

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

Confronto e validazione tra software di simulazione di stampaggio ad iniezione termoplastica e dati sperimentali

Relatore

prof. Paolo Minetola

Candidato

Fabio Callari

Anno accademico 2021/2022

RINGRAZIAMENTI

La prima persona che voglio ringraziare è Claudio, il quale mi ha spronato ad intraprendere questa strada di lavoratore - studente. Devo molto a lui per tutto ciò che ho imparato negli anni di lavoro in Olsa, non solo come competenze tecniche ma anche nel modo di affrontare i momenti di difficoltà.

In secondo luogo voglio ringraziare tutti gli amici: Sabrina, Massimiliano, Massimo, Marco, Eugenio, Samuele, Elisabetta, Stefano, Simone, Valeria, Domenico, Michela, Michele, Ivan, Antonio, Fabio e Andrea. Tutti in un modo o nell'altro hanno festeggiato con me i successi e alleviato le sconfitte.

Non posso non citare il T.A.G. che mi ha accolto all'interno del team di lavoro dandomi fiducia nonostante la poca esperienza sul campo.

Ringrazio la famiglia Strampala che mi ha aiutato ad affrontare con leggerezza questi anni.

Un altro ringraziamento alla mia famiglia che mi è sempre stata al fianco dandomi la forza di andare avanti. Grazie mamma, papà e Linda.

Ovviamente l'ultimo ringraziamento va a Serena che ha giocato un ruolo fondamentale in questi anni. Non ha mai smesso di credere in me e di riporre fiducia nelle mie potenzialità, soprattutto nelle scelte che ho preso nei mesi precedenti alla stesura della tesi. Spero un giorno di poter fare lo stesso per lei.

Infine riservo una dedica a chi non potrà leggere questa pagina.

A Piero, Tito, Giuseppina e Gaetano

SOMMARIO

1	CENNI STORICI DEL PROCESSO DI STAMPAGGIO	4
1.1	Scoperta della plastica	4
2	LA PRESSA AD INIEZIONE.....	6
2.1	Classificazione delle presse.....	7
2.2	Specifiche di una pressa.....	8
3	IL PROCESSO DI STAMPAGGIO AD INIEZIONE.....	8
4	POLIMERI	10
4.1	Definizione	10
4.2	Processi chimici per realizzare i polimeri	11
4.3	Morfologia	11
4.4	Ritiro volumetrico	11
5	REOLOGIA	13
5.1	L'esperimento di Newton	13
5.2	Fluidi newtoniani e non newtoniani	15
5.3	Equazioni caratteristiche nei polimeri.....	16
5.4	Caratterizzazione viscosa dei polimeri	19
5.5	Diagramma p-v-T	20
5.6	Il calorimetro differenziale a scansione (DSC)	23
5.7	Ritiro volumetrico	23
6	UMIDITÀ NELLA PLASTICA	24
7	TEOREMA DI REYNOLDS	26
8	EQUAZIONE DELLA CONSERVAZIONE DELLA MASSA.....	32

9	EQUAZIONE DELLA CONSERVAZIONE DELLA QUANTITÀ DI MOTO	36
10	EQUAZIONE DELLA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA	40
11	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	42
11.1	Condizioni al contorno di pressione	44
11.2	Condizioni al contorno di temperatura	45
11.3	Condizioni al contorno di scorrimento	46
12	ANALISI DELL'ATTREZZATURA.....	47
13	OTTIMIZZAZIONE DELLA MESH.....	53
14	IMPOSTAZIONE DEI PARAMETRI DI PROCESSO.....	55
15	INTRODUZIONE AI RISULTATI	57
16	TEMPO DI RIEMPIMENTO.....	57
17	PRESSIONE ALLA COMMUTAZIONE	61
18	PRESSIONE NEL PUNTO DI INIEZIONE.....	62
19	LINEE DI GIUNZIONE.....	63
20	RITIRO VOLUMETRICO MEDIO	64
21	DEFORMAZIONI.....	65
22	CONFRONTO TRA SOFTWARE E MISURAZIONI	67
23	CONCLUSIONI DELLO STUDIO.....	77

I INTRODUZIONE

1 CENNI STORICI DEL PROCESSO DI STAMPAGGIO

La presente tesi affronta lo studio del processo di stampaggio termoplastico, ben noto nella produzione di diversi settori industriali come l'auto motive, il biomedicale, l'industria del bianco, il packaging e molti altri.

Questa tecnologia ha trovato largo impiego grazie alle caratteristiche dei materiali utilizzati nel prodotto finito. A fronte di un peso ridotto (il peso specifico dei polimeri varia da 0,9 a 2,2 g/cm³) le plastiche hanno una discreta durezza, una buona resistenza alle sollecitazioni, sono resilienti e hanno una buona resistenza agli urti. Anche se un materiale avesse delle caratteristiche meccaniche che non soddisfano i requisiti del progetto, queste possono essere migliorate grazie all'utilizzo di additivi (come fibre o sfere di vetro e talco) o unendo due polimeri formando la così detta "lega metallica". Ad esempio il PC e l'ABS formano una lega che ha elevata resistenza agli urti anche a basse temperature, elevata rigidità, basso ritiro, elevata accuratezza dimensionale, resistenza al calore e facile lavorabilità.

1.1 SCOPERTA DELLA PLASTICA

La scoperta di questi materiali ha inizio nel 1869, anno in cui i John Hyatt sviluppa un metodo per creare delle palle da biliardo a partire dal nitrato di cellulosa, conosciuta come celluloide. L'obiettivo di Hyatt era quello di sostituire il costoso e raro avorio nella produzione di tali componenti. La macchina per realizzare queste sfere era costituita da un cilindro, riscaldato dal vapore, che fondeva la celluloide e da un cilindro idraulico che iniettava la plastica nello stampo. Questa può essere considerata la prima bozza di pressa ad iniezione. Attraverso gli anni queste si sono evolute sostituendo le operazioni

manuali con quelle automatizzate, grazie all'aggiunta di controlli elettrici. Circa settanta anni dopo l'invenzione della prima pressa ad iniezione è stata introdotta una vera rivoluzione per queste macchine: la vite punzonante. Prima dell'avvento di questo elemento l'omogeneità del fuso veniva raggiunto con l'aiuto di torpedo nei cilindri di iniezione. Grazie alla vite punzonante si riusciva a raggiungere l'omogeneità desiderata e avere un controllo migliore della quantità di materiale iniettata nello stampo. Inoltre si era riusciti ad aumentare il volume di plastica che si riusciva a fondere nel cilindro e di conseguenza anche le parti che potevano essere realizzate erano più grandi. Con l'introduzione dell'elettronica avanzata nelle presse, queste sono diventate sempre più sofisticate, portando a un miglior controllo del processo. Oggi le presse ad iniezione stanno diventando sempre più complesse e sono capaci di realizzare quasi tutto ciò che un designer può desiderare, dalle parti micro stampate usate in un orologio ai più grandi paraurti delle auto. Le ultime generazioni possono essere connesse a qualunque computer nel mondo grazie ad Internet ed essere monitorate in remoto in qualunque momento. Ciò permette una rapida soluzione dei problemi della macchina e dello stampaggio senza la presenza fisica del tecnologo sul sito produttivo.

2 LA PRESSA AD INIEZIONE

In figura 1 è riportato lo schema di una pressa ad iniezione.

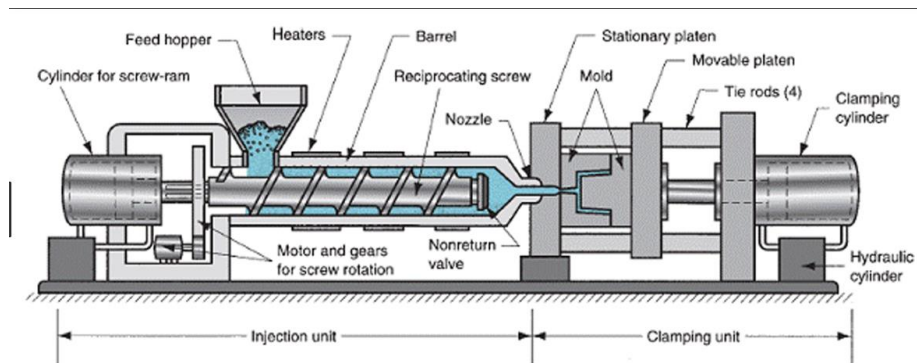


Figura 1 Schema di una pressa ad iniezione

La plastica in granuli viene inserita attraverso la tramoggia (feed hopper) nel cilindro di plastificazione (barrel). Qui i granuli ricevono il calore necessario per raggiungere il punto di fusione grazie:

- all'attrito generato dalla rotazione della vite
- al calore fornito da resistenze elettriche esterne posizionate attorno al cilindro.

La rotazione della vite, oltre a generare calore, accumula il materiale fuso necessario al riempimento della figura in testa al cilindro. Questa plastica viene poi iniettata nello stampo (mold) con il movimento in avanti della vite punzonante (reciprocating screw) e l'aiuto della valvola di non ritorno, che impedisce al materiale fuso di tornare nel cilindro. Il raffreddamento del polimero viene raggiunto nello stampo con l'aiuto di un fluido refrigerante, solitamente acqua o olio, che attraversa degli appositi canali scavati nell'acciaio. Quando il materiale raggiunge la temperatura ideale per poter essere estratto, si può procedere al prelievo della parte dallo stampo. Nonostante la descrizione del processo risulti semplice, non si può dire lo stesso del suo controllo per

mantenere la qualità desiderata del prodotto, che dipende da svariati fattori come velocità, pressione, tempo e temperatura.

2.1 CLASSIFICAZIONE DELLE PRESSE

Le presse ad iniezione possono essere classificate in base a differenti caratteristiche. Secondo il movimento del sistema di chiusura possono essere distinte in orizzontali o verticali. Le presse orizzontali sono adatte per le applicazioni dove il componente deve essere estratto dallo stampo e cadere in un nastro trasportatore, per gravità o prelevato da una mano di presa. Sono le presse più versatili e comuni. Le presse verticali si prestano per produrre componenti con inserti costampati. Solitamente queste hanno delle piastre rotative o shuttle che muove la metà stampo da sotto il sistema di chiusura a una zona facilmente accessibile da un operatore o da un robot, che scarica il pezzo e posiziona gli inserti per il ciclo successivo. Può esserci inoltre più basi mobili, che permettono così di stampare un nuovo componente durante la fase di prelievo del pezzo e dell'inserimento degli inserti. Ciò aiuta il processo sia nella riduzione del tempo ciclo che nella permanenza della plastica nel cilindro, così da evitare degradazione termica del materiale.

Un'altra suddivisione dei tipi di presse sulla direzione di iniezione della plastica. Anche per questo tipo di differenziazione le macchine possono essere orizzontali o verticali. Nelle orizzontali l'unità di iniezione è montata parallela al pavimento e la plastica viene iniettata attraverso una boccola montata in genere al centro dello stampo. Dalla boccola di iniezione la plastica raggiunge la cavità entrando prima nei canali di colata, ricavati di solito su entrambe le metà stampo. Una volta che lo stampo viene aperto la parte stampata e la materozza rimangono sulla parte mobile, che poi verranno prelevate da un operatore o da una mano di presa. Le presse verticali hanno l'unità di iniezione

perpendicolare al pavimento ed hanno un limite legato alle dimensioni dell'unità stessa, la quale è supportata da delle barre.

Nelle presse multi materiale due o più unità di iniezione possono iniettare differenti materiali. Dopo aver iniettato uno dei due materiali, lo stampo viene aperto e la parte mobile viene posizionata in modo da combaciare con la seconda cavità fissa, così da poter iniettare il secondo materiale. Un esempio tipico di componente multi materiale è lo spazzolino da denti.

2.2 SPECIFICHE DI UNA PRESSA

Le specifiche che definiscono una pressa sono:

1. Tonnellaggio: forza di chiusura massima applicabile dalla pressa
2. Capacità di iniezione: massima quantità di materiale che può essere iniettata (indicata in cm^3)
3. Diametro della vite e rapporto L/D: il diametro del cilindro è leggermente più grande della vite (in genere 0,1 mm). Qualora si verificasse un aumento di questo gioco si può verificare un ritorno indietro di materiale, che causa inconsistenza tra una stampata e l'altra. Dal rapporto lunghezza/diametro della vite dipende una buona omogeneità della fusione del polimero
4. Capacità di plastificazione: indica la massima quantità di materiale che può essere portata in testa al cilindro alla temperatura di fusione del polimero. In genere è indicata in chilogrammi per ora.
5. Massima pressione di iniezione: è la massima pressione idraulica che può essere applicata dal cilindro idraulico sulla plastica. Questo dipende fattore di intensificazione della vite.

3 IL PROCESSO DI STAMPAGGIO AD INIEZIONE

Il processo di lavorazione per la creazione di manufatti termoplastici più utilizzato al mondo è lo stampaggio ad iniezione. Questo consiste nell'iniettare il polimero fuso all'interno di una cavità detta stampo, costituita da due parti distinte. Una volta terminato il processo le due parti verranno separate l'una dall'altra e il componente plastico potrà essere prelevato. Il processo è reso possibile grazie ad una macchina dedicata a gestire l'intero processo: la pressa ad iniezione. Questa è costituita da diverse unità, ognuna delle quali copre un ruolo fondamentale nelle varie fasi del processo. Quest'ultimo è sintetizzato nello schema riportato in figura.

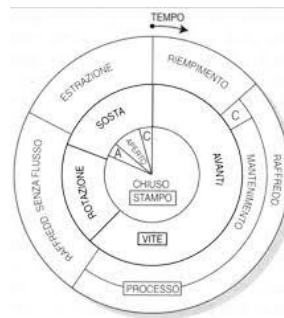


Figura 2 Fasi del ciclo di stampaggio

Nell'anello esterno è riportata la fisica del processo. Percorrendo tale anello in senso orario otteniamo il ciclo intero costituito da:

1. Riempimento: questa fase prevede l'ingresso del materiale fuso all'interno della cavità stampo e si conclude poco prima del completamento della figura, così da evitare un brusco innalzamento della pressione. Il controllo su questa fase del processo è di tipo volumetrico in quanto viene regolata la velocità di avanzamento (portata) del materiale.
2. Fase "C": è chiamata anche di compensazione o pressurizzazione ed è caratterizzata da un innalzamento della pressione
3. Mantenimento: si chiama così poiché viene richiesto alla macchina di mantenere una pressione sul polimero e ciò permette l'ingresso di altro

materiale all'interno della cavità, evitando che il materiale già entrato torni indietro, generando dei vuoti o dei ricali sul pezzo finito. Il parametro che governa questo frangente del processo è la pressione impostata sul polimero.

4. Raffreddamento senza flusso: si specifica la dicitura “senza flusso” perché il materiale nella realtà inizia a raffreddarsi già nella fase di riempimento, nel momento in cui entra in contatto con le pareti “fredde” dello stampo. La differenza fra i due raffreddamenti è che in quello che si verifica durante il riempimento vi è un apporto di calore fornito dal materiale entrante, mentre quello senza flusso vede uno scambio termico che va esclusivamente dal polimero, che inizia a solidificare, allo stampo.
5. Estrazione: dopo che il materiale plastico si è raffreddato a sufficienza il manufatto può essere prelevato dallo stampo. Ciò che si richiede durante l'estrazione è una certa rigidità strutturale, che eviti delle deformazioni sul componente finito.

4 POLIMERI

4.1 DEFINIZIONE

I polimeri sono lunghe catene che hanno molte molecole identiche unite insieme tra loro. La parola stessa che definisce questi materiali è costituita da ‘poli’ che significa molti e ‘mero’ che significa parte. La parte che viene ripetuta in queste catene prende il nome di monomero. Il processo che converte un monomero in polimero viene definito polimerizzazione. Un polimero può essere costituito dalla ripetizione di più monomeri diversi. Per esempio l'ABS è sintetizzando partendo da tre diversi monomeri: acrilonitrile, butadiene e stirene.

