in cavità

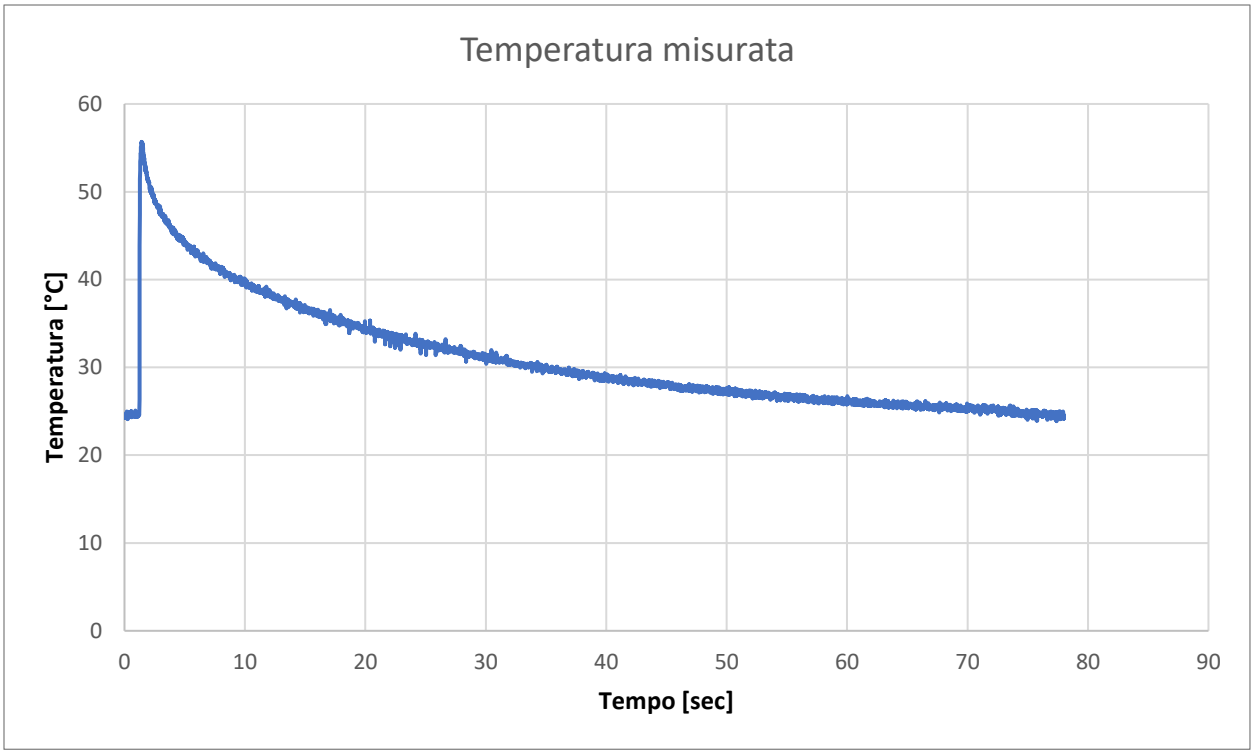


Figura 5.2 Andamento della temperatura misurata dai sensori

Anche in questo caso si osserva un rapidissimo aumento di temperatura, che raggiunge un valore massimo di circa 55°. Ancora una volta il forte gradiente dovuto all'elevata velocità di riempimento, ma a differenza della pressione la temperatura non cala altrettanto rapidamente, ma inizia una lenta decrescita. Questo è dovuto al fatto che il calore del fluido, trasmesso allo stampo, viene disperso all'interno dello stampo stesso di alluminio che si raffredda lentamente (il sensore è comunque immerso nel metallo dello stampo). Come possiamo vedere il grafico riporta le tipiche oscillazioni dovute agli errori di rilevazione.

5.3 Simulazione di processo tramite MOLDEX 3D: pressione e temperatura

Dopo aver inserito i dati di progetto nel programma si può procedere nell'avviare la simulazione. Una volta che il programma ha terminato di computare la simulazione si ricavano i grafici della pressione e della temperatura che ci forniscono una previsione delle letture dei sensori.

I seguenti grafici sono ottenuti tramite una media di 7 o 8 punti.

