

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Interfaccia tra ugello e piastra di distribuzione nei sistemi di
iniezione a canale caldo: soluzioni costruttive e metodo di calcolo**



Relatore

prof.ssa Francesca Maria Curà

Candidato

Alberto Baudino

Anno Accademico 2018/19

Abstract

Moltissimi dei prodotti in plastica che usiamo ogni giorno sono realizzati per stampaggio a iniezione. Con questa tecnica si producono pezzi di forma e dimensioni differenti con pesi che variano da pochi grammi fino a diversi chili. Il cuore del processo è costituito dallo stampo e un suo elemento fondamentale è il sistema di iniezione. Esso ha il compito di convogliare il flusso di materia plastica dalla boccola fino alle cavità dello stampo e può essere di due tipi: a canale freddo o a canale caldo. Quest'ultimo, ideale per pezzi tecnici e di piccola grammatura, sarà l'oggetto di questa tesi e verrà studiato in collaborazione con l'azienda Thermoplay di Pont-Saint-Martin, leader del settore.

In particolar modo, verrà analizzata l'interfaccia tra la piastra di distribuzione e gli ugelli. Si tratta di un'area molto delicata in quanto deve garantire la tenuta del sistema e impedire perdite della plastica fusa che viene trasferita dal distributore negli ugelli e quindi iniettata nelle cavità dello stampo. Possono essere raggiunte temperature di oltre 300°C e pressioni di quasi 250 MPa.

Sono state quindi esaminate alcune delle soluzioni costruttive attualmente presenti nel mercato che prevedono l'impiego di molle e contrasti di vario tipo con l'obiettivo di migliorare il prodotto esistente e i metodi di progettazione adottati in azienda. Terminata questa prima fase di studio, è stato progettato e costruito un sistema di prova per testare una nuova soluzione che preveda l'inserimento di viti tra la camera calda e la piastra sottostante dello stampo per incrementarne la tenuta. Infine, si è valutato l'effetto congiunto tra l'utilizzo di queste viti e delle rondelle di contrasto con lo scopo di stimare le sollecitazioni presenti ed evitare possibili danneggiamenti delle teste degli ugelli.

Tutto questo lavoro ha compreso attività di calcolo e di progettazione meccanica utilizzando software CAD, analisi FEM termiche e strutturali di tipo statico svolte in *Ansys* e prove sperimentali effettuate nella sala testing dell'azienda.

Giunto alla conclusione del mio percorso universitario, è mio desiderio ringraziare tutti quelli che mi hanno accompagnato e aiutato durante questi anni.

Ringrazio innanzitutto il mio riferimento aziendale, l'Ing. Carlo Cocito, e tutto il reparto di Ricerca e sviluppo della Thermoplay che hanno permesso la realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio i miei amici per i momenti passati insieme tra corsi, esami e tempo libero.

Un ultimo grazie va alla mia famiglia per il supporto che mi ha sempre dato, specialmente nei momenti più difficili.

Alberto

Indice

Capitolo 1

Introduzione.....	1
1.1. La società Thermoplay e il gruppo Barnes.....	1

Capitolo 2

Lo stampaggio a iniezione delle materie plastiche	3
2.1. Definizione, vantaggi e limiti.....	3
2.2. La pressa e lo stampo	4
2.3. Ciclo e fasi del processo.....	8

Capitolo 3

I sistemi di iniezione	11
3.1. Sistema di iniezione a canale freddo	11
3.2. Sistema di iniezione a canale caldo.....	12
3.2.1. Descrizione e caratteristiche progettuali	12
3.2.2. Vantaggi e limiti.....	14
3.2.3. Il problema delle perdite: le cause.....	15
3.2.4. Il problema delle perdite: soluzioni e sistemi di tenuta.....	16

Capitolo 4

L'interfaccia tra ugello e piastra di distribuzione.....	19
4.1. Soluzione A: contrasti e tenuta per compressione.....	19
4.1.1. Descrizione e geometria	20
4.1.2. Analisi e risultati	22
4.2. Soluzione B: sistema con molle	26
4.2.1. Descrizione e geometria	27
4.2.2. Calcolo di rigidità delle molle a tazza	28
4.2.3. Analisi e risultati	30
4.3. Soluzione C: ugello avvitato al distributore	35
4.3.1. Descrizione e geometria	35
4.3.2. Analisi e risultati	35

4.4.	Confronto tra le varie soluzioni costruttive	40
------	--	----

Capitolo 5

Viti “anti-leakage”: analisi e validazione	43
5.1. Obiettivi dell’analisi e descrizione del sistema	43
5.2. Analisi termiche e strutturali	46
5.2.1. Primo caso: quattro viti per ugello	48
5.2.2. Secondo caso: due viti per ugello	49
5.2.3. Terzo caso: aumento della superficie di contatto	51
5.2.4. Quarto caso: variazione della temperatura di lavoro	52
5.3. Verifica della resistenza delle viti	53
5.3.1. Normativa e formule	53
5.3.2. Calcoli e risultati	55
5.4. Prove sperimentali e validazione.....	57
5.4.1. Test a banco.....	57
5.4.2. Disaccoppiamento boccola di iniezione e ugello pressa	63
5.4.3. Test in macchina: quattro viti per ugello	66
5.4.4. Test in macchina: due viti per ugello	68
5.4.5. Test in macchina: aumento della superficie di contatto	71
5.5. Conclusioni delle prove.....	73

Capitolo 6

Effetto combinato di viti “anti-leakage” e rondelle di contrasto.....	75
6.1. Geometria e analisi FEM.....	75
6.2. Risultati delle simulazioni	78
6.3. Variazione della coppia di serraggio delle viti	80

Capitolo 7

Conclusioni.....	85
-------------------------	-----------

Riferimenti e bibliografia	87
---	-----------

Capitolo 1

Introduzione

Questa tesi è stata svolta in collaborazione con il reparto di *Ricerca e Sviluppo* dell'azienda *Thermoplay s.p.a.*, situata nell'area industriale di Pont-Saint-Martin in Valle d'Aosta.

1.1. La società Thermoplay e il gruppo Barnes

La società *Thermoplay* è stata fondata nel 1995 ed è un'azienda specializzata nella progettazione, sviluppo e produzione di sistemi d'iniezione a canale caldo per lo stampaggio di materie plastiche. Opera principalmente nei settori packaging, cosmetico, elettronico, medicale e automotive.

Grazie a una costante crescita e a continui investimenti, l'azienda ha raggiunto una posizione leader in Italia e nel mondo. Oggi impiega una forza lavoro di oltre 170 dipendenti e, in aggiunta alla sede produttiva in Italia, è presente con proprie filiali di vendita e assistenza tecnica anche in Francia, Germania, Portogallo, USA, Brasile, Cina e India.

Nell'agosto 2015 è stata acquisita da *Barnes Group Inc.*, società statunitense dedita alla produzione di componenti industriali e aerospaziali e fornitore di servizi e consulenze a livello internazionale. Attualmente fa parte del settore *Molding solutions*, unità strategica del gruppo incentrata sull'industria dello stampaggio a iniezione, che comprende la progettazione e la vendita di stampi, sistemi a canale caldo, centraline e unità di controllo sequenziali.



Figura 1.1 – Loghi di *Thermoplay s.p.a.* e *Barnes Group Inc.*



Figura 1.2 – Vista della sede e dello stabilimento produttivo dell'azienda a Pont-Saint-Martin (AO).

Capitolo 2

Lo stampaggio a iniezione delle materie plastiche

In questo capitolo si vuole brevemente illustrare il processo dello stampaggio a iniezione dei materiali termoplastici e dei componenti principali di una pressa e di uno stampo.

2.1. Definizione, vantaggi e limiti

Lo stampaggio a iniezione è una tra le tecniche maggiormente impiegate per la trasformazione delle materie plastiche. Oltre il 30% dei materiali termoplastici viene stampato con questa tecnologia (**Figura 2.1**). Vengono realizzati pezzi di forma e dimensioni diverse e dal peso che varia da pochi grammi a quasi 25 kg. Tra i numerosi prodotti che è possibile fabbricare si hanno cover dei cellulari, parti di veicoli, contenitori, tappi, ripiani, etc.

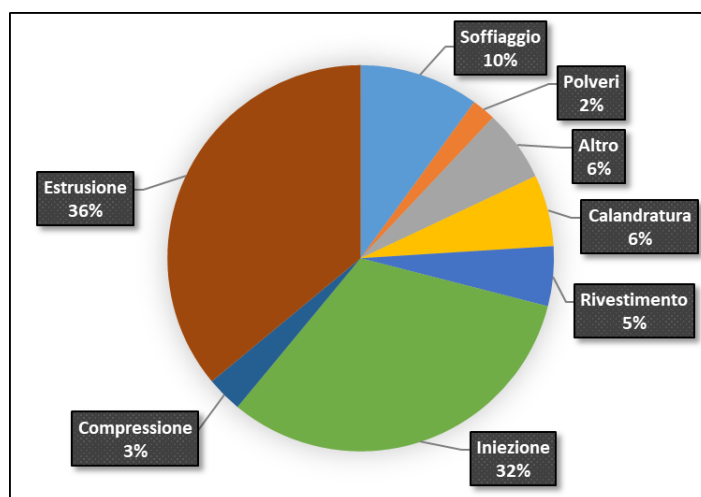


Figura 2.1 – Ripartizione delle diverse tecniche utilizzate al giorno d'oggi per la trasformazione della plastica. Le più diffuse sono quelle per iniezione ed estrusione che coprono quasi il 70% della produzione mondiale dei prodotti in plastica.

Questa tecnica può essere definita e sintetizzata nel seguente modo: *lo stampaggio a iniezione in sostanza è un processo in cui viene riscaldato un materiale termoplastico solido fino a raggiungere*

uno stato di fluidità (liquido), viene quindi iniettato ad alta pressione in uno spazio chiuso e poi raffreddato nello stampo fino a che ritorna nuovamente allo stato solido, assumendo la forma della cavità dello stampo [1].

I principali vantaggi che questa tecnologia offre sono:

- possibilità di produrre parti con geometrie complesse, spessori variabili e di dimensioni molto piccole, anche in diversi colori e materiali o in accoppiamento con inserti metallici;
- elevata produttività e automazione dei processi;
- bassi costi di produzione;
- minima necessità di operazioni di rifinitura;
- stampi e presse possono essere utilizzati con materiali plastici diversi;
- continui investimenti in ricerca e innovazione delle metodologie di stampaggio e degli accessori utilizzati.

Si hanno però anche diversi limiti; i principali sono elencati di seguito:

- elevato costo di stampi, presse e attrezzature;
- è un processo discontinuo con un'elevata quantità di scarti, che possono però essere recuperati, rimacinati e riprocessati;
- i pezzi devono presentare spessori contenuti (generalmente non oltre 10 mm) ed è impossibile determinare immediatamente la qualità del particolare stampato;
- scarsa conoscenza delle relazioni reologiche tra il processo e le proprietà dei polimeri;
- elevata competitività del settore.

Pertanto, lo stampaggio a iniezione risulta economicamente conveniente solo per produzioni elevate e ampiamente automatizzate.

2.2. La pressa e lo stampo

Due elementi fondamentali sono la pressa a iniezione e lo stampo.

In particolare, la pressa è costituita dai seguenti gruppi (**Figura 2.2**):

- unità di plastificazione e di iniezione: ha il compito di plastificare (cioè liquefare) il polimero, di accumulare la massa fusa nella camera di iniezione, quindi di iniettarla nella cavità dello stampo e mantenere la pressione di mantenimento fino al termine della fase di raffreddamento;
- unità di chiusura: accoglie lo stampo e deve creare una forza sufficiente a contrastare l'elevata pressione generata dal gruppo di iniezione che tenderebbe ad aprire le due metà dello stampo; si occupa anche della movimentazione in apertura e in chiusura di quest'ultimo;

- unità di controllo: si occupa di gestire tutti i sottosistemi del macchinario e permette all'operatore di monitorare in tempo reale i parametri di processo.

Andando più nel dettaglio, il gruppo di iniezione schematizzato in **Figura 2.3** include la parte della pressa tra l'arrivo del polimero in granuli fino all'iniezione del fluido plastificato nello stampo. Seguendo il percorso compiuto dal materiale, si incontrano:

- la tramoggia per il granulato, posta in cima alla macchina, in cui il materiale viene omogeneizzato ed eventualmente miscelato con additivi e coloranti;
- la vite punzonante, racchiusa in un cilindro riscaldato da diversi gruppi di resistenze controllabili separatamente. Questa vite ha il compito di riscaldare e plastificare il materiale plastico; il calore necessario viene fornito per conduzione dai riscaldatori e per effetto meccanico dalla compressione e dall'attrito del filetto della vite;
- una valvola di antiritorno posizionata nella parte terminale della vite (**Figura 2.4**);
- l'ugello di iniezione della pressa, posizionato alla fine del cilindro, che permette di convogliare il fluido nel canale d'alimentazione dello stampo.

Il gruppo di chiusura è, invece, quella parte della pressa in cui viene montato lo stampo del pezzo da realizzare. Comprende il sistema di estrazione del pezzo e il sistema di chiusura dello stampo, che può essere a ginocchiera a 3 o 5 punti o a pistone. Questi cinematismi possono essere di tipo idraulico, meccanico, elettrico o misto.

Lo stampo (**Figura 2.5**) è l'elemento centrale di ogni pressa. Può contenere una o più cavità e ha il compito di distribuire il polimero fuso in queste cavità, dare la forma desiderata al fuso, raffreddare la massa plastica e permettere l'estrazione del prodotto finito. È collegato all'unità di iniezione tramite l'ugello pressa ed è principalmente costituito da una parte fissa e da una parte mobile. Può essere a due o a tre piastre (questo verrà descritto nel dettaglio nella **Sezione 3.1**).

La parte fissa è composta da più piastre, con funzioni che includono l'isolamento (generalmente la prima piastra lato macchina), il fissaggio e il sostegno del tassello contenente la semiforma del pezzo (tipicamente la femmina). Inoltre, il semistampo fisso contiene il canale d'ingresso (o di alimentazione) del fluido plastificato.

Se lo stampo è della tipologia a “canale freddo”, comprende anche il condotto per la materozza che viene estratta insieme al pezzo e poi rimossa. Se invece è a “camera calda”, allora racchiude la stessa camera calda, cioè un insieme di piastre che contengono i canali di iniezione circondati da resistenze e mantenuti a temperature elevate per evitare la solidificazione del materiale all'interno di tali canali. Queste resistenze sono controllate esternamente tramite delle termocoppie e da una centralina a bordo macchina che permette di impostare le temperature dei diversi gruppi di riscaldatori. In questo modo è possibile stampare senza materozza. Questo sistema verrà ampiamente descritto nel **Capitolo 3**.

La parte mobile è più complessa in quanto contiene tutti i meccanismi necessari all'estrazione del pezzo stampato. Il semistampo mobile comprende la piastra nella quale è intassellata l'altra semiforma del pezzo (generalmente il maschio). Inoltre, è presente anche una piastra munita di fori passanti per lo scorrimento di una o più colonne che movimentano il tavolino di estrazione (una piastrina mobile a cui sono fissati gli estrattori, colonnine cilindriche che andando in battuta sul pezzo lo spingono fuori dallo stampo).

Altro elemento importantissimo è il sistema di condizionamento, cioè l'insieme di tutti i canali di raffreddamento realizzati in piastre appartenenti sia alla parte fissa che a quella mobile. Il liquido utilizzato è generalmente acqua.

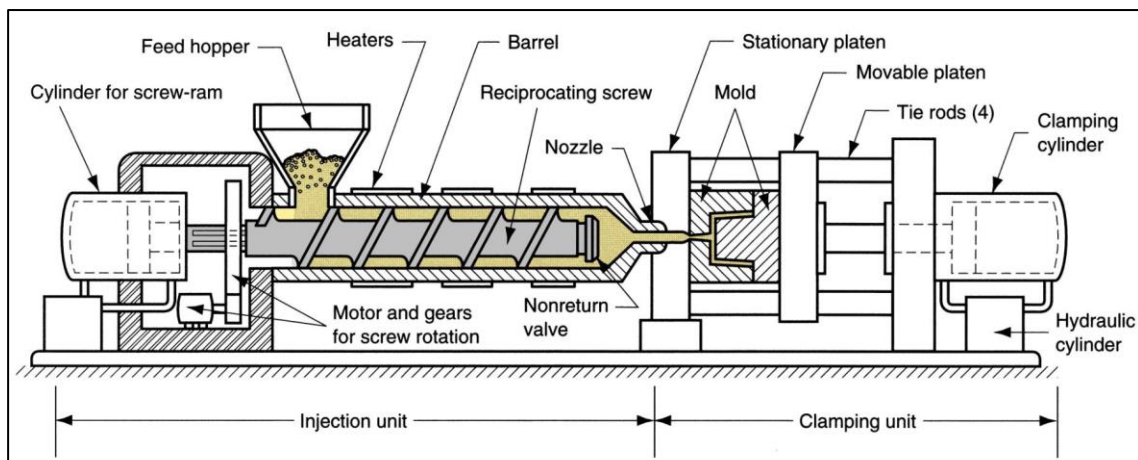


Figura 2.2 – Sezione di una pressa a iniezione e indicazione dei gruppi e componenti principali [2].

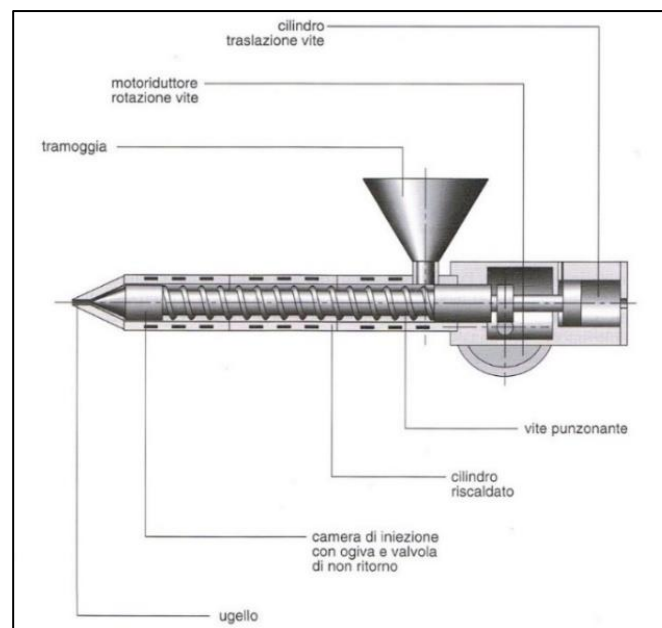


Figura 2.3 – Schema dell'unità di iniezione e plastificazione [3].

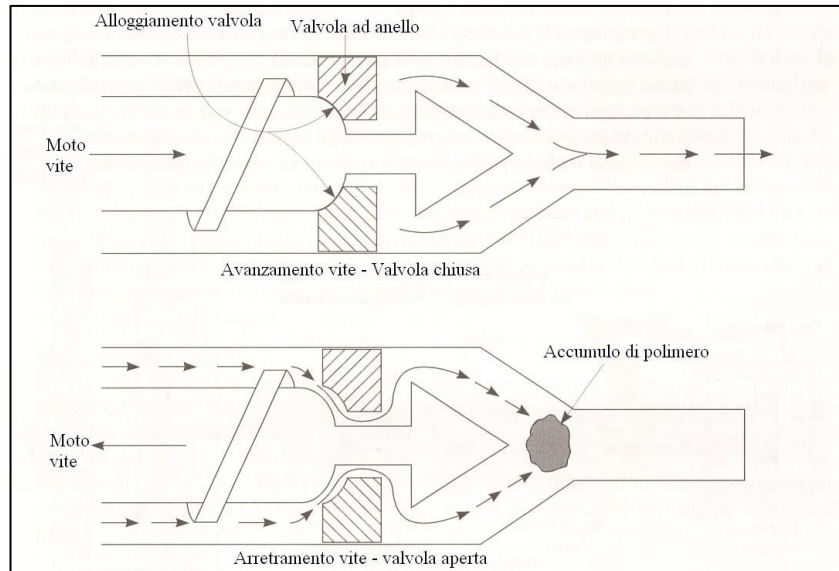


Figura 2.4 – Schema di funzionamento della valvola antiriflusso: 1) in fase di iniezione (traslazione della vite in avanti) la valvola è chiusa e fa tenuta contro un apposito spallamento della vite impedendo il reflusso del materiale lungo i filetti; 2) quando la vite si ritrae e ruota plastificando del nuovo materiale, la valvola si apre e consente il passaggio e l'accumulo del polimero nella zona antistante al puntale per un nuovo ciclo di stampaggio [3].

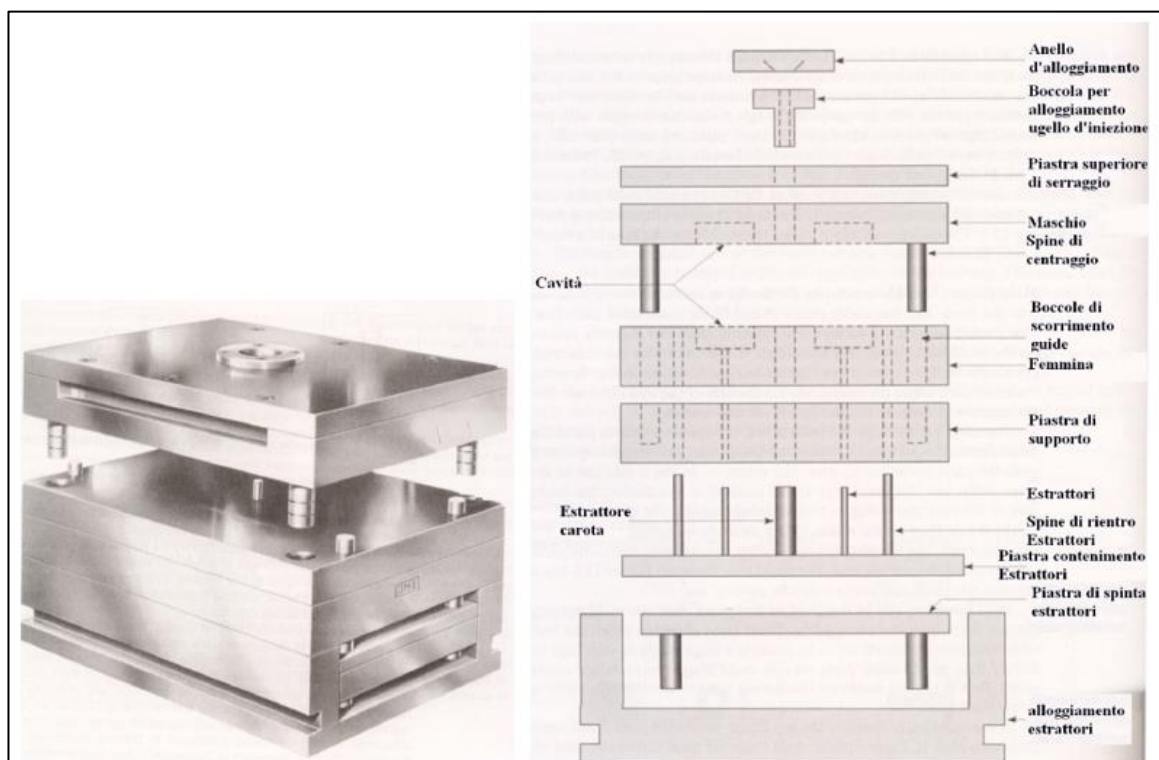


Figura 2.5 – Raffigurazione di uno stampo ed esploso con indicazione dei suoi componenti principali [3].

2.3. Ciclo e fasi del processo

All'inizio del ciclo di stampaggio i granuli del polimero, contenuti nella tramoggia, vengono fatti cadere all'interno del cilindro e la vite punzonante ruota e arretra lasciando spazio al materiale. I granuli, avanzando verso la testa del cilindro, vengono riscaldati da una serie di resistenze elettriche fino oltre la loro temperatura di fusione e plastificati dalla rotazione della vite. L'accumulo del materiale plastificato nella parte terminale del cilindro fa arretrare la vite, determinando anche la quantità di materiale che verrà iniettata. La pressa ha allo stesso tempo provveduto alla chiusura dello stampo e può quindi iniziare l'iniezione della massa fusa.

Negli istanti iniziali dell'iniezione (fase di riempimento) viene introdotto materiale per circa il 95% del volume del pezzo fino al raggiungimento del punto di commutazione. Si tratta di una fase di "controllo in velocità o in portata" in quanto alla vite viene applicata una velocità scelta dall'operatore. Il restante 5% viene iniettato negli istanti finali dell'iniezione (fase di compensazione o pressurizzazione). Ora si ha un "controllo in pressione" (il punto di commutazione corrisponde infatti al cambio del parametro di controllo).

Quindi la vite continua a forzare del materiale all'interno delle cavità per compensare il ritiro volumetrico che la massa plastica subisce raffreddandosi (fase di mantenimento).

A questo punto non viene iniettato altro materiale e la pressione all'interno della cavità comincia a decrescere gradualmente. Si ha quindi l'apertura dello stampo per permettere l'estrazione della parte. Il pezzo espulso cade in un canale sottostante che lo fa depositare in un apposito contenitore da dove verrà prelevato per le successive fasi di controllo, distacco della materozza se presente ed eventuale rifinitura.

Può infine iniziare un nuovo ciclo di stampaggio.

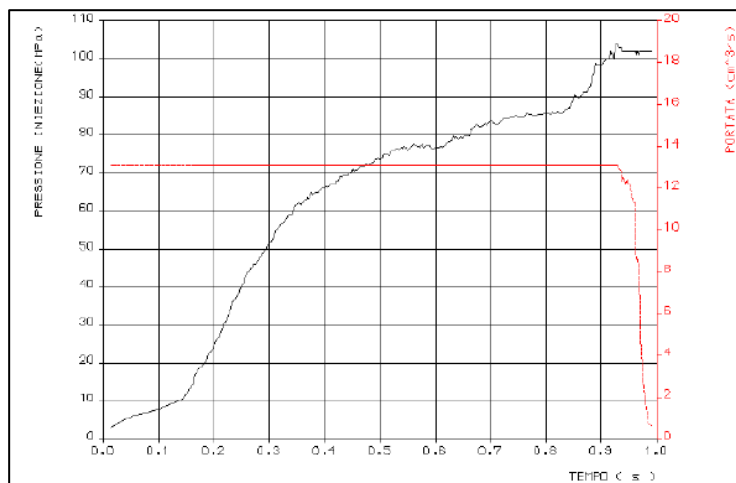


Figura 2.6 – Andamento nel tempo della pressione di iniezione e della portata del materiale iniettato. Si può osservare il punto di commutazione in cui si ha il cambio del parametro di controllo (dalla velocità o portata alla pressione).

Riepilogando, il processo può essere suddiviso nelle seguenti fasi (**Figura 2.7**):

0. preparazione e plastificazione del materiale all'interno del cilindro;
1. chiusura dello stampo;
2. riempimento e compensazione: la vite punzonante trasla e, agendo come un pistone, spinge il fuso attraverso l'ugello nelle cavità dello stampo;
3. mantenimento: la vite continua a essere spinta in avanti e applica al fuso una pressione solitamente più bassa di quella precedente finché il gate di iniezione non si solidifica;
4. raffreddamento e plastificazione: mentre il pezzo raffredda all'interno dello stampo, la vite si ritrae e allo stesso tempo ruota per preparare del nuovo materiale per la stampata successiva;
5. apertura dello stampo ed estrazione del pezzo.

I parametri del processo controllabili esternamente sono la temperatura del materiale iniettato, la temperatura di condizionamento dello stampo, il tempo di iniezione e pressione e tempo di mantenimento.

In **Figura 2.8** è mostrato il ciclo del materiale sul diagramma pVT (pressione–volume– temperatura). Solo il ritiro volumetrico tra i punti A e C può essere compensato con il mantenimento. Il ritiro tra C ed E non può essere compensato ed è necessario sovradimensionare le cavità dello stampo.

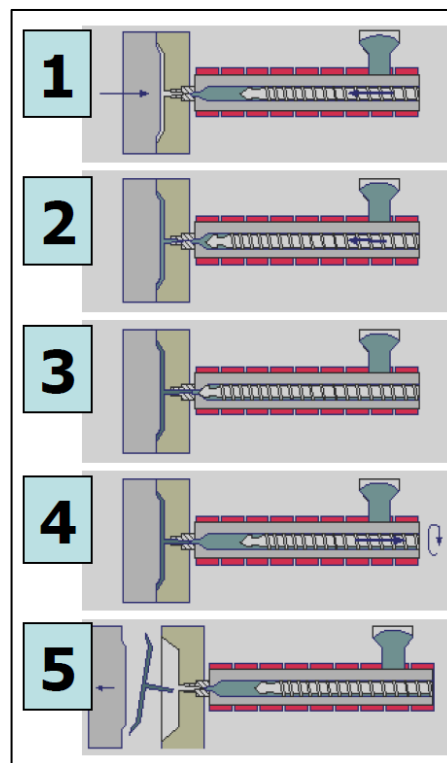


Figura 2.7 – Fasi principali del processo di stampaggio a iniezione: 1) chiusura dello stampo; 2) riempimento e compensazione; 3) mantenimento; 4) raffreddamento e plastificazione del nuovo materiale; 5) apertura dello stampo ed estrazione del pezzo.

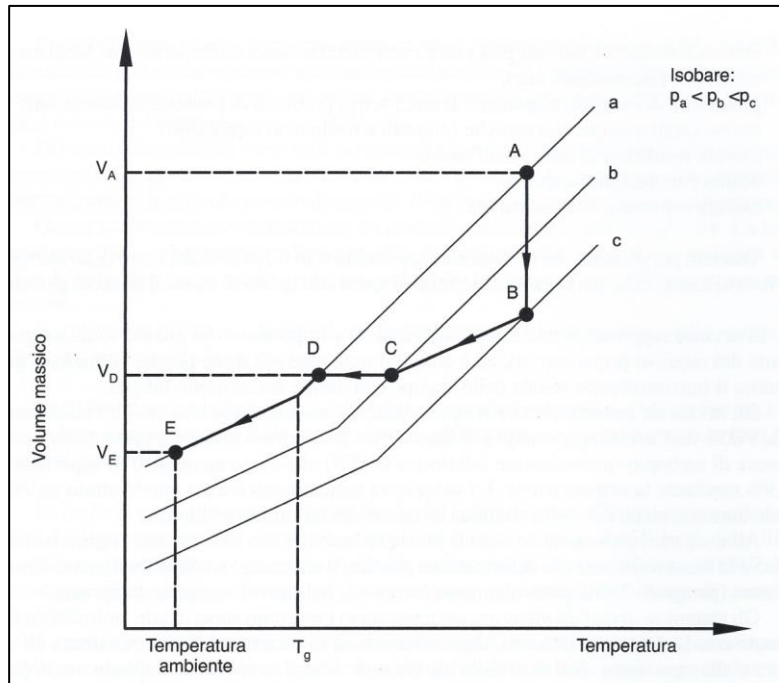


Figura 2.8 – Evoluzione sul diagramma pVT delle condizioni fisiche della plastica durante lo stampaggio: A) plastificazione; A-B) iniezione; B-C) mantenimento; C) solidificazione del gate; C-D) raffreddamento all'interno dello stampo con gate solidificato; D) apertura dello stampo; D-E) raffreddamento fuori dallo stampo; E) condizioni ambientali [3].