4.2 PROCESSI CHIMICI PER REALIZZARE I POLIMERI

Il processo chimico che permette la polimerizzazione può essere di due tipologie: per addizione o per condensazione. Nel processo per addizione vi è un catalizzatore che dà inizio alla reazione di polimerizzazione, unendo ogni monomero all'altro. Il processo termina quando tutti i monomeri sono uniti tra loro. Un esempio tipico è quello del polietilene. Anche nel processo per condensazione ogni monomero si unisce al successivo, ma questa reazione chimica produce dei prodotti a basso peso molecolare che devono essere continuamente rimossi per permettere l'avanzamento del processo. Un esempio tipico è quello della poliammide (nylon) e del poliestere.

4.3 MORFOLOGIA

I polimeri possono essere suddivisi in base alla loro morfologia in amorfi e cristallini. Quelli amorfi hanno la disposizione delle molecole che non segue un determinato ordine. Se osservate al microscopio apparirebbero come una palla di spaghetti. I polimeri cristallini hanno certe regioni in cui le molecole risultano avere una struttura ordinata. Ognuna di queste regioni prende il nome di cristallite. Nella realtà un polimero non può essere totalmente cristallino, quindi d'ora in avanti parleremo di polimeri semicristallini. In questi troveremo dei cristalliti all'interno di zone amorfe.

4.4 RITIRO VOLUMETRICO

La differenza sostanziale tra materiali amorfi e semicristallini risiede nel loro ritiro, che è la differenza in percentuale di volume che si ha tra la fase di fusione e quella solida. Quando la temperatura aumenta, le molecole immagazzinano energia, diventando molto più libere di muoversi ed allontanandosi tra di loro. Ciò porta ad un incremento di volume. Nel momento in cui la temperatura diminuisce succede esattamente l'opposto, le molecole cedono la loro energia e il volume occupato si riduce. Nei semicristallini l'allontanamento delle molecole

tra di loro è maggiore se comparata con gli amorfi. Durante il raffreddamento il materiale cerca di recuperare la sua struttura ordinata ed è per questo motivo che i semicristallini hanno un ritiro maggiore. A titolo di esempio si riportano i valori dell' ABS (amorfo) che si attestano intorno allo 0,5-0,8%, mentre per un Nylon (semicristallino) i valori tipici sono al di sopra del 2,5%.

La morfologia influenza anche il raggiungimento della fase liquida del polimero. In genere i semicristallini richiedono un apporto specifico di energia per fondere, che corrisponde alla temperatura alla quale i legami dei cristallini si rompono. Il range di temperatura alla quale un cristallino fonde è più stretto, circa 20 °C, rispetto a quello di un amorfo, che si attesta sui 40 °C. Il valore delle temperature di processo vanno dai 200 °C fino ai 310 °C.

II FISICA DEI POLIMERI

5 REOLOGIA

Nello stampaggio il polimero viene sottoposto a una forza che lo spinge all'interno della cavità dello stampo. La scienza che studia il comportamento di un fluido quando è sottoposto a una sollecitazione è la reologia. Capire il comportamento reologico dei polimeri risulta essere fondamentale per comprendere il processo di stampaggio. Di seguito si introdurranno le basi che hanno portato a capire come la plastica fluisce nello stampo.

5.1 L'ESPERIMENTO DI NEWTON

Newton fu il primo a studiare la reazione di un fluido quando sottoposto a una forza e lo fece con un esperimento. Consideriamo un fluido sopra il quale è posta una tavola di area A . La tavola viene messa in movimento applicando su di essa una forza F . La tavola inizierà a muoversi a una certa velocità v . Ipotizzando che la velocità non sia tale da generare turbolenze nel liquido, si può ipotizzare che il fluido sia divisibile in tanti piccoli strati. Ognuno di questi non sarà libero di muoversi, poiché è soggetto all'attrito degli strati adiacenti. Quindi le velocità del fluido tenderanno a ridursi andando dal primo strato a contatto con la tavola verso il fondo del recipiente che contiene il liquido.

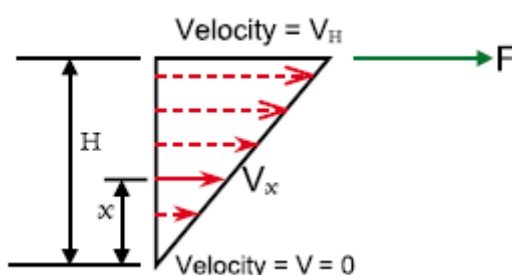


Figura 3 Velocità di scorrimento

Il primo strato si muove alla velocità V_h della tavola. Uno strato generico sarà soggetto alla velocità V_x generica alla distanza x dal fondo. Si definisce gradiente di velocità la differenza di velocità tra due strati rapportato alla distanza dei due. Se prendiamo come riferimento il fondo del recipiente, alla generica distanza x si avrà:

$$\dot{\gamma}_x = \frac{V_x}{x}$$

Dato che il gradiente di velocità o shear rate è il rapporto tra una velocità, espressa in m/s, e una distanza, espressa in m, la sua unità di misura è espressa in s^{-1} .

Il fluido è sottoposto a uno sforzo di taglio, che può essere calcolato come il rapporto tra una forza e l'area di applicazione della forza. In un generico strato x si avrà:

$$\tau_x = \frac{F_x}{A}$$

Sia la forza che la velocità sono proporzionali alla distanza x dello strato dal fondo del recipiente. Quindi maggiore sarà la distanza e maggiore saranno la velocità e la forza di taglio.

Lo sforzo di taglio e lo shear rate sono direttamente correlate tra di loro dalla seguente equazione:

$$\tau_x = \eta \dot{\gamma}_x$$

dove η è una costante di proporzionalità che viene indicata come viscosità del liquido. In un grafico che riporta sulle ascisse lo shear rate e sulle ordinate lo shear stress (sforzo di taglio) la viscosità rappresenterebbe l'inclinazione della curva.

5.2 FLUIDI NEWTONIANI E NON NEWTONIANI

I fluidi possono essere classificati in base alla relazione esistente tra lo shear rate e lo shear stress. Se la viscosità è una costante allora la relazione $\dot{\gamma} - \tau$ sarebbe una retta e il fluido viene definito newtoniano. Se la viscosità non è una costante allora il fluido in esame viene detto non-newtoniano e può essere suddiviso in altri due sottogruppi: dilatante e pseudoplastico.

I fluidi dilatanti sono tutti quelli che aumentano la loro viscosità all'aumentare dello shear rate applicato. Uno degli esempi più famosi di questa tipologia di fluidi è la soluzione di acqua e amido di mais. Al contrario i liquidi pseudoplastici sono quelli che hanno una riduzione della viscosità all'aumentare del gradiente di velocità. I materiali plastici utilizzati nello stampaggio ad iniezione appartengono a quest'ultima categoria

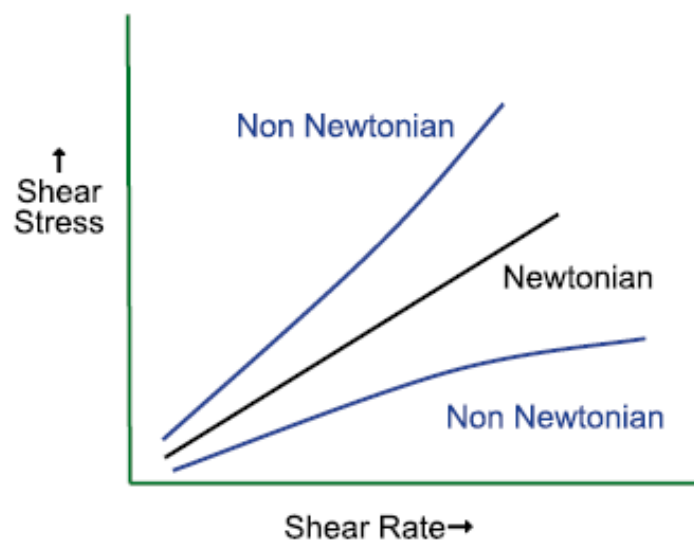


Figura 4 Dipendenza shear rate - shear stress

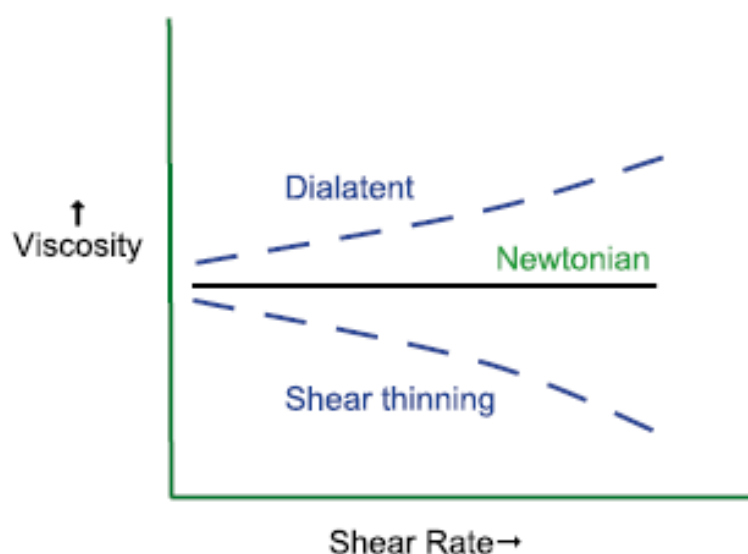


Figura 5 Dipendenza viscosità-shear rate

5.3 EQUAZIONI CARATTERISTICHE NEI POLIMERI

Il profilo di velocità di un polimero non è una retta, come sarebbe per un fluido newtoniano come l'acqua, ma bensì è una curva. La ricerca ha dimostrato che l'andamento delle velocità in una sezione è di tipo parabolico, come mostrato in figura.

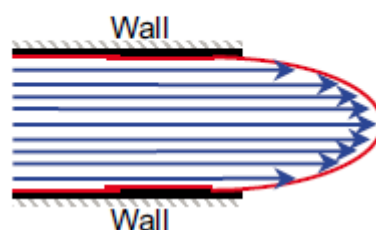


Figura 6 Profilo di velocità di un polimero iniettato

Questo tipo di comportamento da parte dei polimeri viene definito flusso a “fontana”. Quando il polimero entra dentro un canale “freddo” il materiale che si trova a contatto con le pareti rallenta e si raffredda quasi istantaneamente, mentre nella parte centrale continua a scorrere. Questo accade solo sul fronte del flusso e non dietro di esso. Nei canali caldi, dove il canale è già pieno del precedente materiale, non si ha questo modo di fluire, ad eccezione della prima volta che il canale viene riempito.

Dal momento che il profilo di velocità non è lineare, dobbiamo riscrivere l’equazione dello shear rate nel seguente modo:

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{x}{h}\right) \left(\frac{dx}{dt}\right)$$

dove t è il tempo, h è lo spessore o il diametro del canale e x è la distanza dello strato di fluido dal canale.

La relazione tra shear rate e viscosità è descritta da diverse equazioni. La più utilizzata poiché ben rappresenta il comportamento pseudoplastico ad alti shear rate è la legge di potenza proposta da Ostwald e de Waale.

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1}$$

dove m è una costante chiamata indice di consistenza ed n è l’esponente della potenza. Applicando il logaritmo all’equazione si ottiene:

$$\log \eta = \log m + (n - 1) \log \dot{\gamma}$$

Rappresentando l’equazione in scala logaritmica si ottiene una retta con inclinazione uguale a $n - 1$.

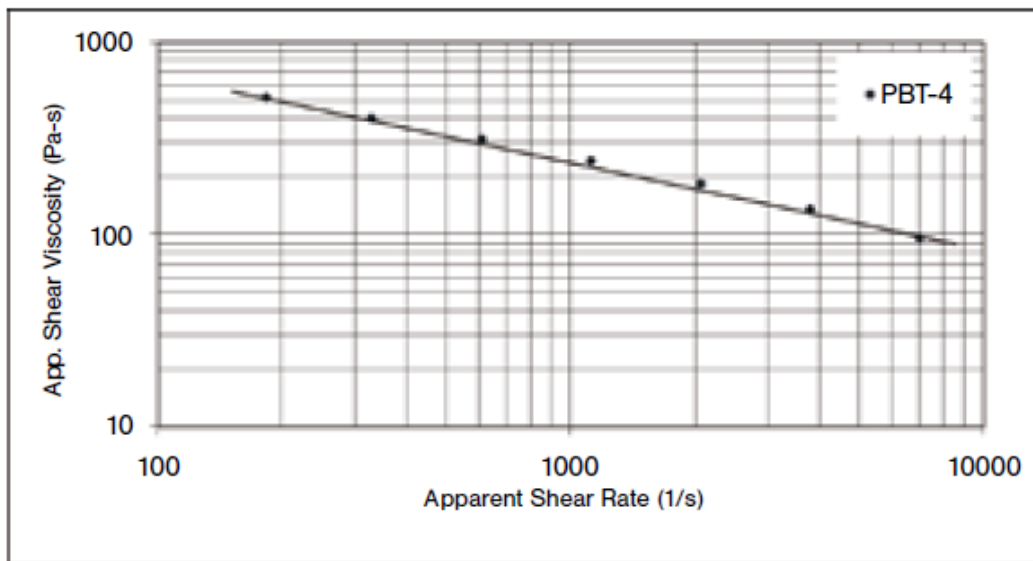


Figura 7 Grafico shear rate vs viscosità

Ricordando che il polimero è un materiale pseudoplastico, shear thinning in inglese, cioè che diminuisce la sua viscosità all'aumentare dello shear rate, possiamo intuire che l'inclinazione della retta sarà negativa. Infatti il valore di n è sempre minore di 1 ma maggiore di 0.

Una spiegazione fisica della riduzione della viscosità all'aumentare del gradiente di velocità può essere data immaginando che, con l'applicazione di uno shear rate le lunghe catene aggrovigliate iniziano ad allinearsi nella direzione del flusso, abbandonando il loro stato di aggrovigliamento. Con l'aumento della velocità il numero di molecole che si allineano aumenta e con ciò la resistenza con la quale si oppongono al moto si riduce. Nella zona ad alto shear rate si può considerare il fluido come Newtoniano, poiché la viscosità non cambia in modo percettibile, come si può osservare dalla figura 6.

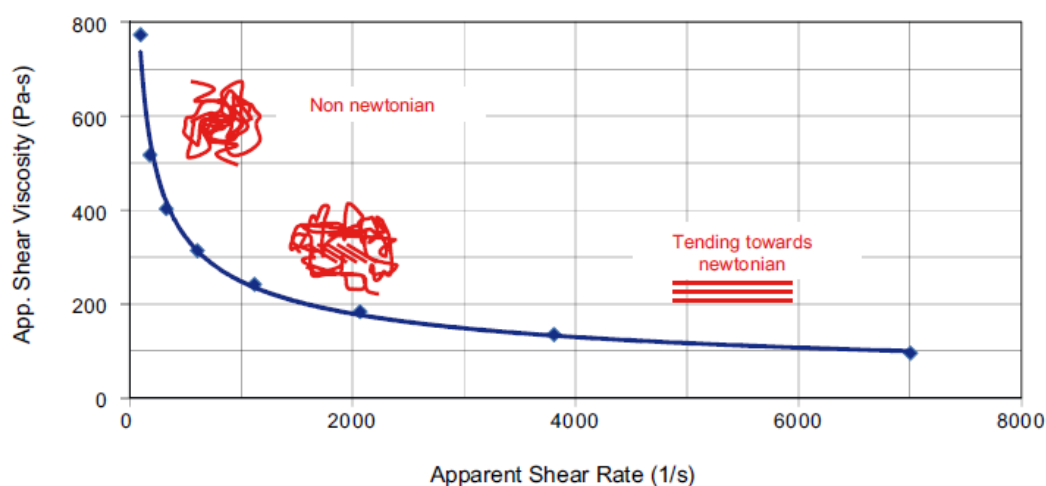


Figura 8 Viscosità vs Shear rate

5.4 CARATTERIZZAZIONE VISCOSA DEI POLIMERI

Ci sono diversi modi per caratterizzare l'andamento della viscosità in funzione dello shear rate. Per lo stampaggio ad iniezione riveste un ruolo importante il reometro capillare. Il comportamento fluidodinamico della plastica all'interno dei canali, della camera calda, del punto di iniezione e della cavità può essere riprodotto in questo reometro. Vediamo un'immagine che riporta uno schema di questa macchina.