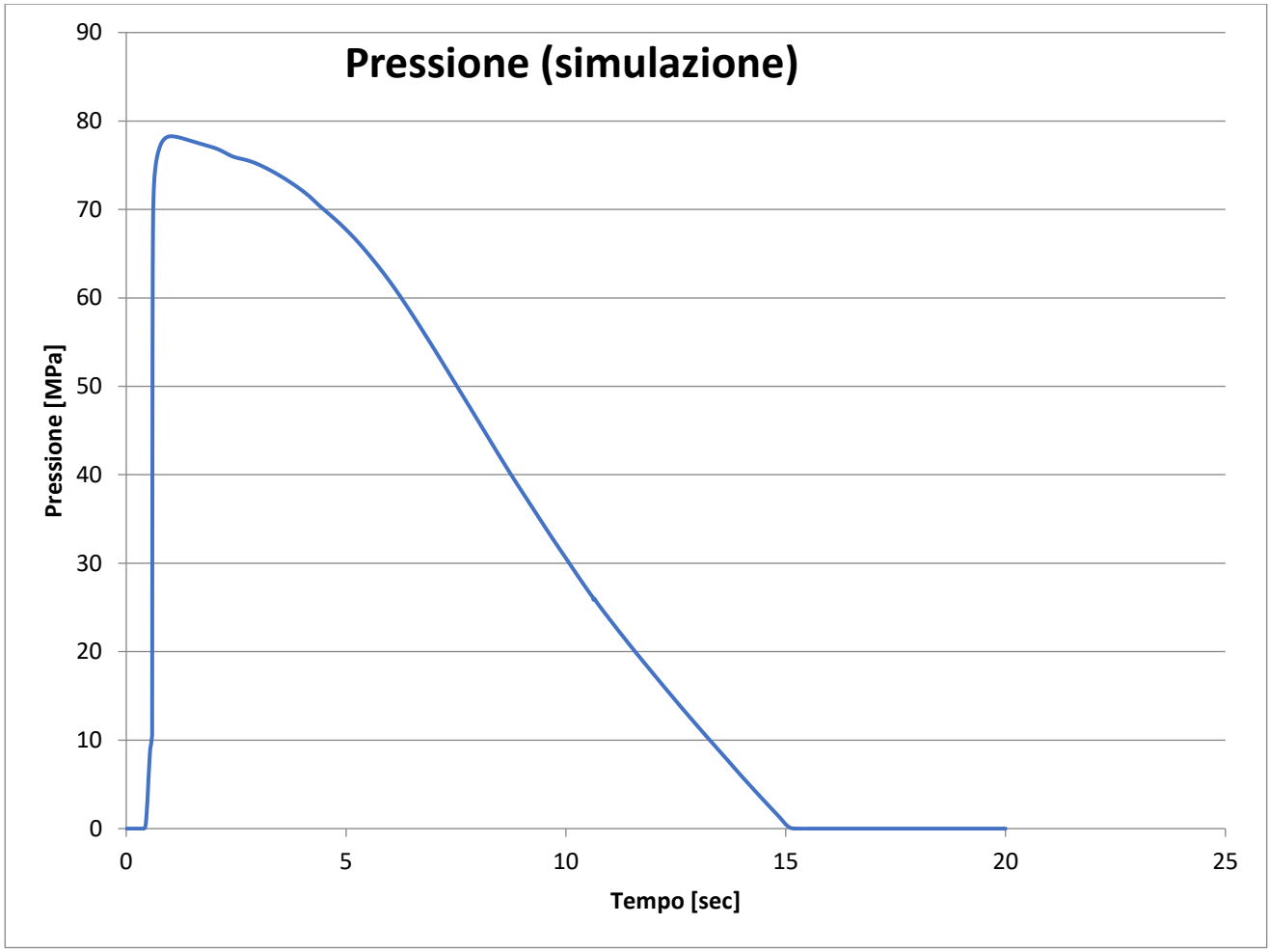


Figura 5.3. Andamento della pressione ottenuta dalla simulazione (media di 8 punti)

Rispetto all'andamento delle misure sperimentali sembra esistere un ritardo di circa 2-3 secondi per azzerare la pressione; si potrebbe ipotizzare che tale ritardo sia dovuto al fatto che la curva è ottenuta da un calcolo delle medie dei valori di 8 punti diversi.

La Figura 5.4 mostra l'andamento della temperatura, anche in questo caso come media della previsione del software della temperatura in 8 posizioni. In questo caso il massimo di temperatura raggiunge un valore sensibilmente più elevato del massimo valore registrato sperimentalmente (circa 80°C, contro 55°C).