Capitolo 3

I sistemi di iniezione

Il sistema di iniezione di uno stampo è tutto quell'insieme di parti che ha il compito di indirizzare il flusso di plastica dalla boccola di iniezione fino alle cavità dello stampo.

Come già accennato nel capitolo precedente, gli stampi possono essere a due o a tre piastre e avere un canale freddo o un canale caldo.

Questi sistemi verranno approfonditi nei seguenti paragrafi [4].

3.1. Sistema di iniezione a canale freddo

Uno stampo a canale freddo può essere definito come uno stampo in cui il polimero presente nella materozza viene raffreddato ed estratto dallo stampo durante il ciclo.

Nella maggiore parte dei sistemi di iniezione la materozza e la parte formata nelle cavità si trovano lungo lo stesso piano di divisione principale. Il piano di divisione principale è quello in cui il pezzo viene formato ed estratto. Questo piano è utilizzato negli stampi a “due piastre a canale freddo”, nei quali parte e materozza vengono estratti insieme e più precisamente lungo la stessa linea di divisione (Figura 3.1).

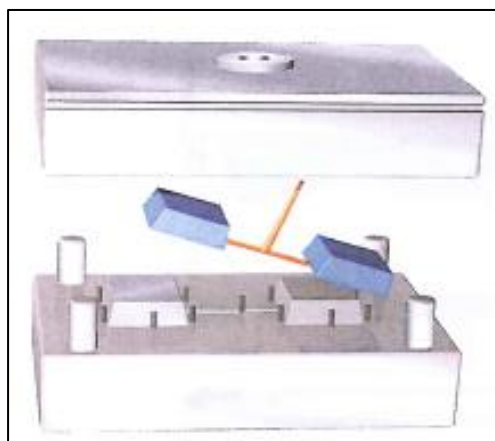


Figura 3.1 – Stampo “a due piastre a canale freddo” aperto: parte e materozza sono estratti insieme lungo lo stesso piano di divisione principale [4].

Un esempio di stampo a “tre piastre a canale freddo” è illustrato in **Figura 3.2**. Il termine due o tre piastre si riferisce al numero minimo di piastre dello stampo necessarie per formare ed estrarre il pezzo e la materozza solidificata.

In particolare:

- in uno stampo a due piastre, parte e materozza sono formate e rimosse tra almeno una prima e una seconda piastra;
- in uno stampo a tre piastre, la parte è formata e rimossa tra almeno una prima e una seconda piastra, mentre la materozza tra almeno una terza piastra e la stessa seconda piastra utilizzata per formare il pezzo.

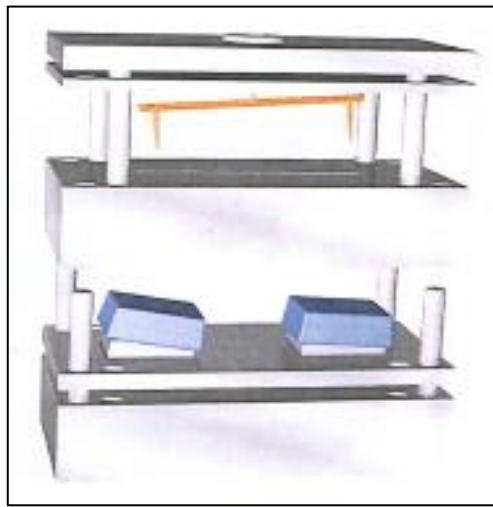


Figura 3.2 – Stampo “a tre piastre a canale freddo” aperto: i pezzi sono estratti lungo il piano di divisione principale, la materozza invece su quello secondario [4].

3.2. Sistema di iniezione a canale caldo

3.2.1. Descrizione e caratteristiche progettuali

Negli ultimi decenni l’uso dei sistemi di iniezione “a canale caldo” è aumentato di oltre il 30%. Generalmente la camera calda viene fornita da aziende specializzate nella loro progettazione e fabbricazione, quindi assemblata all’interno dello stampo.

In questi tipi di sistemi il flusso di plastica che attraversa la materozza non si solidifica e non viene estratto insieme alla parte formata nelle cavità. Essi devono soddisfare le seguenti caratteristiche:

- resistere a pressioni interne della massa fusa di oltre 200 MPa senza incorrere in perdite o cedimenti strutturali;
- coesistere in uno stampo, anche a canale freddo;

- avere canali che garantiscano un flusso controllato e bilanciato per poter essere inseriti in sistemi multicavità;
- il punto di iniezione degli ugelli deve minimizzare l'effetto di un riscaldamento locale dell'area di iniezione perché questo potrebbe causare elevate tensioni residue sul pezzo stampato;
- la struttura deve infine prevedere la dilatazione termica del canale caldo rispetto allo stampo freddo con cui si interfaccia (temperature di oltre 200°C causano significativi spostamenti relativi tra le due parti in fase di riscaldamento e raffreddamento).

Un sistema simile (**Figura 3.3**) è costituito da una boccola di iniezione, una piastra di distribuzione (anche chiamata distributore) e gli ugelli. La boccola introduce il flusso plastico nel distributore dal gruppo di iniezione della pressa. Quindi il distributore lo convoglia verso gli ugelli e le cavità dello stampo.

In **Figura 3.4** sono illustrate le due tipologie possibili di ugelli: la più convenzionale a flusso libero e una a otturazione. In quest'ultima uno spillo, controllato da un sistema idraulico o pneumatico, apre e chiude il punto di iniezione a comando.

Distributore e ugelli possono essere riscaldati internamente, esternamente o anche totalmente isolati. Esistono molte combinazioni possibili, ma la più diffusa è quella di un riscaldamento esterno per entrambi i componenti (**Figura 3.5-A**). Questa sarà anche la tipologia che verrà spiegata nel dettaglio nei paragrafi successivi e sarà oggetto di studio in questa tesi.

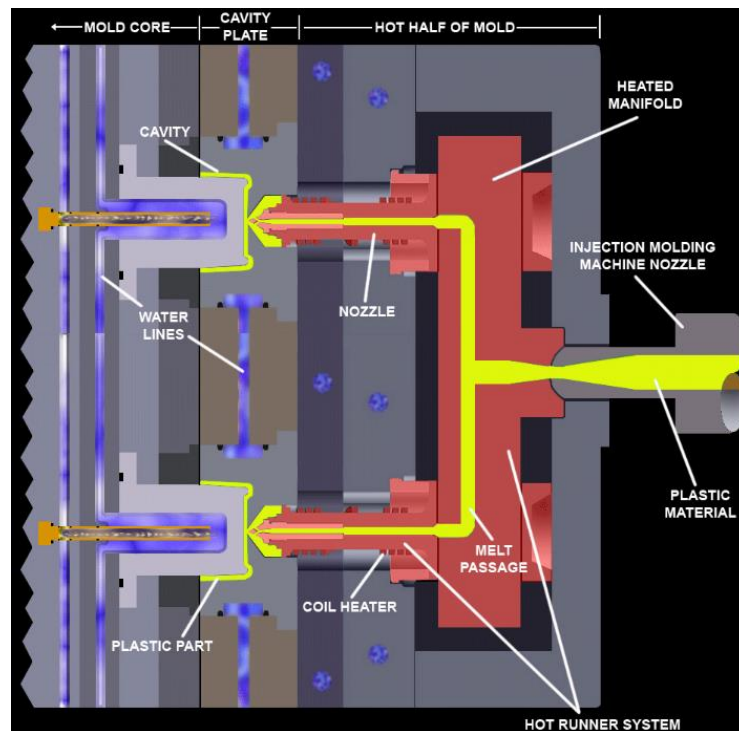


Figura 3.3 – Schema di un sistema di iniezione a camera calda con due punti di iniezione.

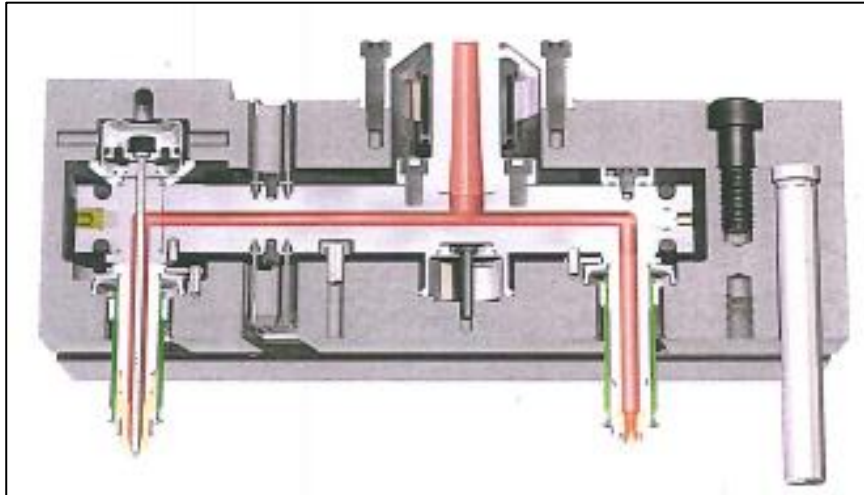


Figura 3.4 – Sistema a canale caldo riscaldato esternamente: a sinistra un ugello a otturazione, a destra un ugello a flusso libero [4].

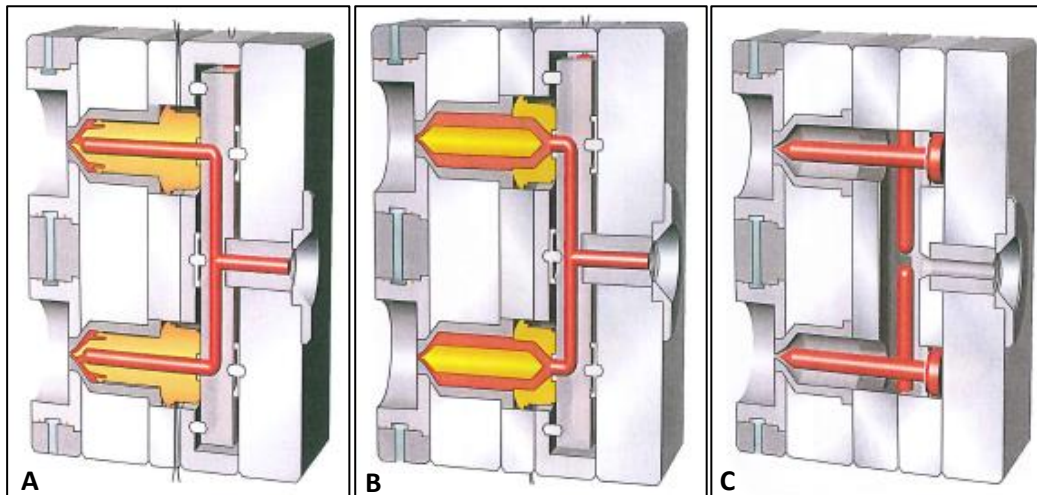


Figura 3.5 – Alcuni esempi di possibili combinazioni: A) distributore e ugelli riscaldati esternamente; B) distributore riscaldato esternamente e ugelli riscaldati internamente; C) distributore e ugelli riscaldati internamente [4].

3.2.2. Vantaggi e limiti

Le camere calde offrono molti vantaggi in confronto ai sistemi di iniezione tradizionali a canale freddo [5]:

- produttività più alta e tempi ridotti dei cicli di processo in quanto non è necessario raffreddare anche la carota e i canali, inoltre il tempo di plastificazione e di iniezione per il materiale dei canali è inesistente;
- l'eliminazione della materozza consente di risparmiare il lavoro aggiuntivo dato dalla gestione del canale, dall'asportazione e dalla rifinitura del pezzo;

- risparmio di energia perché il sistema richiede meno materiale da plastificare e si elimina l'utilizzo di granulatori;
- corsa di chiusura stampo minore rispetto agli stampi a tre piastre;
- riduzione delle pressioni di iniezione;
- ambiente di lavoro più pulito riducendo gli scarti e il trasporto delle materozze;
- elevata automazione;
- possibilità di usare sistemi a otturazione per ridurre le linee di giunzione e realizzare pezzi di ottima qualità;
- maggiore flessibilità in fase di progettazione e possibilità di ottenere flussi bilanciati controllando localmente le temperature.

Ovviamente sono presenti anche alcuni limiti:

- è necessaria la presenza di un operatore esperto e adeguatamente formato;
- maggiori difficoltà a garantire la tenuta della struttura rispetto alle camere fredde (le perdite possono avere conseguenze disastrose, bloccare la produzione per settimane e danneggiare anche alcuni componenti del sistema);
- elevati costi del sistema, incluse le connessioni elettriche e i circuiti idraulici o pneumatici in caso di ugelli a otturazione;
- alti costi di manutenzione;
- spesso non è possibile cambiare materiale plastico, specialmente se le temperature operative sono molto diverse tra loro.

3.2.3. Il problema delle perdite: le cause

Uno dei principali problemi dei sistemi di iniezione a camera calda è quello delle perdite. Quando un sistema inizia a perdere, spesso non è possibile intervenire rapidamente finché la situazione non è troppo grave. La fuoriuscita di plastica non è visibile dall'esterno dello stampo e può fluire in tutte le zone vuote tra distributore e ugelli, riempiendo l'intero sistema (**Figura 3.6**). Pertanto, garantire un'adeguata tenuta è fondamentale.

Le perdite si possono verificare principalmente in tre zone del canale caldo: tra boccia di iniezione e distributore, tra ugello e distributore (quelle più frequenti e pericolose) e infine tra il puntale dell'ugello e la cavità dello stampo.

Esse sono causate principalmente da quattro fattori [6]:

- surriscaldamento accidentale del sistema: se il canale caldo viene portato per errore a una temperatura troppo elevata (oltre 400°C), dovuto per esempio a una termocoppia difettosa, l'eccessiva espansione termica del sistema genera delle sollecitazioni maggiori

del limite di snervamento di ugello o distributore, causando delle deformazioni permanenti; non è più così garantita la tenuta del sistema dopo averlo riportato alla temperatura di lavoro;

- la camera calda lavora a temperature inferiori rispetto a quelle per cui è stata progettata: è il caso opposto a quello precedentemente illustrato, in questa situazione la dilatazione termica dei componenti non è in grado di generare una forza sufficiente per compensare la forza di iniezione del polimero che tende a separare ugello e distributore;
- assemblaggio non corretto;
- errata progettazione (per esempio non viene garantito un corretto spazio per compensare l'espansione termica dei componenti) o tolleranze dimensionali non rispettate in fase di lavorazione.

Alcuni dei metodi di tenuta tra ugello e piastra di distribuzione verranno descritti nel paragrafo successivo e analizzati nei prossimi capitoli.

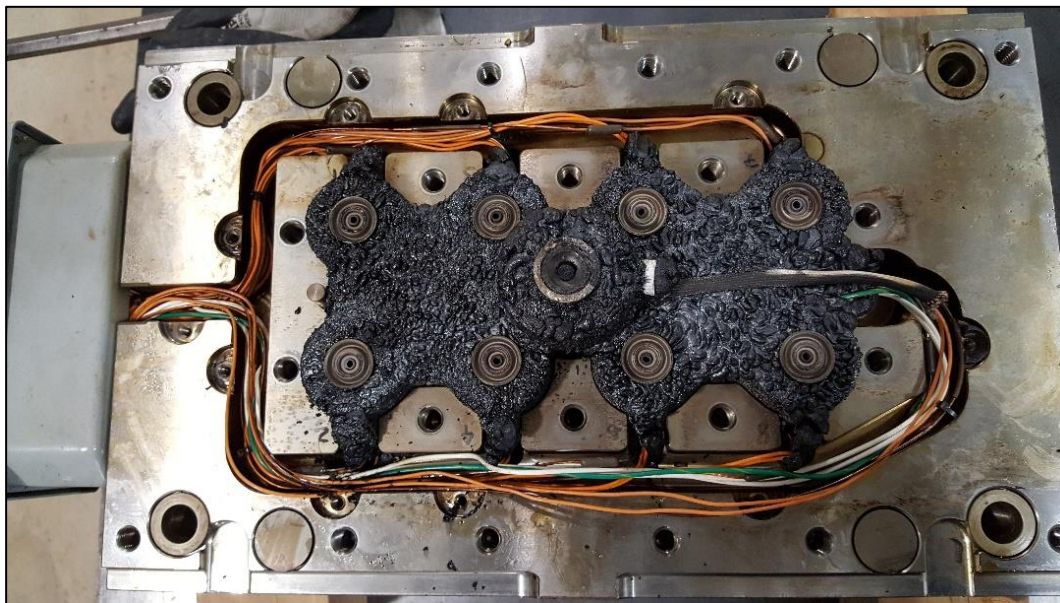


Figura 3.6 – Risultato di una perdita di plastica all'interno dello stampo e danneggiamento delle connessioni elettriche.

3.2.4. Il problema delle perdite: soluzioni e sistemi di tenuta

I principali metodi per sigillare l'area tra ugello e distributore e per prevenire le perdite sono [6]:

1. avvitamento diretto (**Figura 3.7**): l'ugello viene avvitato alla piastra di distribuzione; è la soluzione più sicura ma è limitata dall'espansione termica del distributore (se eccessiva potrebbe danneggiare il corpo dell'ugello);

2. avvitamento indiretto (**Figura 3.8**): l'ugello è collegato al distributore per mezzo di viti; questo metodo è limitato dalle dimensioni e dalle temperature operative dello stampo (negli stampi più grandi, a causa delle elevate dilatazioni termiche, le viti potrebbero allentarsi e snervarsi);
3. tenuta per compressione: questa soluzione è la più diffusa ed è basata sulla dilatazione termica del distributore. Qui l'ugello è schiacciato tra la parte fredda dello stampo e il canale caldo. Non ci sono vincoli meccanici tra le varie parti. Quando il sistema viene riscaldato, il distributore si espande verticalmente portando in battuta il contrasto posto sopra l'ugello con la piastra superiore dello stampo sigillando il sistema. Inoltre, mentre l'ugello è fisso nella sua sede nello stampo freddo, il distributore si espande anche lateralmente, scorrendo sopra la testa dell'ugello stesso. Bisogna pertanto garantire un corretto allineamento tra le parti (**Figura 3.9**). Un limite di questa soluzione è la forte dipendenza dalle temperature di progetto (e quindi dal tipo di polimero iniettato);
4. utilizzo di molle: sotto l'ugello sono posizionate delle molle che forniscono un precarico anche quando il sistema si trova a basse temperature; in questo modo sono impedito anche perdite causate da accidentali surriscaldamenti in quanto le molle assorbono parte dell'espansione termica.

Gli ugelli delle ultime due soluzioni illustrate sono definiti a rasamento.

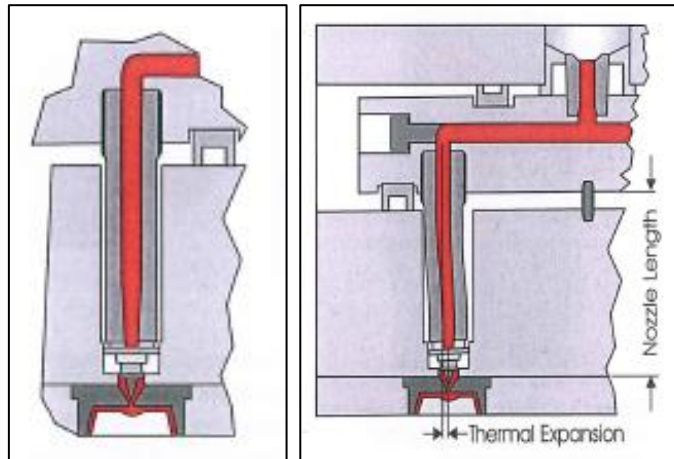


Figura 3.7 – Ugello direttamente avvitato al distributore ed esempio di un'eccessiva deformazione del corpo dell'ugello causato dalla dilatazione della camera calda in fase di riscaldamento [4].

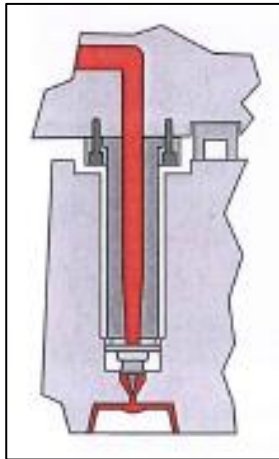


Figura 3.8 – Ugello avvitato al distributore per mezzo di viti [4].

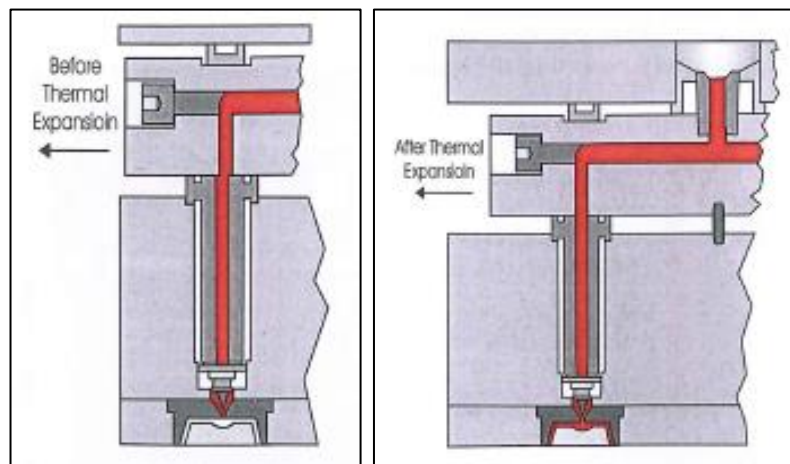


Figura 3.9 – Sistema con contrasti: disallineamento tra distributore e ugello prima del riscaldamento a sinistra e corretto allineamento dopo l'espansione termica del sistema a destra [4].

Capitolo 4

L'interfaccia tra ugello e piastra di distribuzione

In questo capitolo verranno analizzate alcune delle soluzioni costruttive presenti sul mercato per impedire perdite di plastica tra il distributore e l'ugello.

Gli obiettivi di questa prima parte della tesi sono i seguenti:

1. confrontare vantaggi e svantaggi tra le differenti tipologie costruttive;
2. stimare la distribuzione delle pressioni di contatto tra ugello e camera calda;
3. calcolare le rigidezze dei vari componenti che contribuiscono alla tenuta del sistema.

Le soluzioni prese in considerazione sono una che prevede l'impiego di rondelle di contrasto (A), una seconda che utilizza molle a tazza posizionate tra ugello e piastra di distribuzione (B) e una terza con la camera calda avvitata indirettamente al corpo dell'ugello e rondelle di contrasto di forma particolare (C).

Le analisi agli elementi finiti sono state eseguite utilizzando il software *Ansys Mechanical*.

4.1. Soluzione A: contrasti e tenuta per compressione

Nel primo sistema analizzato la tenuta viene garantita per mezzo di rondelle di contrasto che, a causa dell'espansione termica dei componenti, vanno in battuta con la piastra superiore dello stampo. Quest'ultima, essendo condizionata, subisce dilatazioni trascurabili. Si crea così una forza di compressione che "impacca" l'intero sistema ed evita perdite di materiale tra la testa dell'ugello e il distributore. Non sono presenti vincoli meccanici tra piastre e ugelli, quali per esempio viti o giunti. L'altezza del regolo, ovvero della piastra interposta tra la piastra porta iniettori e la piastra superiore di supporto e che racchiude l'intera camera calda, deve essere opportunamente calcolata. Si ipotizza di assicurare un'interferenza di almeno 0,05 mm tra rondella e piastra di supporto quando il sistema si trova alla temperatura di lavoro.

L'altezza è calcolata secondo la seguente formula:

$$H = (A + B + C) + (A + B + C) \cdot \Delta T \cdot \alpha - 0,05 \quad (4.1)$$

H altezza regolo [mm]

A spessore del distributore [mm]

B altezza testa ugello [mm]

C altezza rondella di contrasto [mm]

ΔT differenza di temperatura tra canale caldo e stampo [°C]

α coefficiente medio di dilatazione termica dell'acciaio (posto pari a $0,0000125\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

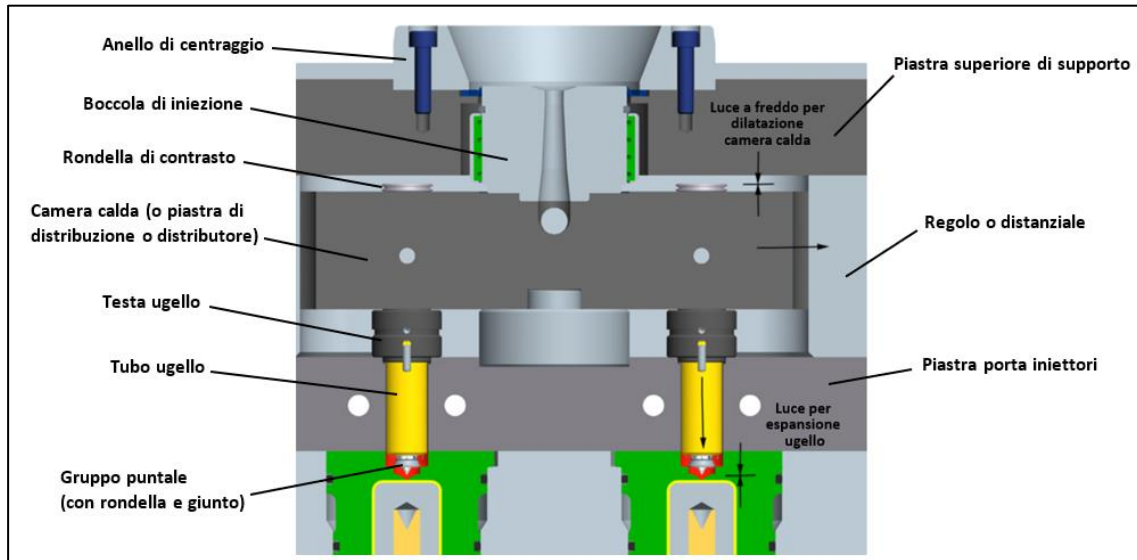


Figura 4.1 – Soluzione A: vista in sezione e indicazione dei principali componenti e delle luci per compensare l'effetto della dilatazione termica.

La dilatazione termica dovrà essere presa in considerazione anche nel calcolo degli interassi tra i punti di iniezione per garantire un perfetto allineamento tra il canale di colata della piastra e quello dell'ugello in condizioni operative.

4.1.1. Descrizione e geometria

Il modello preso come riferimento è con due punti di iniezione e sono installati ugelli a rasamento a flusso libero. È progettato per stampare polipropilene, polimero che richiede una temperatura dello stampo di 40°C e una temperatura di materiale e camera calda di 240°C . Gli ugelli presentano un diametro esterno della testa di 29 mm e lunghezza di 46 mm. Sono distanti dalla boccola di iniezione 113 mm.

Lo spessore del distributore è di 38 mm, l'altezza delle teste degli ugelli 20 mm e le rondelle di contrasto sono alte 6 mm. Secondo la formula (4.1) l'altezza del regolo risulta pertanto:

$$H = (38 + 20 + 6) + (38 + 20 + 6) \cdot 200 \cdot 0,0000125 - 0,05 = 64,11 \text{ mm}$$

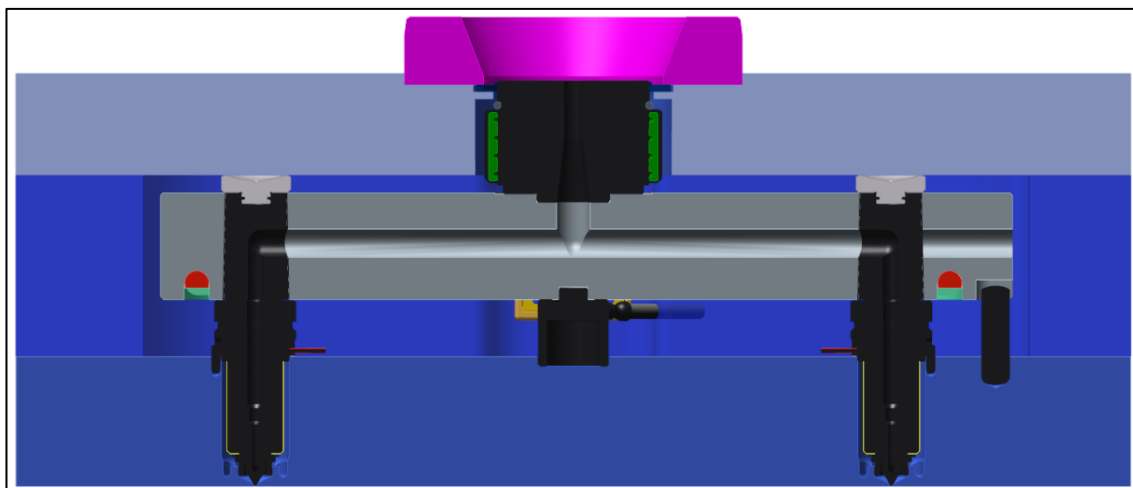


Figura 4.2 – Vista in sezione del sistema analizzato.

La rondella di contrasto, la boccola di iniezione, la testa e il puntale degli ugelli sono realizzati in W.Nr.1.2344 trattato termicamente con tempra per ottenere una durezza superficiale di 50-52 HRC. Le piastre sono in acciaio per stampi bonificato (W.Nr.1.2311) e il distributore in W.Nr.1.2378. Il giunto del puntale è in Ti-6Al-4V.

La plasticità dei materiali è stata simulata adottando una legge di incrudimento isotropo bilineare (**Figura 4.3**). Non essendo note indicazioni precise, il valore del modulo tangente (pendenza del secondo tratto della curva) è stato imposto pari al 5% del modulo elastico (pendenza del primo tratto). Il punto di intersezione tra le due linee è il limite di snervamento del materiale. È bene ricordare che non si dovrebbe mai lavorare nel secondo tratto, in quanto sinonimo di deformazioni permanenti in questa zona.

Dati e caratteristiche dei materiali utilizzati nelle simulazioni sono riportati in **Tabella 4.1**.

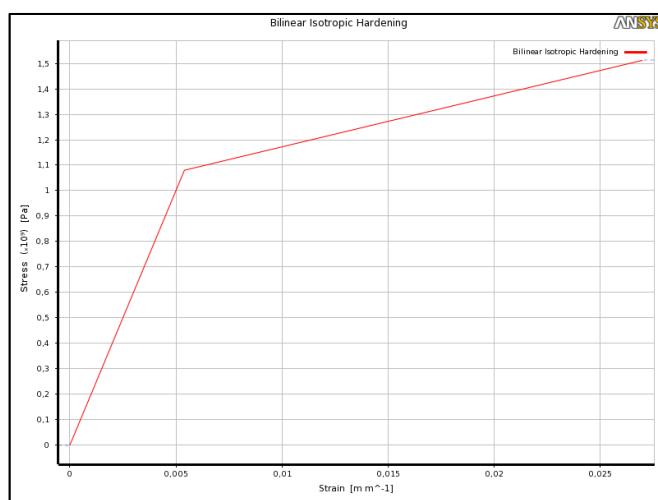


Figura 4.3 – Curva σ - ϵ di incrudimento isotropo bilineare di un acciaio generico ($E = 200$ GPa, $E_t = 10$ GPa).