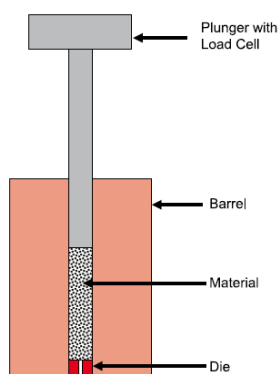


Figura 9 Schema di un reometro capillare

Questo è costituito da un cilindro (barrel) e da un pistone (plunger). Alla fine del cilindro è presente un foro (die). Il cilindro è riscaldato a una certa temperatura ed è riempito dei granuli del materiale che deve essere testato. Una volta che il polimero è fuso, il pistone si muove a diverse velocità, cioè diversi shear rate e la plastica viene estrusa dal foro. La forma del foro è molto importante poiché viene usata per calcolare la viscosità. Questi dati in genere vengono rilevati a tre diverse temperature e i valori vengono resi disponibili agli stampatori e alle aziende che sviluppano software di simulazione.

Un'altra prova simile è il melt flow test che, a differenza del reometro capillare, non applica carichi diversi sul pistone ma un peso fisso. Per questo motivo il valore ricavato non ci dà un reale comportamento agli shear rate ai quali è sottoposto il polimero in fase di iniezione, ma solo a bassi gradienti di taglio. Il numero ricavato dalla prova è chiamato melt flow index (MFI) e rappresenta il peso del materiale in grammi che è stato estruso in 10 minuti di tempo.

5.5 DIAGRAMMA P-V-T

Supponiamo che in natura esistano materiali cristallini al 100% e materiali amorfi al 100%. Consideriamo un polimero amorfo e supponiamo di immergerlo in un liquido molto freddo, come ad esempio l'azoto liquido, che ha una temperatura compresa tra i -210 e i -195 °C. A tale temperatura le molecole non sono libere di muoversi poiché la loro energia molecolare è pressoché inesistente. Il materiale risulterà essere fragile e se prendessimo un foglio di materiale e lo buttassimo per terra, questo si spaccherà in mille pezzi. Se invece aumentassimo in modo graduale la temperatura, l'energia fornita verrà trasmessa alle molecole e, al raggiungimento di una data temperatura che dipende dal materiale, il foglio diventerà flessibile e le molecole inizieranno ad essere libere di muoversi. Questa temperatura è chiamata T_g , ovvero temperatura di transizione vetrosa. Se incrementassimo ulteriormente la

temperatura, la libertà di movimento delle molecole aumenterebbe e con essa anche la flessibilità del foglio. Ad un certo punto il materiale si trasformerà in una massa fusa viscosa, ideale per poter essere iniettata in uno stampo. Con l'incremento della temperatura si potrà notare anche un aumento del volume specifico, come mostrato nel seguente grafico.

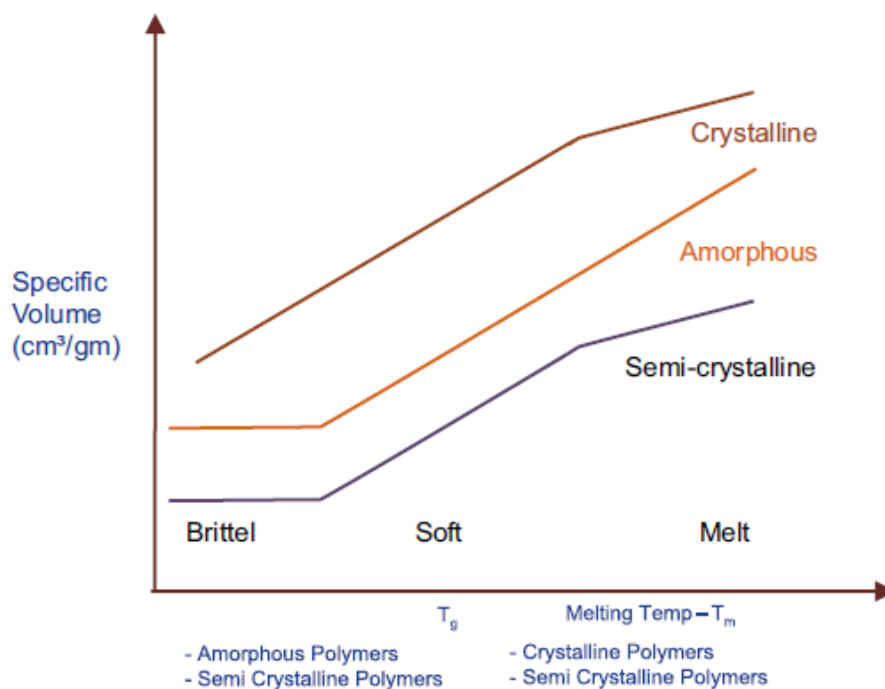


Figura 10 Volume specifico – Temperatura

Se ripetessimo lo stesso esperimento per un materiale cristallino ci accorgeremmo che l'energia richiesta per allontanare le molecole le une dalle altre sarebbe maggiore, perché le forze molecolari che tengono insieme le catene polimeriche sono più resistenti. La temperatura alla quale le catene iniziano a muoversi è tale da rendere il polimero già una massa fusa, questo perché l'energia richiesta per rompere tutti i legami molecolari è uguale per tutte le catene. La temperatura di transizione che porta dalla fase solida a quella fusa è detta T_m o di rammollimento.

Una volta capito il comportamento per materiali cristallini e amorfi, è intuitivo comprendere cosa succederebbe con un materiale semicristallino. Questo presenterebbe una temperatura di transizione vetrosa e una di rammollimento. Questi però non sarebbero dei valori puntuali ma bensì dei range entro i quali il materiale passa da un comportamento fragile a uno flessibile e da uno stato solido a quello fuso. Ciò capita perché la dimensione dei cristalliti non è uguale e nemmeno la lunghezza delle catene che lo compongono.

Da quanto detto si può comprendere il perché i materiali semicristallini hanno una finestra di temperature di processo molto più ristretta rispetto ai materiali amorfi. Per esempio il nylon che è semicristallino ha un range di temperature compreso tra i 248 e i 265 °C, mentre per un ABS amorfo la temperatura va dai 218 °C ai 260 °C.

Ora ipotizziamo di effettuare il percorso inverso, cioè di raffreddare un polimero allo stato fuso e di portarlo ad essere fragile. Mentre il materiale si raffredda l'energia molecolare inizia a ridursi e la viscosità comincia ad aumentare. Ad una certa temperatura i cristalliti inizieranno a formarsi e si sarà arrivati alla temperatura di cristallizzazione o T_c . Per fare in modo che i cristalliti si possano formare, è necessario che il materiale venga sottoposto alla T_c per un dato tempo. Se ciò non accade e si arriva in modo molto rapido alla T_g , si avrà un materiale amorfo anziché semicristallino. Per questo la temperatura dello stampo è molto più importante nei materiali semicristallini che negli amorfi.

Quanto discusso fino ad ora è molto importante per chiunque si occupi di plastica. Ad esempio, per un progettista è di fondamentale importanza conoscere la T_g , poiché grazie ad essa saprà se il componente alla temperatura ambiente o di lavoro risulterà essere fragile o flessibile. Per un tecnologo di stampaggio sarà indispensabile conoscere le T_c e le T_m di un materiale per poter impostare i parametri di processo più adeguati.

5.6 IL CALORIMETRO DIFFERENZIALE A SCANSIONE (DSC)

Il calorimetro differenziale a scansione è uno strumento utilizzato per studiare il comportamento di un polimero quando soggetto ad una transazione termica.

Per i materiali semicristallini si eseguono due scansioni. Nella prima si prende il materiale e lo si porta alla temperatura di fusione, la quale viene registrata, per poi aumentarla ulteriormente. Nella seconda si raffredda bruscamente il campione con dell'azoto liquido e poi si riscalda nuovamente il materiale, aspettando questa volta il raggiungimento della T_c prima della T_m , la quale è caratterizzata da un incremento del calore specifico per permettere la formazione dei cristalliti. Un tipico grafico del DSC è rappresentato di seguito.

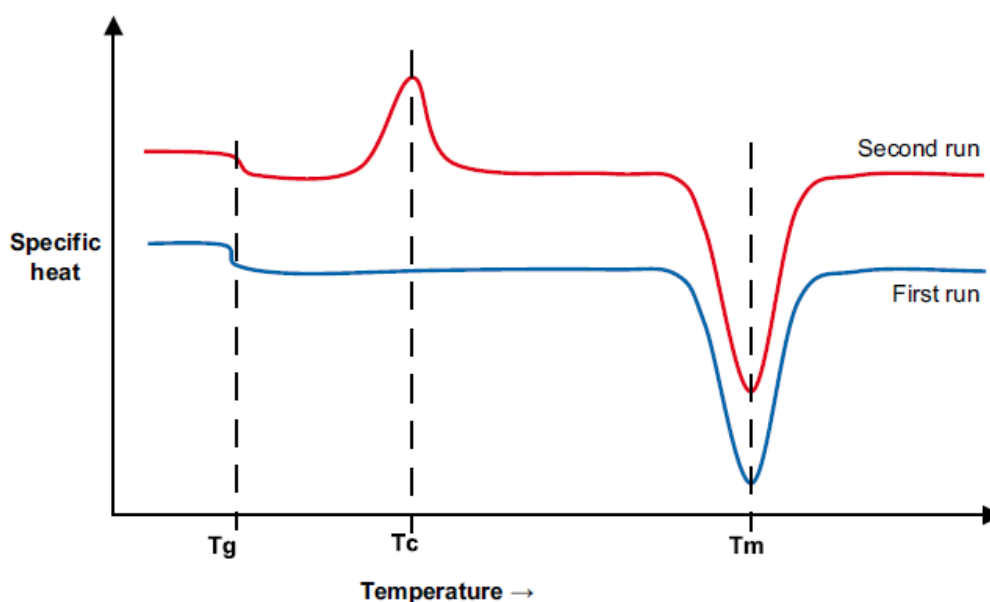


Figura 11 Calore specifico - Temperatura

5.7 RITIRO VOLUMETRICO

Il ritiro volumetrico è la differenza di volume che esiste tra il polimero allo stato fuso e quello allo stato solido. Questa differenza è legata al fatto che quando le molecole raffreddano cercano di tornare nel loro stato di equilibrio, riducendo la distanza tra di esse. Il ritiro nello stampaggio ad iniezione può essere influenzato da differenti parametri. Impostare il giusto valore di ritiro in fase di progettazione dello stampo rappresenta la sfida più grande per il progettista, poiché da esso dipende il mantenimento della qualità richiesta e delle tolleranze imposte.

Il ritiro dipende anche dalla direzione del flusso durante l'iniezione, poiché esso presenta valori diversi se misurato in una direzione perpendicolare al flusso piuttosto che in una direzione parallela al flusso. In particolare si riscontra che il ritiro maggiore si presenta nella direzione perpendicolare al flusso. Inoltre vi è una correlazione con lo spessore del componente, poiché più lo spessore è alto e più il calore tenderà ad essere trattenuto per più tempo, favorendo un rilassamento delle molecole che porterà ad un aumento del ritiro.

6 UMIDITÀ NELLA PLASTICA

La maggior parte dei polimeri tende ad assorbire l'umidità presente nell'ambiente circostante. Questa tendenza può essere più o meno pronunciata a seconda del tipo di materiale. Ad esempio il nylon assorbe molta umidità al punto da modificare le dimensioni del componente dopo lo stampaggio.

Un valore troppo elevato di umidità presente nei granuli prima del processo di stampaggio può portare a delle difettosità estetiche, riduzione delle proprietà meccaniche e a delle discontinuità produttive. Per ogni materiale si rende necessario deumidificare i granuli prima di introdurli nel cilindro. I produttori della materia prima forniscono delle tabelle nelle quali si indicano tempi di

permanenza e temperature del deumidificatore, tali da ottenere un valore accettabile di umidità presente nel polimero.

III EQUAZIONI CHE GOVERNANO IL PROCESSO DI STAMPAGGIO

7 TEOREMA DI REYNOLDS

La plastica è un fluido e come tutti i fluidi il suo comportamento è governato dalle equazioni di Navier-Stokes. Per ricavare queste espressioni si parte dal teorema di Reynolds, che ci permette di descrivere la variazione nel tempo di una grandezza estensiva. A tal proposito ricordiamo che una grandezza estensiva è una grandezza che dipende dall'estensione del dominio considerato, mentre il suo esatto opposto è una grandezza intensiva. A titolo di esempio possiamo considerare la massa come una grandezza estensiva, poiché dipende dal volume che prendiamo in considerazione. Al contrario la densità di un corpo omogeneo è una grandezza intensiva, dal momento che non cambia in ogni porzione di volume che prendo in considerazione.

Possiamo sempre definire una grandezza estensiva (B) come l'integrale esteso al volume del prodotto tra la densità e una grandezza intensiva (b).

$$(1) \quad B(t) = \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) b(\vec{x}, t) dV$$

Notiamo che sia la densità che la grandezza intensiva dipendono dalla posizione \vec{x} e dal tempo. Inoltre il volume V sul quale si calcola l'integrale è una funzione del tempo ed è chiamato volume materiale, ovvero il volume che è occupato da tutte le particelle che fanno parte del sistema considerato. Se ad esempio prendiamo in considerazione l'acqua contenuta in un bicchiere e decidiamo di seguirne l'evoluzione nel tempo, allora il volume materiale conterrebbe tutte le particelle che erano contenute nel bicchiere, comprese quelle che evaporeranno.

Il teorema di Reynolds si utilizza per calcolare la derivata nel tempo di una grandezza estensiva. Utilizzando l'equazione (1) si ottiene:

$$(2) \quad \frac{dB(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) b(\vec{x}, t) dV$$

Si noti che si dovrebbe calcolare la derivata nel tempo di un integrale la cui funzione integranda e il dominio di integrazione dipendono dal tempo. Il problema è che non si può sapere a priori come il dominio varia. Per semplificare il problema iniziamo col schematizzarlo.

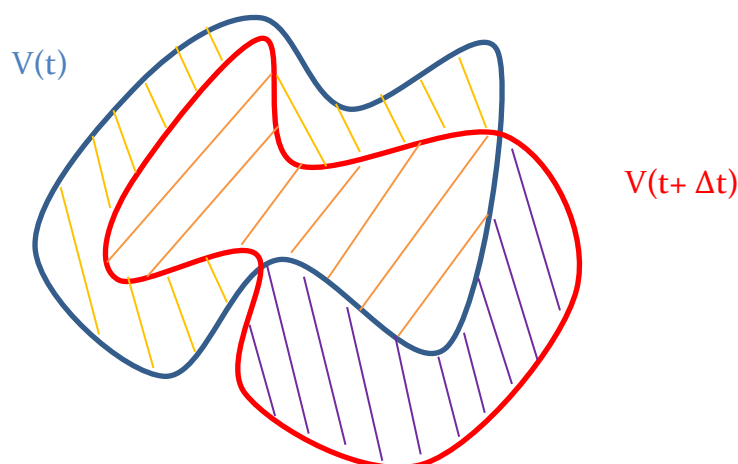


Figura 12 Schema da analizzare

Si immagini di avere ad un certo istante di tempo il volume $V(t)$, che in un'istante successivo si sia evoluto al volume $V(t+\Delta t)$. Si noti che il volume non solo si è spostato ma si è anche deformato. La derivata nel tempo si può esprimere per definizione come:

$$(3) \quad \frac{dB(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{B(t + \Delta t) - B(t)}{\Delta t}$$

Si può considerare che nel tempo trascorso tutte le particelle fanno parte del sistema, ovvero nessuna particella ha cambiato stato. Si può affermare questo perché si vuole calcolare il limite per Δt che tende a zero.