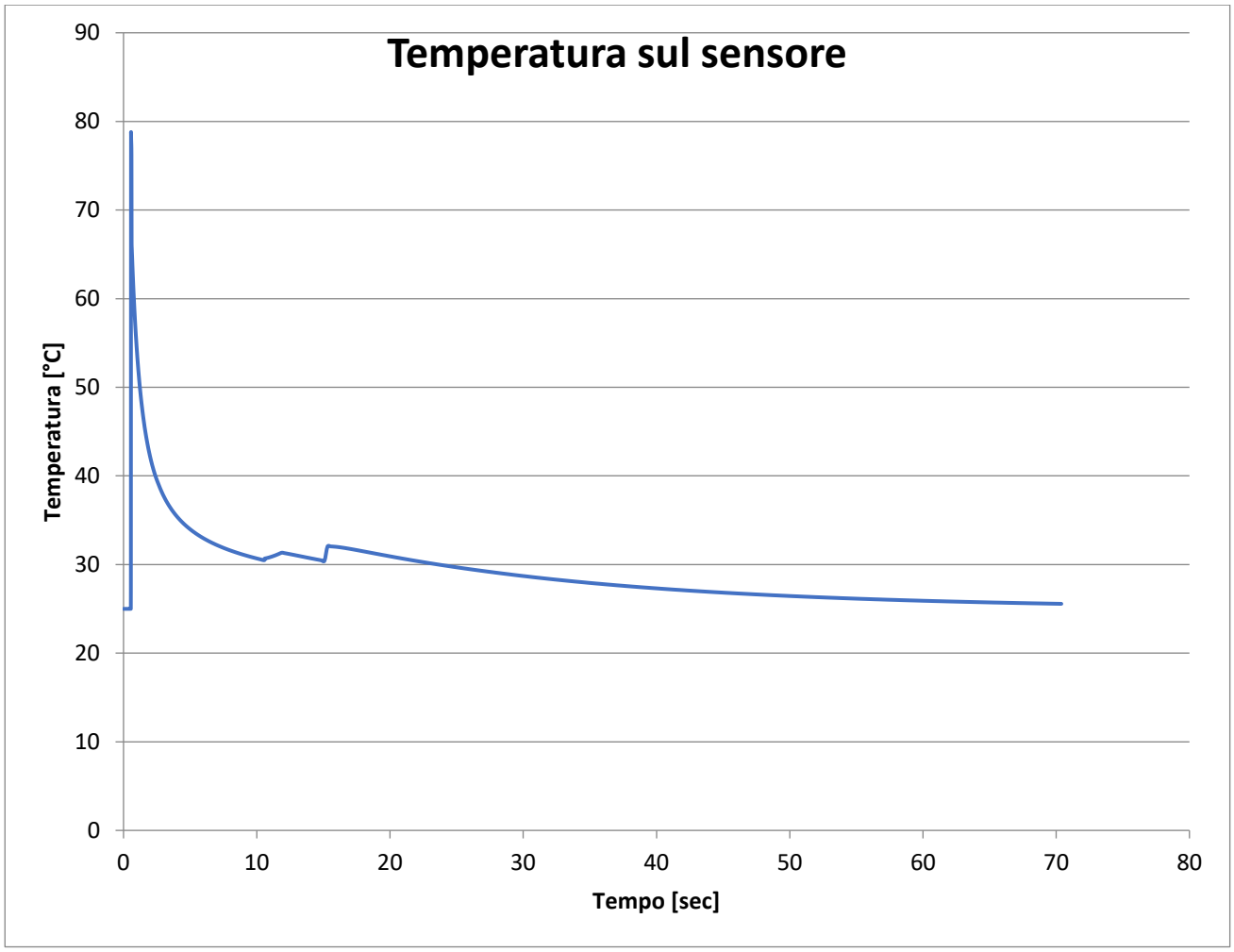


Figura 5.4. Andamento della temperatura ottenuta dalla simulazione (media di 8 sensori, in due cluster da 4 disposti intorno alla posizione dei sensori)

La figura 5.5 invece illustra l'andamento della pressione che viene esercitata durante il processo sullo stampo. Come previsto dalle condizioni di stampaggio, la pressione nel corso del processo rimane fissata ad 80 MPa. Con l'apertura dello stampo dopo 12 s, la pressione ovviamente crolla a 0. La Figura 5.6 mostra invece la temperatura dello stampo nel suo complesso. La temperatura si innalza fino a 35° per l'effetto dell'iniezione del fluido caldo, per poi discendere fino a temperature leggermente superiori a quella ambiente.