Tabella 4.1 – Caratteristiche e proprietà dei materiali utilizzati (i coefficienti di dilatazione termica lineare α sono riferiti alla temperatura di 100°C, quelli di conduttività termica λ a 20°C).

Materiale	Densità [kg/m ³]	E [GPa]	R _{p02} [MPa]	R _m [MPa]	Dilatazione lineare α [°C ⁻¹]	Conduttività termica λ [W/mK]
W.Nr.1.2311	7850	200	880	1000	$1,10 \cdot 10^{-5}$	34
W.Nr.1.4542	7800	200	1000	1100	$1,08 \cdot 10^{-5}$	16
W.Nr.1.2738	7800	205	900	1020	$1,28 \cdot 10^{-5}$	29
W.Nr.1.2344	7800	210	1520	1820	$1,15 \cdot 10^{-5}$	25
W.Nr.1.4923	7700	210	1220	1620	$1,0 \cdot 10^{-5}$	24
Ti-6Al-4V	4430	113,8	880	950	$8,6 \cdot 10^{-6}$	6,7

4.1.2. Analisi e risultati

Innanzitutto, è stata eseguita un'analisi termica stazionaria con lo scopo di simulare il sistema nelle condizioni di lavoro, cioè dopo aver raggiunto le temperature di funzionamento definite in sede di progetto ($T_{\text{stampo}} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{materiale}} = 240^{\circ}\text{C}$). Questa prima analisi serve per stimare la distribuzione di temperatura, da cui si ricaveranno deformazioni e tensioni da utilizzare nella successiva analisi strutturale.

Essendo simmetrico sia in direzione longitudinale che trasversale, è stato sufficiente simulare solo un quarto del sistema. Dato il tipo di analisi, non è necessaria una mesh molto fitta.

I vincoli e i carichi utilizzati sono i seguenti:

- per simulare il condizionamento dello stampo è stata imposta una temperatura di 40°C sulla faccia superiore della piastra di supporto e sulla faccia inferiore della piastra porta iniettori;
- in fase di stampaggio l'aria racchiusa all'interno del sistema si scalda e raggiunge temperature anche elevate, pertanto si è applicato su tutte le superfici interne e non a contatto con altri corpi un carico di convezione con l'aria (come temperatura dell'aria è stato utilizzato un valore fisso pari a 140°C, media tra le temperature di materiale e stampo);
- una potenza termica (*Heat Flow*) in corrispondenza della sede della resistenza della camera calda;
- una seconda potenza termica lungo la parete esterna del corpo dell'ugello per simulare la resistenza che avvolge l'iniettore.

Per quantificare le potenze da utilizzare si è proceduto per tentativi, controllando la temperatura raggiunta al termine della simulazione in corrispondenza delle termocoppie di ugello, boccola di iniezione e camera calda fino a ottenere i valori corretti.

Tutti i carichi sono stati applicati in un unico step.

Le condizioni al contorno sono riepilogate in **Figura 4.4** e i risultati in **Figura 4.5**. La temperatura massima raggiunta nella rondella di contrasto è di 186°C, nel tassello di 224°C e sulla testa dell'ugello di 214°C.

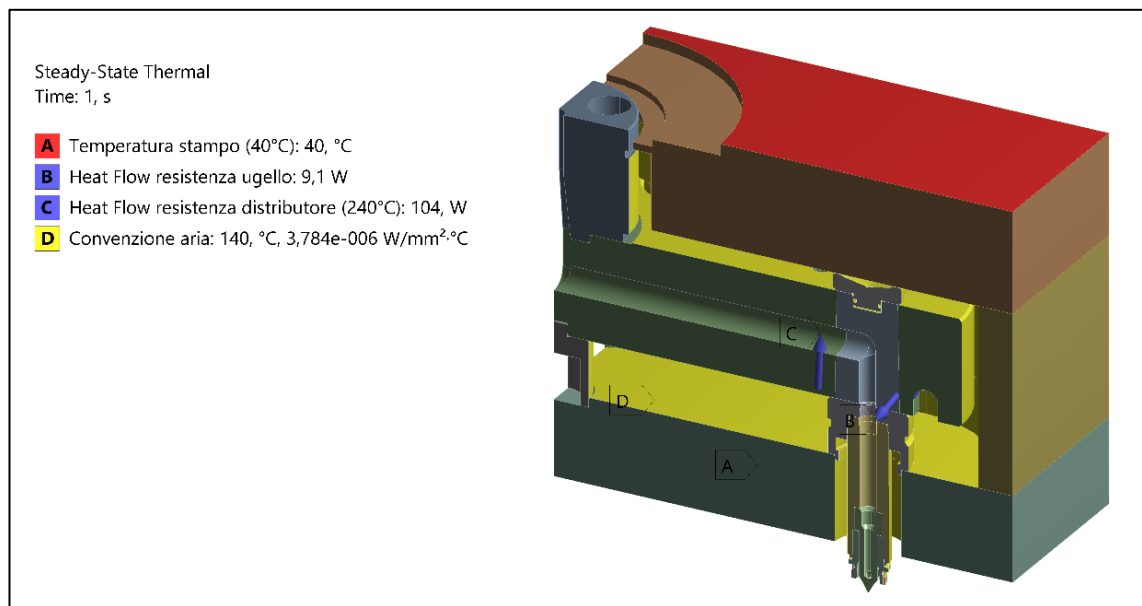


Figura 4.4 – Soluzione A: condizioni al contorno per l'analisi termica.

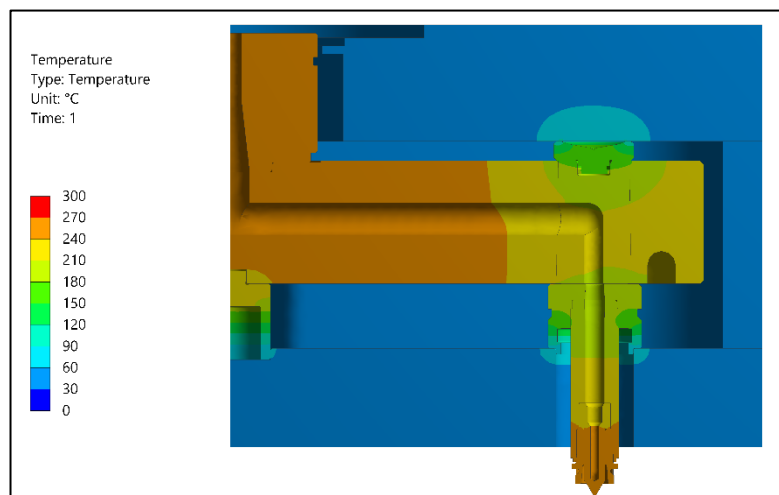


Figura 4.5 – Soluzione A: risultati dell'analisi termica e distribuzione delle temperature.

Successivamente si è effettuata un'analisi strutturale di tipo statico. In questo caso la mesh è stata infittita, soprattutto in prossimità dei contatti di rondella e ugello.

I vincoli utilizzati sono i seguenti:

- *Fixed support* sulla faccia superiore della piastra di supporto e su quella inferiore della piastra porta iniettori per simulare la chiusura dello stampo all'interno della pressa;
- *Frictionless support* lungo le pareti laterali per simulare la doppia simmetria;
- alla rondella del puntale è permesso di spostarsi unicamente in direzione verticale (la sede dell'ugello nello stampo è "fredda" e rimane pertanto fissa), la rotazione e lo spostamento nelle altre direzioni è impedito.

I carichi sono stati suddivisi in due step:

1. applicazione del carico termico importando il profilo delle temperature ricavato dalla precedente analisi termica;
2. applicazione di una pressione di 200 MPa all'interno dei canali di colata di distributore e ugello.

I contatti sulla testa dell'ugello e quello tra la rondella di contrasto e la piastra superiore sono di tipo *Frictional* (coefficiente di attrito di 0,2 e comportamento *Asymmetric* per una più rapida convergenza della soluzione). Tutti gli altri sono lineari di tipo *Bonded*. L'asse Y è quello verticale. La boccia di iniezione e le viti di fissaggio laterali non sono state simulate.

In **Figura 4.6** sono riepilogati i carichi e i vincoli utilizzati.

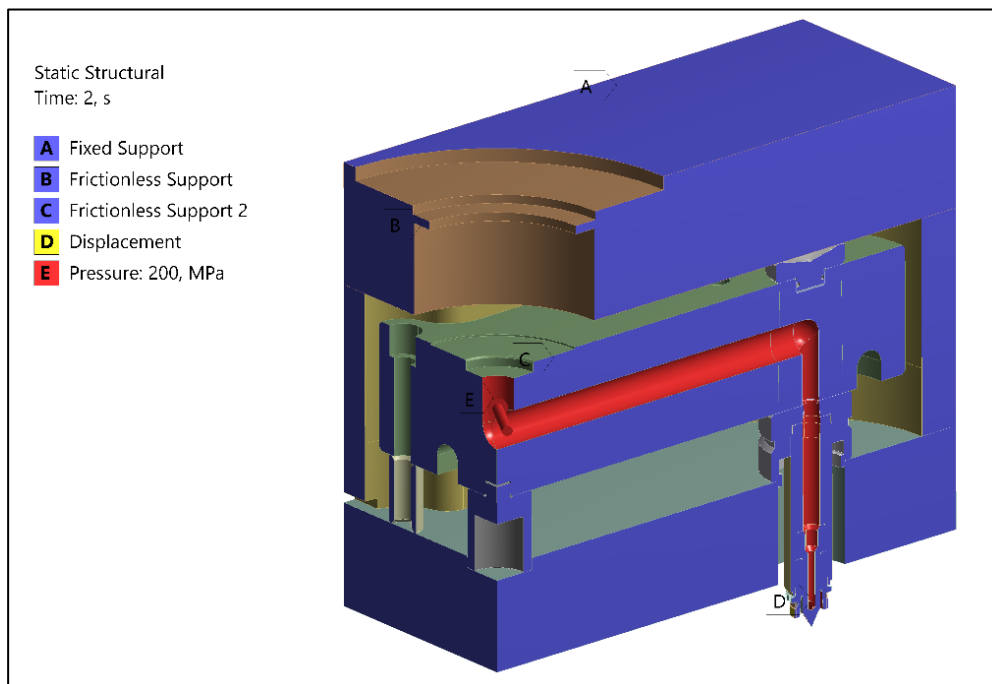


Figura 4.6 – Soluzione A: condizioni al contorno per l'analisi strutturale.

Le tensioni massime calcolate secondo il criterio di Von Mises raggiunte sulla rondella e sulla testa dell'ugello sono rispettivamente di 660 e 860 MPa (**Figura 4.7**), inferiori rispetto al limite di snervamento del materiale ($R_{p02} = 1520$ MPa).

Le pressioni di contatto tra rondella e piastra superiore e tra testa dell'ugello e distributore sono mostrate in **Tabella 4.2**. La pressione di contatto media è calcolata rapportando la componente verticale della forza all'area di contatto. Tutti i valori riportati in tabelle e grafici in questo lavoro sono stati normalizzati rispetto a una forza, uno spostamento e a una pressione di riferimento.

Nell'interfaccia tra piastra di distribuzione e ugello la pressione minima nella corona interna è pari a 60 MPa, quella minima nella zona esterna aumenta a 210 MPa (**Figura 4.8**). Sono stati presi in considerazione solo i valori minimi delle pressioni lungo la direzione radiale in quanto l'obiettivo principale dell'analisi è valutare la condizione in cui si ha una perdita e quindi quantificare la pressione minima in quella situazione.

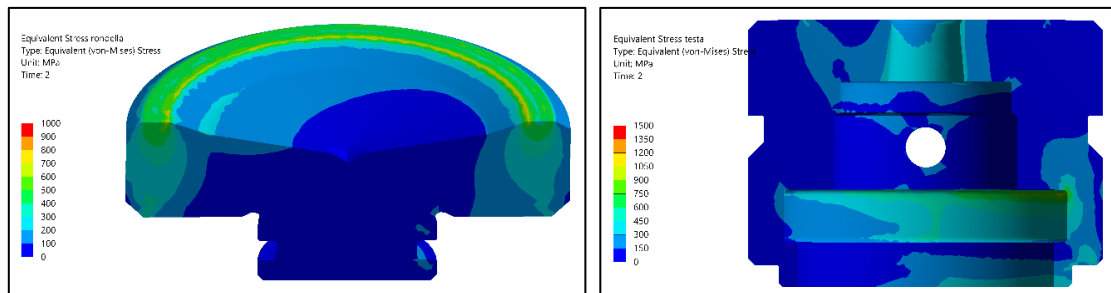


Figura 4.7 – Soluzione A: tensioni equivalenti (secondo il criterio di Von Mises) sulla rondella di contrasto a sinistra e sulla testa dell'ugello a destra.

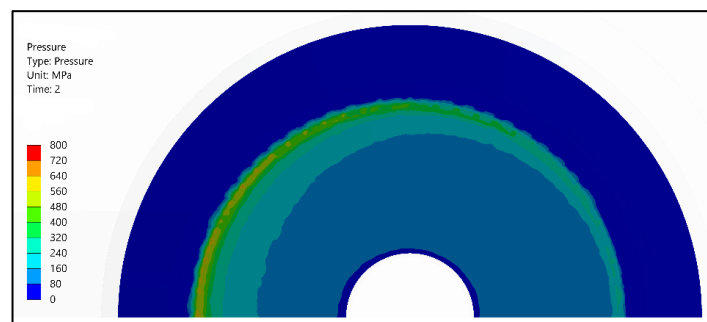


Figura 4.8 – Soluzione A: distribuzione delle pressioni di contatto all'interfaccia tra ugello e camera calda.

Tabella 4.2 – Soluzione A: forze e pressioni di contatto sulla rondella di contrasto e sulla testa dell'ugello (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Zona di contatto	A _{contatto} [mm ²]	F [N/N]	p _c media [MPa/MPa]
Rondella di contrasto – piastra superiore	91,9	2,31	12,56
Testa ugello – camera calda	285,9	2,00	3,50

Come ultimo passo, sono state calcolate le rigidità dei vari componenti che contribuiscono all'”impaccamento” del sistema. La rigidità è stata valutata come il rapporto tra la componente verticale della forza di contatto e lo spostamento medio del pezzo:

$$k = \frac{F_y}{\Delta y} \quad [N/mm] \quad (4.2)$$

Lo spostamento verticale Δy è stato misurato a partire dal momento in cui la rondella di contrasto va in battuta con la piastra superiore dello stampo.

I risultati sono presentati in **Tabella 4.3**.

Tabella 4.3 – Soluzione A: calcolo delle rigidità dei componenti (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Componente	Δy [mm/mm]	F [N/N]	Rigidità [N/mm]
Rondella di contrasto	0,56	2,21	$1,04 \cdot 10^7$
Camera calda	1,17	2,30	$4,94 \cdot 10^6$
Testa dell'ugello	0,78	2,00	$6,41 \cdot 10^6$

I componenti possono essere considerati come delle molle disposte in serie:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots \quad (4.3)$$

La rigidità equivalente è pertanto pari a $2,20 \cdot 10^6$ N/mm.

4.2. Soluzione B: sistema con molle

La seconda tipologia costruttiva analizzata prevede l'impiego di molle a tazza combinata con una rondella di contrasto per garantire la tenuta del sistema. In questo modo viene assicurato un precarico non solo a caldo come nel caso precedente, ma anche a freddo e in fase di montaggio. Le molle, disposte in parallelo nel caso ne fossero presenti più di una, sono posizionate tra il sottotesta dell'ugello e l'isolatore corrispondente. Questo isolatore, oltre ad avere una funzione di supporto, crea anche un isolamento termico con le piastre dello stampo.

Le perdite sono impedito anche quando il sistema non si trova alla temperatura di lavoro corretta (è ammesso un range di $\pm 100^\circ\text{C}$). Protegge inoltre ugelli e piastre da surriscaldamenti accidentali della camera calda.

4.2.1. Descrizione e geometria

Il sistema analizzato è illustrato in **Figura 4.10**. L'ugello è del tipo a otturazione con una lunghezza di 156 mm e un diametro del canale interno di 8 mm. Il diametro esterno dell'isolatore è pari a 25 mm. La rotazione è impedita per mezzo di una spina.

Sono inserite tre molle a tazza realizzate in X22CrMoV12-1 (W.Nr.1.4293), acciaio per molle ad alta resistenza e per impieghi ad alta temperatura. In fase di assemblaggio è richiesto un precarico sul gruppo di molle di 0,5 mm.

La zona di contatto tra ugello e camera calda è piccolissima (la faccia superiore presenta un'inclinazione costante di 0,5 gradi). Rondella di contrasto (o pattino di sostegno), ugello e corrispondente isolatore sono in W.Nr.1.2344.

Il sistema è progettato per stampare polipropilene ($T_{\text{stampo}} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{materiale}} = 240^{\circ}\text{C}$). Il gradiente termico di lavoro è pertanto di $200^{\circ}\text{C} \pm 100^{\circ}\text{C}$. Come già scritto precedentemente, un così elevato intervallo di funzionamento è permesso dall'utilizzo di molle già precaricate a temperatura ambiente. In questo modo il sistema non necessita di arrivare alla temperatura di regime per garantire un adeguato "impaccamento".

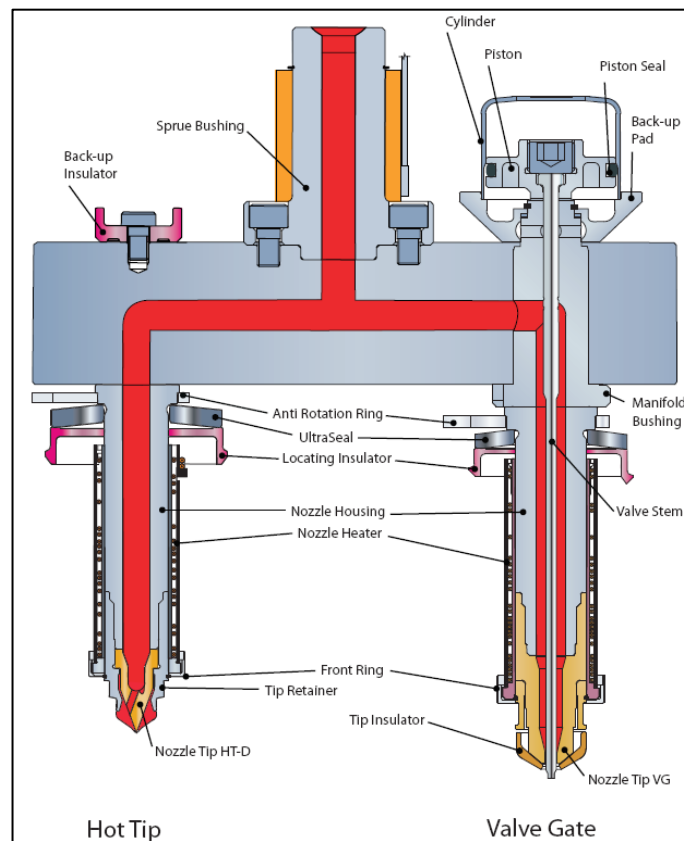


Figura 4.9 – Soluzione B: tipologia costruttiva per ugelli a flusso libero a sinistra e a otturazione a destra [7].

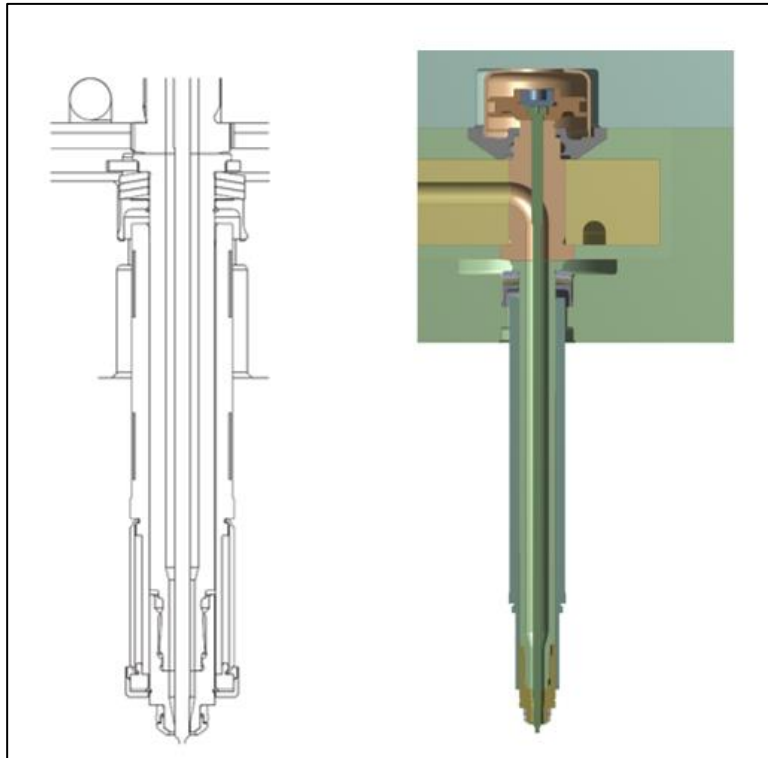


Figura 4.10 – Soluzione B: vista in sezione dell'ugello a otturazione e disegno CAD.

4.2.2. Calcolo di rigidità delle molle a tazza

Il valore di rigidità delle molle a tazza è stato ricavato secondo la normativa *DIN 2092*, basata sulla teoria di Almen-Laszlo presente in letteratura tecnica [8].

I dati necessari per il calcolo sono i seguenti:

- diametro esterno D ;
- diametro interno d ;
- spessore t ;
- spessore ridotto t' ;
- altezza a riposo h ;
- altezza totale H ;
- deflessione richiesta s .

Secondo normativa queste molle possono essere suddivise in tre gruppi:

- gruppo 1 – molle con spessore inferiore di 1,25 mm;
- gruppo 2 – molle con spessore compreso tra 1,25 e 6 mm;
- gruppo 3 – molle con spessore compreso 6 e 16 mm.

Inoltre, possono presentare superfici di appoggio per aumentare la zona di contatto e generare una maggiore spinta (**Figura 4.12**). In questo caso, ma solo per spessori elevati (molle appartenenti al

terzo gruppo), si farà riferimento allo spessore ridotto t' e le formule di calcolo dovranno essere modificate per compensare la spinta più elevata.

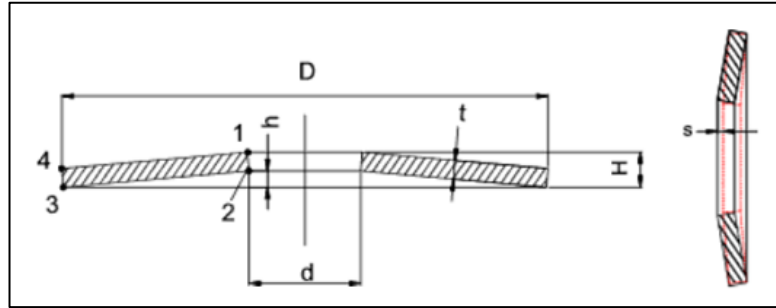


Figura 4.11 – Molla a tazza vista in sezione: quote, numerazione degli spigoli (da 1 a 4) e indicazione della deflessione s .

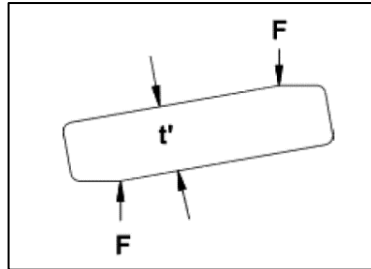


Figura 4.12 – Molla a tazza: caso con superfici di appoggio e spessore ridotto t' (gruppo 3).

Le molle utilizzate in questo sistema presentano superfici di appoggio e uno spessore di 1,5 mm, quindi appartengono al secondo gruppo e si utilizzeranno le formule illustrate qui di seguito. In **Tabella 4.4** sono riportati i risultati dei calcoli.

Rapporto diametrale:

$$\delta = \frac{D}{d} \quad (4.4)$$

Parametri adimensionali:

$$K_1 = \frac{\left(\frac{\delta-1}{\delta}\right)^2}{\pi\left(\frac{\delta+1}{\delta-1} - \frac{2}{\ln \delta}\right)} \quad K_2 = \frac{6\left(\frac{\delta-1}{\ln \delta} - 1\right)}{\pi \ln \delta} \quad K_3 = \frac{3(\delta-1)}{\pi \ln \delta} \quad K_4 = 1 \quad (4.5)$$

Forza assiale e rigidezza:

$$F = \frac{-4EsK_4^2 \left[K_4^2 \left(h - \frac{s}{2} \right) (h-s)t + t^3 \right]}{(1-\mu^2)K_1D^2} \quad (4.6)$$

$$k = \frac{|F|}{s} \quad (4.7)$$

Tensioni calcolate nei punti 1, 2, 3 e 4:

$$\sigma_1 = \frac{-4EK_4s \left[K_4K_2 \left(h - \frac{s}{2} \right) + K_3t \right]}{(1 - \mu^2)K_1D^2} \quad (4.8)$$

$$\sigma_2 = \frac{-4EK_4s \left[K_4K_2 \left(h - \frac{s}{2} \right) - K_3t \right]}{(1 - \mu^2)K_1D^2} \quad (4.9)$$

$$\sigma_3 = \frac{-4EK_4s \left[K_4(K_2 - 2K_3) \left(h - \frac{s}{2} \right) - K_3t \right]}{(1 - \mu^2)K_1D^2\delta} \quad (4.10)$$

$$\sigma_4 = \frac{-4EK_4s \left[K_4(K_2 - 2K_3) \left(h - \frac{s}{2} \right) + K_3t \right]}{(1 - \mu^2)K_1D^2\delta} \quad (4.11)$$

Tabella 4.4 – Dati, forza, rigidezza e tensioni della molla a tazza del sistema analizzato nella soluzione B.

Diametro esterno [mm]	D	24
Diametro interno [mm]	d	13
Spessore [mm]	t	1,5
Altezza totale [mm]	H	2,21
Altezza [mm]	h	0,84
Deflessione [mm]	s	0,5
Modulo elastico [MPa]	E	$210 \cdot 10^3$
Coefficiente di Poisson	μ	0,3

Forza assiale [N]	F	-4306
Rigidezza [N/mm]	K	8612

Tensioni [MPa]	σ_1	-3224
	σ_2	1523
	σ_3	1850
	σ_4	-721

Parametri adimensionali	δ	1,846
	K_1	0,658
	K_2	1,184
	K_3	1,318
	K_4	1,000

La rigidezza di ogni molla è pari a 8612 N/mm. Nel sistema sono disposte tre molle in parallelo con una rigidezza equivalente di 25836 N/mm.

4.2.3. Analisi e risultati

Le analisi termica e strutturale sono state impostate come nel caso precedente. Per semplicità spillo, molle, cilindro dell'otturatore e pistone non sono stati simulati.

Il gruppo di molle è stato sostituito con una *Spring Longitudinal connection with preload* centrata nel canale di colata (*Stiffness* = 26000 N/mm, *Spring length* = 5,19 mm, *Free length* = 4,69 mm). È stato simulato metà sistema ed è stato inserito un contatto di *No separation* tra ugello e isolatore per permetterne lo scorrimento verticale.

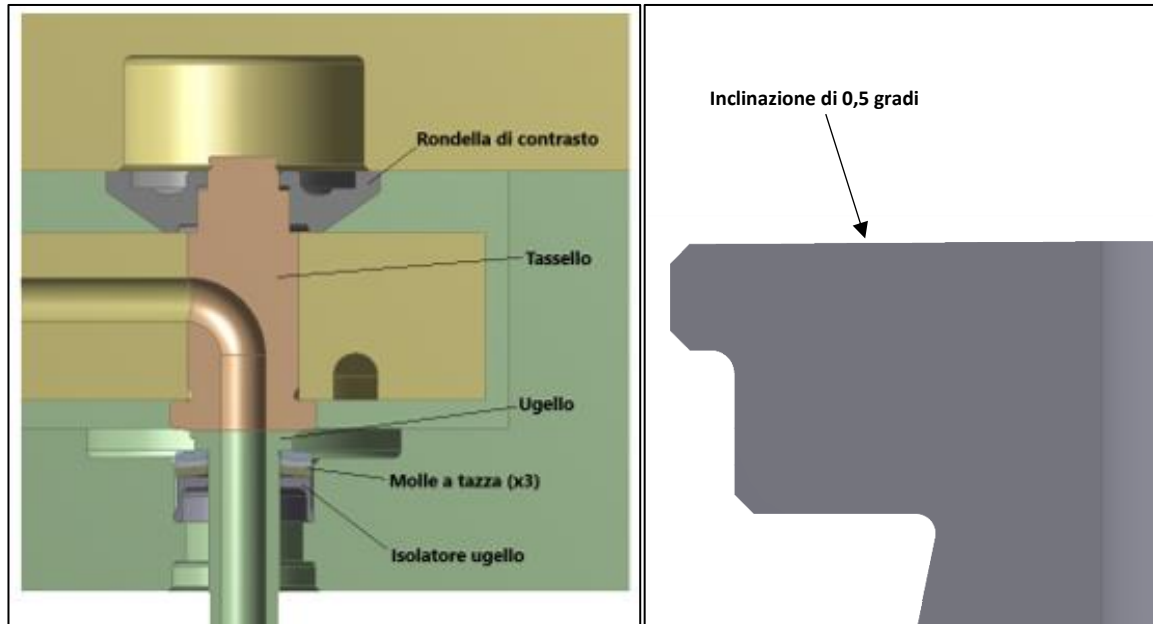


Figura 4.13 – Soluzione B: geometria semplificata e indicazione dell'inclinazione di 0,5° della faccia superiore dell'ugello per migliorare la tenuta del sistema.

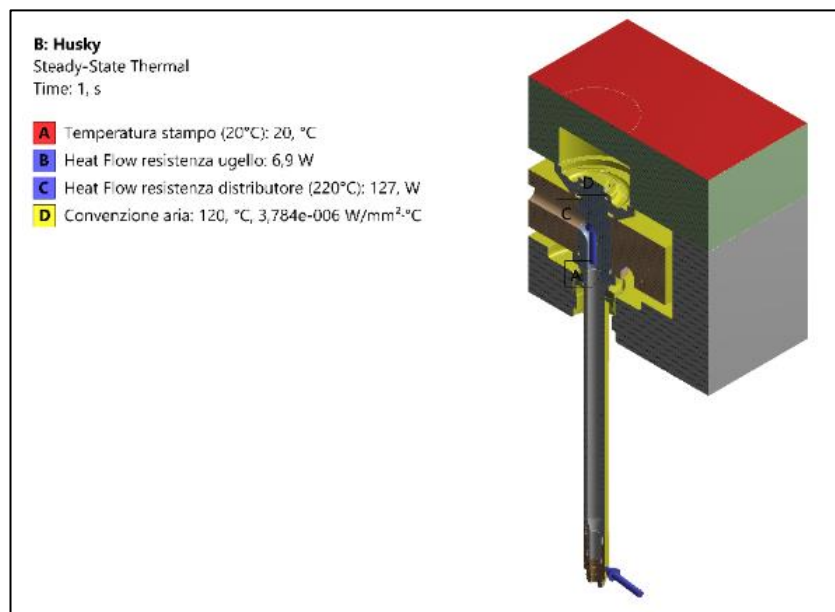


Figura 4.14 – Soluzione B: condizioni al contorno per l'analisi termica.