Si può sostituire alle espressioni della grandezza estensiva l'espressione (1) calcolata ai tempi giusti, utilizzando una notazione più snella in termini di scrittura. Facendo ciò si ottiene:

$$(4) \quad \frac{dB(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V(t+\Delta t)} \rho b|_{t+\Delta t} dV - \int_{V(t)} \rho b|_t dV}{\Delta t}$$

Facendo riferimento alla *Figura 1* si può identificare il volume \bar{V} come quello tratteggiato in verde, che appartiene sia a $V(t)$ che a $V(t+\Delta t)$, mentre V_1 appartiene solo a $V(t)$ mentre V_2 appartiene solo a $V(t+\Delta t)$.

$$(5) \quad \begin{aligned} V(t) &= \bar{V} + V_1 \\ V(t + \Delta t) &= \bar{V} + V_2 \end{aligned}$$

Quindi si può scrivere l'equazione (4) come segue:

$$(6) \quad \frac{dB(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{\bar{V}} \rho b|_{t+\Delta t} dV + \int_{V_2} \rho b|_{t+\Delta t} dV - \int_{\bar{V}} \rho b|_t dV - \int_{V_1} \rho b|_t dV}{\Delta t}$$

Si noti che il primo e il terzo termine sono calcolati sul volume \bar{V} ma le funzioni integrande sono calcolate su tempi diversi. Questi due termini si possono esprimere come la derivata parziale della funzione integranda rispetto al tempo.

$$(7) \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{\bar{V}} \rho b|_{t+\Delta t} dV - \int_{\bar{V}} \rho b|_t dV}{\Delta t} = \int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dV$$

Ora si deve comprendere cosa diventa il volume \bar{V} quando Δt tende a zero. Se si immagina di tornare all'istante iniziale è facile intuire che questo si sovrappone al volume $V(t)$, pertanto l'integrale si calcolerà su tale dominio.

Ora si farà riferimento al secondo e al quarto termine dell'equazione (6). Si focalizzi l'attenzione sulla seguente figura.

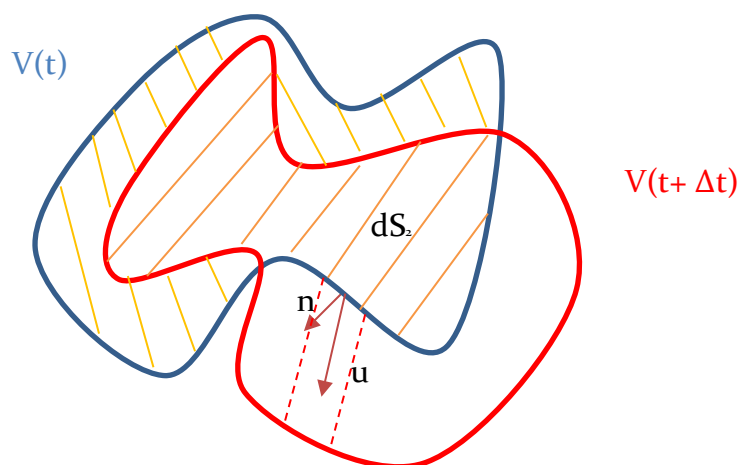


Figura 13 Schema da analizzare

Si consideri solo l'interfaccia tra \bar{V} e V_2 che chiameremo S_2 . Si ipotizzi di prendere una porzione di superficie dS_2 . Questa avrà una normale \vec{n} e una velocità \vec{u} . Durante la traslazione la superficie dS_2 spazza il volume dV_2 . Questo è dato dal prodotto tra la superficie dS_2 moltiplicata per il segmento percorso nel tempo Δt , ovvero $\vec{u} \Delta t$. Questo segmento dovrà poi essere proiettato nella direzione della normale \vec{n} , ottenendo così l'altezza del parallelogramma con base dS_2 . Si noti che nel fare questa operazione si introduce un errore, che però risulta trascurabile. Infine il volume dV_2 sarà:

$$(8) \quad dV_2 = dS_2 \vec{u} \cdot \vec{n} \Delta t$$

Pertanto l'integrale sul volume V_2 sarà dato da:

$$(9) \quad \int_{V_2} \rho b|_{t+\Delta t} dV = \int_{S_2} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_{t+\Delta t} \Delta t dS_2$$

Si potrà effettuare lo stesso discorso sull'integrale su V_1 facendo però riferimento alla seguente immagine.

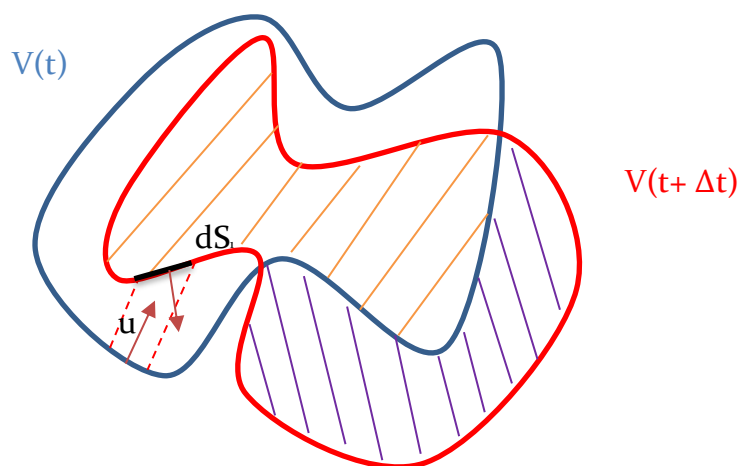


Figura 14 Schema da analizzare

Si noti che la normale n e il vettore u sono discordi, quindi ciò che otterremo sarà uguale all'equazione 9 ma cambiata di segno.

$$(10) \quad dV_1 = - dS_1 \vec{u} \cdot \vec{n} \Delta t$$

$$\int_{V_1} \rho b|_t dV = - \int_{S_1} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_t \Delta t dS_1$$

Quindi il secondo e quarto termine dell'equazione 6 diventano:

$$(11) \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{V_2} \rho b|_{t+\Delta t} dV - \int_{V_1} \rho b|_t dV}{\Delta t}$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\int_{S_2} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_{t+\Delta t} \Delta t dS_2 + \int_{S_1} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_t \Delta t dS_1}{\Delta t}$$

I Δt si possono semplificare e quindi si ottiene:

$$(12) \quad = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\int_{S_2} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_{t+\Delta t} dS_2 + \int_{S_1} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_t dS_1 \right)$$

Quando Δt tende a 0, nella funzione integranda calcolata in S_2 sarà valutata al tempo t e lo stesso vale per la seconda funzione integranda. Pensando a cosa succede alle superfici S_2 e S_1 quando Δt tende a zero, cioè portando il volume V_2 a coincidere con V_1 , ci si rende conto che entrambe coincideranno con la superficie $S(t)$. Quindi si ottiene:

$$(13) \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\int_{S_2} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_{t+\Delta t} dS_2 + \int_{S_1} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} |_t dS_1 \right) \\ = \int_{S(t)} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} dS$$

Quindi la derivata nel tempo di una grandezza estensiva si può scrivere come segue:

$$(14) \quad \frac{dB(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho b dV = \int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dV + \int_{S(t)} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} dS$$

Questo fu il primo risultato ottenuto da Reynolds con il suo teorema. Però il problema non era ancora del tutto risolto, poiché rimaneva l'incognita di come cambia il volume materiale nel tempo. Così Reynolds intuì che il volume $V(t)$ può essere qualunque e pertanto lo si può sostituire con il volume di controllo, ossia il volume al quale noi vogliamo fare riferimento. Quindi è come se si prendessero in considerazione le particelle che contenute nel volume di controllo. Quindi il teorema di Reynolds può essere scritto nel seguente modo.

$$(14) \quad \frac{dB(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho b dV = \int_{V_0} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dV + \int_{S_0} \rho b \vec{u} \cdot \vec{n} dS$$

8 EQUAZIONE DELLA CONSERVAZIONE DELLA MASSA

Dal teorema di Reynolds si può ricavare l'equazione della conservazione della massa. Riprendiamo in esame l'equazione 1 e consideriamo come grandezza intensiva il valore uno. Si otterrà:

$$(15) \quad b(\vec{x}, t) = 1 \Rightarrow B(t) = \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV = M(t)$$

Come si vede l'integrale sul volume della densità equivale alla massa, che sarà dunque una grandezza estensiva. Essendo la massa una quantità che si conserva nel tempo, si può affermare che la sua derivata nel tempo è zero.

$$(16) \quad M(t) = cost \Rightarrow \frac{d}{dt} M(t) = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV = 0$$

Applicando il teorema di Reynolds (equazione 14) si ottiene:

$$(17) \quad \frac{d}{dt} M(t) = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV = \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_S \rho \vec{u} \cdot \vec{n} dS = 0$$

L'equazione ottenuta è detta equazione della conservazione della massa. Si noti che l'integrale sul volume della derivata parziale della densità rispetto al tempo ci dice quanta massa si sta accumulando all'interno del volume materiale, mentre l'integrale sulla superficie ci dice il flusso di massa che sta attraversando la superficie materiale. La 17 è l'equazione della conservazione di massa in forma integrale, che ci dice come varia in media la massa nel tempo. Per sapere cosa succede al sistema punto per punto si deve eliminare l'integrale. Per fare ciò si utilizza il teorema della divergenza, il quale permette di esprimere un integrale di superficie come un integrale di volume.

$$(18) \quad \int_S \vec{q} \cdot \vec{n} \, dS = \int_V \nabla \cdot \vec{q} \, dV$$

Applicando tale teorema all'equazione 17 si possono raccogliere tutti i termini in un unico integrale di volume.

$$(19) \quad \int_V \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} \right) dV = 0$$

Si noti che l'integrale è applicato a un volume qualunque e non a uno specifico. Se questo integrale deve essere nullo, vorrà dire che la funzione integranda dovrà essere nulla (teorema di localizzazione). Pertanto si otterrà:

$$(20) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0$$

Questa equazione ci permette di conoscere la variazione della massa in modo puntuale e, di conseguenza, anche la variazione media su un volume di controllo. Se invece conoscessimo una soluzione della 17, che vale sulla media nel volume, questa non sarebbe per forza una soluzione anche della 20. Per questo motivo le soluzioni dell'equazione differenziale si dicono forti, mentre quelle dell'equazione integrale si dicono deboli.

Partendo dalla 20 si può sviluppare la divergenza ottenendo:

$$(21) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

Il primo e il secondo termine non sono altro che la derivata totale o sostanziale della densità, ovvero la variazione di una grandezza vista da un osservatore che si muove insieme a una particella fluida. Quindi si può ricavare:

$$(22) \quad \frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{u} \xrightarrow{\rho \neq 0} \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{u}$$

Si noti che se la densità rimane costante lungo la sua traiettoria, allora la sua derivata totale sarà nulla, pertanto si potrà scrivere:

$$(23) \quad \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{u} \xrightarrow{\rho=\text{cost}} \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

Questa relazione è molto importante, poiché ci dice che per avere un sistema in cui il gradiente di velocità sia zero, non serve per forza che la densità sia costante in ogni punto (fluido incompressibile omogeneo), ma la densità potrebbe variare da punto a punto (fluido non omogeneo) basta che lungo la traiettoria che la particella percorre la densità rimanga costante. Un esempio può essere quello di un bicchiere contenente acqua e delle gocce di olio che sono immiscibili tra di loro. Questo sistema rappresenta un fluido non omogeneo, poiché nei punti in cui ci saranno delle particelle di acqua si avrà una densità diversa rispetto ai punti in cui ci saranno le particelle di olio. Essendo i due liquidi immiscibili, ogni particella che percorre una traiettoria manterrà la sua densità costante, cioè avrà derivata sostanziale nulla e quindi la divergenza della velocità sarà zero.

9 EQUAZIONE DELLA CONSERVAZIONE DELLA QUANTITÀ DI MOTO

In meccanica la quantità di moto è il prodotto tra la massa e la velocità. Per la seconda legge di Newton la variazione di tale quantità nel tempo è uguale alla risultante delle forze applicate sul sistema.

$$(24) \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \vec{F}$$

Su un sistema fluido possono agire delle forze sulla superficie materiale (forze di pressione) e delle forze che agiscono internamente al corpo materiale (forze di volume).

Riprendendo in esame l'equazione 1, per ottenere come grandezza estensiva la quantità di moto si dovrà considerare come grandezza intensiva la velocità. Si può quindi scrivere:

$$(25) \quad b(\vec{x}, t) = \vec{u}(\vec{x}, t) \Rightarrow B(t) = \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) \vec{u}(\vec{x}, t) dV = Q(t)$$

Applicando il teorema di Reynolds, la variazione nel tempo della quantità di moto sarà:

$$(26) \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \int_V \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} dV + \int_S (\rho \vec{u}) \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \vec{F}$$

Si deve ora comprendere quali forze vanno considerate come risultante. Come già anticipato ci sono delle forze che agiscono sul bordo del sistema (forze di superficie) e delle forze che agiscono all'interno del sistema (forze di volume).

$$(27) \quad \vec{F} = \vec{F}_V + \vec{F}_S$$

Come forza di volume si intende la forza di gravità che agisce su tutte le masse che compongono il sistema.

$$(28) \quad \vec{F}_V = \int_V \rho \vec{f} dV$$

Si noti che la presenza della densità all'interno dell'integrale ci indica che nel punto che si sta considerando deve essere presente della massa. Facendo un'analisi dimensionale si otterrà che la grandezza \vec{f} sarà una forza specifica di volume per unità di massa.

Spostando ora l'attenzione sulle forze di superficie, si può intuire che la loro direzione non è legata alla normale della superficie su cui esse sono applicata. La loro risultante sarà una grandezza moltiplicata scalarmente per la normale alla superficie ed integrata su tutta la superficie. Per ottenere un vettore da questo prodotto la grandezza che si dovrà prendere in considerazione sarà un tensore.

$$(28) \quad \vec{F}_S = \int_S \vec{T} \cdot \vec{n} dS$$

Sostituendo le forze trovate nella 26 si ottiene:

$$(29) \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \int_V \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} dV + \int_S (\rho \vec{u}) \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \int_V \rho \vec{f} dV + \int_S \vec{T} \cdot \vec{n} dS$$

Quella ottenuta è la conservazione della quantità di moto scritta in forma integrale.