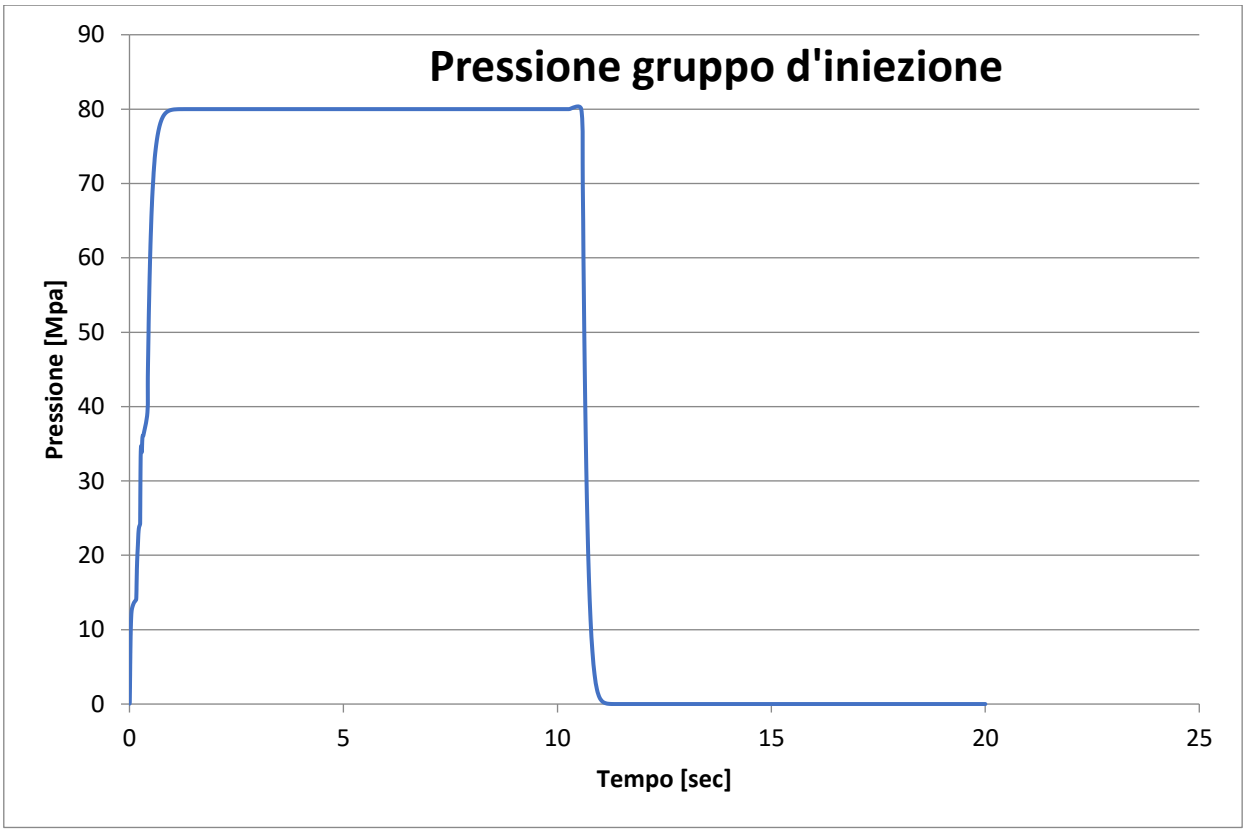


Figura 5.5. Andamento della pressione sullo stampo ottenuta dalla simulazione .

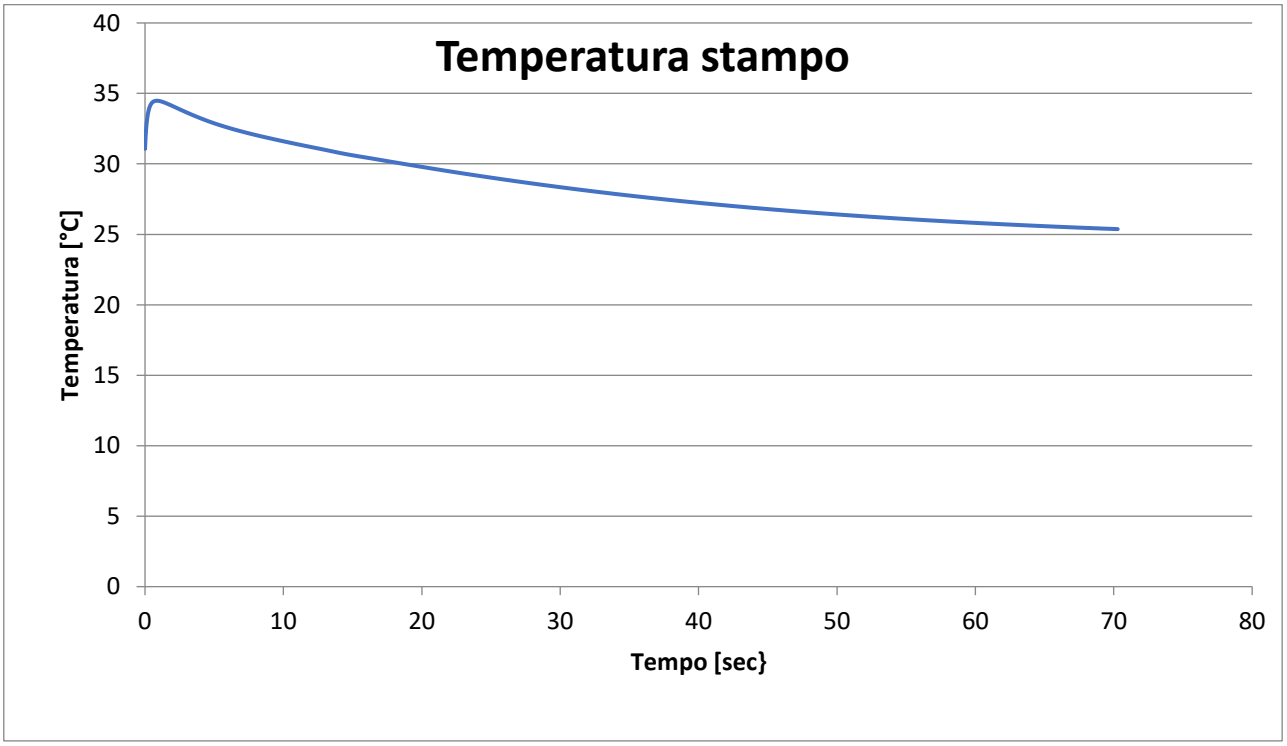


Figura 5.6. Andamento della temperatura sullo stampo ottenuta dalla simulazione .