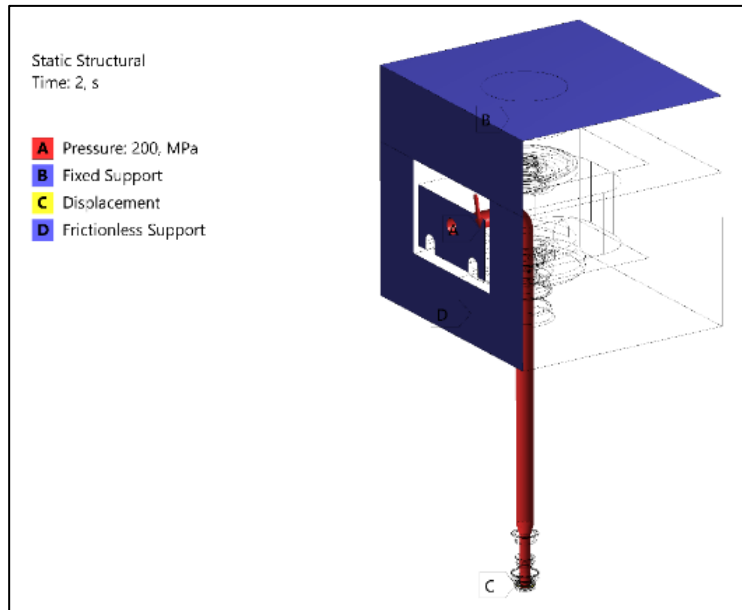


Figura 4.15 - Soluzione B: condizioni al contorno per l'analisi strutturale.

Le temperature massime (**Figura 4.16**) raggiunte nei vari componenti sono:

- 92°C nella rondella di contrasto;
- 160°C nel tassello;
- 164°C sull'ugello;
- 70°C nell'isolatore.

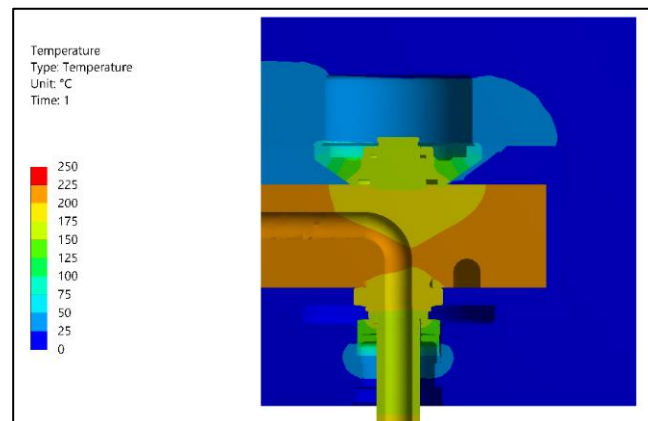


Figura 4.16 – Soluzione B: risultati dell'analisi termica e distribuzione delle temperature.

La pressione minima di contatto raggiunta nella corona interna tra ugello e camera calda è di 250 MPa, quella minima esternamente è di 35 MPa (**Figura 4.17**). Questo valore, molto alto in prossimità del canale di colata, è conseguenza della lieve ma costante inclinazione della faccia dell'ugello (non ci sono superfici piane di appoggio).

Le tensioni massime raggiunte nei vari componenti sono:

- 260 MPa nella rondella di contrasto;
- 1280 MPa nell'isolatore;
- 740 MPa nel corpo dell'ugello.

In tutti i casi sono inferiori al limite di snervamento del relativo materiale.

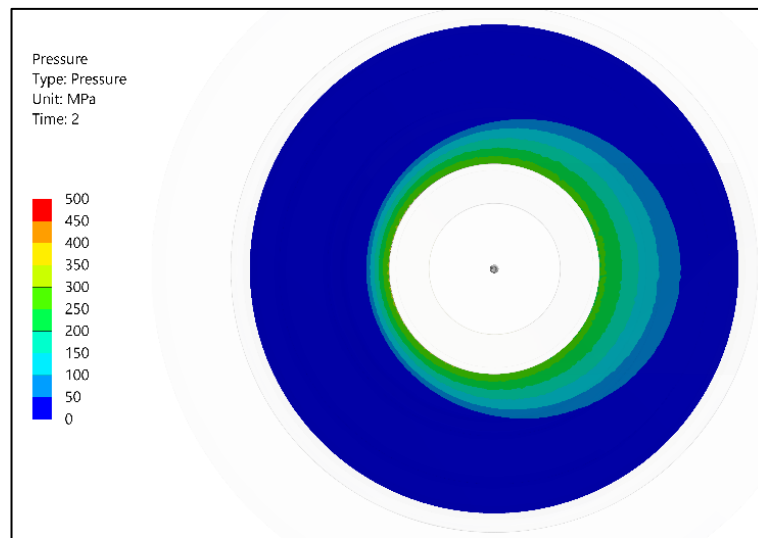


Figura 4.17 – Soluzione B: distribuzione delle pressioni di contatto all'interfaccia tra ugello e camera calda.

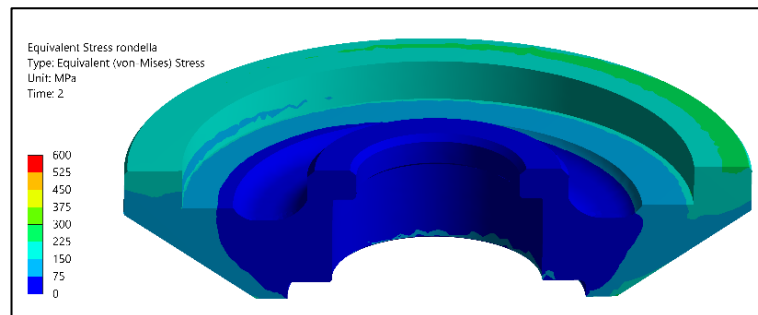


Figura 4.18 – Soluzione B: tensioni equivalenti sulla rondella di contrasto.

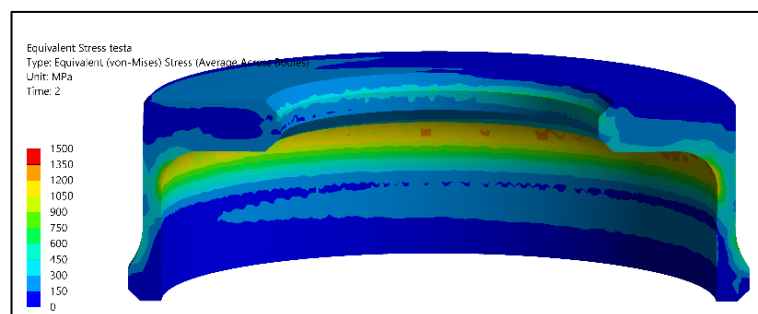


Figura 4.19 – Soluzione B: tensioni equivalenti sull'isolatore posto sotto l'ugello.

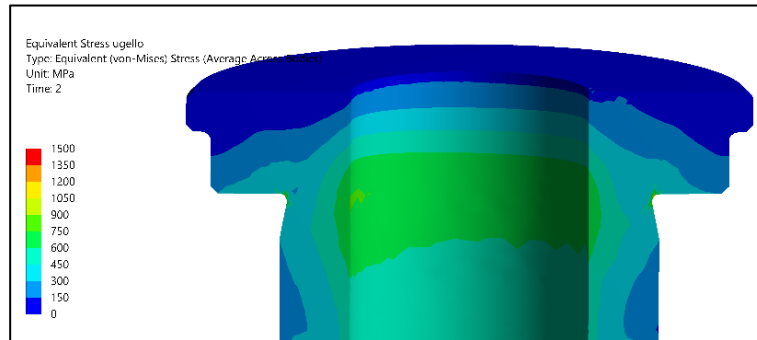


Figura 4.20 – Soluzione B: tensioni equivalenti sulla sommità dell’ugello.

Tabella 4.5 – Soluzione B: forze e pressioni di contatto sulla rondella di contrasto e sulla parte superiore dell’ugello (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Zona di contatto	A _{contatto} [mm ²]	F [N/N]	p _c media [MPa/MPa]
Rondella – piastra superiore	588,2	0,77	0,66
Ugello – camera calda	220,1	0,36	0,82

Quindi sono state calcolate le rigidezze come nel caso precedente (**Tabella 4.6**).

Tabella 4.6 – Soluzione B: calcolo delle rigidezze dei componenti (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Componente	Δy [mm/mm]	F [N/N]	Rigidezza (N/mm)
Rondella di contrasto	0,27	0,77	$7,08 \cdot 10^6$
Camera calda	2,45	0,65	$6,63 \cdot 10^5$
Ugello	5,08	0,36	$1,79 \cdot 10^5$
Gruppo di molle a tazza	5,11	0,57	$2,78 \cdot 10^5$
Isolatore	0,15	0,57	$9,76 \cdot 10^6$

Lo spostamento dell’ugello è stato misurato considerando solo la parte superiore del componente, compresa tra il tassello della camera calda e l’isolatore.

La rigidezza totale del sistema è risultata di $9,14 \cdot 10^4$ N/mm.

Forze così basse in confronto alla soluzione A permettono la realizzazione di ugelli con spessori dei tubi molto ridotti (2,25 mm).

4.3. Soluzione C: ugello avvitato al distributore

Nel terzo e ultimo caso analizzato la rondella di contrasto presenta una particolare forma a “doppia S” per avere una elevata capacità di deformazione. Inoltre, ogni ugello è avvitato alla camera calda per mezzo di due viti M5 per aumentare la tenuta della struttura.

4.3.1. Descrizione e geometria

Il sistema è illustrato in **Figura 4.21** [9]. È presente un ugello a rasamento ed è progettato per stampare polipropilene ($T_{\text{stampo}} = 35^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{canale caldo}} = 255^{\circ}\text{C}$).

Le due viti M5 sono serrate con una coppia di 7 Nm, a cui corrisponde un precarico iniziale di 8300 N. Non sono presenti rondelle per migliorare il serraggio delle viti.

La superficie di contatto tra distributore e ugello è interamente piatta. Testa e tubo dell’ugello costituiscono un corpo unico. La lunghezza totale è di 122 mm e il nucleo presenta un diametro di 22 mm, la testa è alta 32 mm con un diametro esterno di 30 mm, il diametro del canale di colata è di 6 mm. Da notare è il profondo intaglio presente sotto la testa per migliorare l’isolamento tra stampo e camera calda e garantire una maggiore flessione e deformabilità in caso di surriscaldamenti accidentali.

Tra la rondella di contrasto e la piastra di supporto dello stampo è presente un gap d’aria di 0,06 mm a temperatura ambiente (corrispondente a una interfrenza “a caldo” di 0,07 mm). Le rondelle sono realizzate in acciaio inox W.Nr.1.4542 e l’ugello è in W.Nr.1.2344. Le viti appartengono alla classe di resistenza 12.9 ($R_m = 1200 \text{ MPa}$, $R_{p02} = 1080 \text{ MPa}$).

4.3.2. Analisi e risultati

La simulazione termica è identica a quelle delle sezioni precedenti. Invece, nell’analisi strutturale per la presenza delle viti è stato aggiunto un ulteriore step. I tre step risultano quindi:

1. serraggio della vite con un precarico di 8300 N;
2. applicazione del carico termico;
3. applicazione della pressione della massa plastica di 200 MPa.

È stato attivato il comando *Large deflection*.

Poiché simulare la filettatura di una sistema vite-madrevite risulta computazionalmente troppo oneroso, è stata disegnata una vite semplificata. La filettatura non è stata tracciata ed è stata sostituita da un cilindro avente il diametro di nocciolo della vite [10].

Con il comando *Bolt Pretension* presente nel software *Ansys*, nel primo step è stato applicato il precarico sulla vite, cioè la forza assiale data durante l’operazione di chiusura (*Load*). Negli step

successivi questo carico è stato bloccato (*Lock*) per simulare il serraggio del sistema. I contatti tra la vite e i pezzi contigui sono di tipo *Bonded*.

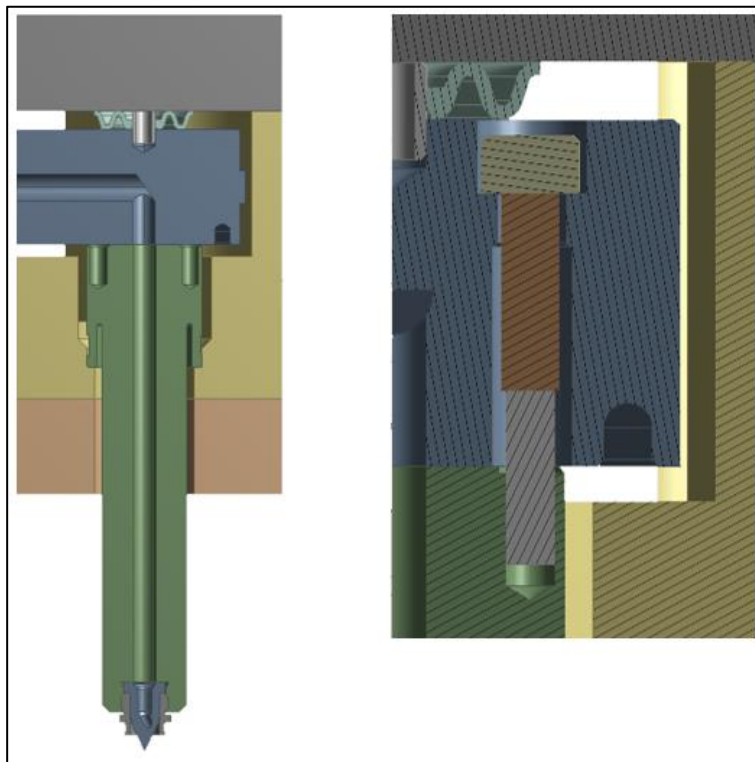


Figura 4.21 – Soluzione C: vista in sezione dell'assieme e vista in dettaglio della vite semplificata senza la filettatura.

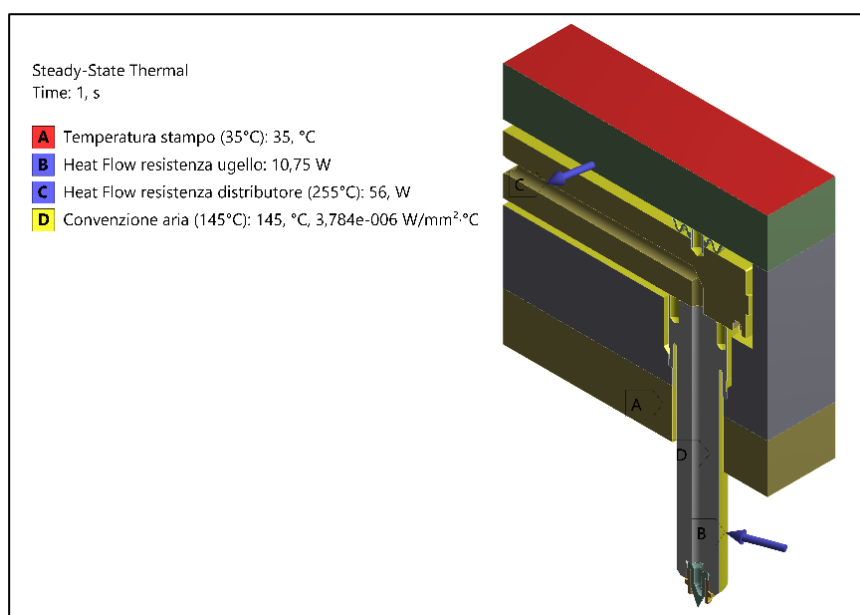


Figura 4.22 – Soluzione C: condizioni al contorno per l'analisi termica.

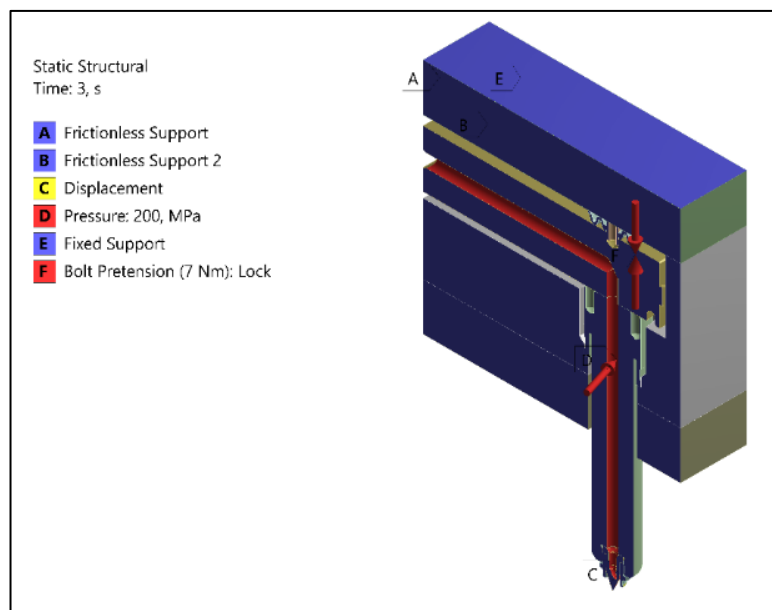


Figura 4.23 – Soluzione C: condizioni al contorno per l’analisi strutturale.

Le temperature massime raggiunte su rondella di contrasto, camera calda e ugello sono rispettivamente di 88, 163 e 119°C (**Figura 4.24**).

La pressione minima di contatto tra ugello e piastra di distribuzione è di 75 MPa nella corona interna e si riduce a 50 MPa esternamente (**Figura 4.25** e **Tabella 4.7**). Le pressioni sono basse ma costanti su tutta la zona di contatto per effetto delle due viti presenti e la superficie interamente piatta. Si osservano valori molto elevati in alcuni punti per la presenza di spigoli vivi.

La tensione massima (calcolata secondo Von Mises) raggiunta sulla rondella di contrasto è di 980 MPa, a fronte di un limite di snervamento del materiale di 1000 MPa (**Figura 4.26**). Le tensioni sull’ugello sono complessivamente molto basse e inferiori ai 350 MPa (**Figura 4.27**).

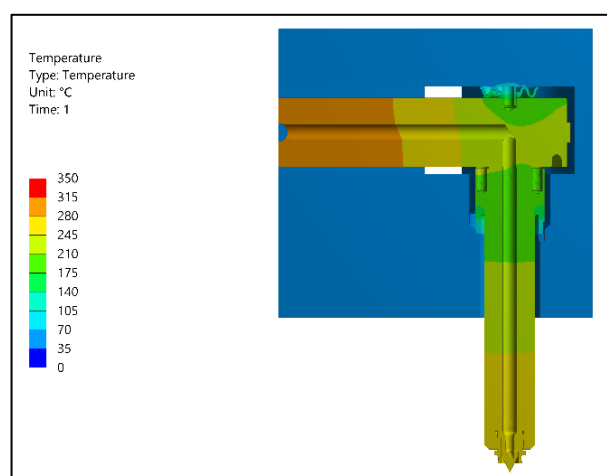


Figura 4.24 – Soluzione C: risultati dell’analisi termica e distribuzione delle temperature.

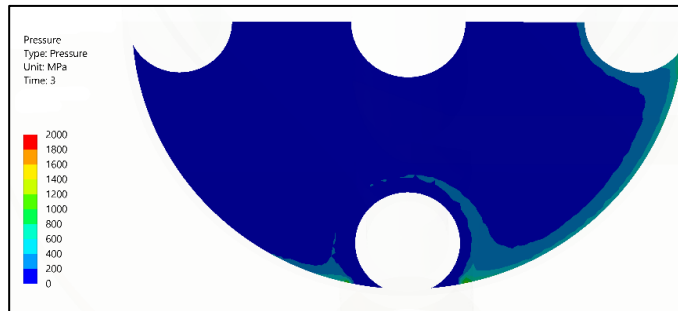


Figura 4.25 – Soluzione C: distribuzione delle pressioni di contatto all’interfaccia tra ugello e camera calda.

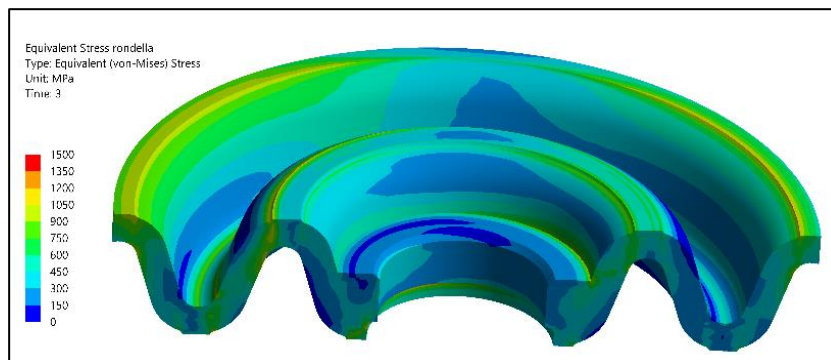


Figura 4.26 – Soluzione C: tensioni equivalenti sulla rondella di contrasto.

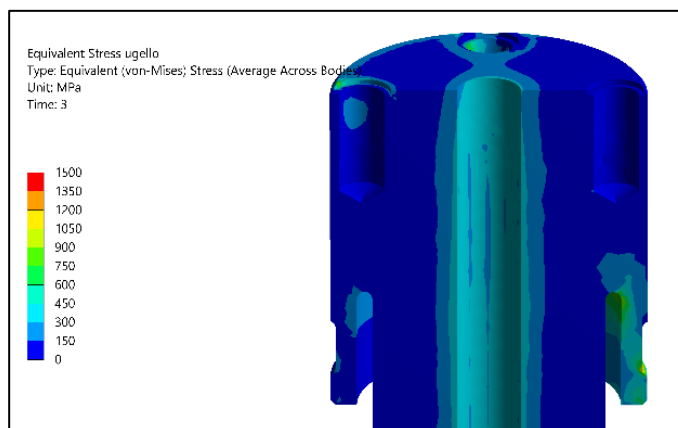


Figura 4.27 – Soluzione C: tensioni equivalenti sulla parte superiore dell’ugello.

Tabella 4.7 – Soluzione C: forze e pressioni di contatto sulla rondella di contrasto e sull’ugello (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Zona di contatto	A _{contatto} [mm ²]	F [N/N]	p _c media [MPa/MPa]
Rondella di contrasto – piastra superiore	102,5	1,82	8,90
Ugello – camera calda	538,9	2,60	2,42

Durante il secondo step le viti subiscono un massimo aumento di carico di appena 200 N per poi scaricarsi e ritornare quasi al valore del precarico iniziale (**Figura 4.28**). Questo si verifica non appena la rondella di contrasto va in battuta con la piastra di supporto superiore dello stampo, situazione che accade quasi subito dato il piccolissimo gap presente. La forza assiale finale agente sulla vite è di 8377 N a fronte di un precarico iniziale di 8300 N. Le viti non giungono a snervamento o rottura.

Il contributo del carico esterno dato dall'effetto della dilatazione termica è bassissimo. Questo perché le temperature della vite e dei componenti adiacenti sono praticamente identiche (nessuno dei due elementi è condizionato) e i pezzi si espandono in egual misura.

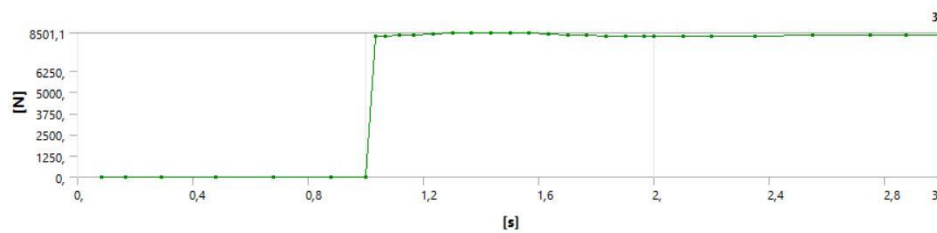


Figura 4.28 – Soluzione C: andamento della forza assiale agente sulla vite lungo i tre step.

In **Tabella 4.8** sono riportati i calcoli delle rigidezze dei vari componenti del sistema. Lo spostamento dell'ugello è stato valutato considerando solo la parte superiore del pezzo, compreso tra la camera calda e la piastra porta iniettori.

Tabella 4.8 – Soluzione C: calcolo delle rigidezze dei componenti (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Componente	Δy [mm/mm]	F [N/N]	Rigidezza [N/mm]
Rondella di contrasto	1,09	1,82	$4,18 \cdot 10^6$
Camera calda	2,37	1,93	$2,04 \cdot 10^6$
Ugello	0,38	2,60	$1,73 \cdot 10^7$

La rigidezza totale del sistema è di $1,27 \cdot 10^6$ N/mm.

4.4. Confronto tra le varie soluzioni costruttive

In questa sezione conclusiva è stato svolto un confronto tra i tre sistemi analizzati. Per svolgere l'analisi è stato preso come riferimento il primo sistema (soluzione A).

Le forze agenti sull'interfaccia tra ugello e camera calda e sulle rondelle di contrasto nei casi A e C sono abbastanza simili. Queste forze risultano invece nettamente inferiori nella soluzione B, dove si riducono sulla testa al 18% e sulla rondella al 33% rispetto alla prima soluzione (**Grafico 4.1**).

Come riportato nel **Grafico 4.2**, le pressioni di contatto minime valutate nella corona interna dell'ugello rispetto a quanto ricavato per il primo sistema sono:

- quattro volte superiori nella soluzione B che tendono però ad annullarsi spostandosi verso l'esterno a causa dell'inclinazione di $0,5^\circ$ della superficie della testa dell'ugello;
- circa simili nella soluzione C (superiori del 25%).

Lungo la corona esterna la maggiore tenuta è invece garantita nella soluzione A, le pressioni negli altri casi si attestano intorno al 20% del caso di riferimento.

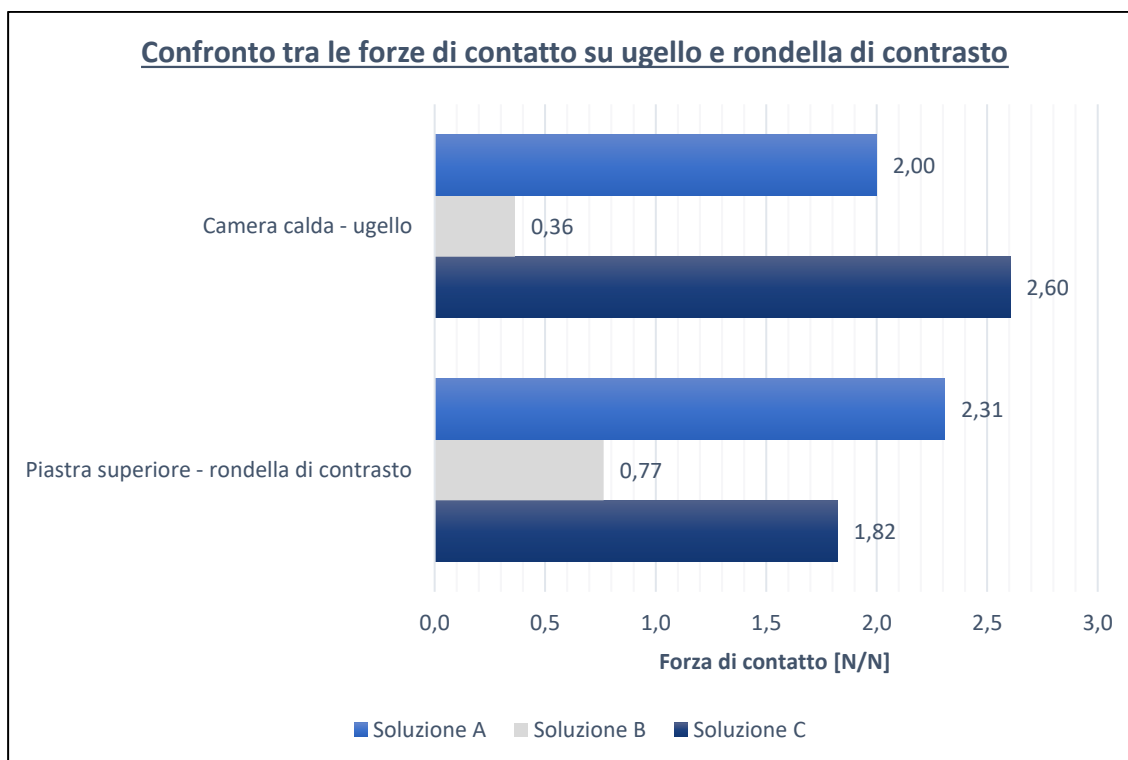


Grafico 4.1 – Confronto tra le forze di contatto nell'interfaccia ugello-camera calda e sulle rondelle di contrasto nei tre sistemi analizzati (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

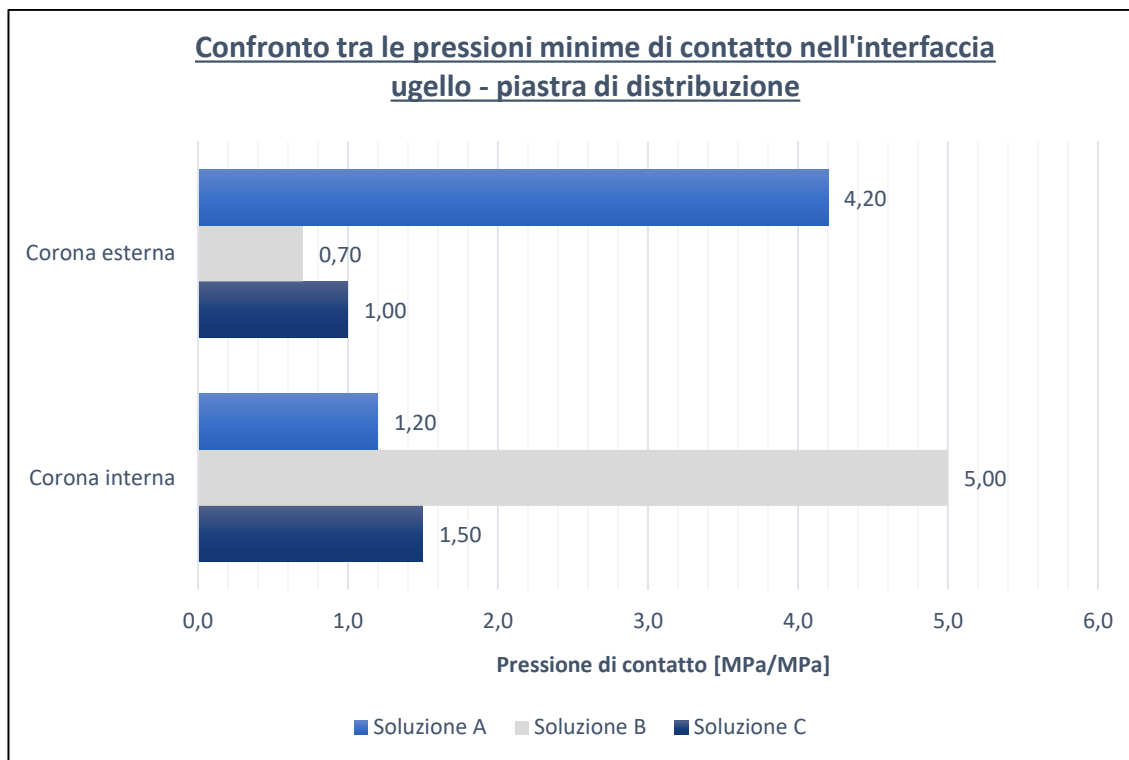


Grafico 4.2 – Confronto tra le pressioni minime di contatto all’interfaccia tra ugello e camera calda nei tre sistemi analizzati; sono riportati i valori sia nell’area interna che in quella esterna della zona di contatto (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Capitolo 5

Viti “anti-leakage”: analisi e validazione

In questo capitolo verrà studiata una nuova soluzione per limitare ancor di più le perdite tra la camera calda e l’ugello, senza però impiegare rondelle di contrasto. La tenuta del sistema sarà garantita tramite delle viti poste tra il distributore e le piastre dello stampo, definite per l’appunto “viti anti-leakage”.