Si focalizza ora l'attenzione sul tensore \vec{T} . Al suo interno dovrà essere presente la pressione, che agisce nella direzione della normale alla superficie ma con verso opposto. Questa parte del tensore prende il nome di parte isotropa, mentre tutto il resto è chiamata parte deviatorica del tensore e si indica con la lettera τ . Si potrà quindi scrivere:

$$(30) \quad \vec{T} = -p\vec{I} + \vec{\tau}$$

Sostituendo quanto trovato nella 29 si ottiene:

$$(31) \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \int_V \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} dV + \int_S (\rho \vec{u}) \vec{u} \cdot \vec{n} dS = \int_V \rho \vec{f} dV - \int_S p \vec{I} \cdot \vec{n} dS + \int_S \vec{\tau} \cdot \vec{n} dS$$

Come per la conservazione della massa, anche in questo caso la formulazione integrale della conservazione della quantità di moto non ci dice nulla a livello puntuale. Pertanto si deve ricavare la formulazione differenziale per sapere come varia la quantità di moto nel tempo in ogni singolo punto del sistema. Si noti che nella 31 tutti gli integrali di superficie hanno al proprio interno un prodotto scalare per la normale. Pertanto si può applicare il teorema della divergenza trasformando gli integrali di superficie in integrali di volume.

$$(32) \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \int_V \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} dV + \int_V (\rho \vec{u} \vec{u}) dV = \int_V \rho \vec{f} dV - \int_V \nabla \cdot (p \vec{I}) dV + \int_V \nabla \cdot \vec{\tau} dV$$

Sviluppando la divergenza della parte isotropa del tensore si ottiene:

$$(33) \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \int_V \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} dV + \int_V (\rho \vec{u} \vec{u}) dV = \int_V \rho \vec{f} dV - \int_V \nabla p dV + \int_V \nabla \cdot \vec{\tau} dV$$

Siccome tutti i termini sono integrali sul volume e che l'equazione deve essere valida per qualunque volume scelto, allora si può applicare il teorema di localizzazione, eliminando gli integrali.

$$(34) \quad \frac{d\vec{Q}}{dt} = \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \rho \vec{f} + \nabla \cdot \vec{\tau}$$

Sviluppando la derivata parziale nel tempo e la divergenza di $\rho \vec{u} \vec{u}$ si ottiene:

$$(35) \quad \vec{u} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \cdot (\rho \vec{u}) + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{f} + \nabla \cdot \vec{\tau}$$

Si riprende ora l'equazione della conservazione della massa (20) e la si moltiplica per la velocità, ottenendo:

$$(36) \quad \vec{u} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla (\rho \vec{u}) = \vec{0}$$

Si noti che lo zero a destra dell'uguale non è uno scalare ma un vettore. A sinistra vi sono due termini presenti anche nell'equazione 35 che si possono eliminare. Rimarrà così:

$$(37) \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{f} + \nabla \cdot \vec{\tau}$$

Raccogliendo ora la densità a primo membro si ottiene:

$$(38) \quad \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \rho \vec{f} + \nabla \cdot \vec{\tau}$$

Tutto ciò che è presente all'interno della parentesi non è altro che la derivata totale della velocità. Quindi si può scrivere:

$$(39) \quad \rho \frac{D \vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{f} + \nabla \cdot \vec{\tau}$$

Quella ottenuta è l'equazione differenziale della conservazione della quantità di moto. Questa è applicabile a una particella di fluido, ovvero in un punto in cui possiamo considerare tutte le quantità costanti al suo interno (velocità, pressione,...). Analizzando l'equazione si può notare che la derivata totale della velocità non sarà altro che l'accelerazione della particella lungo la sua traiettoria. Se questa la si moltiplica per la densità si ottiene una forza per unità di volume. Dando un'interpretazione fisica all'equazione si può affermare che, se una particella sta variando la sua quantità di moto, ovvero sta cambiando il modulo della sua velocità o la direzione e il verso di essa, questo potrà essere attribuibile a:

1. Variazione di pressione lungo la traiettoria
2. Presenza di forze che agiscono sulla particella senza bisogno di contatto (forza di gravità)
3. Variazione del tensore $\vec{\tau}$

In riferimento al punto 1 si fa notare che una particella accelererà da zone a pressione maggiore verso zone a pressione minore. Questo è legato alla presenza del segno meno davanti al gradiente della pressione.

10 EQUAZIONE DELLA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

Si vuole ora verificare la seguente relazione:

$$(40) \quad \frac{dE(t)}{dt} = \dot{L} + \dot{Q}$$

Questa ci dice che la variazione dell'energia nel tempo è data dalla somma della potenza meccanica \dot{L} e da quella termica \dot{Q} . Essendo l'energia una grandezza estensiva si può scrivere:

$$(41) \quad E(t) = \int_V \rho \mathcal{E} dV$$

In questa espressione la quantità \mathcal{E} è un'energia per unità di massa (J/kg). Sfruttando nuovamente il teorema di Reynolds si può scrivere:

$$(42) \quad \frac{dE(t)}{dt} = \int_V \frac{\partial (\rho \mathcal{E})}{\partial t} dV + \int_S (\rho \mathcal{E}) \vec{u} \cdot \vec{n} dS$$

A questo punto, riferendoci all'equazione 40, si deve capire come scrivere la potenza meccanica e la potenza termica. Per quanto riguarda la meccanica si può considerare l'equazione della quantità di moto, che ci restituisce la risultante delle forze applicate.

$$(43) \quad \frac{dQ(t)}{dt} = \vec{F} = \vec{F}_V + \vec{F}_S = \int_V \rho \vec{f} dV - \int_S p \cdot \vec{n} dS + \int_S \vec{\tau} \cdot \vec{n} dS$$

Se questa espressione la si moltiplica per la velocità si ottiene la potenza meccanica infinitesima applicata sul corpo.

$$(44) \quad \dot{L} = \int_V \rho \vec{f} \cdot \vec{u} \, dV - \int_S p \vec{u} \cdot \vec{n} \, dS + \int_S (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) \cdot \vec{n} \, dS$$

Per quanto riguarda la potenza termica si può affermare che essa avrà un contributo legato al volume e uno legato alla superficie.

$$(45) \quad \dot{Q} = \dot{Q}_V + \dot{Q}_S$$

Il termine di volume lo si può scrivere come integrale del prodotto tra la densità e la potenza generata per unità di massa all'interno del volume (\dot{q}) che sarà espresso in W/kg.

$$(46) \quad \dot{Q}_V = \int_V \rho \dot{q} \, dV$$

Per quanto riguarda la potenza termica scambiata sulla superficie si deve usare l'equazione di Fourier, che lega la conducibilità termica λ con il gradiente della temperatura.

$$(46) \quad \dot{Q}_S = \int_S \lambda \nabla T \cdot \vec{n} \, dS$$

Quindi la potenza termica totale sarà data da:

$$(47) \quad \dot{Q} = \int_V \rho \dot{q} \, dV + \int_S \lambda \nabla T \cdot \vec{n} \, dS$$

Sostituendo quanto trovato nell'equazione 40 si ottiene:

$$(48) \quad \frac{dE(t)}{dt} = \int_V \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} \, dV + \int_S (\rho E) \vec{u} \cdot \vec{n} \, dS = \int_V \rho \vec{f} \cdot \vec{u} \, dV - \int_S p \vec{u} \cdot \vec{n} \, dS + \int_S (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) \cdot \vec{n} \, dS + \int_V \rho \dot{q} \, dV + \int_S \lambda \nabla T \cdot \vec{n} \, dS$$

Si applica ora il teorema della divergenza agli integrali di superficie, visto che tutti hanno un prodotto scalare per la normale.

$$(49) \quad \int_V \frac{\partial (\rho \mathcal{E})}{\partial t} dV + \int_V \nabla \cdot (\rho \mathcal{E} \vec{u}) dV = \int_V \rho \vec{f} \cdot \vec{u} dV - \int_V \nabla \cdot (p \vec{u}) dV + \int_V \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) dV + \int_V \rho \dot{q} dV + \int_V \nabla \cdot (\lambda \nabla T) dV$$

Quella ricavata è l'equazione della conservazione dell'energia scritta in forma integrale. Per capire cosa succede a livello puntuale si può ripetere il procedimento seguito precedentemente. Dato che l'integrale dovrà essere valido per qualunque volume al quale si applicherà, l'equivalenza deve essere valida anche per le funzioni integrande.

$$(50) \quad \frac{\partial (\rho \mathcal{E})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathcal{E} \vec{u}) = \rho \vec{f} \cdot \vec{u} - \nabla \cdot (p \vec{u}) + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) + \rho \dot{q} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

Si è ottenuta l'equazione differenziale della conservazione dell'energia.

Se si riprende in considerazione la conservazione della massa e la si moltiplica per \mathcal{E} si ottiene:

$$(51) \quad \mathcal{E} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathcal{E} \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0$$

Se si riprende la 50 e si sviluppa il primo e il secondo termine si ottiene che non sono altro che la derivata totale dell'energia moltiplicata per la densità.

$$(52) \quad \begin{aligned} \frac{\partial (\rho \mathcal{E})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathcal{E} \vec{u}) &= \rho \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \mathcal{E} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathcal{E} \nabla \cdot (\rho \vec{u}) + \rho \vec{u} \cdot \nabla \mathcal{E} \\ &= \rho \left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \mathcal{E} \right) = \rho \frac{D\mathcal{E}}{Dt} \end{aligned}$$

Quindi l'equazione differenziale della conservazione dell'energia può essere scritta nel seguente modo:

$$(50) \quad \rho \frac{D\mathcal{E}}{Dt} = \rho \vec{f} \cdot \vec{u} - \nabla \cdot (p \vec{u}) + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) + \rho \dot{q} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

11 CONDIZIONI AL CONTORNO

A differenza delle equazioni che governano il processo, le condizioni al contorno sono specifiche per il problema che deve essere studiato. Si analizzi la seguente figura.

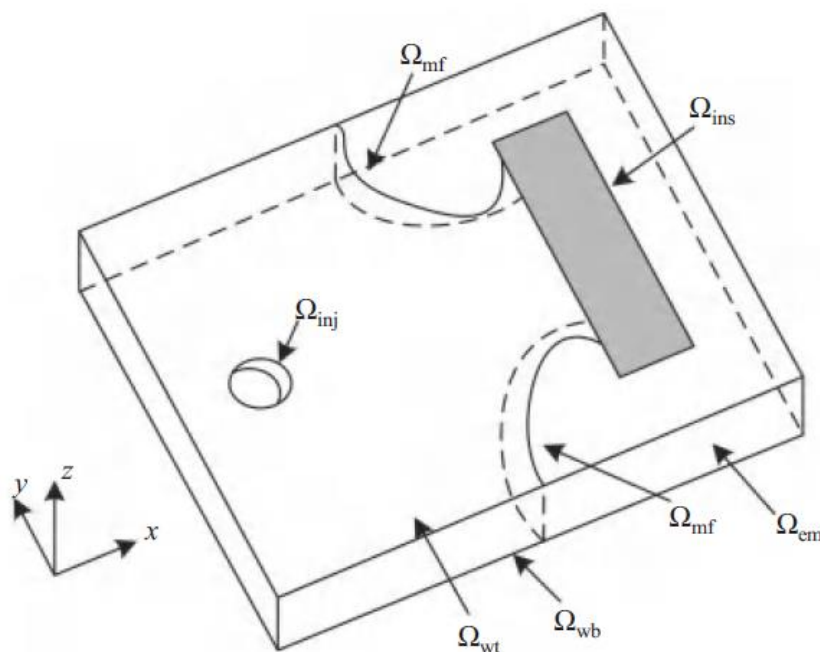


Figura 15 Schema delle condizioni al contorno

Questa immagine rappresenta una semplice cavità di uno stampo nella quale si possono evidenziare le seguenti superfici:

- Ω_{inj} è la superficie che permette al polimero fuso di entrare nello stampo
- Ω_{em} è la superficie che rappresenta il bordo dello stampo, che sarà direttamente in contatto con il polimero fuso
- Ω_{wb} e Ω_{wt} rappresentano rispettivamente le superfici di bordo inferiore e superiore dello stampo
- Ω_{ins} definisce la superficie dello stampo in corrispondenza degli inserti
- Ω_{mf} definisce la superficie in corrispondenza del fronte di flusso

Le condizioni al contorno che governano lo stampaggio a iniezione possono essere suddivise in:

- Condizioni al contorno di pressione
- Condizioni al contorno di temperatura
- Condizioni al contorno di scorrimento

11.1 CONDIZIONI AL CONTORNO DI PRESSIONE

Riferendosi alle superfici impermeabili dello stampo si può affermare che in tali zone si avrà che la derivata della pressione nella direzione normale alla superficie è nulla. In termini fisici ciò significa che non ci sarà un flusso di materiale plastico attraverso queste superfici. Quindi si può scrivere:

$$(51) \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ per } \Omega_{em}, \Omega_{wb}, \Omega_{wt}, \Omega_{ins}$$

La portata di fluido q , che determina la velocità di iniezione o la pressione di iniezione, è nota nel punto di ingresso del materiale in cavità, ossia:

$$(52) \quad q = q_{inj} \text{ o } p = p_{inj} \text{ per } \Omega_{inj}$$

In genere la portata di iniezione del polimero può essere ricavata dividendo il volume della cavità da riempire per il tempo di iniezione impostato dall'utente. Inoltre durante la fase di impaccamento viene impostata una pressione da applicare sul polimero, che sarà uguale a quella da usare nella superficie di iniezione.

L'ultima condizione al contorno per la pressione riguarda il fronte di flusso del materiale. Ipotizzando che nello stampo siano presenti gli sfoghi d'aria opportunamente dimensionati, l'aria presente all'interno dello stampo sarà alla pressione atmosferica. Quindi si può affermare che la pressione in queste superfici è uguale a zero.

$$(52) \quad p = 0 \text{ per } \Omega_{mf}$$

11.2 CONDIZIONI AL CONTORNO DI TEMPERATURA

Per quanto riguarda la temperatura si può affermare che la temperatura attraverso lo spessore è uguale alla temperatura nello spessore del punto di iniezione, che viene impostata nell'input dell'analisi.

$$(53) \quad T(z) = T_{inj}(z) \text{ per } \Omega_{inj}$$

Molti software di simulazione assumono che la temperatura nella cavità è uguale a quella nel punto di iniezione. Questo non si discosta molto dalla realtà, poiché durante il riempimento il polimero viene iniettato molto rapidamente all'interno della cavità e, grazie alla conduzione e alla generazione di calore per frizione, la temperatura si trasmette velocemente attraverso lo spessore.

Nelle superfici dello stampo la temperatura del fuso sarà uguale a quella della superficie stessa. Se non sono presenti i canali di condizionamento nel modello della simulazione allora la temperatura delle superfici impermeabili viene ipotizzata costante. Nel caso in cui i canali siano stati modellati, il software effettuerà prima un'analisi termica, ricavando i valori di temperatura sulle superfici dello stampo, che verranno utilizzati come condizioni al contorno nella simulazione di riempimento. Si avrà quindi:

$$\begin{aligned}
 (54) \quad & T = T_{em} \text{ per } \Omega_{em} \\
 & T = T_{wt} \text{ per } \Omega_{wt} \\
 & T = T_{wb} \text{ per } \Omega_{wb} \\
 & T = T_{ins} \text{ per } \Omega_{ins}
 \end{aligned}$$

11.3 CONDIZIONI AL CONTORNO DI SCORRIMENTO

Riferendosi alle superfici di contatto tra stampo e polimero fuso si può pensare che il materiale plastico sia fermo all'interfaccia per continuità. Quindi si può scrivere:

$$(55) \quad \vec{u} = 0 \text{ per } \Omega_{em}, \Omega_{wt}, \Omega_{wb}$$

IV DALLO STAMPO AL MODELLO MOLDFLOW

12 ANALISI DELL'ATTREZZATURA

Generalmente le analisi di simulazione di stampaggio vengono utilizzate per eseguire una fattibilità del processo per il componente preso in esame. In questa fase non si conosce come sarà fatto lo stampo, pertanto vengono lanciate delle simulazioni allo scopo di capire se il componente deve subire delle modifiche per renderlo idoneo al processo.

In altri casi si lanciano delle simulazioni di stampaggio dopo che lo stampo è stato costruito. Ad esempio se il componente fosse eccessivamente deformato si potrebbe lanciare una simulazione per capire se possono essere modificate le temperature dei condizionamenti in modo da controllare le deformazioni.

L'argomento di questa tesi ricade nel secondo caso, in quanto lo stampo è stato già costruito e si vuole verificare se ciò che accade nella realtà è uguale a ciò che accade nella simulazione. Per fare ciò si dovrà analizzare l'architettura dello stampo, in modo da ottenere un modello il più possibile fedele alla realtà.

Il componente preso in esame nella tesi è lo skid plate della FIAT 500L. Questo componente è collocato nella zona posteriore della vettura al di sotto del paraurti posteriore. La sua funzionalità è principalmente estetica ma funge anche da riparo dei componenti situati al di sotto del paraurti. Nell'immagine è riportata una foto dello skid plate (elemento grigio in basso).