5.4 Confronto fra dati sperimentali e eimulazione di processo tramite MOLDEX 3D

Per capire se i dati della simulazione danno una descrizione con una buona approssimazione rispetto ai dati sperimentali, bisogna confrontarli tra di loro. I seguenti grafici sono il risultato del confronto tra i grafici ottenuti tramite i sensori della pressa e quelli ottenuti dalla simulazione del programma Moldex 3D.

5.4.1 Confronto grafici pressione

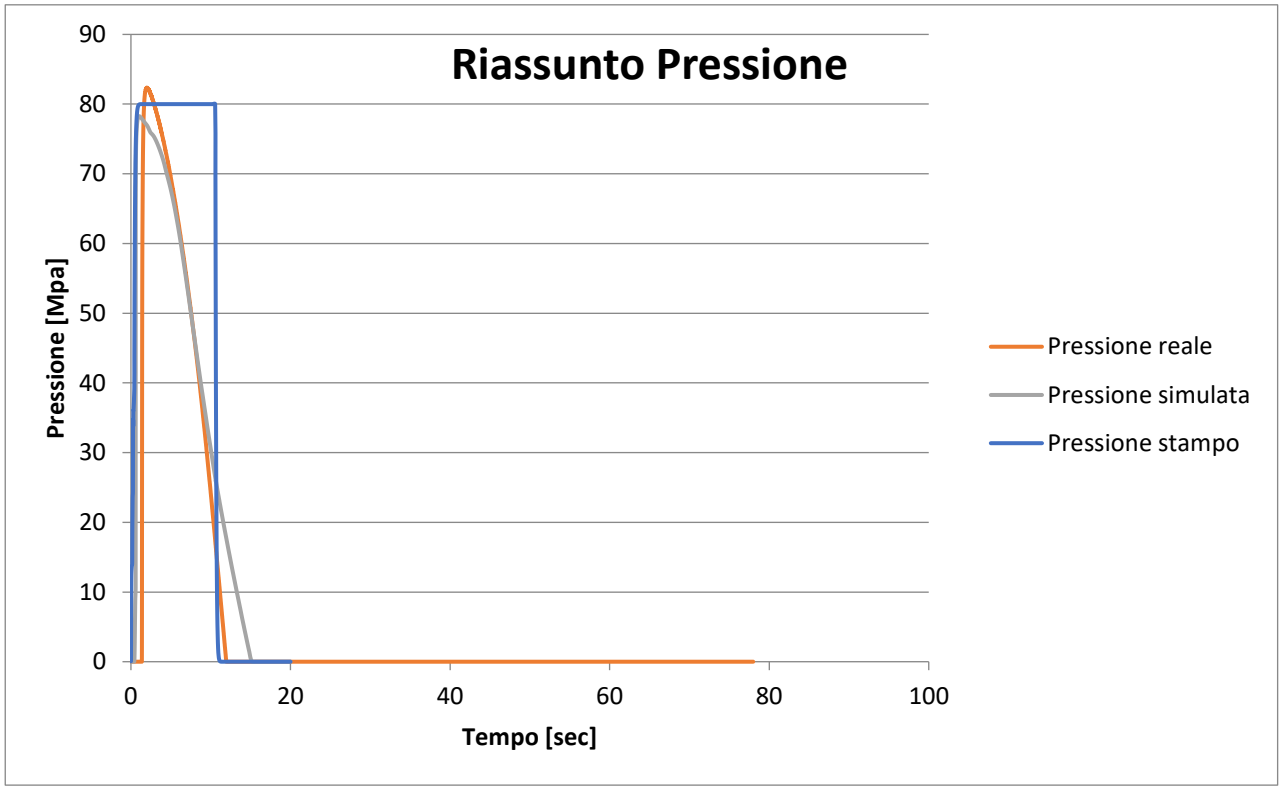


Figura 5.7. Andamento della pressione (Pressione reale: valori sperimentali; Pressione simulata:, valori calcolati dalla simulazione come media su 7 punti; Pressione stampo: valore della pressione esercitata sullo stampo) .

Si può notare che il grafico della pressione registrata dai sensori della pressa è leggermente in ritardo rispetto ai grafici della simulazione. Questo è probabilmente dovuto al fatto che i sensori non registrano immediatamente la pressione, ma manifestano un certo ritardo (tempo di latenza). Inoltre, sul ritardo della simulazione rispetto al grafico delle misure sperimentali, potrebbe influire anche il fatto che la curva simulata è stata ottenuta da una media di 8 sensori fittizi (cioè degli ipotetici sensori posti sugli 8 punti a cui si è accennato in precedenza).