In questo modo il regolo non ha più nessuna funzione nell’“impaccamento” del sistema, eccetto quella di racchiudere la camera calda. Non è più necessario quindi portare il sistema alla corretta temperatura di lavoro per ottenere un’adeguata forza di tenuta, che in questo caso viene garantita anche a “freddo”.

Come primo passo si svolgeranno delle simulazioni FEM in *Ansys*. Successivamente verranno condotte delle prove sperimentali nella sala testing dell’azienda per validare i risultati precedentemente ottenuti.

5.1. Obiettivi dell’analisi e descrizione del sistema

Gli obiettivi di questa seconda parte della tesi sono i seguenti:

- determinare numero, posizione e coppia di serraggio delle viti necessarie per assicurare una pressione di contatto uniforme e sufficiente a evitare perdite tra la testa dell’ugello e la camera calda, senza ovviamente incorrere in danni strutturali dei componenti;
- verificare la resistenza delle viti durante il riscaldamento e in condizioni operative;
- stimare e verificare sperimentalmente la minima pressione di contatto tra la testa dell’ugello e la piastra di distribuzione che garantisce la tenuta.

Il sistema utilizzato per prove e simulazioni è RD180013. L’assieme è illustrato in **Figura 5.1**, **Figura 5.2** e **Figura 5.4**. È progettato per stampare polipropilene superfluido ($T_{\text{stampo}} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{materiale}} = 300^{\circ}\text{C}$), materiale adatto per valutare perdite di plastica data la sua elevata fluidità. È composto da una piastra di distribuzione a due punti di iniezione con due ugelli a rasamento di lunghezza di 126 mm e diametro della testa di 29 mm. La camera calda è fissata alla piastra intermedia con viti. Le viti sono passanti nella piastra porta iniettori. Le viti utilizzate sono M8 di lunghezza 110 mm e classe di resistenza 12.9 ($R_m = 1200 \text{ MPa}$, $R_{p02} = 1080 \text{ MPa}$). Sono stati predisposti fori, lamature e

sedi su distributore e piastre per poter avvitare fino a quattro viti attorno a ogni ugello. Si prevede anche di inserire delle rondelle piane sotto ogni vite per migliorare il serraggio.

Lo spessore della camera calda è di 52 mm, l'altezza della testa degli ugelli è 20 mm, l'interasse a caldo tra i punti di iniezione 160 mm. Seguendo il flusso della plastica, i canali di colata del distributore hanno diametro di 10, 8 e 6 mm. Il sistema comprende anche regolo, due boccole intermedie e due boccole porta iniettori posizionate nelle rispettive piastre dello stampo.

Per le prove in sala testing il canale caldo verrà montato su uno stampo già presente in azienda e utilizzato per i test sulla pressa.

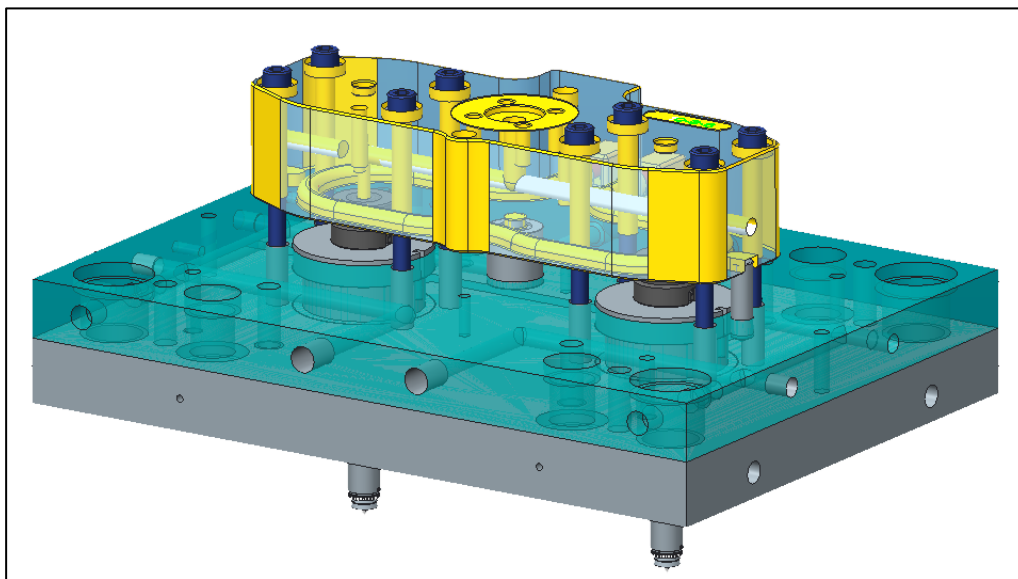


Figura 5.1 – Sistema RD180013 raffigurato senza regolo, piastra di supporto superiore e boccola di iniezione. Si possono notare quattro viti “anti-leakage” attorno ad ogni ugello.

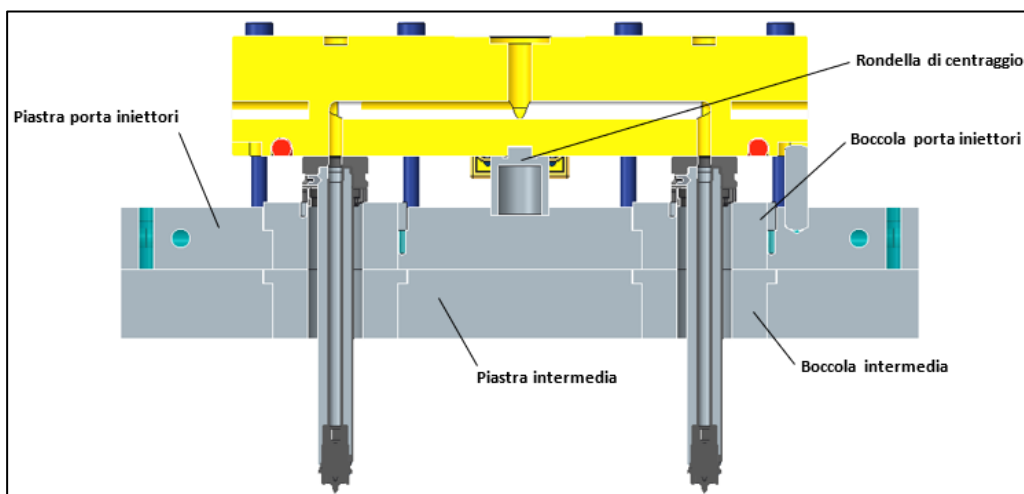


Figura 5.2 – Vista in sezione del sistema RD180013: si osservino le piastre dello stampo e le boccole alloggiare in esse.

Per favorire la tenuta del sistema e limitare possibili perdite sono state predisposte due diverse teste dell'ugello con differenti superfici di contatto tra la faccia superiore e il distributore. Le aree di contatto sono rispettivamente di 160 mm^2 e di 286 mm^2 . Da questo punto in avanti, nel capitolo si farà riferimento a esse come “testa con superficie ridotta” e “testa base”. Un confronto tra le due soluzioni è illustrato in **Figura 5.3**.

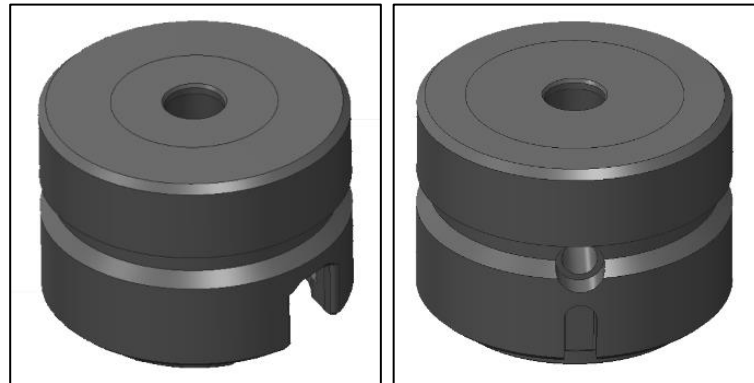


Figura 5.3 – Confronto tra la testa dell'ugello con superficie ridotta (a sinistra) e la testa base (a destra); si può notare la diversa estensione dell'area che va in battuta con la camera calda.

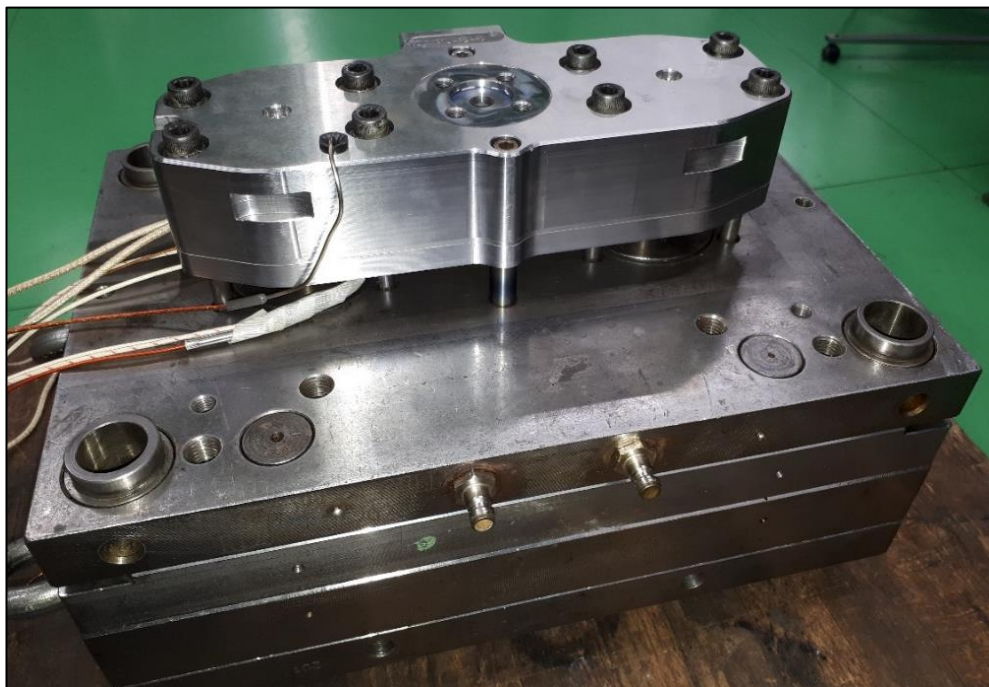


Figura 5.4 – Sistema RD180013 assemblato e pronto per iniziare le prove sperimentali.

5.2. Analisi termiche e strutturali

Prima delle prove sperimentali sono state eseguite delle simulazioni FEM. Le analisi sono state svolte utilizzando sia due che quattro viti per ogni ugello e teste con superficie ridotta. Verrà studiato il comportamento del sistema in funzione del numero e della coppia di serraggio delle viti.

Regolo, piastra di supporto superiore e boccia di iniezione non sono stati simulati.

Come primo passo è stata eseguita un'analisi termica stazionaria per valutare la mappatura termica della struttura. È stato simulato solo metà sistema in quanto simmetrico. La temperatura dell'aria (170°C) è data dalla media tra le temperature di stampo (40°C) e camera calda (300°C).

Si faccia riferimento al **Paragrafo 4.1.2** per una spiegazione più dettagliata delle condizioni al contorno. In **Figura 5.5** sono mostrati i vincoli e i carichi utilizzati.

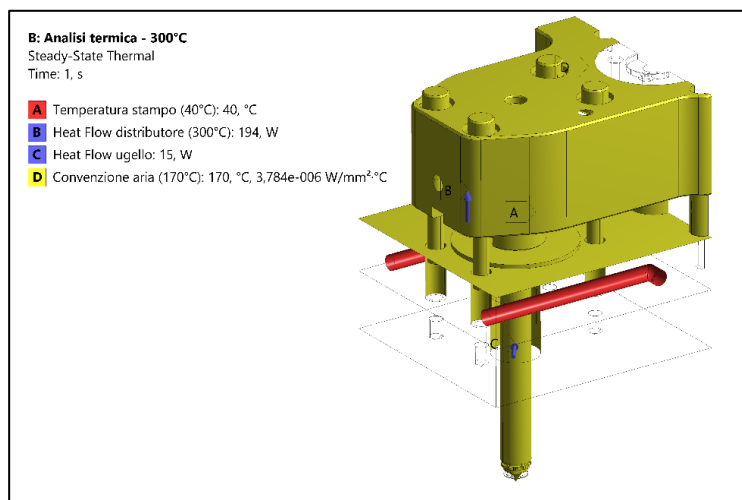


Figura 5.5 – Sistema RD180013: condizioni al contorno per l'analisi termica.

In **Figura 5.6** sono riportati i risultati ottenuti.

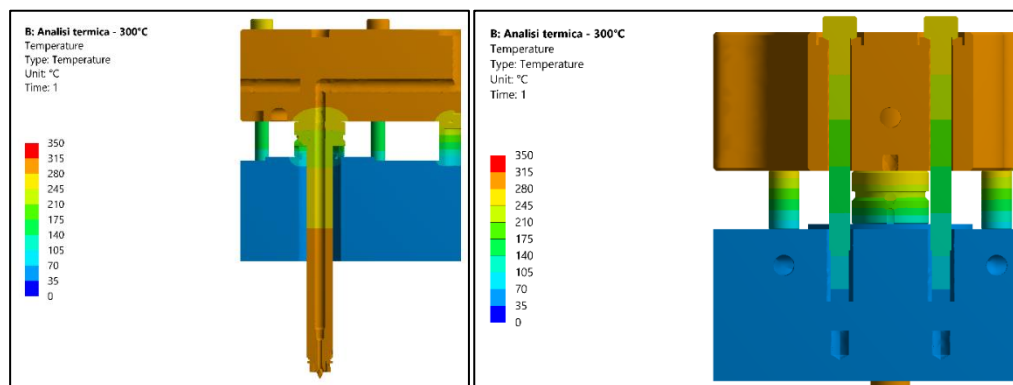


Figura 5.6 – Sistema RD180013: risultati dell'analisi termica con distribuzione delle temperature e vista in sezione delle due viti esterne.

Le temperature nella camera calda si attestano tra 260 e 315°C con una differenza massima di 55°C. Questa disomogeneità è principalmente dovuta al non aver simulato il materiale plastico all'interno dei canali. Tra la testa e il fusto della vite c'è una differenza massima di 230°C. Essendo a contatto con piastre condizionate a 40°C, la parte filettata presenta temperature praticamente costanti (si aggirano tra i 47 e i 54°C). La zona in presa della vite è quindi sollecitata da carichi termici trascurabili. Non si notano variazioni significative tra il profilo termico delle viti esterne e di quelle interne (le due viti interne risultano più calde di soli 5°C).

Come secondo passo è stata eseguita un'analisi strutturale di tipo statico. Data la doppia simmetria e per ridurre ulteriormente i tempi di calcolo, è stato simulato solo un quarto del sistema.

I carichi sono stati suddivisi in tre step:

1. applicazione del precarico sulle viti e successivo bloccaggio;
2. applicazione del carico termico ottenuto dalla precedente analisi;
3. applicazione di una pressione di 200 MPa data dalla plastica iniettata lungo i canali di colata.

La faccia inferiore della piastra intermedia è vincolata lungo tutte le direzioni.

Le viti sono state simulate come descritto nel **Paragrafo 4.3.1**. I contatti tra viti e madrevite e tra il sottotesta della vite e la rondella piana sono di tipo *Bonded*. Così facendo si tende a sovrastimare leggermente le tensioni presenti ponendosi in un caso più critico e quindi più cautelativo [11]. Questa condizione di non scorrimento è stata anche verificata sperimentalmente con prove svolte in azienda nel passato.

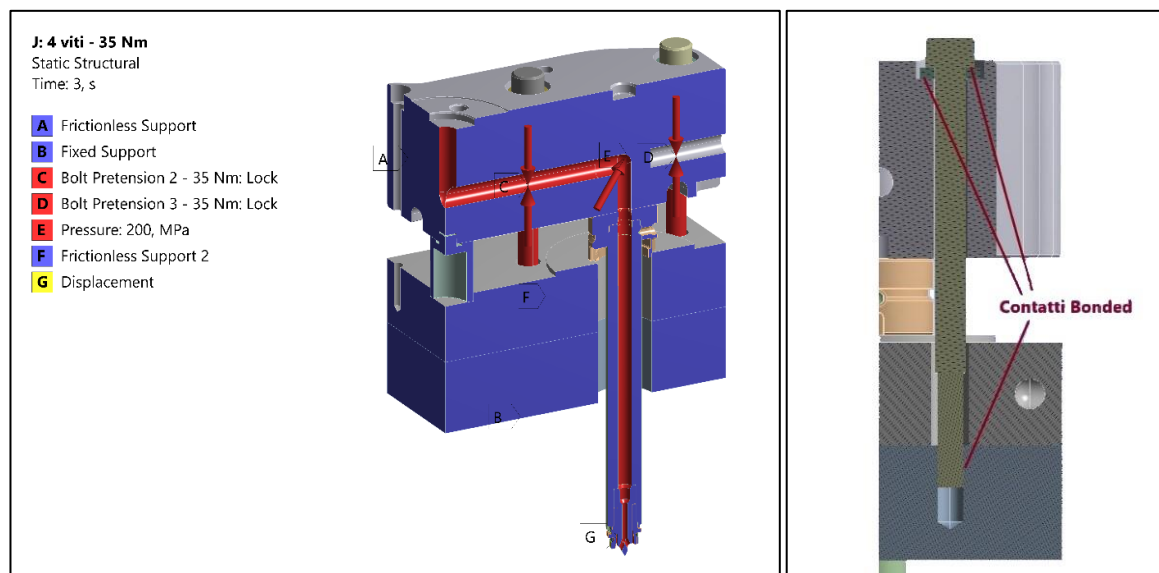


Figura 5.7 – Sistema RD180013: condizioni al contorno per l'analisi strutturale (destra) e geometria semplificata della vite con indicazione dei contatti *Bonded* tra le parti (sinistra).

5.2.1. Primo caso: quattro viti per ugello

Nel primo caso analizzato è stata condotta un'analisi impiegando quattro viti per ugello.

Le viti, pur essendo di classe 12.9, sono state avvitate con la coppia di serraggio prevista per la classe 10.9 in modo da permettere un margine di deformazione maggiore prima del raggiungimento del limite di snervamento. Sono state quindi serrate con una coppia di 35 Nm, corrispondente a un precarico di 25750 N (si faccia riferimento la **Sezione 5.3** per ulteriori dettagli).

La pressione minima di contatto tra testa dell'ugello e camera calda è risultata pari a 125 MPa internamente e 830 MPa esternamente.

La pressione media del contatto iniziale è invece:

$$p_{c \text{ iniziale}} = \frac{\text{numero viti} \cdot \text{precarico}}{A_{\text{contatto}}} = 644 \text{ MPa}$$

Nelle immagini seguenti sono riportate le pressioni di contatto sulla testa dell'ugello (**Figura 5.8**) e l'andamento della forza assiale sulle viti (**Figura 5.9**). Quest'ultima aumenta da 25750 N a 30450 N al termine dell'ultimo step.

Le viti verranno poi verificate secondo normativa nel **Paragrafo 5.3.2**.

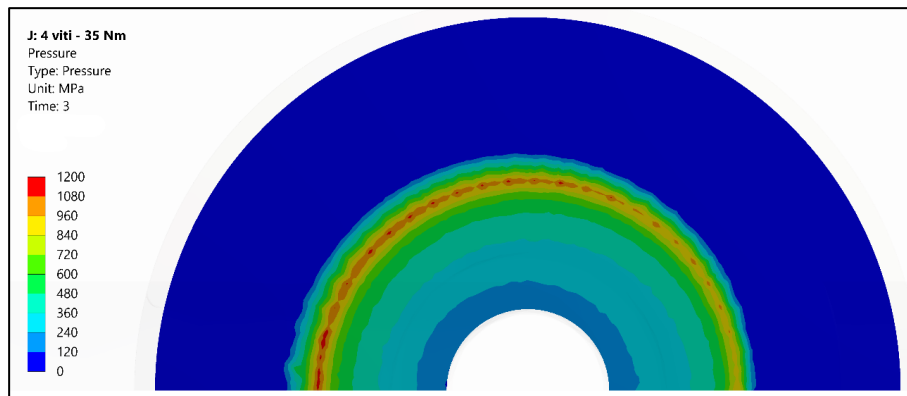


Figura 5.8 – Sistema RD180013 con quattro viti per ugello: distribuzione delle pressioni di contatto all'interfaccia tra camera calda e ugello.

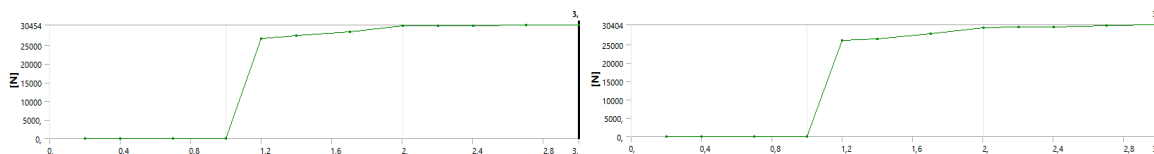


Figura 5.9 – Andamento del carico assiale agente sulle viti esterne (sinistra) e su quelle interne (destra) durante i tre step.

Nel primo step viene mostrato un carico nullo in quanto si è in fase di chiusura e non intervengono carichi esterni (*Ansys* in questo caso non tiene traccia dell'andamento del precarico). Il contributo maggiore è dato dal carico termico (step 2), mentre la pressione della materiale iniettato ha

un'influenza quasi trascurabile (step 3). Nell'ultimo step la forza di contatto tra la testa dell'ugello e la piastra di distribuzione è di 96978 N che divisa per la corrispondente area di contatto fornisce una pressione media effettiva di 606 MPa.

5.2.2. Secondo caso: due viti per ugello

Dal momento che con quattro viti si ottengono pressioni di contatto molto elevate, in questo paragrafo vengono ridotte a due. In ogni ugello sono inserite solo le due viti più esterne.

I casi con una sola vite o con due viti disposte in diagonale (una interna e una esterna) non saranno analizzati. Un sistema simile non risulterebbe più simmetrico e si avrebbe una pressione di contatto molto disomogenea. Anche l'utilizzo delle sole due viti interne non verrà preso in considerazione perché non si garantirebbe nessuna tenuta nella zona in cui sono presenti le viti. Se il distributore dovesse flettersi o presentasse dei difetti dimensionali o di planarità, il sistema certamente perderebbe.

Sono state allora condotte più analisi strutturali con due viti esterne per ugello, variando il precarico sulle viti. Le coppie di serraggio simulate sono state 35, 22, 14, 11 e 7 Nm.

Nelle figure seguenti sono riportate le distribuzioni delle pressioni di contatto all'interfaccia tra la testa dell'ugello e la camera calda.

In **Figura 5.15** è mostrato l'andamento del carico sulla vite nella prima situazione analizzata (con una coppia di serraggio di 35 Nm). Gli andamenti delle forze negli altri casi non sono stati riportati perché simili a questo.

In **Tabella 5.1** sono riportati i risultati ricavati. Tutti i valori tabulati sono stati normalizzati rispetto al valore della forza e della pressione di contatto di riferimento. In tutti i casi la pressione di contatto effettiva è stata sempre superiore ai 100 MPa.

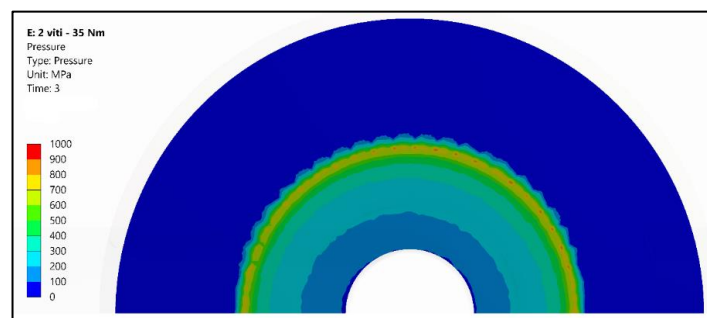


Figura 5.10 – Sistema RD180013 con due viti serrate a 35 Nm (secondo classe 10.9): distribuzione delle pressioni di contatto all'interfaccia tra camera calda e ugello.

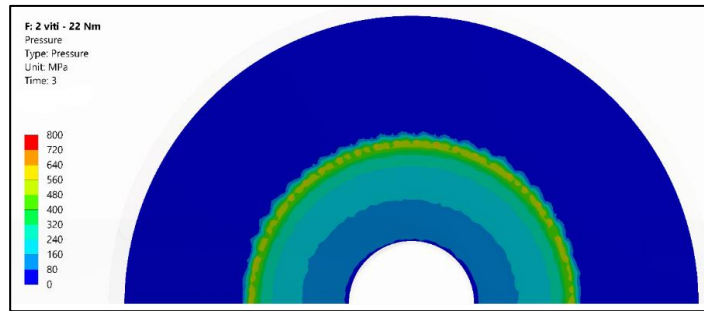


Figura 5.11 – Sistema RD180013 con due viti serrate a 22 Nm: distribuzione delle pressioni di contatto all’interfaccia tra camera calda e ugello.

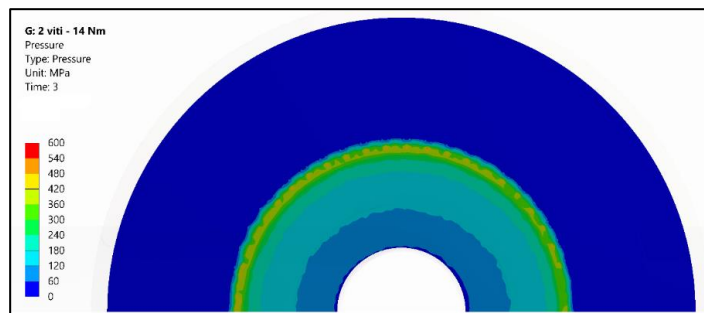


Figura 5.12 – Sistema RD180013 con due viti serrate a 14 Nm: distribuzione delle pressioni di contatto all’interfaccia tra camera calda e ugello.

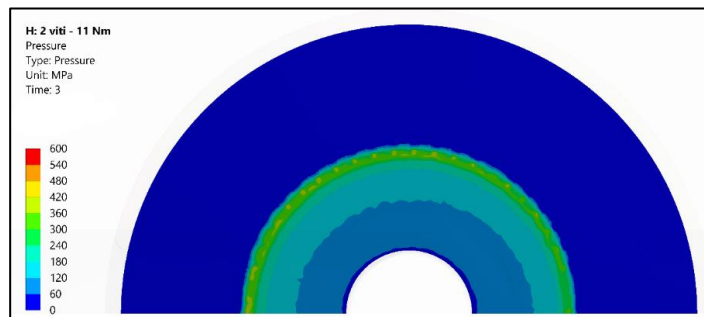


Figura 5.13 – Sistema RD180013 con due viti serrate a 11 Nm: distribuzione delle pressioni di contatto all’interfaccia tra camera calda e ugello.

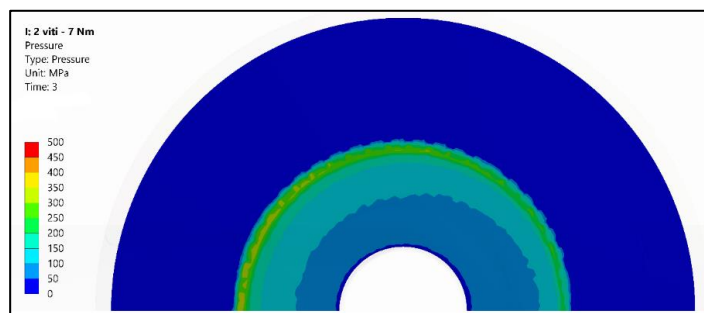


Figura 5.14 – Sistema RD180013 con due viti serrate a 7 Nm: distribuzione delle pressioni di contatto all’interfaccia tra camera calda e ugello.

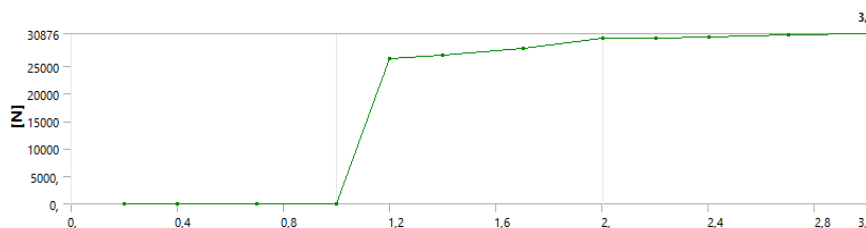


Figura 5.15 – Sistema RD180013 con due viti serrate a 35 Nm: andamento del carico assiale agente sulla vite esterna lungo i tre step.

Tabella 5.1 – Sistema RD180013 con due viti: precarico iniziale, forza assiale sulle viti, pressioni e forze di contatto al variare della coppia di serraggio (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Coppia di serraggio [Nm]	Precarico [N]	p_c iniziale [MPa]	Carico vite [N/N]	$p_{c \text{ min}}$ interna [MPa/MPa]	$p_{c \text{ min}}$ esterna [MPa/MPa]	$F_{\text{testa-camera calda}}$ [N/N]	p_c effettiva [MPa/MPa]
35	25750	322	1,24	1,80	11,60	2,37	7,40
22	16200	203	0,86	1,20	8,40	1,67	5,22
14	10300	129	0,63	1,00	6,30	1,21	3,78
11	8100	101	0,54	0,80	5,60	1,07	3,36
7	5150	64	0,43	4,10	4,10	0,87	2,70

5.2.3. Terzo caso: aumento della superficie di contatto

In questo paragrafo si è deciso di valutare forze e pressioni in gioco aumentando l'area di contatto tra la testa dell'ugello e il distributore. A questo scopo le teste con superficie ridotta sono state sostituite con le "teste base" (l'area di contatto con la piastra di distribuzione aumenta da 160 a 286 mm²). Aree maggiori implicano ovviamente, a parità di forza, pressioni di contatto minori.