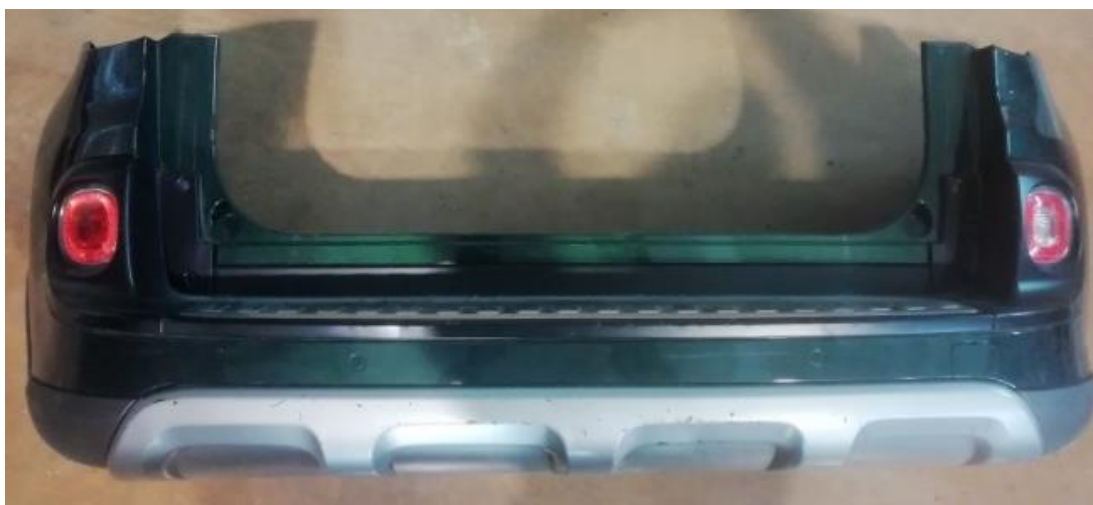


Figura 16 Paraurto posteriore fiat 500L

In questo capitolo si analizzerà lo stampo che realizza il componente skid plate, così da comprenderne meglio il funzionamento. Inoltre ciò è indispensabile ai fini della realizzazione del modello FEM. Nelle figure seguenti vengono riportate le viste in pianta della matrice e del punzone prese dal modello CAD dello stampo.

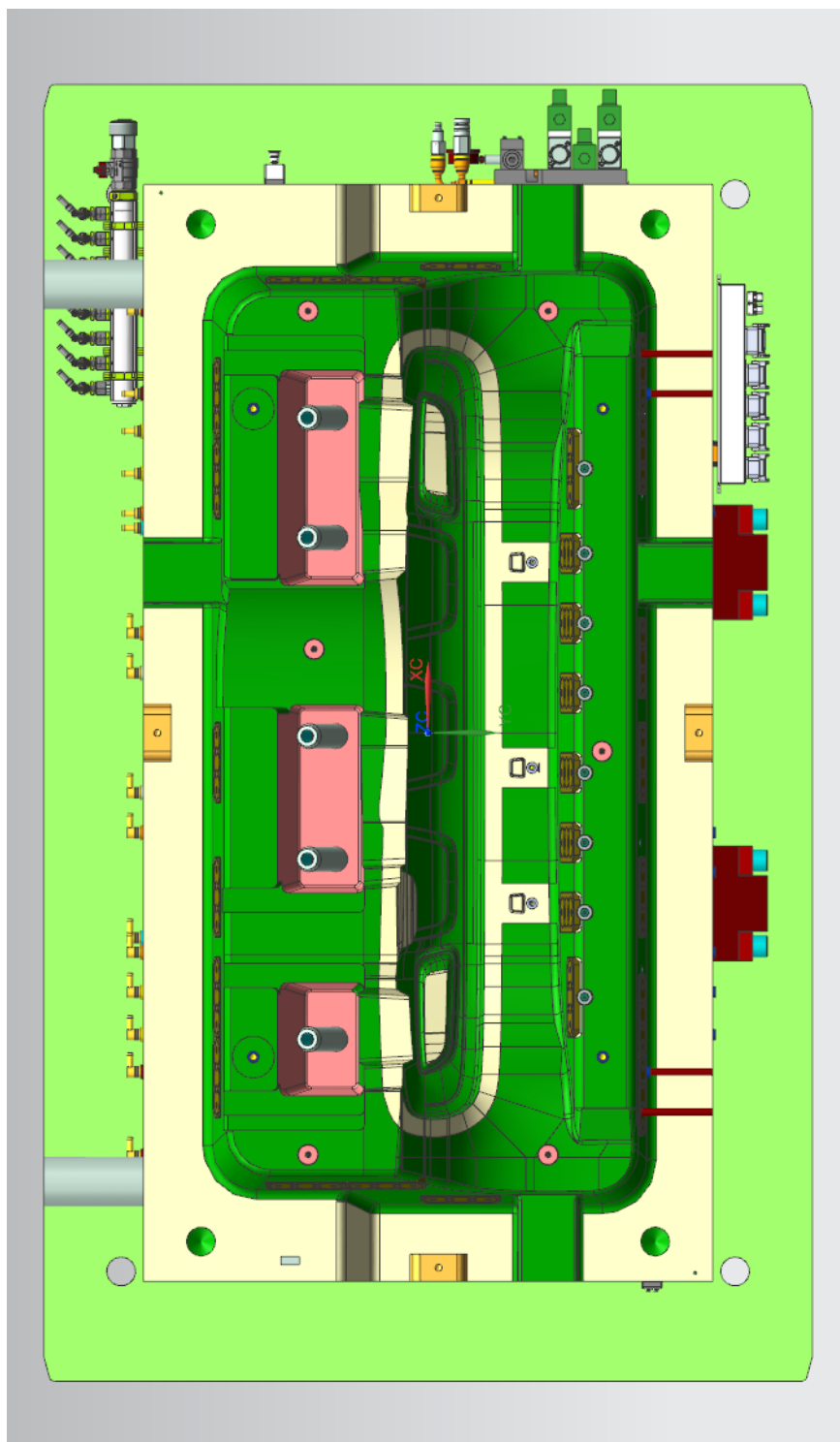


Figura 17 CAD Matrice

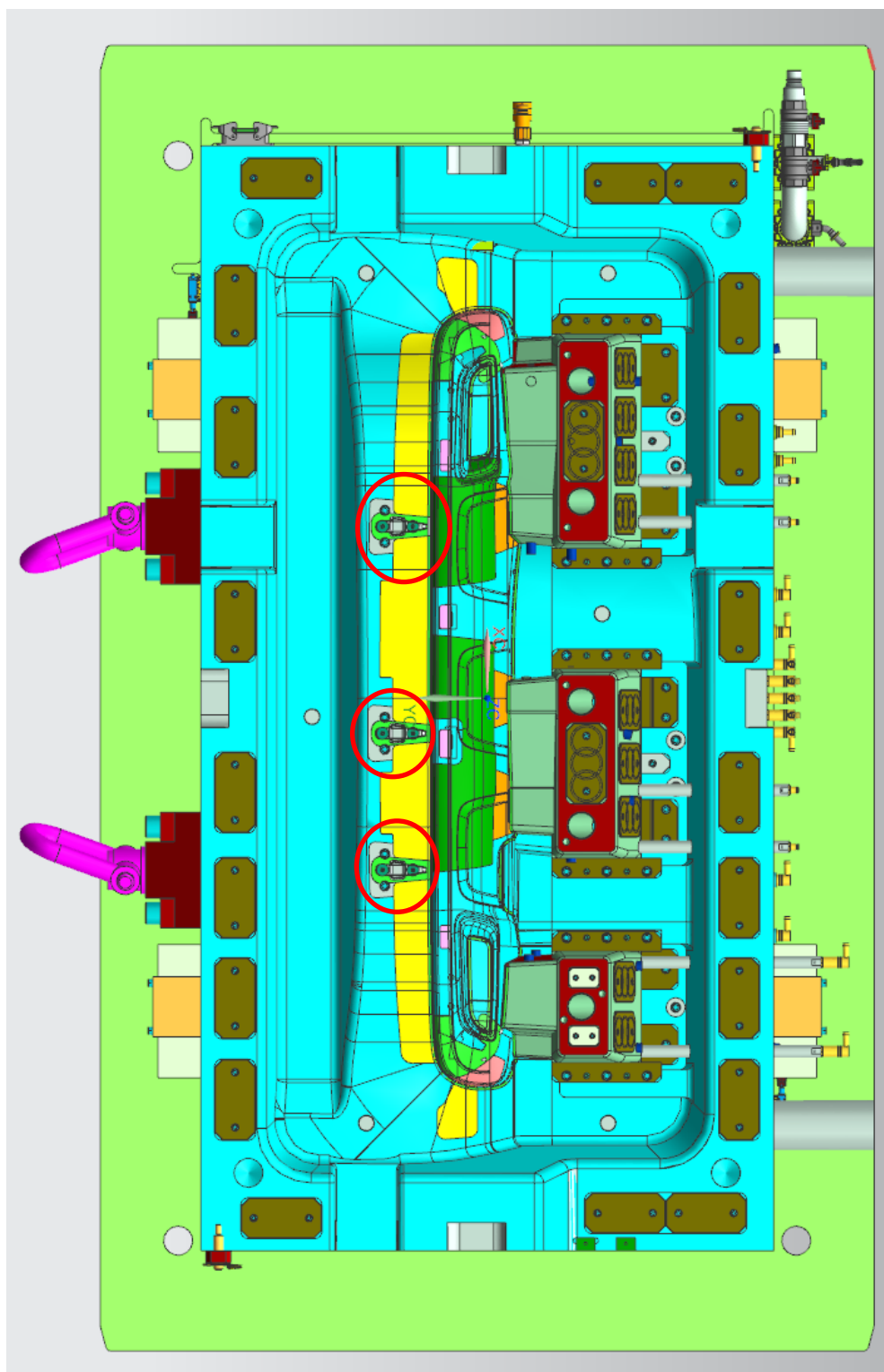


Figura 18 CAD punzone

Analizzando le figure si può capire dove sono posizionati i punti di iniezione. Nel punzone sono posizionati tre tasselli di iniezione, evidenziati nella figura 2. Per capire la tipologia del punto di iniezione si riporta una sezione effettuata nel punto centrale.

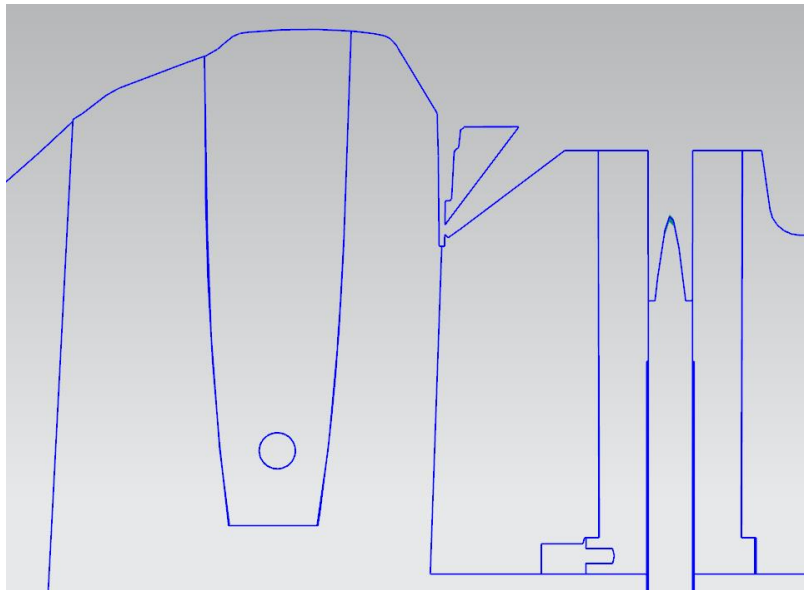


Figura 19 Sezione nel punto di iniezione

Dalla sezione si può notare che il punto è sotto la linea di divisione stampo e quindi il punto di iniezione sarà di tipo sottomarina. Analizzando il tassello si è ricavata la forma e la dimensione del punto di iniezione.

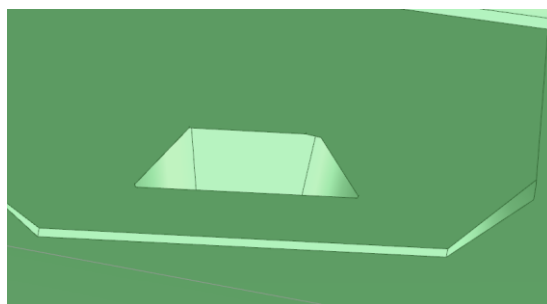


Figura 20 Forma del punto di iniezione

Come si vede dalla figura 4 l'iniezione ha una forma trapezoidale. Le sue dimensioni sono 1,5 mm di altezza, 2,5 mm di base minore e 5 mm di base

maggiore. I canali “freddi” possono essere modellati direttamente all’interno di Moldflow, importando le linee che identificano il percorso e assegnando loro una forma e una dimensione, oppure possono essere importati direttamente tramite il modello meshato del componente. Generalmente si sceglie la prima strada nelle analisi di fattibilità, in quanto non si conosce l’esatta geometria della materozza. Nel caso in cui lo stampo è già stato realizzato si preferisce importare la materozza nella mesh del componente, in quanto è anche più preciso il calcolo degli stress generati nel punto di iniezione.

Un dato importante ai fini dell’analisi di processo è la camera calda, ovvero la parte dello stampo che ha il compito di trasportare la materia plastica fusa dall’ugello del cilindro di plastificazione fino ai canali freddi dello stampo e allo stesso tempo di mantenerla alla temperatura idonea. Anche questo dato può essere omesso in prima battuta, poiché le dimensioni di tale componente dipendono dagli ingombri presenti nello stampo, ma per analisi più approfondite è bene inserirla, in quanto da essa dipende la caduta di pressione all’interno dello stampo.

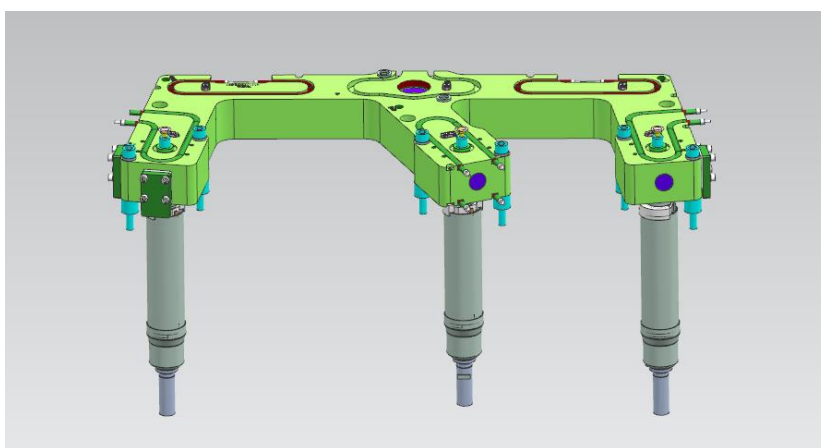


Figura 21 Camera calda dello stampo

Una volta ricavata la geometria della camera calda si dovranno ricavare le dimensioni degli ugelli per poi riportarli nei dati della simulazione. Per fare ciò si esegue una sezione in corrispondenza degli ugelli.

Una volta terminato lo studio della camera calda si dovranno individuare i canali di condizionamento, i quali sono scavati all'interno della matrice e del punzone. Si dovrà ricavare il percorso dei canali di condizionamento e il diametro dei fori, per poi realizzare il loro modello all'interno del simulatore. Anche per i canali di condizionamento vale lo stesso discorso fatto in precedenza, ovvero che possono essere inseriti all'interno dello studio moldflow solo se si conosce già lo stampo, poiché il loro posizionamento dipende dagli ingombri come i movimenti, i tasselli, gli estrattori e così via.

Il ruolo centrale nella preparazione del modello è rivestito dal componente che dovrà essere realizzato. Si deve prestare molta attenzione ad esso in quanto potrebbe precludere l'accuratezza dei risultati ottenuti. Per questo motivo in genere si utilizzano dei software dedicati a questo scopo chiamati pre-processor, i quali permettono di ottenere delle mesh con i requisiti richiesti dal simulatore.

13 OTTIMIZZAZIONE DELLA MESH

Quando si realizza una mesh si deve prestare attenzione a una serie di parametri geometrici che potrebbero causare errori di calcolo. Si mostrano di seguito i più rilevanti.

La prima prerogativa di una mesh di tipo dual domain è la connessione tra i triangoli. Essi infatti devono formare un volume chiuso, quindi non dovranno essere presenti dei "buchi" all'interno della mesh. Tramite la ricerca dei "free edges" è possibile individuare i triangoli non connessi per poi collegarli nel modo più corretto.