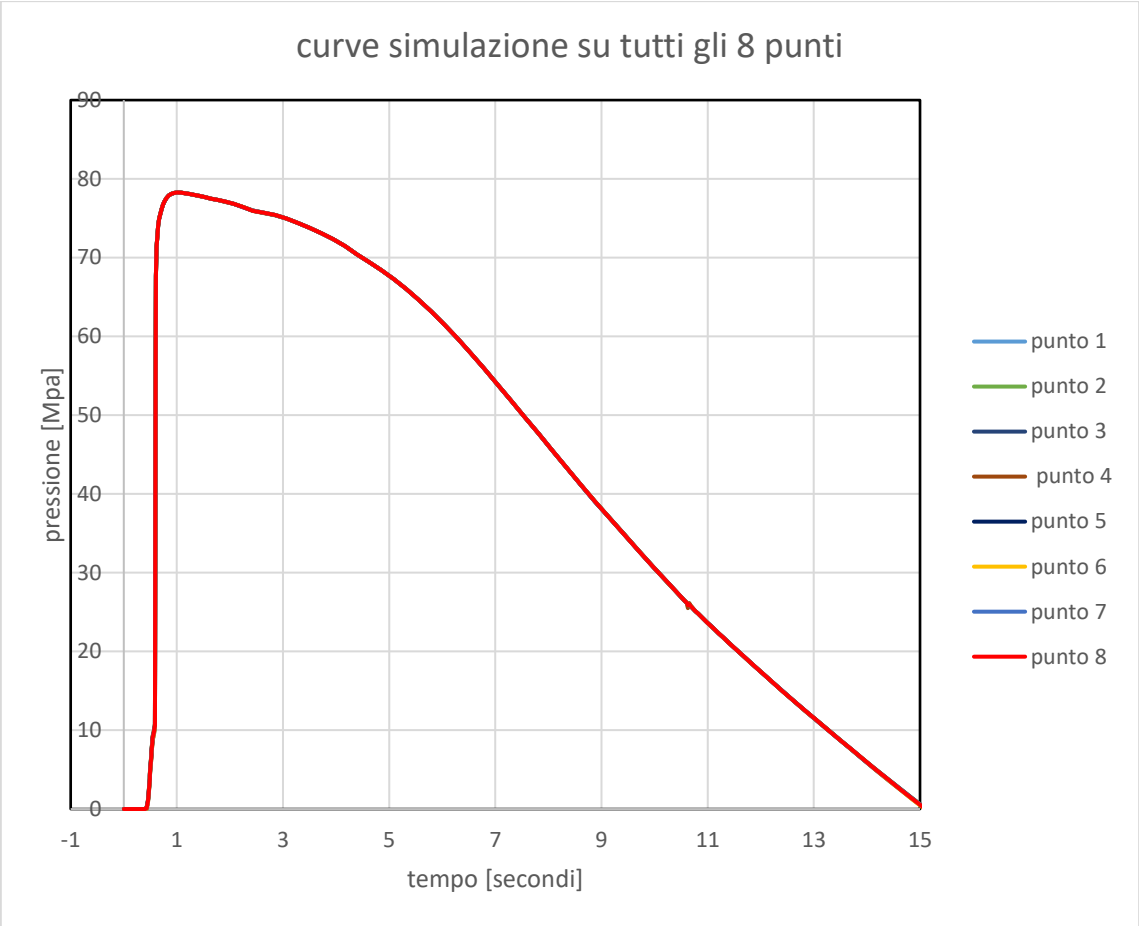


Figura 5.8. Andamento della pressione dalla simulazione per gli 8 punti considerati.

L'analisi della Figura 5.8 indica che tutte le curve si sovrappongono perfettamente, per cui non si hanno effetti di scostamento a causa del fatto che si sono considerati punti diversamente collocati nello stampo.

Si può notare che la pressione raggiunta dai sensori nello stampo è leggermente superiore a quella simulata. Questo fenomeno potrebbe essere spiegato dal fatto che la viscosità del polimero allo stato fluido (che è un fattore difficile da simulare per via dei vari fenomeni come la dissipazione del calore) è maggiore di quella calcolata, e perciò la pressione da imprimere al fluido è maggiore.