Le simulazioni sono state svolte solo con due viti per ugello. Le coppie di serraggio utilizzate sono state 22, 14, 11 e 7 Nm.

I casi studiati e i risultati sono riepilogati in **Tabella 5.2**.

Si nota come previsto una generale riduzione delle pressioni di contatto. La distribuzione delle pressioni tra ugello e camera calda è analoga a quelle illustrate nel paragrafo precedente, maggiori nella corona esterna e minori ma mai nulle nella corona interna. La forza agente sulla testa base aumenta di circa 1-2 kN rispetto al caso con teste con superficie ridotta perché la rigidità cresce leggermente.

Tabella 5.2 – Sistema RD180013 con teste degli ugelli non scaricate e due viti per ugello: precarico iniziale, forza assiale sulle viti, pressioni e forze di contatto al variare della coppia di serraggio (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

Coppia di serraggio [Nm]	Precarico [N]	p_c iniziale [MPa]	Carico vite [N/N]	p_c min interna [MPa/MPa]	p_c min esterna [MPa/MPa]	$F_{\text{testa-camera calda}}$ [N/N]	p_c effettiva [MPa/MPa]
22	16200	113	0,86	0,80	5,80	1,74	3,04
14	10300	72	0,63	0,70	3,90	1,28	2,24
11	8100	57	0,55	0,60	3,10	1,12	1,96
7	5150	36	0,43	0,60	1,80	0,90	1,58

5.2.4. Quarto caso: variazione della temperatura di lavoro

Si è studiato anche il comportamento delle viti e la variazione delle forze e delle pressioni di contatto in funzione delle temperature di lavoro.

È stata pertanto diminuita la temperatura della camera calda portandola da 300 a 240°C. La temperatura di condizionamento dello stampo è rimasta invariata (40°C). La temperatura dell'aria è stata posta pari a 140°C, media tra i due valori.

Sono stati nuovamente simulati il sistema con due viti serrate a 11 e a 22 Nm con entrambe le tipologie di testa.

In **Figura 5.16** sono presentati i risultati dell'analisi termica.

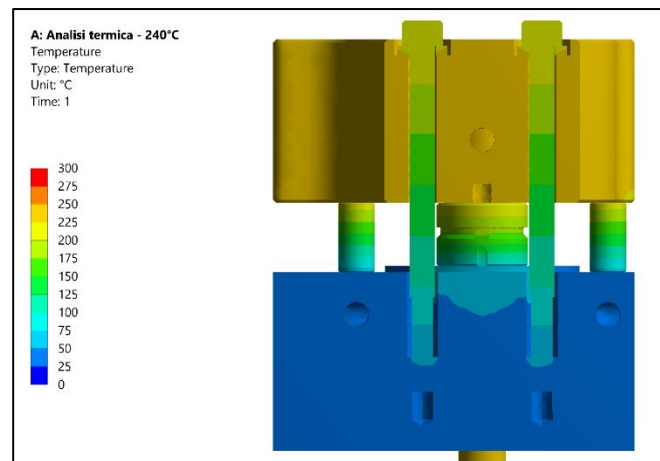


Figura 5.16 – Risultati dell'analisi termica e distribuzione delle temperature ($T_{\text{stampo}} = 40^\circ\text{C}$, $T_{\text{materiale}} = 240^\circ\text{C}$).

In **Tabella 5.3** sono illustrati i risultati. Diminuendo la temperatura della piastra di distribuzione di 60°C, il carico agente sulle viti si riduce di 1,3 kN. Anche la forza di contatto tra camera calda e testa dell'ugello diminuisce mediamente di 2,3 kN. Questo è dovuto a un minor contributo

dell'espansione termica (i carichi termici sono inferiori rispetto ai casi precedenti). Tali considerazioni sono valide per entrambe le tipologie di teste analizzate.

Tabella 5.3 – Sistema RD180013 con due viti per ugello e temperatura della camera calda ridotta a 240°C: precarico iniziale, forza assiale sulle viti, pressioni e forze di contatto al variare della coppia di serraggio e del tipo di testa (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

	Coppia di serraggio [Nm]	Precarico [N]	p_c iniziale [MPa]	Carico vite [N/N]	$p_{c\ min}$ interna [MPa/MPa]	$p_{c\ min}$ esterna [MPa/MPa]	$F_{testa-camera\ calda}$ [N/N]	p_c effettiva [MPa/MPa]
Testa con area ridotta	22	16200	203	0,81	1,30	8,00	1,58	4,94
	11	8100	101	0,49	0,80	5,00	0,99	3,08
Testa base	22	16200	113	0,81	0,90	5,80	1,65	2,88
	11	8100	57	0,49	0,60	2,60	1,03	1,80

5.3. Verifica della resistenza delle viti

Le viti sono state verificate secondo normativa. Le formule utilizzate sono tratte dalla letteratura tecnica [12].

Ogni vite è sollecitata dai seguenti carichi:

- il precarico iniziale fornito dalla coppia di serraggio;
- un carico termico in quanto viti e pezzi adiacenti presentano un diverso profilo termico;
- una forza dovuta alla spinta del materiale plastico iniettato all'interno dei canali di distributore e ugello.

5.3.1. Normativa e formule

Sono riportate le formule utilizzate per la verifica statica delle viti.

Dati:

F_v forza assiale sulla vite (precarico)

d diametro nominale della vite

d_n diametro di nocciolo della vite

d_m diametro medio del filetto

α inclinazione del filetto (30° per filettature metriche)

p passo

$\tan \Phi$ coefficiente di attrito vite/madrevite

$\tan \Phi_s$ coefficiente di attrito sottotesta/pezzi serrati

L lunghezza della vite

Calcoli preliminari:

$$\tan \alpha_m = \frac{p}{\pi d_m} \quad (\text{angolo dell'elica}) \quad (5.1)$$

$$\tan \Phi' = \frac{\tan \Phi}{\alpha} \quad (\text{coefficiente di attrito apparente}) \quad (5.2)$$

$$d_t = 1,3 \cdot d \quad (\text{diametro efficace tra testa e sottotesta}) \quad (5.3)$$

$$A_{res} = \pi \frac{\left(\frac{d_n + d_m}{2}\right)^2}{4} \quad (\text{sezione resistente della vite}) \quad (5.4)$$

$$W_t = \pi \frac{d_n^3}{16} \quad (\text{modulo di resistenza a torsione}) \quad (5.5)$$

Calcolo delle coppie di serraggio e di svitamento:

$$M_{serraggio} = \frac{F_v}{2} [d_m \tan(\Phi' + \alpha_m) + d_t \tan \Phi_s] \quad (5.6)$$

$$M_{svitamento} = \frac{F_v}{2} [d_m \tan(\Phi' - \alpha_m) + d_t \tan \Phi_s] \quad (5.7)$$

Calcolo della rigidezza K_v della vite:

$$K_{v1} = \frac{\pi d^2 E}{4 L_a} \quad \text{con } L_a \text{ lunghezza del tratto non filettato} \quad (5.8)$$

$$K_{v2} = A_{res} \frac{E}{L_b} \quad \text{con } L_b \text{ lunghezza del tratto filettato non in presa} \quad (5.9)$$

$$K_v = \frac{1}{\delta_v} = \frac{K_{v1} K_{v2}}{K_{v1} + K_{v2}} \quad (5.10)$$

Calcolo della rigidezza K_p degli i pezzi serrati:

$$L_{tot} = \sum_i L_i \quad (\text{spessore totale dei pezzi serrati}) \quad (5.11)$$

$$E_p = \frac{\sum_i L_i E_i}{\sum_i L_i} \quad (\text{modulo elastico effettivo di pezzi serrati con diversi valori di } E) \quad (5.12)$$

$$D = 1,5 \cdot d \quad (\text{diametro del tronco di cono}) \quad (5.13)$$

$$K_p = \frac{1}{\delta_p} = \frac{\pi d E_p \tan \alpha}{2 \ln \frac{(L_{tot} \tan \alpha + D - d)(D + d)}{(L_{tot} \tan \alpha + D + d)(D - d)}} \quad (5.14)$$

Carichi esterni:

$$\Delta L_p = \Delta T_p \alpha_p L \quad (\text{allungamento dei pezzi serrati}) \quad (5.15)$$

$$\Delta L_v = \Delta T_v \alpha_v L \quad (\text{allungamento della vite}) \quad (5.16)$$

$$C_{termico} = \frac{K_v K_p}{K_v + K_p} (\Delta L_p - \Delta L_v) \quad (5.17)$$

$$C_{pressione\ del\ fuso} = p_{materiale} \frac{\pi d_{canale}^2}{4} / \text{numero viti} \quad (5.18)$$

$$C_v = C_{termico} + \frac{K_v}{K_v + K_p} C_{pressione\ del\ fuso} \quad (5.19)$$

Verifica statica della vite:

$$\sigma_v = \frac{(F_v + C_v)}{A_{res}} \quad (5.20)$$

$$M' = \frac{F_v}{2} [d_m \tan \alpha_m + d_m \tan \Phi'] \quad (\text{momento torcente dovuto all'attrito sui filetti}) \quad (5.21)$$

$$\tau_v = \frac{M'}{W_t} \quad (5.22)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_v^2 + 3 \tau_v^2} \leq R_{p02} \quad (5.23)$$

$$CS_{statico} = \frac{R_{p02}}{\sigma_{eq}} \quad (5.24)$$

Possibili cambiamenti se la vite non dovesse risultare verificata sono:

- cambiare la classe di resistenza;
- aumentare il numero di viti, diminuendo così il carico esterno su ogni vite;
- utilizzare viti più lunghe, cioè più deformabili.

Aumentare il diametro della vite non porta sempre a dei benefici.

La verifica a fatica della vite non è necessario eseguirla. I carichi esterni presenti sono essenzialmente due ma:

- il carico termico non viene applicato in ogni ciclo di stampaggio ma solo all'accensione della pressa quando il sistema viene portato in temperatura;
- il carico dovuto al materiale plastico iniettato, pur variando e ripetendosi a ogni ciclo della macchina, è molto basso e non ha quasi nessuna influenza sulle tensioni media e alternata.

Si è quindi in una situazione di fatica oligociclica ed è pertanto sufficiente la sola verifica statica per stimare il coefficiente di sicurezza delle viti.

5.3.2. Calcoli e risultati

Sono state utilizzate viti M8x110 a passo grosso ($p = 1,25$ mm) e classe 12.9 ($R_{p02} = 1080$ MPa, $R_m = 1200$ MPa).

Viti e pezzi adiacenti non presentano lo stesso profilo termico, ma la vite è più fredda come osservato dai risultati dell'analisi termica della **Sezione 5.2** per un sistema scaldato a 300°C. In questo caso si è ottenuto un gradiente termico nei pezzi serrati (ΔT_{pezzi}) di 260°C e di 240°C nella vite (ΔT_{vite}). Per

il sistema scaldato a 240°C (**Paragrafo 5.2.4**), i gradienti termici sono stati rispettivamente di 200°C e 185°C.

Questi valori sono stati stimati come differenza tra la temperatura massima raggiunta nella zona di interesse e quella dello stampo, pari a 40°C in entrambe le situazioni.

Per i pezzi serrati è stato utilizzato un coefficiente di dilatazione medio di $1,28 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

La pressione del materiale è di 200 MPa e il diametro del canale di colata (d_{canale}) è 6 mm. La forza esercitata (**5.18**) è stata quindi calcolata come il prodotto tra l'area del canale e la pressione del materiale divisa per il numero di viti impiegate.

Sono stati utilizzati i seguenti coefficienti di attrito misurati sperimentalmente:

- 0,14 tra vite e madrevite;
- 0,11 tra il sottotesta della vite e i pezzi serrati.

Si faccia riferimento alle prove a banco illustrate nel **Paragrafo 5.4.1.** per la valutazione di tali coefficienti.

Le rigidzze di vite e pezzi serrati sono rispettivamente di $9,54 \cdot 10^4 \text{ N/mm}$ e $1,08 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$ con un fattore di ripartizione del carico sulla vite di 0,08.

In **Tabella 5.4**, **Tabella 5.5** e **Tabella 5.6** sono riportati i risultati per i vari casi analizzati in funzione della coppia di serraggio.

Tabella 5.4 – Verifica delle viti del sistema RD180013 con quattro viti per ugello e camera calda a 300°C.

Coppia di serraggio [Nm]	Precarico [N]	Carico totale [N]	σ_{eq} [MPa]	CS statico
35	25750	30185	1053	1,0

Tabella 5.5 – Verifica delle viti del sistema RD180013 con due viti per ugello e camera calda a 300°C.

Coppia di serraggio [Nm]	Precarico [N]	Carico totale [N]	σ_{eq} [MPa]	CS statico
35	25750	30300	1056	1,0
22	16200	20750	701	1,5
14	10300	14260	483	2,2
11	8100	12650	402	2,7
7	5150	9700	296	3,6

Tabella 5.6 – Verifica delle viti del sistema RD180013 con due viti per ugello e camera calda a 240°C.

Coppia di serraggio [Nm]	Precarico [N]	Carico totale [N]	σ_{eq} [MPa]	CS statico
22	16200	19709	678	1,6
11	8100	11609	378	2,9

Sole le viti chiuse con coppie elevate (35 Nm) sono prossime al limite di snervamento del materiale. Il carico esterno che ha il contributo maggiore è quello di tipo termico che pesa per 4320 N nel sistema scaldato a 300°C e 3279 N in quello a 240°C. Il materiale iniettato all'interno dei canali invece ha un'influenza quasi trascurabile in quanto il carico viene equamente ripartito su tutte le viti presenti. Nel caso con due viti grava per soli 230 N e si riduce a 115 N in quello con quattro viti. È bene ricordare che il carico viene applicato sulle spire della filettatura in modo decrescente, ovvero i primi 5-6 filetti sostengono quasi il 90% del carico. Pertanto, lunghezze della madrevite maggiori non portano significativi miglioramenti.

Confrontando questi valori con quanto simulato in *Ansys*, si ottengono risultati molto simili.

Per completezza è stato svolto un calcolo ipotizzando di utilizzare viti più corte. Le viti sono sempre M8 a passo grosso ma con una lunghezza di 75 mm. In questo caso la rigidità della vite aumenta fino a $1,43 \cdot 10^5$ N/mm, mentre quella dei pezzi serrati rimane quasi invariata ($1,15 \cdot 10^6$ N/mm). Il fattore di ripartizione del carico sale a 0,11 con un aumento del 37% rispetto all'utilizzare viti più lunghe.

Svolgendo i calcoli, a fronte di un precarico di 25750 N (coppia di serraggio di 35 Nm) si ottiene un carico totale sulla vite di 30335 N e una tensione equivalente di 1056 MPa. Questo corrisponde a una percentuale di snervamento del 98% e a un coefficiente di sicurezza appena sopra l'unità (il limite di snervamento è di 1090 MPa).

Quindi utilizzare viti più corte non porta alcun beneficio. Una vite più corta è meno deformabile, quindi più rigida e viene pertanto sollecitata da un carico maggiore. Questo viene però compensato da un minore carico termico agente sulla vite (dilatazioni minori perché la vite è più corta e subisce un gradiente termico minore).

5.4. Prove sperimentali e validazione

In questa sezione sono descritte tutte le prove che sono state svolte in sala testing per validare i risultati delle simulazioni precedenti e determinare il valore della pressione di contatto tra ugello e distributore che non garantisce un'adequata tenuta del sistema.

5.4.1. Test a banco

Come primo passo sono stati eseguiti dei test sul banco di lavoro, senza quindi montare lo stampo sulla pressa e iniettare il polimero. Sono state condotte due prove utilizzando quattro viti per ugello. Le viti sono state serrate prima a 35 e poi a 41 Nm. Questi valori sono quelli indicati dalle schede tecniche rispettivamente per viti di classe di resistenza 10.9 e 12.9 (**Figura 5.17**).

L'obiettivo di questo test è studiare il comportamento del sistema e delle viti durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento in funzione delle coppie di serraggio.

Per valutare al meglio l'effetto della dilatazione termica e verificare un loro possibile snervamento, tutte le viti sono state misurate all'inizio e al termine di ogni prova con l'altimetro.

Qualità/ Dimensioni	Classe di resistenza (R)							
								
	R>400N/mm ²		R>500N/mm ²		R>600N/mm ²	R>800N/mm ²	R>1000N/mm ²	R>1200N/mm ²
Diametro	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm	Nm
M3	0,5	0,7	0,6	0,9	1	1,4	1,9	2,3
M4	1,1	1,5	1,4	1,8	2,2	2,9	4,1	4,9
M5	2,3	3	2,8	3,8	4,5	6	8,5	10
M6	3,8	5	4,7	6,3	7,5	10	14	17
M8	9,4	13	12	16	19	25	35	41
M10	18	25	23	31	37	49	69	83

Figura 5.17 – Tabella utilizzata in sala testing per le coppie di serraggio di viti standard a passo grosso in funzione della classe di resistenza.

Di seguito è riportato l'iter con cui è stata svolta la prova a banco con una coppia di serraggio di 35 Nm:

1. utilizzare viti M8x110 a passo grosso (classe di resistenza 12.9);
2. numerazione e misura della lunghezza delle viti;
3. assemblaggio sul banco di lavoro del sistema con quattro viti attorno a ogni ugello, (lubrificare con grasso per alta temperatura il filetto e il sottotesta di ogni vite);
4. collegare il sistema alla centralina di controllo delle resistenze e le piastre dello stampo al sistema di condizionamento;
5. eseguire le seguenti prove:
 - CASO A ("a freddo"): serrare le viti con una coppia di 35 Nm → misurare la coppia di svitamento con il dispositivo digitale coppia-angolo USAG (**Figura 5.18**);
 - CASO B ("dopo raffreddamento"): riutilizzare le stesse viti del caso A e serrarle con una coppia di 35 Nm → scaldare la camera calda a 300°C e le piastre dello stampo condizionate a 40°C → dopo aver raggiunto le condizioni operative, attendere 2 ore mantenendo la temperatura di lavoro → lasciare raffreddare il sistema con il condizionamento acceso fino a ritornare a temperatura ambiente → misurare la coppia di svitamento → misurare la lunghezza delle viti;
 - CASO C ("a caldo"): utilizzare nuove viti → numerazione e misura della lunghezza delle viti → lubrificare con grasso filetto e sottotesta → serrare le viti a 35 Nm → scaldare la camera calda a 300°C e le piastre dello stampo condizionate a 40°C →

dopo aver raggiunto le condizioni operative, attendere 2 ore mantenendo la temperatura di lavoro → misurare la coppia di svitamento “a caldo” senza lasciare raffreddare il sistema → misurare la lunghezza delle viti;

6. verificare se le viti si sono snervate;
7. misurare il passo del filetto e controllare eventuali danneggiamenti al microscopio.



Figura 5.18 – Dispositivo digitale coppia-angolo per misurare la coppia di svitamento (errore di misurazione della coppia $\pm 4\%$).

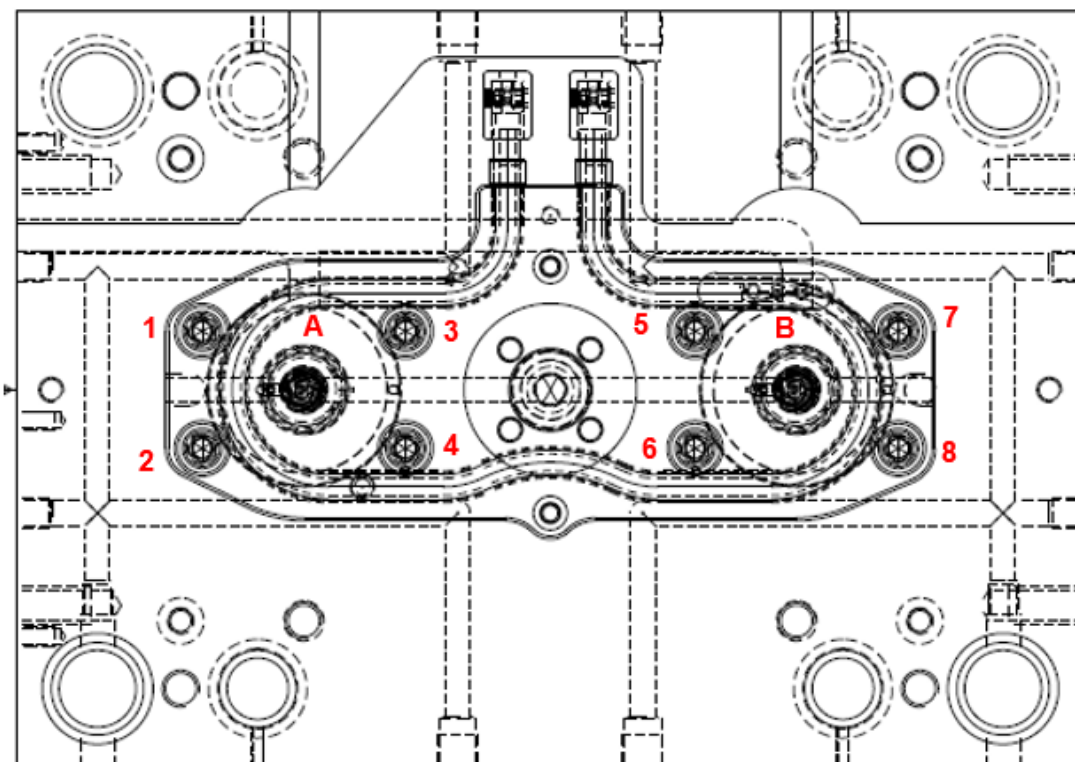


Figura 5.19 – Vista dall’alto del sistema RD180013 con numerazione delle viti (1-8) e degli ugelli (A-B).

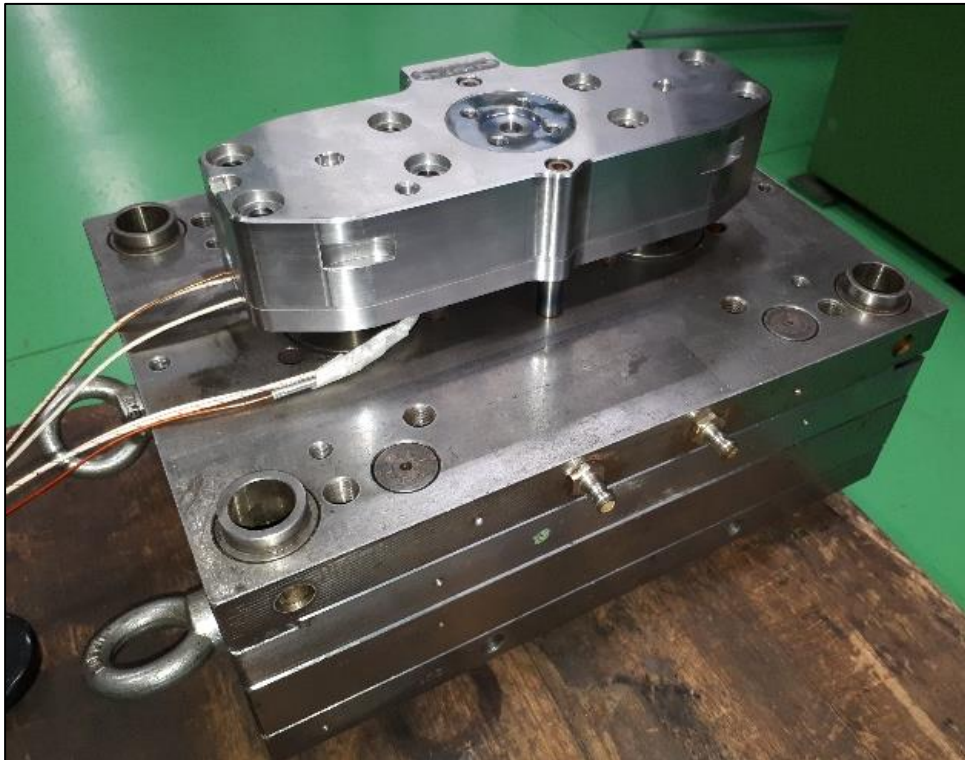


Figura 5.20 – Sistema RD180013 assemblato senza regolo per le prove a banco.

I risultati di questa prova sono riportati in **Tabella 5.7** e in **Tabella 5.8**.

Le viti non hanno subito variazioni di lunghezza apprezzabili (i pochi centesimi di millimetro di differenza sono dovuti alla non perfetta planarità delle facce delle viti). Non si sono allentate o danneggiate e il passo della filettatura di 1,25 mm non ha subito deformazioni come mostrato in **Figura 5.22**. Questo significa che non si sono snervate.

I valori delle coppie di svitamento rilevate nel *caso A* (senza portare in temperatura la camera calda) e nel *caso C* (misurando “a caldo” senza lasciare raffreddare il sistema) sono simili. Nel *caso B* invece si ha un notevole incremento della coppia di svitamento. Questo è probabilmente dovuto all’effetto del grasso applicato a inizio prova: a elevate temperature il grasso che non è evaporato risulta molto fluido e favorisce lo svitamento, raffreddandosi diventa molto pastoso e si comporta da collante avendo l’effetto opposto.

Data la coppia media di svitamento misurata nel *caso A*, sono stati stimati i valori dei coefficienti di attrito secondo la formula (5.7) del **Paragrafo 5.3.1**. Si è ottenuto:

- 0,12 tra vite e madrevite;
- 0,10 tra il sottotesta della vite e la camera calda.

Tabella 5.7 – Misurazione della lunghezza delle viti durante le varie fasi del test a banco con viti serrate a 35 Nm.

Lunghezza viti – prova a banco con serraggio di 35 Nm				
Num. vite	Lunghezza iniziale caso A [mm]	Lunghezza al termine del caso B [mm]	Lunghezza iniziale caso C [mm]	Lunghezza al termine del caso C [mm]
1	110,29	110,29	110,33	110,33
2	110,15	110,16	110,23	110,23
3	110,37	110,35	110,37	110,4
4	110,32	110,39	110,29	110,26
5	110,22	110,21	110,20	110,21
6	110,26	110,31	110,14	110,14
7	110,22	110,18	110,34	110,38
8	110,44	110,45	110,26	110,24
Media	110,28	110,29	110,27	110,27

Tabella 5.8 – Misurazione della coppia di svitamento durante le varie fasi del test a banco con viti serrate a 35 Nm.

Coppia di svitamento [Nm] – prova a banco con serraggio di 35 Nm			
Numero vite	Caso A	Caso B	Caso C
1	22,3	33,7	22,3
2	22,6	36,0	27,1
3	23,3	40,6	20,8
4	23,7	39,8	25,0
5	23,8	37,8	19,1
6	23,4	35,6	19,8
7	25,3	30,5	23,2
8	21,3	39,8	21,7
Media	23,2	36,7	22,4

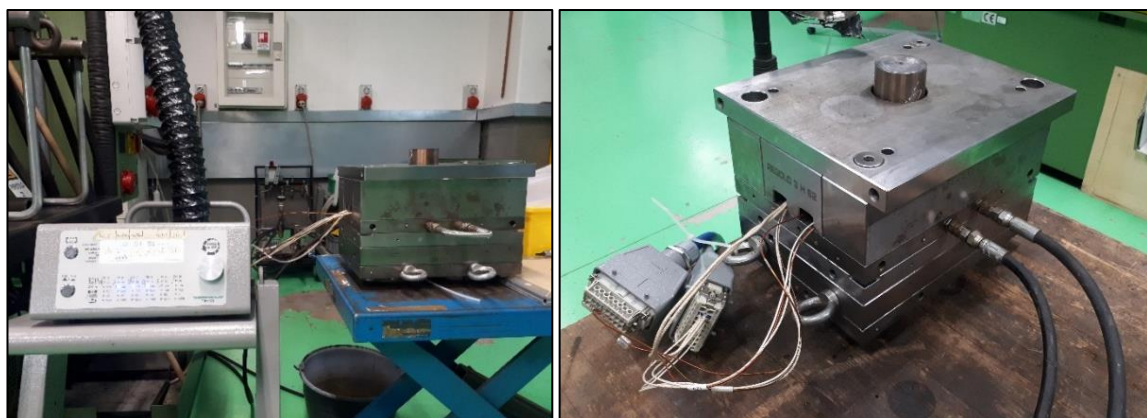


Figura 5.21 – Prova a banco e collegamento del semistampo fisso alla centralina per il controllo delle temperature.



Figura 5.22 – Misurazione al microscopio del passo della filettatura della vite numero 1 al termine del test a banco con viti serrate a 35 Nm.

Lo stesso iter è stato seguito per la prova a banco con viti serrate con una coppia di 41 Nm (secondo la classe di resistenza 12.9).

In **Tabella 5.9** e in **Tabella 5.10** sono illustrati i dati rilevati durante questo secondo test. I risultati sono simili a quelli della prova precedente e, anche se sollecitate da un carico maggiore, le viti non si sono snervate.

Il passo della filettatura non ha subito deformazioni (**Figura 5.23**).

Tabella 5.9 – Misurazione della lunghezza delle viti durante le varie fase del test a banco con viti serrate a 41 Nm.

Lunghezza viti – prova a banco con serraggio di 41 Nm				
Num. vite	Lunghezza iniziale caso A [mm]	Lunghezza al termine del caso B [mm]	Lunghezza iniziale caso C [mm]	Lunghezza al termine del caso C [mm]
	110,20	110,24	110,31	110,31
2	110,32	110,31	110,21	110,21
3	110,22	110,17	110,14	110,07
4	110,21	110,19	110,26	110,23
5	110,33	110,34	110,03	110,10
6	110,34	110,34	110,24	110,27
7	110,13	110,14	110,08	110,15
8	110,28	110,33	110,47	110,45
Media	110,25	110,26	110,22	110,22

Tabella 5.10 – Misurazione della coppia di svitamento durante le varie fasi del test a banco con viti serrate a 41 Nm.

Coppia di svitamento [Nm] – prova a banco con serraggio di 41 Nm			
Numero vite	Caso A	Caso B	Caso C
1	28,2	41,0	26,4
2	29,1	44,7	31,2
3	30,1	42,7	23,1
4	31,0	40,6	26,5
5	31,8	37,4	21,7
6	27,2	35,8	20,2
7	30,2	34,8	18,5
8	27,5	39,3	23,8
Media	29,4	39,5	23,9

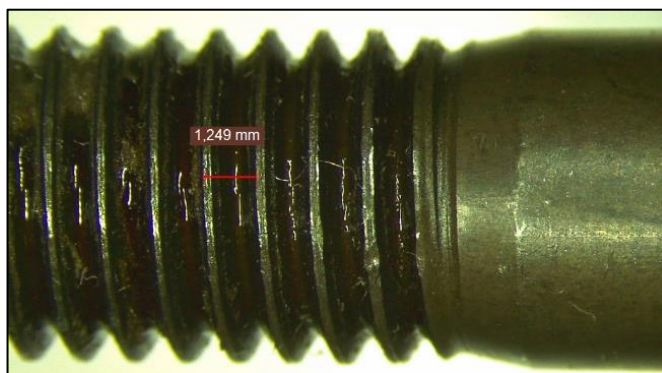


Figura 5.23 - Misurazione al microscopio del passo della filettatura della vite numero 1 al termine del test a banco con viti serrate a 41 Nm.