Il programma che ha generato la mesh potrebbe creare i cosiddetti “non-manifold edge”, ovvero dei lati in cui concorrono più di due triangoli. Se succedesse ciò vorrebbe dire che la mesh non è correttamente connessa. Anche questo problema può essere facilmente intercettato tramite lo strumento di analisi della mesh di Moldflow ed essere risolto rimuovendo il triangolo che non fa parte della geometria del componente.

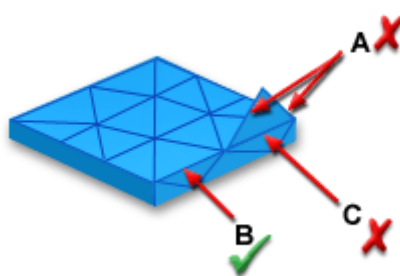


Figura 22 Non manifold edge

Nell'immagine si può notare che il lato C è un “non-manifold edge” poiché vi è un triangolo che non fa parte del componente. I lati A sono invece dei “free edges”.

Una volta terminata la verifica della connessione degli elementi si deve studiare il rapporto di forma o aspect ratio dei singoli triangoli. Questo parametro è dato dal rapporto tra il lato più lungo del triangolo e la sua altezza. Più è alto questo valore e più il triangolo sarà schiacciato. Ai fini della simulazione questi triangoli devono essere rimossi. Tramite lo strumento di diagnosi apposito presente in Moldflow è possibile eliminare tali triangoli. Il valore medio di aspect ratio raccomandato dal Moldflow è di 6, anche se oggi il simulatore accetta valori più alti intorno ai 20, poiché i solutori sono diventati più tolleranti a triangoli deformati.

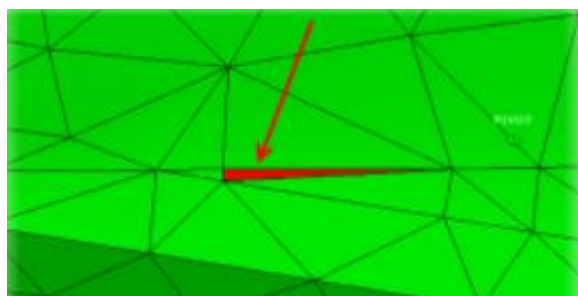


Figura 23 Aspect ratio alto

Dopo aver eliminato tutte le problematiche legate alla mesh si può posizionare il cono di iniezione, ovvero il punto in cui la plastica passa dal cilindro della pressa all'interno dello stampo.

14 IMPOSTAZIONE DEI PARAMETRI DI PROCESSO

Al termine della messa a punto del modello si potranno impostare i parametri di stampaggio. Il primo dato di input è il materiale plastico che verrà iniettato. Questo può essere selezionato da un ampio database che si trova all'interno del simulatore nel quale sono riportati una vasta gamma di materiali commerciali.

A livello di parametri di processo si dovranno impostare le temperature dello stampo e della plastica iniettata, il tempo di iniezione, la pressione, il tempo di mantenimento e il tempo di raffreddamento. In una simulazione di fattibilità questi parametri vengono scelti dall'utente in base all'esperienza e ai dati riportati nella scheda del materiale. Nel caso oggetto della tesi, i dati si imposteranno secondo la scheda dei parametri di stampaggio realmente utilizzati nella realizzazione del manufatto.

Durante la prova stampo l'operatore registra i parametri all'interno di un verbale, in modo da poterli settare come parametri di partenza nella successiva prova. Da questo documento è stato possibile ricavare i dati di input richiesti dal simulatore:

- Tempo di iniezione: 9,1 s
- Temperatura stampo: 20°C
- Temperatura fuso: 240°C
- Tempo di apertura primo ugello: 4 s
- Tempo di apertura secondo ugello: 6 s
- Pressione di mantenimento: 55 MPa
- Tempo di mantenimento: 20 s

Il tempo di raffreddamento non è stato ricavato dalla scheda parametri, ma direttamente dal software, in quanto prima di lanciare l'analisi di flusso è stata eseguita un'analisi termica che ha stabilito il tempo di raffreddamento totale, compreso di iniezione e impaccamento, uguale a 74s.

Una volta impostati i parametri di stampaggio è stata lanciata la simulazione, dalla quale sono stati ricavati i risultati mostrati nel capitolo successivo.

V ANALISI DEI RISULTATI DI MOLDFLOW

15 INTRODUZIONE AI RISULTATI

Quando il simulatore termina un'analisi permette all'utente di visualizzare una serie di risultati. L'abilità dell'analizzatore risiede nel saperli leggere ed interpretare, cercando di intercettare le possibili problematiche derivanti dalle scelte fatte dal progettista del prodotto. Inoltre deve saper valutare se le proprie scelte sulle ipotesi di iniezione consentiranno di ottenere un buon prodotto finito che rispetti le richieste dimensionali ed estetiche.

Nello studio che si prefigge la tesi non si vuole valutare la bontà delle scelte fatte, ma piuttosto analizzare la corrispondenza della simulazione rispetto alla realtà. Pertanto si mostreranno i risultati ottenuti per comprendere se i parametri ottenuti dalla macchina sono congrui con quelli ottenuti dalla simulazione, dopodiché si analizzerà nel dettaglio il risultato delle deformazioni e lo si confronterà con i rilievi dimensionali ottenuti sul pezzo stampato.

16 TEMPO DI RIEMPIMENTO

Il risultato che viene utilizzato per capire come si riempie la cavità è il filling time o tempo di riempimento. Questo permette di visionare in step temporali successivi come la plastica scorre all'interno dello stampo. È utile per capire se gli spessori sono adeguati per non avere difetti come mancati riempimenti o esitazioni. Quest'ultima si verifica quando si presenta una riduzione di spessore lungo il percorso della massa fusa e la pressione più alta richiesta dalla plastica per riempire la cavità fa rallentare il fronte di flusso.

Nelle figure successive viene mostrato l'avanzamento del fronte in diversi istanti temporali.