5.4.2 Confronto grafici temperature

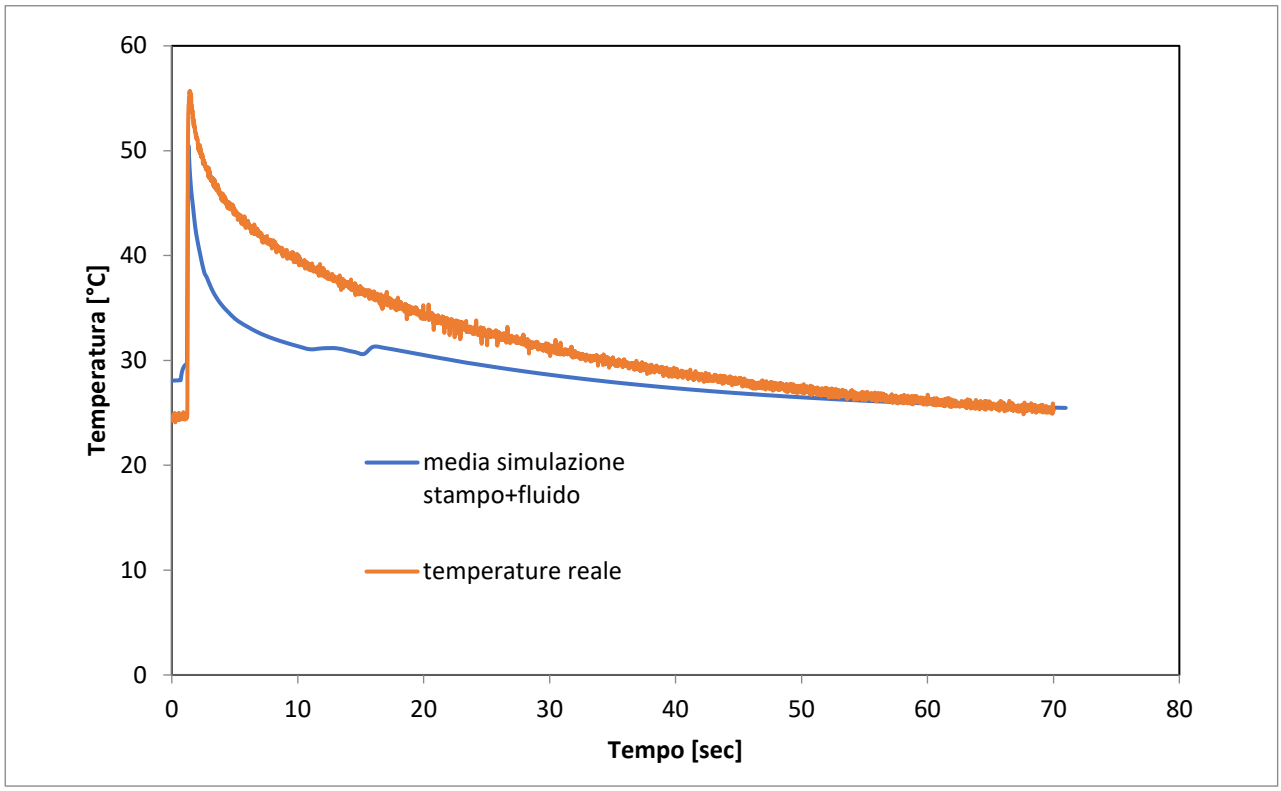


Figura 5.9. Andamento della pressione (Temperatura reale: valori sperimentali; Temperatura ottenuta come media aritmetica della temperatura del fluido e dello stampo, ognuna delle quali è ricavata come media di un cluster di punti fittizi) .

Come si può vedere, la differenza più significativa è lo scostamento fra la stima della temperatura del provino, e quella misurata sperimentalmente, durante la fase del raffreddamento. In effetti, si osserva che la temperatura registrata dal sensore tende a diminuire più lentamente di quanto non indichino le simulazioni. Per comprendere se l'utilizzo dei 7 punti diversi per stimare la temperatura nella zona dei sensori ha implicazioni rilevanti, si è provveduto a confrontare i diversi profili di temperatura dei due cluster (Figura 5.10).