Nuovamente nota la coppia media di svitamento misurata nel *caso A*, sono stati calcolati i valori dei coefficienti di attrito:

- 0,15 tra vite e madrevite;
- 0,12 tra il sottotesta della vite e la camera calda.

Dati i coefficienti d'attrito ricavati in questi due test, i calcoli della **Sezione 5.3** sono stati corretti utilizzando rispettivamente 0,14 e 0,11 (valore medio tra le due prove).

5.4.2. Disaccoppiamento boccola di iniezione e ugello pressa

Prima di iniziare le prove in macchina, è stata eseguita una piccola modifica al sistema ed è stata realizzata una boccola di iniezione speciale. Il motivo di questa scelta è stato il dubbio che la sola forza dell'ugello della pressa agente sullo stampo potesse essere abbastanza elevata da garantire una tenuta sufficiente a evitare perdite all'interno della camera calda e invalidare le future prove.

Questa forza non può essere impostata dall'operatore (l'unità di controllo della pressa non è in grado di regolare in fase di iniezione la forza esercitata dall'ugello della pressa). Agendo direttamente sulla boccola di iniezione, si scarica interamente su camera calda e ugelli, "impaccando" tutto il sistema. Inoltre, il distributore è molto rigido e difficilmente si può flettere o imbarcare (è molto compatto e presenta uno spessore elevato di 52 mm).

Le viti di fissaggio M6 poste a lato della rondella di centraggio e i corrispondenti distanziali non hanno influenza in tutto ciò. In fase di assemblaggio tra distanziale e camera calda c'è un gioco di 0,05 mm e le viti sono avvitate con una coppia bassissima in quanto non hanno funzioni strutturali ma solo di posizionamento.



Figura 5.24 – Immagine dell'ugello della pressa che va in battuta sulla boccola di iniezione dello stampo: si ha il rischio che possa generare una forza sufficiente a "impaccare" l'intero sistema e invalidare i risultati delle prove.

È stato quindi progettato un nuovo sistema di iniezione che permetta di scaricare la forza della pressa sulle piastre dello stampo e non sul distributore, disaccoppiando l'ugello pressa dalla boccola di iniezione (**Figura 5.25**).

Per collegare l'ugello della pressa con la boccola è stato inserito il giunto telescopico RD180013-301 (**Figura 5.26**). Si tratta dell'ugello *Meusburger E16015 - 12x36 - 3.5* opportunamente modificato. È stata realizzata una sede per un anello elastico (tipo seeger) e delle scanalature esterne sulla punta per compensare la dilatazione assiale del pezzo durante il riscaldamento e favorire quella radiale in fase di iniezione. In questo modo si è in grado di garantire pressioni di contatto elevate e quindi una sufficiente tenuta con la boccola durante lo stampaggio.

Il giunto appoggia sull'anello di centraggio RD180013-302 (**Figura 5.27**) e può scorrere all'interno della boccola di iniezione RD180013-303 (con un foro per la decompressione di diametro 12 mm e profondità 18 mm). Tra boccola e anello c'è una luce di 2,65 mm per evitare che i pezzi possano andare in contatto in seguito alla dilatazione termica dei componenti.

Con questa soluzione la forza dell'ugello pressa viene interamente scaricata sull'anello di centraggio e quindi sulla piastra di supporto superiore dello stampo. A questo punto gli unici elementi in grado di contrastare le dilatazioni e la pressione del polimero sono le “viti anti-leakage”.

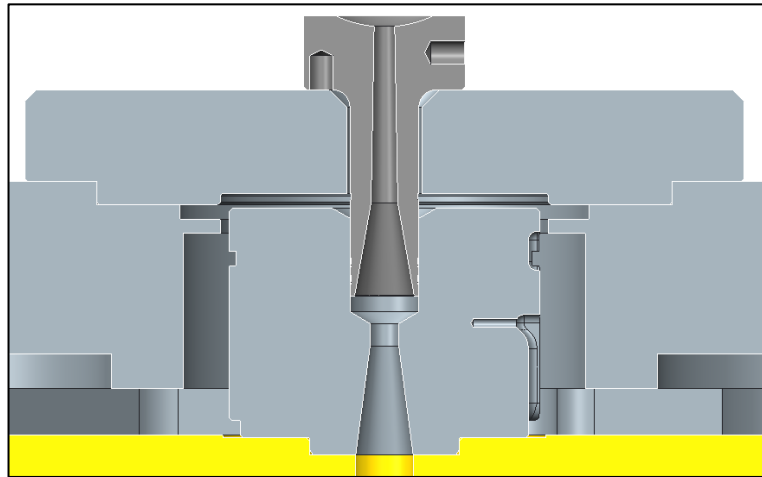


Figura 5.25 – Sistema di iniezione con ugello pressa disaccoppiato dalla boccola di iniezione della camera calda.

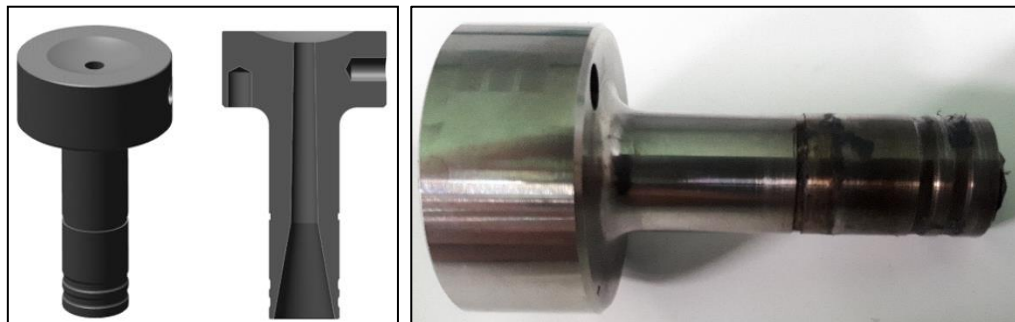


Figura 5.26 – Giunto RD180013-301: disegno CAD e pezzo finito.

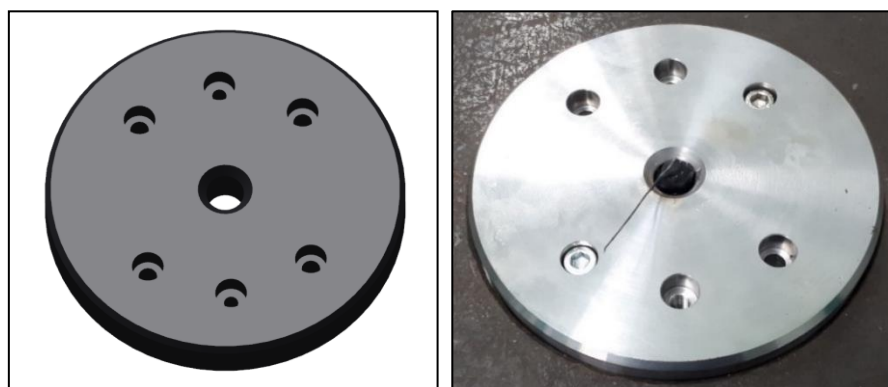


Figura 5.27 – Anello di centraggio RD180013-302: disegno CAD e pezzo finito.

5.4.3. Test in macchina: quattro viti per ugello

In questa prova il sistema è stato montato sulla pressa con l'obiettivo di verificare perdite di plastica, improntamento delle teste degli ugelli sulla piastra porta iniettori e tenuta delle viti durante la fase di stampaggio. Sono state utilizzate teste con superficie ridotta.

Innanzitutto, è stata misurata la rugosità di distributore e teste degli ugelli (**Tabella 5.11**). Un elenco riepilogativo sulle definizioni dei vari tipi di rugosità è riportato in **Figura 5.28**.

Tabella 5.11 – Misurazione delle rugosità sulle teste degli ugelli e sulla faccia inferiore del distributore.

Superficie	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]	R_p [μm]	R_t [μm]
Testa dell'ugello A	0,216	0,275	1,566	0,630	2,000
Testa dell'ugello B	0,183	0,237	1,570	0,513	2,244
Superficie della camera calda A	0,262	0,345	2,473	1,230	3,012
Superficie della camera calda B	0,302	0,404	3,018	1,509	4,330

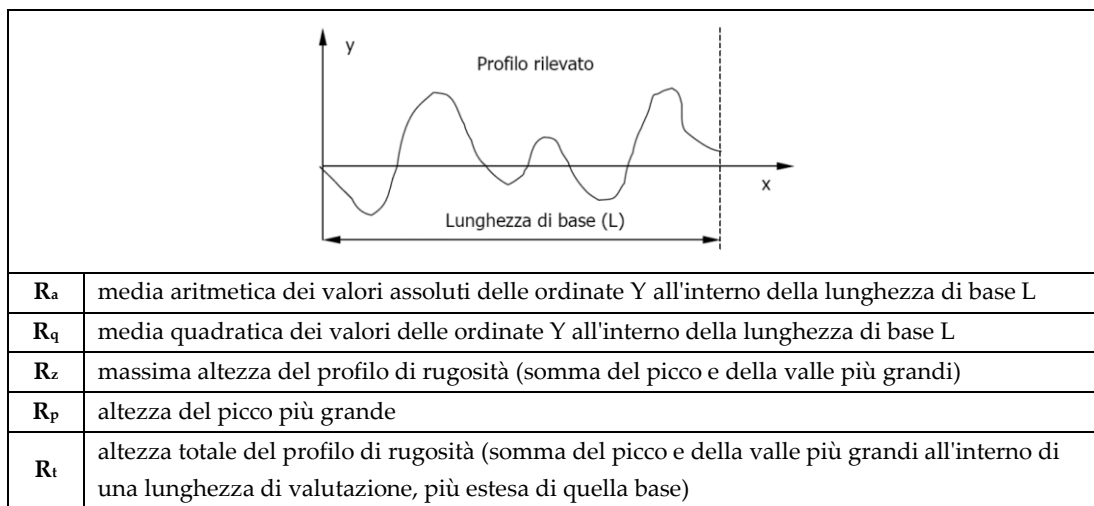


Figura 5.28 – Riepilogo delle differenti misure di rugosità.

L'iter per tutti i test in macchina sarà il seguente:

1. se necessario, all'inizio di ogni prova rettificare la faccia inferiore del distributore;
2. utilizzare nuove viti M8x110 classe 12.9;
3. numerare e misurare la lunghezza delle viti;
4. assemblare il sistema con due o quattro viti per ugello con la coppia di serraggio desiderata (lubrificare con grasso filetto e sottotesta delle viti);
5. montare lo stampo sulla pressa;

6. utilizzare come materiale polipropilene nero superfluido iniettato a 200 MPa e alla temperatura di 300°C;
7. avviare la prova 5 minuti dopo il raggiungimento della temperatura di lavoro (camera calda a 300°C, temperatura della boccola di iniezione a 250°C) e stampare per almeno un'ora;
8. lasciare raffreddare lo stampo ed eseguire una prova di ripartenza nelle stesse condizioni;
9. lasciare raffreddare il sistema e smontarlo dalla pressa;
10. verificare la presenza di perdite e controllare macchie di plastica e improntamenti della testa degli ugelli;
11. misurare la coppia di svitamento delle viti con lo strumento USAG;
12. misurare la lunghezza delle viti.

In questa prima prova sono state impiegate quattro viti per ugello serrate con una coppia di 35 Nm. La pressione iniziale di contatto è di 640 MPa.

In **Tabella 5.12** sono riportate le misurazioni effettuate. Non si sono verificate perdite di materiale e l'improntamento delle teste degli ugelli sulle boccole porta iniettori è inesistente, eccetto che per piccoli graffi.

Tabella 5.12 – Lunghezza e coppia di svitamento delle viti durante il test in macchina con quattro viti per ugello serrate a 35 Nm.

Serraggio di 35 Nm			
Numero vite	Lunghezza vite inizio prova [mm]	Lunghezza vite termine prova [mm]	Coppia di svitamento [Nm]
1	110,20	110,22	34,4
2	110,24	110,25	38,0
3	110,27	110,30	33,7
4	110,08	110,10	33,7
5	110,08	110,07	35,0
6	110,28	110,29	36,4
7	110,14	110,18	29,7
8	110,23	110,23	34,7
Media	110,19	110,21	34,5

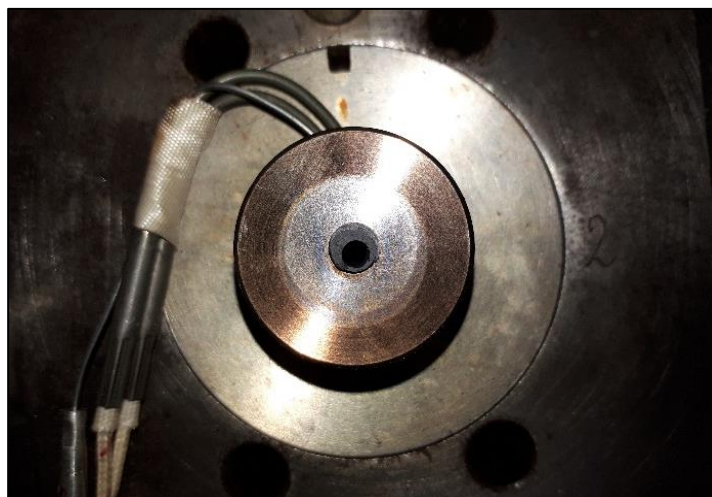


Figura 5.29 – Testa dell’ugello B al termine della prova in macchina con quattro viti.

5.4.4. Test in macchina: due viti per ugello

Le prove sono state ripetute utilizzando due viti per ugello e coppie di serraggio decrescenti (22, 14 e 7 Nm).

Nelle tabelle e figure seguenti sono mostrati i risultati dei tre test:

- **PROVA A:** due viti serrate a 22 Nm secondo la classe di resistenza 8.8 (pressione di contatto iniziale di 200 MPa);
- **PROVA B:** due viti serrate a 14 Nm secondo la classe di resistenza 5.8 (pressione di contatto iniziale di 130 MPa);
- **PROVA C:** due viti serrate a 7 Nm (pressione di contatto iniziale di 65 MPa).

Un test con viti bloccate con una coppia di 35 Nm non è stato svolto perché dalle simulazioni FEM risulta essere una situazione che non presenta criticità e simile alla prova precedente.

Nella prima prova non si sono osservate perdite e la zona tra camera calda e ugello è pulita (**Figura 5.30**). Le viti non si sono snervate.

Tabella 5.13 – Lunghezza e coppia di svitamento delle viti durante il test in macchina con due viti per ugello serrate a 22 Nm.

PROVA A – serraggio di 22 Nm			
Numero viti	Lunghezza vite inizio prova [mm]	Lunghezza vite termine prova [mm]	Coppia di svitamento [Nm]
1	109,76	109,77	20,6
2	110,03	110,06	24,1
3	109,98	110,00	11,6
4	109,95	109,95	11,7
Media	109,93	109,95	21,2



Figura 5.30 – Impronta sulla superficie della camera calda in corrispondenza dell’ugello B al termine della prima prova con due viti: non si notano graffi o macchie di plastica intorno al canale di colata.

Anche al termine della seconda prova non si sono evidenziati improntamenti, graffi o perdite ma solo delle piccole macchie nere lasciate dalla frazione gassosa del polimero (**Figura 5.31** e **Figura 5.32**).

Tabella 5.14 – Lunghezza e coppia di svitamento delle viti durante il test in macchina con due viti per ugello serrate a 14 Nm.

PROVA B – serraggio di 14 Nm			
Numero vite	Lunghezza vite inizio prova [mm]	Lunghezza vite termine prova [mm]	Coppia di svitamento [Nm]
1	109,93	109,94	15,3
2	109,98	109,96	14,2
3	109,93	109,94	11,7
4	110,02	110,00	11,5
Media	109,97	109,96	13,2



Figura 5.31 – Impronta sulla superficie della camera calda in corrispondenza dell’ugello A al termine della seconda prova: si osservano delle macchie nere causate dalla frazione gassosa del polimero.

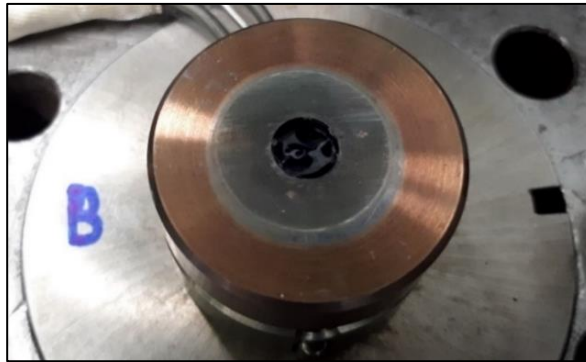


Figura 5.32 – Testa dell'ugello B al termine della seconda prova.

Dopo l'ultima prova, pur non essendoci state delle vere e proprie perdite, si sono osservati dei primi trafilamenti di polimero ed evidenti macchie lasciate dai gas del materiale iniettato tra la testa e la camera calda (**Figura 5.33**). Questo significa che si è in una situazione limite: continuando a stampare, sempre più plastica si depositerà tra ugello e distributore fino ad arrivare a una condizione di reale perdita del sistema.

Tabella 5.15 – Lunghezza e coppia di svitamento delle viti durante il test in macchina con due viti per ugello serrate a 7 Nm.

PROVA C – serraggio di 7 Nm			
Numero vite	Lunghezza vite inizio prova [mm]	Lunghezza vite termine prova [mm]	Coppia di svitamento [Nm]
1	110,35	110,33	- (*)
2	110,42	110,39	7,6
3	110,05	110,06	5,3
4	110,45	110,45	7,4
Media	110,32	110,31	6,8

(*) misurazione non rilevata per errata impostazione dello strumento di misura

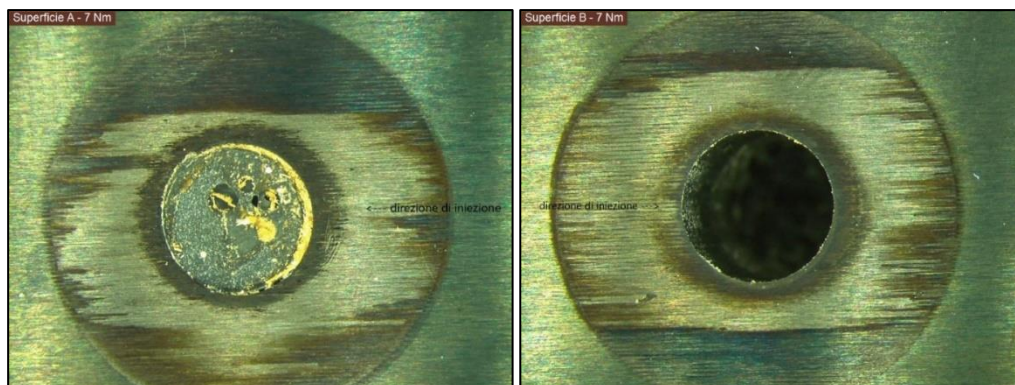


Figura 5.33 – Impronte fotografate al microscopio ottico sulla superficie della camera calda in corrispondenza dell'ugello A (sinistra) e dell'ugello B (destra) al termine della terza prova.

Non sono state eseguite prove con coppie di serraggio inferiori.

5.4.5. Test in macchina: aumento della superficie di contatto

Terminata la prima fase di testing, le teste degli ugelli con superficie ridotta sono state sostituite con teste base come simulato nel **Paragrafo 5.2.3**. L'area di contatto con la camera calda aumenta da 160 mm² a 286 mm² (si ha un incremento del 79%).

Sono state eseguite prove con due viti per ugello serrate con coppie di 14 e 7 Nm. La pressione iniziale di contatto è rispettivamente di 72 e 36 MPa.

In **Tabella 5.16** sono mostrati i risultati del primo test. Non ci sono state perdite e le macchie di polipropilene tra ugello e camera calda sono simili a quanto osservato nel caso C della prova con due viti e teste con area ridotta (in quella situazione la pressione iniziale era di 65 MPa).

Tabella 5.16 – Lunghezza e coppia di svitamento delle viti durante il test in macchina con ugelli con teste senza superficie ridotta e viti serrate a 14 Nm (non è stata misurata la lunghezza delle viti al termine della prova perché usate per la prova successiva).

Testa base e serraggio di 14 Nm			
Numero vite	Lunghezza vite inizio prova [mm]	Lunghezza vite termine prova [mm]	Coppia di svitamento [Nm]
1	110,27	-	13,0
2	110,26	-	11,8
3	110,25	-	16,7
4	110,26	-	12,8
Media	110,26	-	13,6



Figura 5.34 – Impronte sulla superficie del distributore in corrispondenza dell'ugello A (destra) e B (sinistra) al termine della prima prova con teste senza superficie ridotta: si notano delle macchie nere lasciate dai gas intorno al canale di colata.

In **Tabella 5.17** sono riportati i dati relativi alla seconda prova. Le viti tra i due test non sono state sostituite.

C'è stata una perdita di plastica tra la boccola di iniezione e il distributore (**Figura 5.35**).

Tabella 5.17 – Lunghezza e coppia di svitamento delle viti durante il test in macchina con ugelli con teste standard e viti serrate a 7 Nm.

Testa base e serraggio di 7 Nm			
Numero vite	Lunghezza vite inizio prova [mm]	Lunghezza vite termine prova [mm]	Coppia di svitamento [Nm]
1	110,27	110,30	6,1
2	110,26	110,24	- (*)
3	110,25	110,26	9,0
4	110,26	110,21	5,8
Media	110,26	110,25	7,0
(*) misurazione non rilevata dallo strumento di misura			



Figura 5.35 – Perdita di materiale tra la boccola di iniezione e il distributore durante la seconda prova con teste senza superficie ridotta; tra le gli ugelli e il distributore non si sono verificate perdite.

5.5. Conclusioni delle prove

I test e le simulazioni svolte fanno riferimento a sistemi che montano ugelli con un diametro della testa di 29 mm.

I risultati ottenuti dalle analisi FEM sono stati abbastanza attendibili e modellare il comportamento delle viti con il comando *Bolt Pretension* ha fornito valori simili ai calcoli eseguiti seguendo le formule presenti nei manuali tecnici.

Il carico che sollecita maggiormente la vite è quello termico. Esso è causato da un diverso profilo termico di vite e distributore, e quindi da una diversa dilatazione dei componenti. Il contributo dato dal materiale iniettato ha un'influenza quasi trascurabile a pressioni anche elevate.

Anche bloccando le viti M8 (classe di resistenza 12.9) con la coppia di serraggio tipica della classe 10.9 per avere un maggiore margine di sicurezza, si giunge ugualmente in prossimità del limite di snervamento del materiale. Per non incorrere in possibili rotture o stiramenti e avere un coefficiente di sicurezza superiore all'unità, è consigliabile serrare le viti con una coppia minore, come per esempio quella della classe di resistenza 8.8.

Dalle simulazioni eseguite nel **Capitolo 4** è stato stimato che la pressione minima di contatto tra la testa e la camera calda nei sistemi con solo rondelle di contrasto e senza viti si aggira su 60 MPa nella zona interna e 200 MPa esternamente. La pressione media è invece di circa 190 MPa. Questo valore si riferisce a ugelli con teste senza superficie ridotta.

È interessante confrontare questi valori con quanto calcolato in questi paragrafi. Impiegare teste degli ugelli con superficie ridotta (con un'area di contatto quasi della metà) migliora la tenuta del sistema garantendo pressioni di contatto più elevate. In queste simulazioni si è passato da una pressione media di 606 MPa per un sistema con quattro viti per ugello (coppia di serraggio di 35 Nm) fino ai 135 MPa nel caso di due viti per ugello serrate con una coppia di 7 Nm. In questo ultimo caso, utilizzando una testa senza area ridotta la pressione media si riduce a 79 MPa, valore molto inferiore di quello generalmente agente nei sistemi con rondelle di contrasto.

In tutte le prove effettuate non si sono mai riscontrate vere e proprie perdite all'interfaccia tra ugello e camera calda, eccetto che macchie e fuoriuscite di gas con coppie di serraggio inferiori ai 15 Nm. Anche i segni di improntamento sulle boccole porta iniettori e sui distributori sono quasi inesistenti. Le viti non si sono mai stirate o allentate. Condizione limite sotto cui non scendere è utilizzare coppie di 7 Nm per teste con area ridotta e 14 Nm per teste con area base. I risultati sono riepilogati nel **Grafico 5.1**.

L'impiego di quattro viti M8 per ogni ugello è eccessivo, in quanto si raggiungono pressioni di contatto sulla testa fin troppo elevate. Per ugello sono sufficienti una o due viti disposte in maniera tale da creare una distribuzione delle pressioni di contatto più uniforme possibile. Questo dipende però fortemente dalla geometria, dimensioni e numero di punti di iniezione del sistema considerato.

Uno sviluppo futuro di questo lavoro potrebbe essere quella di cambiare il polimero iniettato, sostituendo il polipropilene superfluido con PA66.

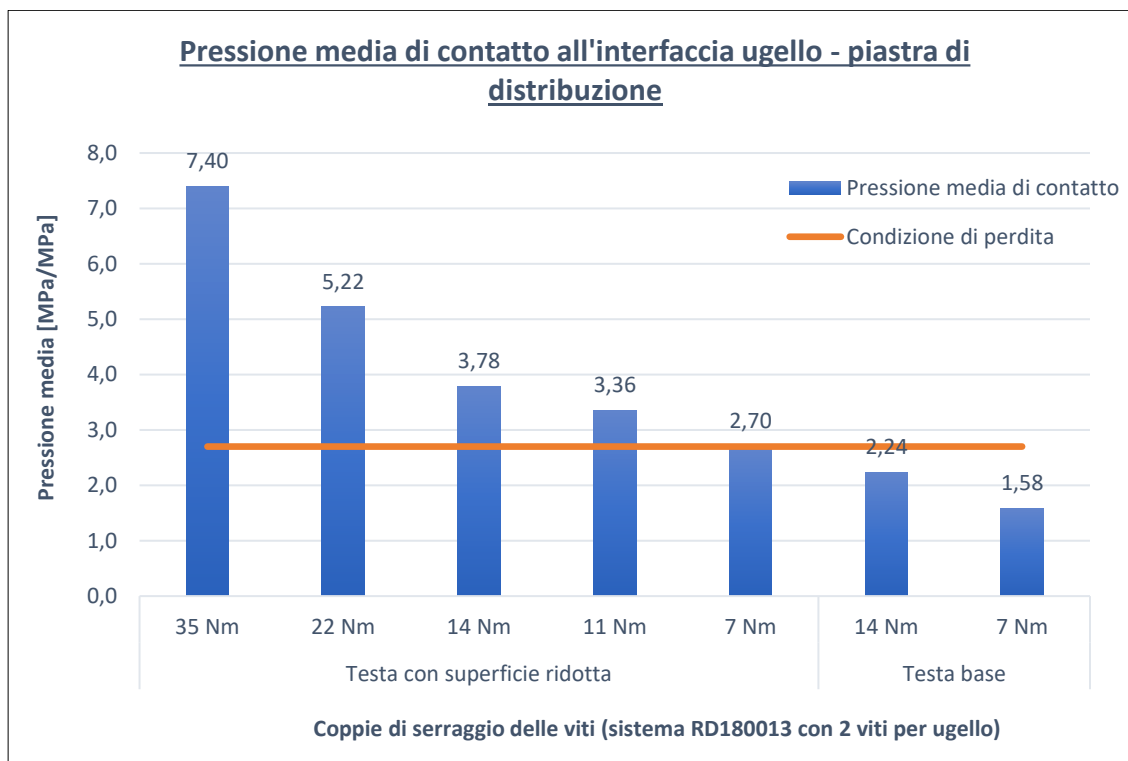


Grafico 5.1 – Pressione media di contatto all’interfaccia tra ugello e camera calda nelle prove e simulazioni svolte in funzione dell’area di contatto e delle coppie di serraggio delle viti (i dati sono riferiti a sistemi con due viti per ugello e sono stati normalizzati rispetto al valore di riferimento).

Capitolo 6

Effetto combinato di viti “anti-leakage” e rondelle di contrasto

In questo ultimo capitolo si vuole analizzare l’effetto combinato delle “viti anti-leakage” con le rondelle di contrasto analizzate nella **Sezione 4.1**, quindi valutare come la presenza di entrambe possa influire sulla tenuta del sistema e sulle forze esercitate sulle teste degli ugelli.

Lo studio è stato svolto solo con analisi FEM e non sono previste prove sperimentali.

A tale scopo si prenderà come riferimento il sistema RD180013 già utilizzato nel capitolo precedente. Il sistema sarà opportunamente modificato aggiungendo le rondelle di contrasto e le piastre dello stampo mancanti.

6.1. Geometria e analisi FEM

Per la geometria originale del sistema RD180013 si faccia riferimento alla **Sezione 5.1**. Come già descritto, è composto da una camera calda a due punti di iniezione con interasse di 160 mm e presenta due ugelli a rasamento con diametro esterno di 29 mm. Sono inserite solo due viti per ogni ugello (quelle più esterne) e sono utilizzate teste senza superficie di contatto ridotta.

Rispetto al caso precedente, sono state apportate alcune modifiche tramite CAD:

- è stato disegnato e aggiunto il regolo e la piastra di supporto superiore;
- sono state inserite due rondelle di contrasto in acciaio W.Nr.1.2344;
- è stata abbassata la lamatura della piastra di distribuzione ed eliminate le rondelle piane per evitare che la testa delle viti possa andare in contatto con la piastra dello stampo in seguito al riscaldamento del sistema.

È progettato per lavorare con una differenza di temperatura di 200°C ($T_{\text{stampo}} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{materiale}} = 240^{\circ}\text{C}$). Lo spessore del distributore è di 52 mm, l’altezza della testa degli ugelli 20 mm, le rondelle di contrasto sono alte 6 mm. Inoltre, le teste degli ugelli non appoggiano direttamente sulla piastra porta iniettori, ma su due boccole incassate in essa e che fuoriescono per 2 mm. Secondo la formula (4.1) l’altezza del regolo è così calcolata:

$$H' = (52 + 20 + 6) + (52 + 20 + 6) \cdot 200 \cdot 0,0000125 - 0,05 = 78,145 \text{ mm}$$

Sommando i 2 mm delle boccole si arriva a una altezza complessiva del regolo di 80,145 mm. La superficie di contatto tra rondella di contrasto e piastra superiore dello stampo è di 92 mm², mentre tra testa dell'ugello e camera calda è di 286 mm². In **Figura 6.1** è mostrato l'assieme modificato.

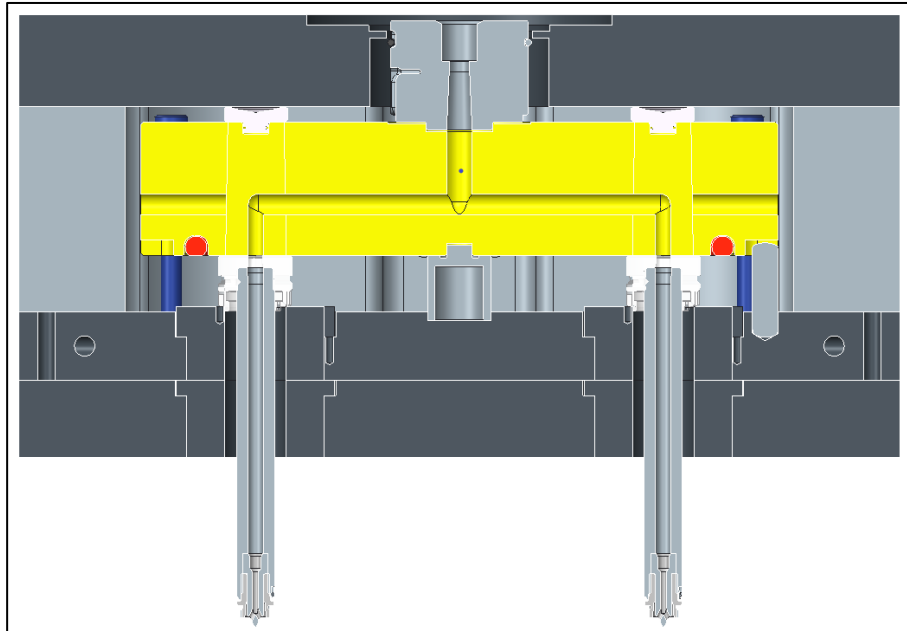


Figura 6.1 – Vista in sezione del sistema RD180013 modificato con viti M8 “anti-leakage” e rondelle di contrasto in W.Nr.1.2344 disposte sopra a ogni ugello.

Le analisi termiche e strutturali sono state impostate come nei precedenti capitoli.

In **Figura 6.2** sono illustrate le condizioni al contorno utilizzate per l'analisi termica. Data la doppia simmetria, è stato sufficiente simulare solo un quarto del sistema.

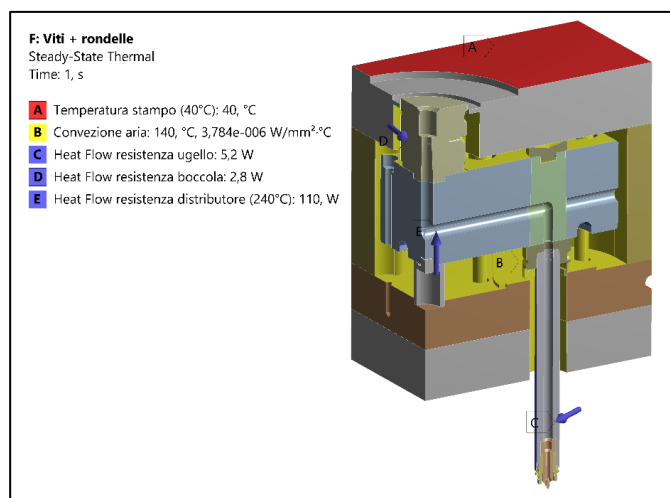


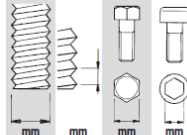
Figura 6.2 – Sistema RD180013 modificato: condizioni al contorno per l'analisi termica.

Nell'analisi strutturale i carichi sono stati suddivisi in quattro step:

1. chiusura delle viti utilizzando il comando *Bolt Pretension (Load)*;
2. bloccaggio delle viti (*Lock*) e applicazione del carico termico;
3. viti bloccate e applicazione di una pressione di 200 MPa all'interno dei canali per valutare l'effetto combinato di viti e rondelle di contrasto;
4. sbloccaggio delle viti (*Open*) per determinare l'effetto delle sole rondelle.

Le viti sono serrate con una coppia di 34 Nm, corrispondente alla classe di resistenza 10.9 e a un precarico di 22388 N (è stato ipotizzato un coefficiente di attrito medio su vite e madrevite di 0,15). Questi valori sono tratti dalla tabella tecnica USAG (**Figura 6.3**), che a differenza di quella usata per le prove del capitolo precedente riporta anche i valori di precarico.

Le condizioni al contorno sono mostrate in **Figura 6.4**.

				8,8				10,9				12,9			
	mm	mm	mm	coefficiente d'attrito 0,10		coefficiente d'attrito 0,15		coefficiente d'attrito 0,20		coefficiente d'attrito 0,10		coefficiente d'attrito 0,15		coefficiente d'attrito 0,20	
				Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm
M 3	0,5	5,5	2,5	2298	0,95	2075	1,21	1866	1,41	3376	1,4	3048	1,79	2740	2,07
M 4	0,7	7	3	3985	2,2	3594	2,78	3230	3,22	5853	3,23	5279	4,09	4744	4,74
M 5	0,8	8	4	6514	4,34	5886	5,5	5293	6,4	9568	6,3	8645	8,1	7774	9,4
M 6	1	10	5	9195	7,5	8302	9,5	7464	11,1	13506	11	12194	14	10962	16,3
M 8	1,25	13	6	16863	18,2	15242	23	13710	27	24768	26	22388	34	20137	39
M 10	1,5	16	8	26838	36	24275	46	21843	53	39418	52	35655	67	32082	78
M 12	1,75	18	10	39119	62	35401	79	31860	92	57457	91	51995	116	46795	136
M 14	2	21	12	63707	99	48618	127	43763	140	78882	145	71408	187	64277	218

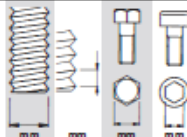
				4,8				5,8				6,8			
	mm	mm	mm	coefficiente d'attrito 0,10		coefficiente d'attrito 0,15		coefficiente d'attrito 0,20		coefficiente d'attrito 0,10		coefficiente d'attrito 0,15		coefficiente d'attrito 0,20	
				Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm	Precarico N	Coppia di serraggio Nm
M 3	0,5	5,5	2,5	1221	0,5	1102	0,64	991	0,75	1608	0,62	1362	0,8	1234	0,92
M 4	0,7	7	3	2117	1,17	1909	1,48	1716	1,71	2615	1,44	2359	1,83	2120	2,11
M 5	0,8	8	4	3460	2,3	3126	2,93	2812	3,4	4275	2,85	3902	3,62	3473	4,2
M 6	1	10	5	4885	4,01	4410	5	3965	5,9	6034	4,95	5448	6,2	4898	7,2
M 8	1,25	13	6	8968	9,7	8097	12,3	7283	14,3	11066	11,9	10003	15,2	8997	17,7
M 10	1,5	16	8	14257	19,1	12966	24	11604	28	17612	23	15930	30	14334	35
M 12	1,75	18	10	20782	33	18806	42	16925	49	25672	40	23231	52	20908	60
M 14	2	21	12	28632	52	25829	67	23349	78	36245	65	31905	83	28719	97

Figura 6.3 – Coppie di serraggio e precarico per filettature metriche a passo grosso secondo USAG.

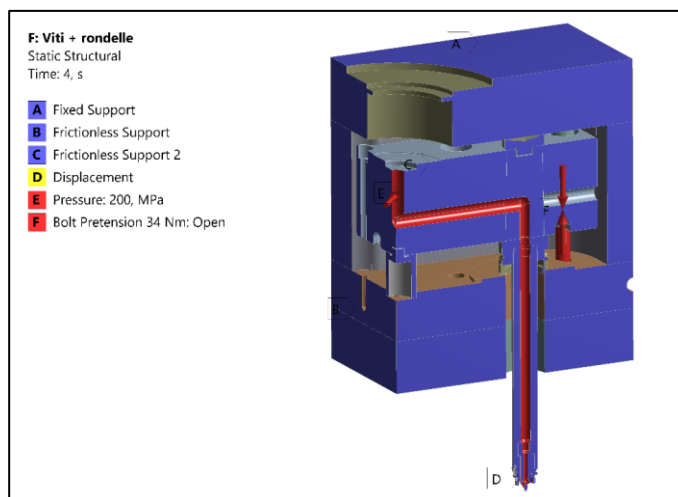


Figura 6.4 – Sistema RD180013 modificato: condizioni al contorno per l'analisi strutturale.

6.2. Risultati delle simulazioni

In questo paragrafo sono riportati gli esiti della simulazione. In **Figura 6.5** e **Figura 6.6** sono mostrati i risultati ottenuti al termine del terzo step. Si è considerato quindi l'effetto combinato di viti e rondelle di contrasto.

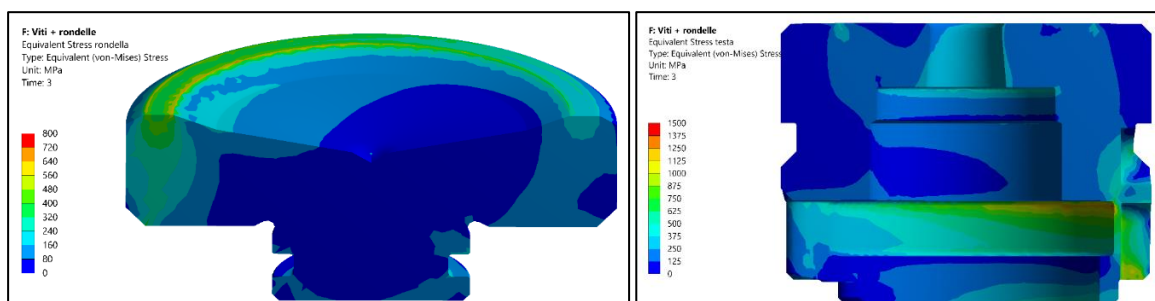


Figura 6.5 – Sistema RD180013 modificato: tensioni equivalenti secondo Von Mises sulla rondella di contrasto (a sinistra) e sulla testa dell'ugello (a destra) al termine dello step 3.

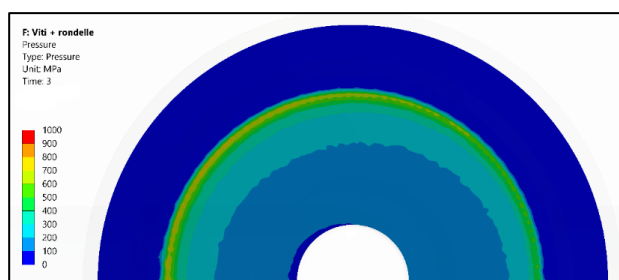


Figura 6.6 – Sistema RD180013 modificato: distribuzione delle pressioni di contatto all'interfaccia tra ugello e camera calda al termine dello step 3.

Le tensioni massime sulla rondella di contrasto (350 MPa) e sulla testa dell'ugello (1050 MPa) sono ampiamente inferiori del limite di snervamento del materiale ($R_{p02} = 1520$ MPa). La testa non è quindi soggetta a carichi che potrebbero danneggiarla.

In **Figura 6.7** e in **Figura 6.8** sono illustrati i risultati al termine del quarto step. È stato valutato quindi il comportamento del sistema dopo aver eliminato il tiro impresso dalle viti. Anche in questo caso le tensioni massime sono inferiori al limite consentito.

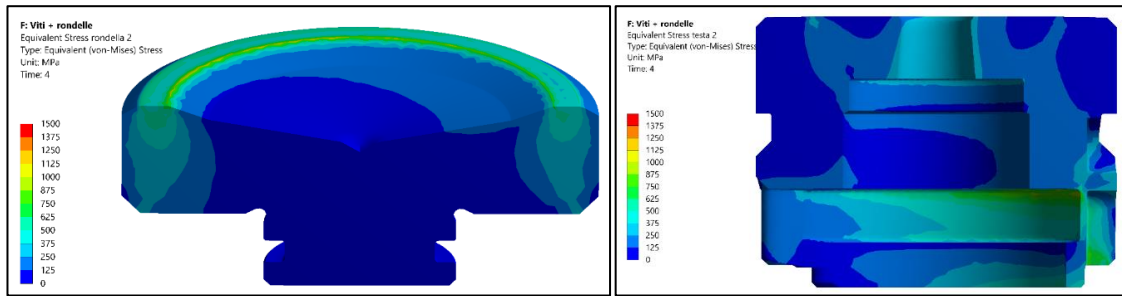


Figura 6.7 – Sistema RD180013 modificato: tensioni equivalenti secondo Von Mises sulla rondella di contrasto (a sinistra) e sulla testa dell'ugello (a destra) al termine dello step 4.

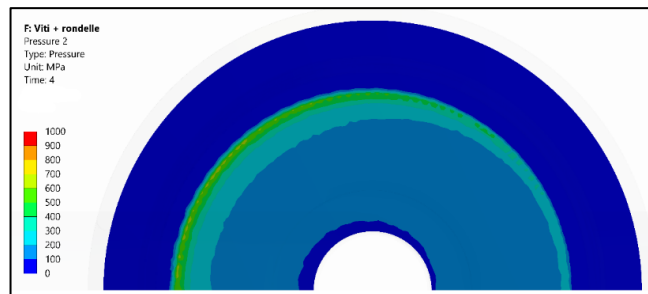


Figura 6.8 – Sistema RD180013 modificato: distribuzione delle pressioni di contatto all'interfaccia tra ugello e camera calda al termine dello step 4.

In **Tabella 6.1** è presentato il confronto tra il terzo e il quarto step, ovvero considerando l'effetto combinato di rondelle di contrasto e viti e poi solo delle rondelle. Le forze sono state valutate lungo la componente verticale (asse Y rivolto verso l'alto). Forze e pressioni sono state normalizzate rispetto ai valori di riferimento.

In **Figura 6.9** si può osservare come, dopo aver eliminato il tiro delle viti, si ha una notevole riduzione della forza di contatto sulle teste degli ugelli del 35%. Allo stesso tempo la forza sulle rondelle di contrasto aumenta del 60% (**Figura 6.10**).

Tabella 6.1 – Sistema RD180013 modificato: confronto dei risultati al termine degli step 3 e 4 (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

	Step 3 (viti + rondelle)	Step 4 (solo rondelle)
F rondella [N/N]	1,44	2,78
p_c media rondella [MPa/MPa]	7,86	15,10
F testa [N/N]	3,01	2,23
p_c media testa [MPa/MPa]	5,26	3,90
p_c minima corona interna [MPa/MPa]	1,50	1,50
p_c minima corona esterna [MPa/MPa]	8,40	5,10

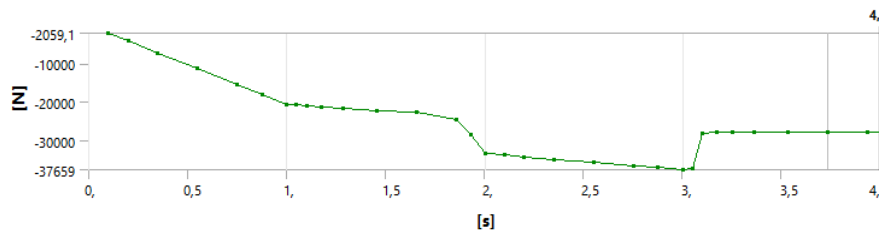


Figura 6.9 – Sistema RD180013 modificato: andamento della forza di contatto sulla testa dell'ugello.

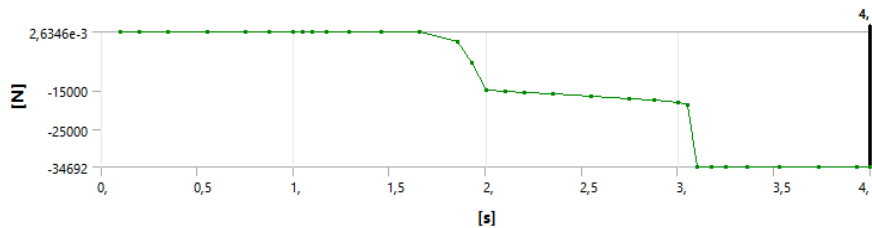


Figura 6.10 – Sistema RD180013 modificato: andamento della forza di contatto sulla rondella di contrasto.

6.3. Variazione della coppia di serraggio delle viti

La stessa simulazione è stata ripetuta variando la coppia di serraggio delle viti per valutare come questa influenzi le forze in gioco. Da 34 Nm si è sceso a 23 (secondo la classe di resistenza 8.8) e a 15 Nm (classe 5.8). Il precarico iniziale è rispettivamente di 15242 N e 10003 N.

In **Tabella 6.2** sono riportate solo le forze di contatto al termine degli ultimi due step e il loro incremento/decremento in forma percentuale.

I valori ottenuti sono molto simili anche variando la coppia di serraggio delle viti. Eliminando l'effetto delle viti si ha un incremento della forza agente sulla rondella di contrasto e una diminuzione di quella sulla testa dell'ugello.

Si può generalizzare affermando che utilizzando viti “anti-leakage” in aggiunta alle rondelle di contrasto si ha:

- un aumento della forza agente sulla testa dell'ugello pari al 43% del precarico iniziale della vite (**Tabella 6.3**);
- una diminuzione della forza agente sulle rondelle di contrasto pari al 78% del precarico iniziale della vite (**Tabella 6.4**).

Tabella 6.2 – Sistema RD180013 modificato: variazione delle forze di contatto sulla rondella di contrasto e sulla testa dell'ugello in funzione della coppia di serraggio delle viti (risultati normalizzati rispetto ai valori di riferimento).

	Serraggio di 15 Nm			Serraggio di 23 Nm			Serraggio di 34 Nm		
	Step 3	Step 4	Var.	Step 3	Step 4	Var.	Step 3	Step 4	Var.
F rondella [N/N]	2,17	2,80	+29%	1,86	2,79	+50%	1,44	2,78	+92%
F testa [N/N]	2,58	2,21	-14%	2,76	2,21	-20%	3,01	2,23	-26%

Tabella 6.3 – Sistema RD180013 modificato: variazione della forza di contatto tra il terzo e il quarto step sulla testa dell'ugello rispetto al precarico iniziale delle viti (variazione media -43%).

	Serraggio di 15 Nm	Serraggio di 23 Nm	Serraggio di 34 Nm
Precarico vite [N]	10003	15242	22388
Precarico totale [N]	20006	30484	44766
ΔF testa tra step 3 e 4 [N]	-9202	-13720	-19598
ΔF testa / precarico totale	-46%	-45%	-44%

Tabella 6.4 – Sistema RD180013 modificato: variazione della forza di contatto tra il terzo e il quarto step sulla rondella di contrasto rispetto al precarico iniziale delle viti (variazione media +78%).

	Serraggio di 15 Nm	Serraggio di 23 Nm	Serraggio di 34 Nm
Precarico vite [N]	10003	15242	22388
Precarico totale [N]	20006	30484	44766
ΔF rondella tra step 3 e 4 [N]	+15850	+23280	+33292
ΔF rondella / precarico totale	+79%	+76%	+74%

I componenti non arrivano mai nelle condizioni di snervamento.

Nei seguenti grafici sono diagrammati gli andamenti delle forze e delle pressioni di contatto lungo tutti gli step:

- step 1: forze determinate dal solo serraggio delle viti in fase di montaggio; a temperatura ambiente c'è luce tra la rondella di contrasto e la piastra superiore dello stampo e infatti la forza agente sulla rondella è nulla;

- step 2: riscaldamento del sistema ed effetto dell'espansione termica, la rondella di contrasto va in battuta con la piastra; è il momento in cui si ha il più elevato aumento delle forze presenti;
- step 3: iniezione del materiale a 200 MPa, si nota un leggero incremento delle forze in gioco (si valuta l'effetto combinato di viti e rondelle);
- step 4: soppressione delle viti ed effetto delle sole rondelle di contrasto.

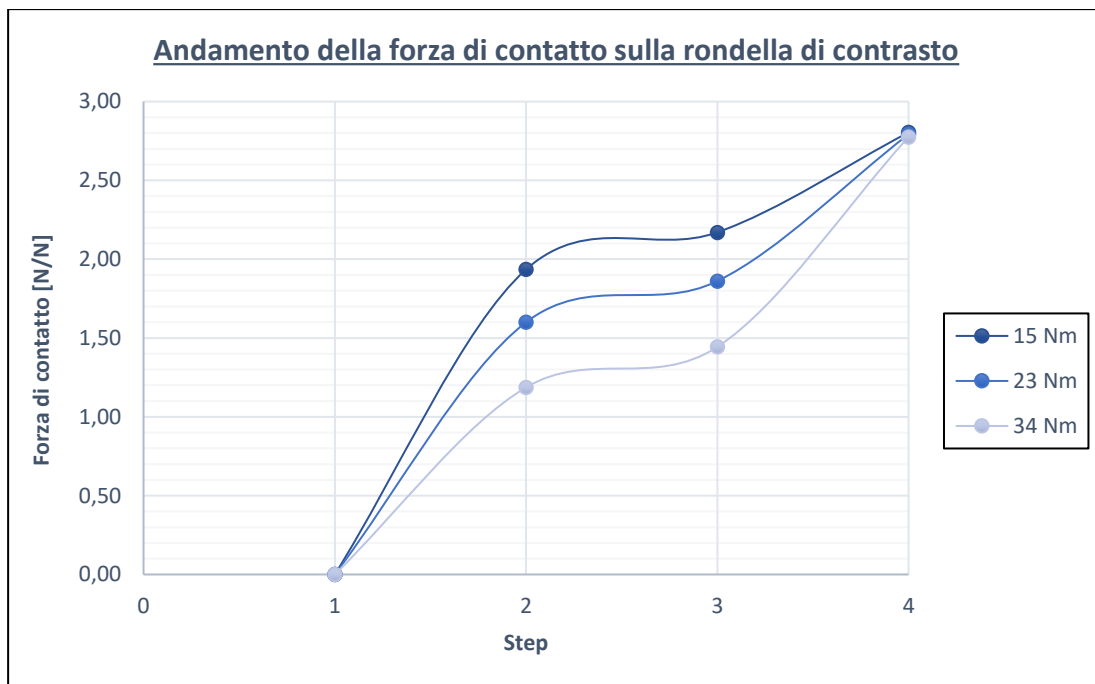


Grafico 6.1 – Sistema RD180013 modificato: variazione della forza di contatto sulla rondella di contrasto in funzione della coppia di serraggio (dati normalizzati rispetto al valore di riferimento).

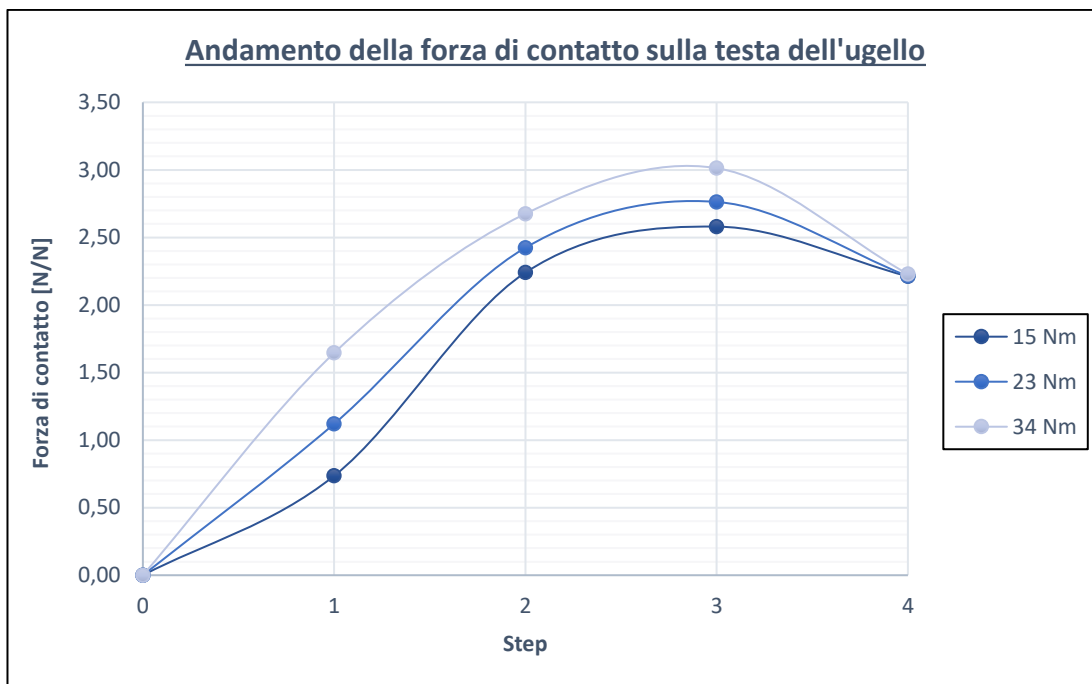


Grafico 6.2 – Sistema RD180013 modificato: variazione della forza di contatto sulla testa dell'ugello in funzione della coppia di serraggio (dati normalizzati rispetto al valore di riferimento).

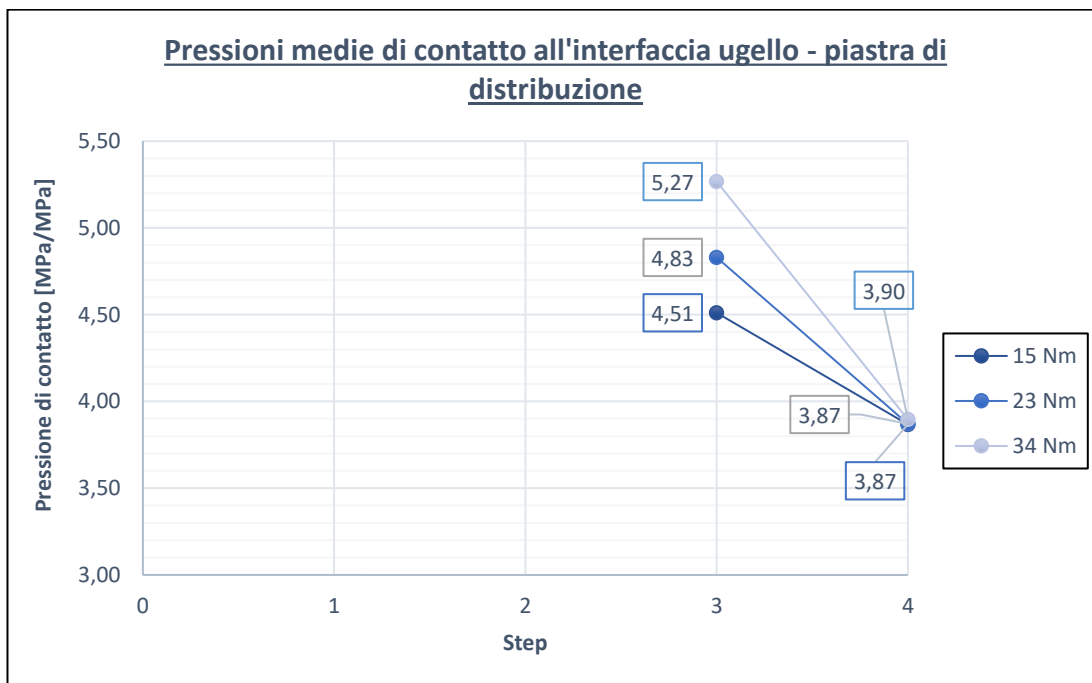


Grafico 6.3 – Sistema RD180013 modificato: variazione e indicazione delle pressioni medie di contatto sulla testa dell'ugello in funzione della coppia di serraggio negli ultimi due step (dati normalizzati rispetto al valore di riferimento).

Capitolo 7

Conclusioni

Lo scopo che si è posto questa tesi è quello di analizzare le interfacce tra ugello e piastra di distribuzione nei sistemi di iniezione a canale caldo.

Dopo una breve presentazione della tecnica dello stampaggio a iniezione e dei sistemi di iniezione a camera fredda e camera calda, è stato introdotto il problema delle perdite di plastica in questi ultimi. Queste perdite sono dovute all'iniezione di materiale a pressioni di oltre 200 MPa e all'effetto della dilatazione termica. Si verificano principalmente tra l'ugello e il distributore e possono risultare catastrofiche e riempire di plastica l'intero stampo. L'obiettivo di questo lavoro è stato quindi studiare alcune soluzioni per evitare tale problema.

La tesi è strutturata in tre parti. Nella prima sono stati analizzati e confrontati tre di queste soluzioni proposte da aziende leader nel settore dei sistemi a canale caldo. I calcoli sono stati svolti con analisi termiche e strutturali agli elementi finiti in *Ansys*.

Nel primo sistema (soluzione A) la tenuta viene garantita per mezzo dell'espansione termica della camera calda e dell'utilizzo di rondelle di contrasto posizionate sopra il distributore in corrispondenza di ogni ugello. La pressione di contatto tra ugello e camera risulta molto elevata nella corona esterna e tende a diminuire spostandosi verso l'interno.

Nel secondo sistema analizzato (soluzione B) si ha una distribuzione delle pressioni opposta, ottenuta con una leggera inclinazione della superficie dell'ugello. Inoltre, questa soluzione è indipendente dalle temperature di lavoro per la presenza di un sistema di molle a tazza che garantisce un precarico sull'interfaccia di tenuta anche a temperatura ambiente.

Nella ultima tipologia (soluzione C) l'ugello è avvitato al distributore con due viti ed è presente una rondella di contrasto con la forma particolare a “doppia S” per avere una maggiore deformabilità. Le pressioni sono distribuite in modo omogeneo e uniforme sull'interfaccia.

Nella seconda parte della tesi è stato progettato, realizzato e testato un nuovo sistema. Non sono presenti contrasti e sono state inserite delle viti per fissare la piastra di distribuzione allo stampo. Sono state prima condotte delle simulazioni FEM per valutare numero, posizione e coppia di serraggio delle viti. Le viti sono state quindi verificate staticamente secondo normativa. Infine, per validare i risultati precedentemente ottenuti sono state eseguite delle prove sperimentali iniettando polipropilene superfluido ed eseguendo prove di ripartenza alla pressa.

Due viti per ugello, anche serrate con coppie abbastanza basse, sono sufficiente a evitare perdite. Le viti non si snervano e le teste degli ugelli non subiscono carichi eccessivi e non improntano le piastre dello stampo.

Infine, nella terza sezione è stata valutata una soluzione combinando viti e rondelle di contrasto. Lo studio è stato affrontato solo tramite simulazioni, senza condurre prove in sala testing. Le teste degli ugelli non sono sollecitate da carichi eccessivi e, pur garantendo un'adeguata pressione di contatto, le forze agenti sulle rondelle di contrasto sono nettamente inferiori rispetto alla soluzione originale senza viti.

Questo lavoro non esaurisce ovviamente lo studio e lo sviluppo dei metodi di tenuta tra piastra di distribuzione e ugello nei sistemi a canale caldo. Le soluzioni affrontate dovranno essere ulteriormente testate e soprattutto estese anche a sistemi con ugelli e interassi maggiori o del tipo ad otturazione.

Riferimenti e bibliografia

- [1] C. I. Weir, Introduction to Injection Molding, 1975.
- [2] M. P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 2010.
- [3] G. Bertacchi, Manuale dello stampaggio progettato, 2011.
- [4] J. P. Beaumont, Runner and Gating Design Handbook, 2004.
- [5] MoldMaking Technology, «www.moldmakingtechnology.com/articles/seven-key-advantages-of-hot-runner-systems/,» [Online].
- [6] MoldMaking Technology, «www.moldmakingtechnology.com/articles/how-to-prevent-hot-runner-leaks/,» [Online].
- [7] Husky Injection Molding Systems, «www.husky.co/EN-US/,» [Online].
- [8] Schnorr, Handbook for Disc Springs, 2003.
- [9] M. M. Milacron, «www.milacron.com/it/prodotti/soluzioni-a-camera-calda/,» [Online].
- [10] SimuTech Group, «www.simutechgroup.com/blog/modeling-bolted-connections/,» [Online].
- [11] CAE Associates, «caeai.com/blog/detailed-modeling-threaded-connections/,» [Online].
- [12] Budynas-Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, Eight Edition, 2008.