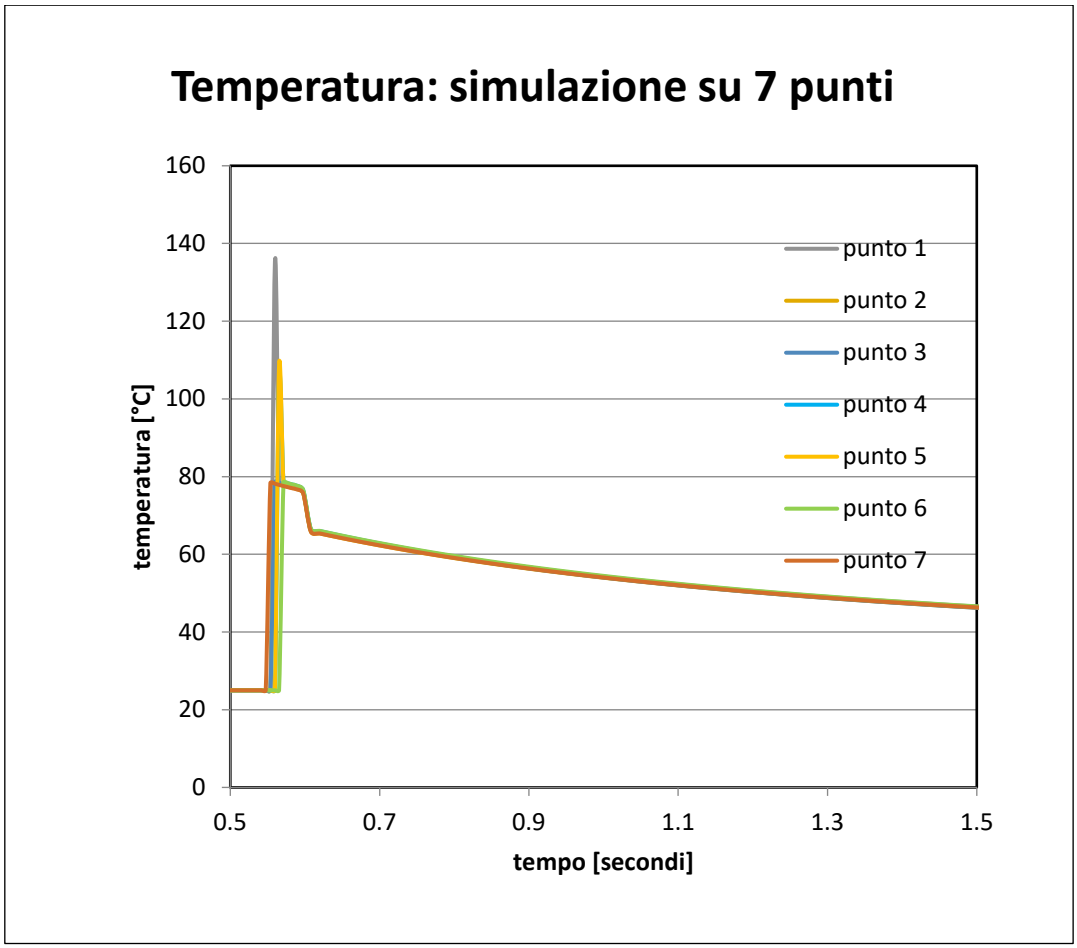


Figura 5.10. Andamento della temperatura dalla simulazione per i punti del cluster 1 (maggiori temperature massime) e per i punti del cluster 2 (massime temperature più basse).

Le curve di Figura 5.10 mostrano che effettivamente si hanno delle rilevanti differenze solo nel valore della temperatura di picco ricavata dalle simulazioni, mentre in generale le curve si sovrappongono completamente per quanto riguarda il profilo di raffreddamento, per cui la deviazione rispetto ai valori misurati è una caratteristica comune di tutti i profili simulati. Le temperature massime misurate nei vari punti oscillano fra circa 140 e circa 80°C, presumibilmente a causa della diversa distanza dal punto di iniezione.

Capitolo 8: conclusioni

In questo studio si è considerato il confronto tra il processo di stampaggio di un poliuretano termoplastico a memoria di forma e il processo simulato mediante software.

Per simulare il processo di stampaggio è stato preso come materiale dalla libreria del software il DESMOPAN DP3695 AU, il materiale con proprietà più vicine al polimero a memoria di forma stampato ad iniezione. Il processo è stato poi simulato tramite codice MOLDEX 3D. Lo scopo dello studio era verificare l'esattezza delle previsioni del software, confrontandole con i dati sperimentali ricavati da una serie di sensori posti nello stampo. La geometria del componente stampato era quella classica dog bone per campioni da sottoporre a prova di trazione. E' stata quindi stampata una serie di provini, e quindi operata la simulazione del processo. In particolare, i dati sperimentali sono stati confrontati con la media dei dati forniti dalla simulazione per 7-8 punti..

Dall'osservazione dei grafici e del loro confronto, tenendo in considerazione la latenza dei sensori e i vari fattori dissipativi reali, che il programma non riesce a simulare in maniera completamente accurata, possiamo dire che il modello è piuttosto fedele al comportamento sperimentale . Questo permette lo studio della produzione del polimero tramite software senza incorrere in errori sostanziali.

Si può dunque affermare che il confronto ha portato buoni risultati per quanto riguarda la pressione in cavità stampo. Diversamente la temperatura non è perfettamente comparabile ai dati ottenuti sperimentalmente, soprattutto per quello che riguarda il profilo di raffreddament.

Per questo sarebbe necessario in futuro modificare il modello del materiale al fine di ottenere valori più attendibili dalla simulazione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Introduction to Shape-Memory Polymers di David L.Safranski di Shape-Memory Polymer Device Design, David L.Safranski e Jack C.Griffis (Ed.), William Andrew

[2] Wiley , Lendlein , A. e S. Kelch, Shape-memory polymers . Angew Chem Int Ed, 2002;41:2034-57

[3] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic e M. A. Gibson, *A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities*, in Materials & Design, vol. 56, 2013, pp. 1078–1113

[4] Monkman. G.J., *Advances in Shape Memory Polymer Actuation*, in Mechatronics, vol. 10, n. 4/5, June–August 2000, pp. 489–498

[5] Giovanni Polo Menichino , Sviluppo di metodologie di calcolo numerico per la simulazione dello stampaggio ad iniezione di materiali polimerici" , tesi di Dottorato, Università degli studi di Napoli "Federico II",A.A. 2009-2010

[6] ISO Datasheet Desmopan DP 3695AU, Bayer Material Science, Edition 07.01.2009 http://www.tpucl.com/wp-content/uploads/2018/04/3695AU.pdf