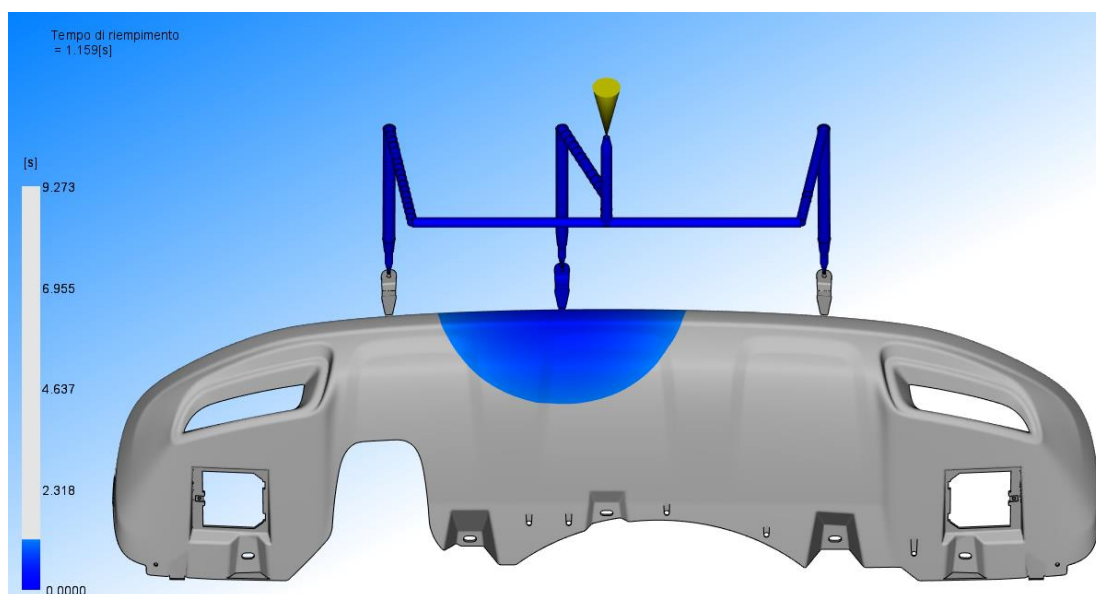


Figura 24 Fronte di flusso a 1,16 s

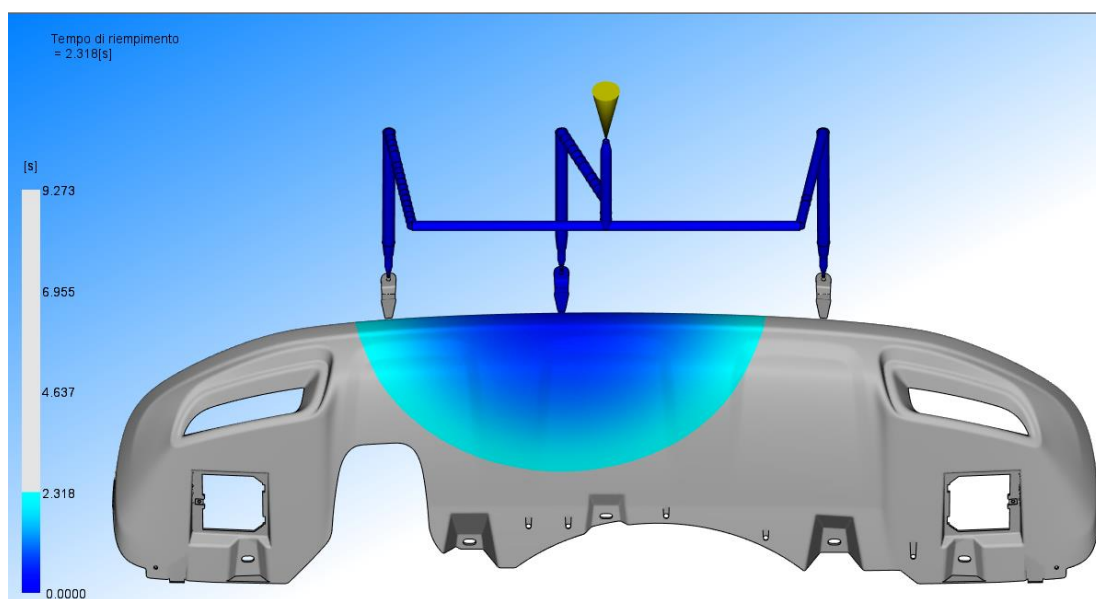


Figura 25 Fronte di flusso a 2,32 s

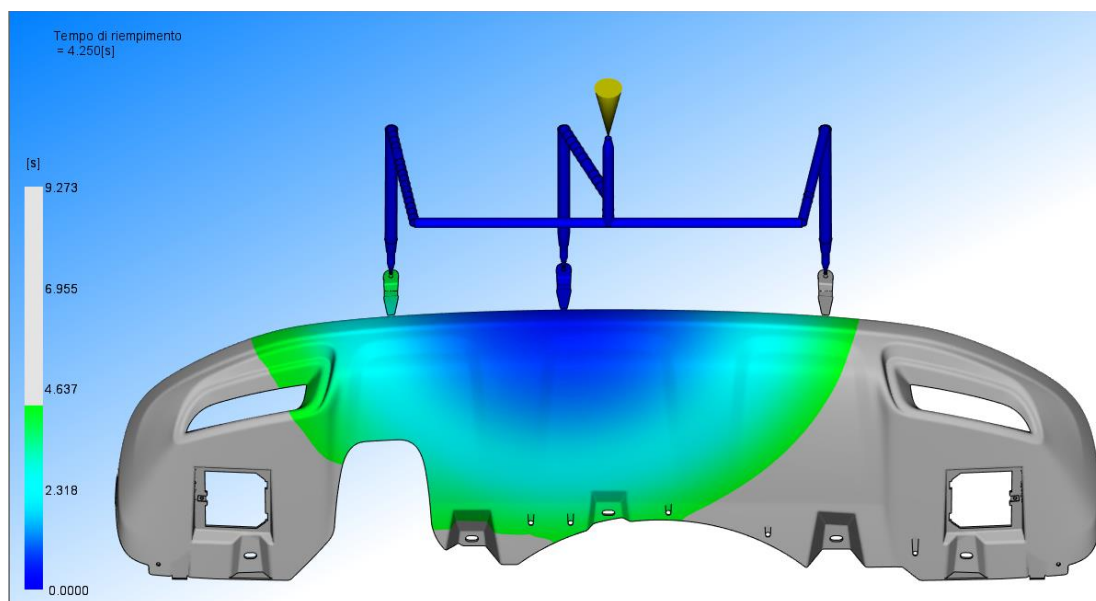


Figura 26 Fronte di flusso a 4,25 s

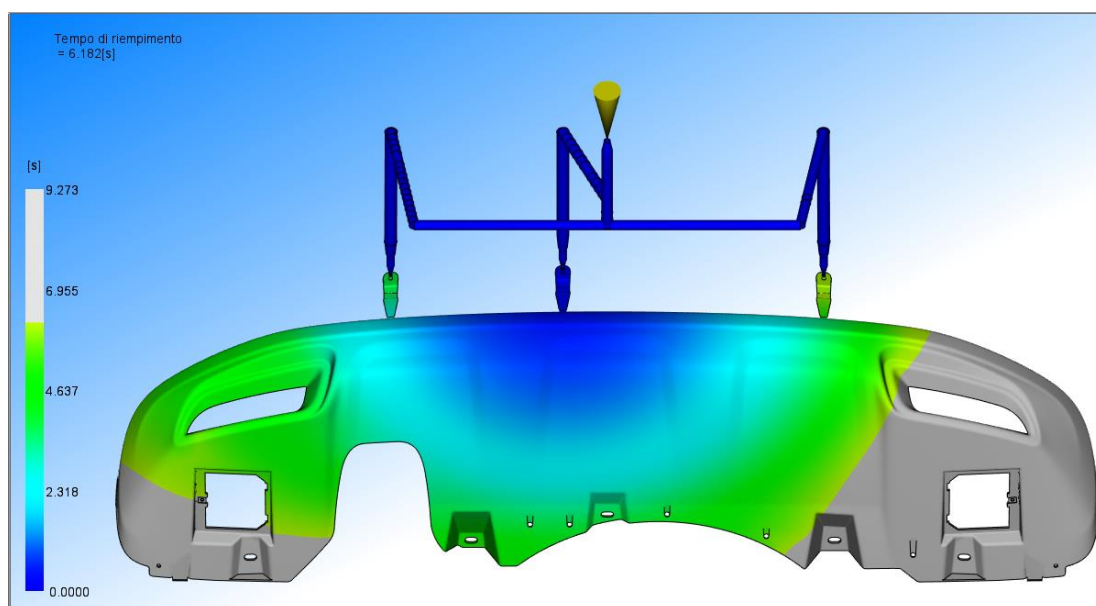


Figura 27 Fronte di flusso a 6,18 s

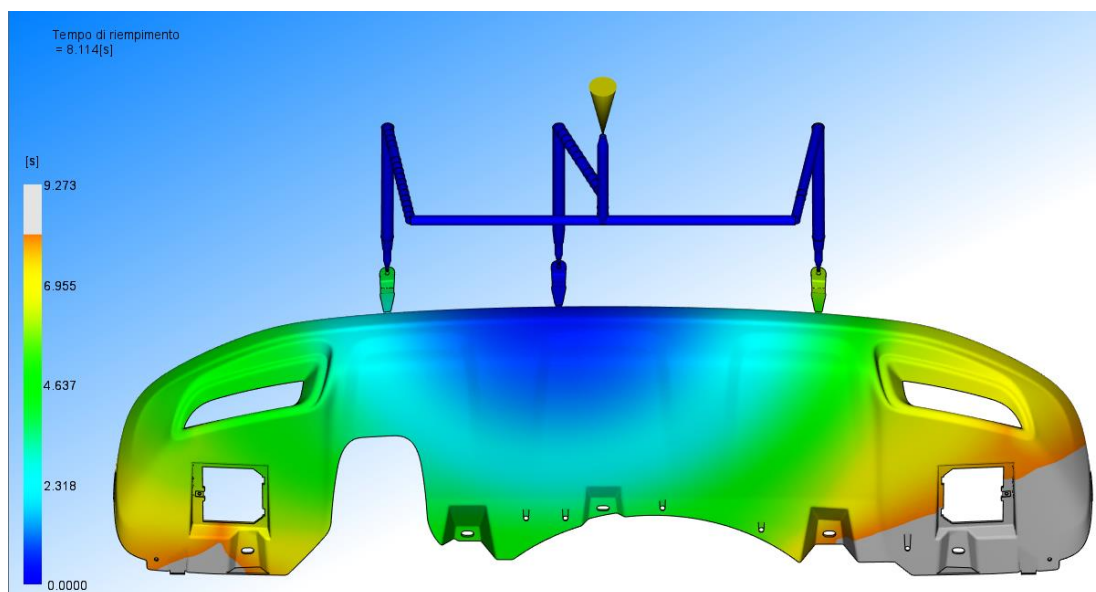


Figura 28 Fronte di flusso a 8,11 s

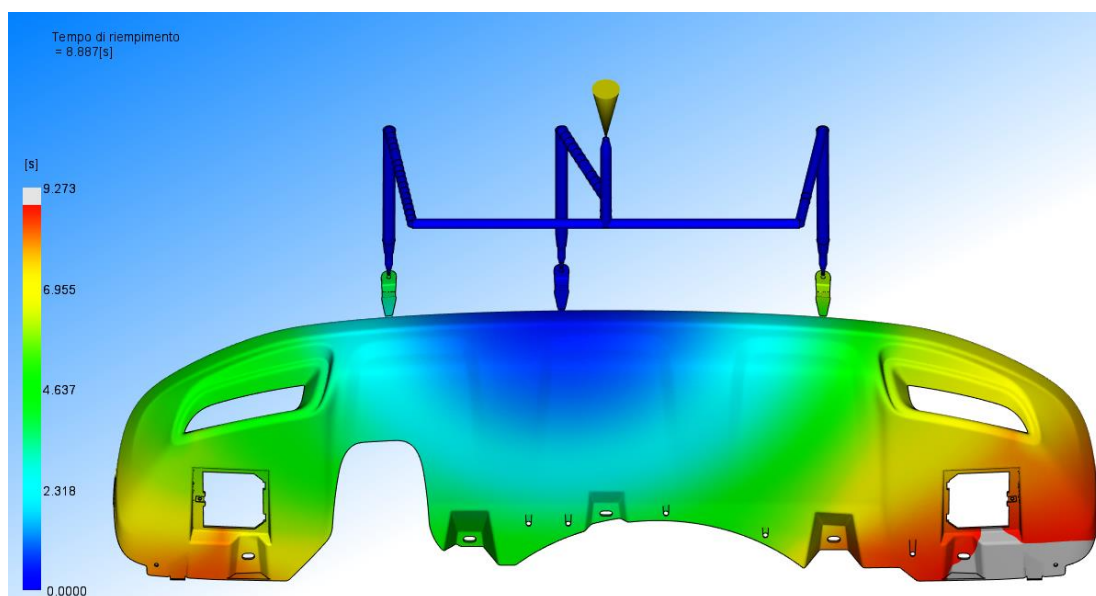


Figura 29 Fronte di flusso a 8,88 s

Analizzando la figura si può notare che la sequenza di apertura scelta consiste nel partire con l'otturatore centrale per poi proseguire con i due laterali. Questo metodo è denominato apertura sequenziale degli ugelli ed è una tecnica usata per particolari estetici in cui non si vuole avere linee di giunzione in vista. Per

farlo bisogna predisporre l'attrezzatura con un sistema di otturatori comandati da un circuito oleodinamico.

17 PRESSIONE ALLA COMMUTAZIONE

Un parametro fondamentale da monitorare durante lo stampaggio di un particolare è la pressione che si genera all'interno della cavità. Da esso dipende la forza di chiusura che la pressa dovrà applicare per impedire allo stampo di aprirsi ed anche le deformazioni finali del manufatto.

Oggi è possibile monitorare l'andamento della pressione all'interno della cavità tramite l'inserimento di sensori di pressione in determinati punti. Prima del loro utilizzo l'unica pressione rilevata dalla pressa era quella generata dal pistone che muove la vite di iniezione. Visto che lo stampo preso in esame non è dotato di sensori di pressione è sensato analizzare il risultato della pressione alla commutazione da controllo in velocità a controllo in pressione (V/P switchover).

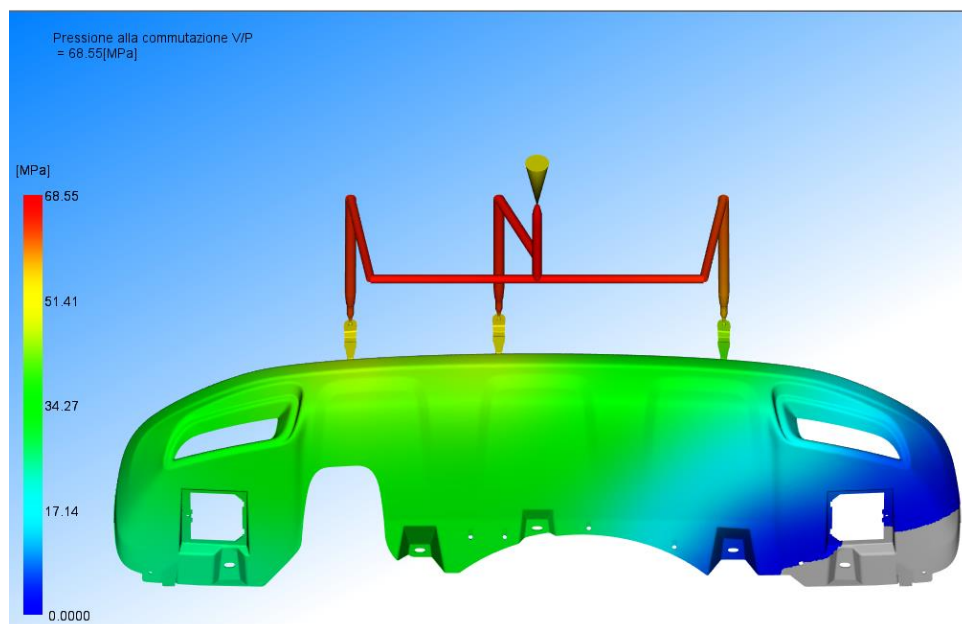


Figura 30 Andamento della pressione al V/P switchover

Analizzando la figura si nota che il picco di pressione è di 69 MPa e si trova nel punto in cui il materiale inizia a fluire all'interno della camera calda. Man mano che ci si allontana da questo punto la pressione tende a diminuire fino ad annullarsi sul fronte di flusso. Questo comportamento è del tutto ragionevole poiché il fronte si trova a contatto con l'aria contenuta all'interno dello stampo che è alla pressione atmosferica. Per il principio di continuità anche la plastica fusa a contatto con essa dovrà trovarsi alla stessa pressione. Invece la plastica che si trova all'ingresso della camera calda è alla pressione più alta poiché deve spingere tutto il materiale davanti per permettere al flusso di avanzare.

18 PRESSIONE NEL PUNTO DI INIEZIONE

Per capire come la pressione evolve nel tempo il post-processore fornisce il risultato della pressione nel punto di iniezione. Questo restituisce un grafico con la pressione nel punto di iniezione sulle ordinate e il tempo sulle ascisse. Se la pendenza della curva aumenta significa che il flusso sta incontrando un restringimento oppure che il riempimento di uno stampo a multi cavità è sbilanciato.

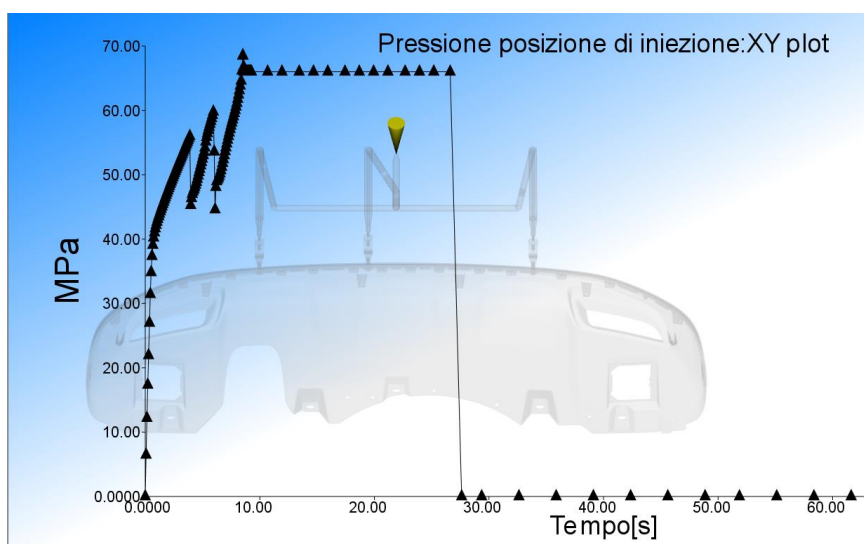


Figura 31 Pressione nel punto di iniezione

Nella figura si può notare che ci sono tre picchi nel grafico. Come spiegato in precedenza nello stampo sono presenti tre otturatori che vengono aperti in tempi diversi stabiliti dal tecnologo di stampaggio. Il primo picco è legato all'apertura del secondo punto di iniezione, il terzo picco all'apertura del secondo e l'ultimo è legato alla commutazione. Si nota che quando si apre l'otturatore la pressione scende per poi riprendere a salire. Per comprendere questo fenomeno si deve analizzare cosa succede all'interno della camera calda durante il riempimento. Inizialmente solo l'otturatore del punto centrale è aperto e la plastica inizia ad attraversarlo. Gli altri due invece sono ancora chiusi e la pressione inizia a salire perché una parte di plastica si accumula in essi. Quando uno dei due viene aperto la pressione dovrà per forza ridursi poiché la plastica contenuta nel ramo di camera che viene aperto dovrà portarsi in equilibrio con quella contenuta dentro lo stampo. Una volta raggiunto l'equilibrio la pressione continuerà a salire, come si vede nel grafico.

19 LINEE DI GIUNZIONE

Un risultato che è largamente utilizzato dagli analisti della simulazione è quello inerente alle linee di giunzione. Queste si creano quando due flussi liberi si incontrano. Tendenzialmente questo accade in due circostanze:

- In presenza di un foro
- In caso di rallentamenti dovuti a differenze di spessore

Le linee di giunzione generano un difetto estetico sulla parte che si presenta come una piccola rigatura. È importante sapere dove le giunzioni cadono per evitare che si collochino in zone visibili all'utilizzatore.

Nel caso che si sta esaminando le giunzioni sono in corrispondenza dei fori e non visibili, quindi non hanno rappresentato un problema estetico.

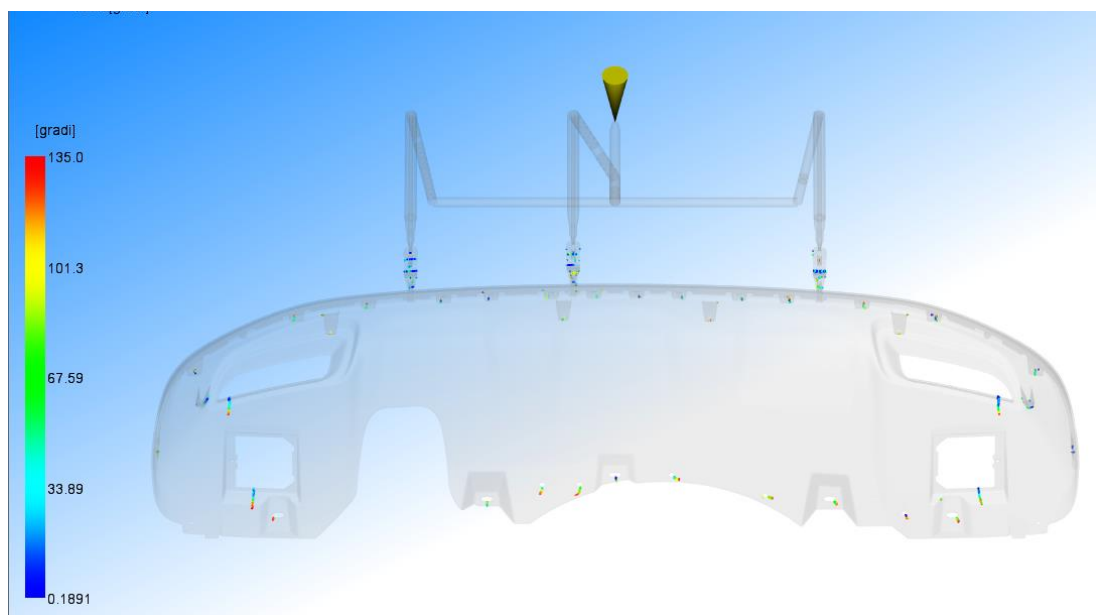


Figura 32 Linee di giunzione

2o RITIRO VOLUMETRICO MEDIO

Il ritiro volumetrico medio è definito come la percentuale di incremento della densità calcolata in un punto. Questa viene calcolata a partire dalla fine dell'impaccamento fino a fine raffreddamento. Come temperatura finale il simulatore considera la temperatura ambiente impostata.

Il valore del ritiro volumetrico danno un'indicazione sull'eventuale presenza di risucchi sul pezzo, che potrebbero influenzare l'estetica del componente. Inoltre si dovrebbe garantire un ritiro volumetrico quasi uniforme sul pezzo in modo di favorire una buona fase di impaccamento.

Nel pezzo analizzato si può notare che la variazione di ritiro percentuale è piuttosto contenuta (dal 2 al 5 %). Quindi i parametri impostati nella realtà sono stati scelti in modo corretto e hanno garantito una buona compattazione del materiale.

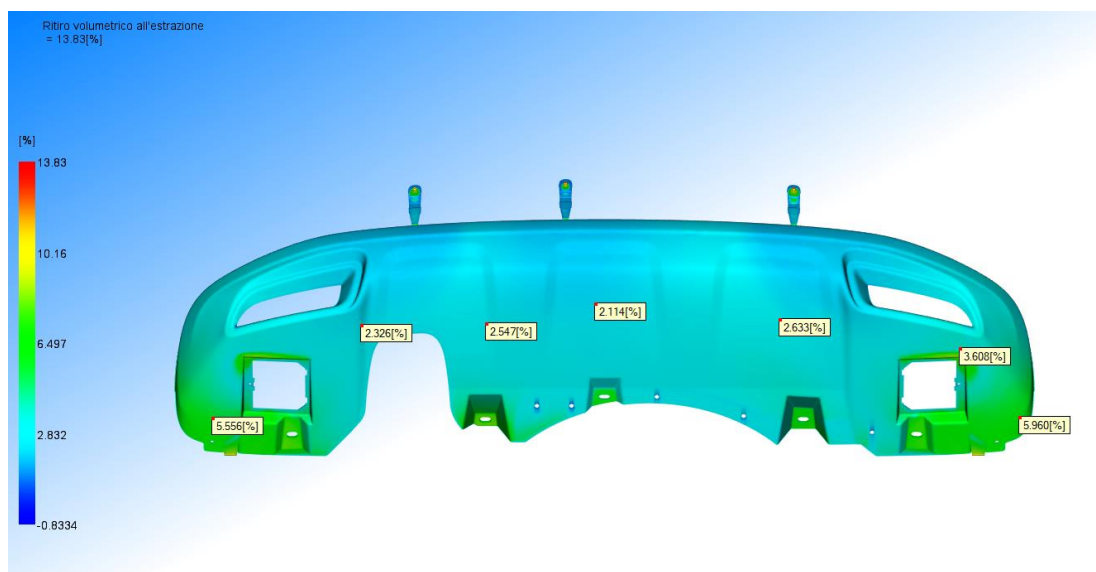


Figura 33 Ritiro volumetrico medio

21 DEFORMAZIONI

Al termine del calcolo di riempimento e impaccamento il software calcola le deformazioni residue sul pezzo. Queste ci interessano particolarmente in quanto sono l'oggetto di studio della tesi.

Il post processore fornisce la possibilità di inserire il ritiro che si applicherà sullo stampo, così da permettere un calcolo più vicino alla realtà. Nel caso esaminato il ritiro assegnato allo stampo era di 0,62%.

I risultati sono stati scomposti lungo le tre componenti degli assi cartesiani.

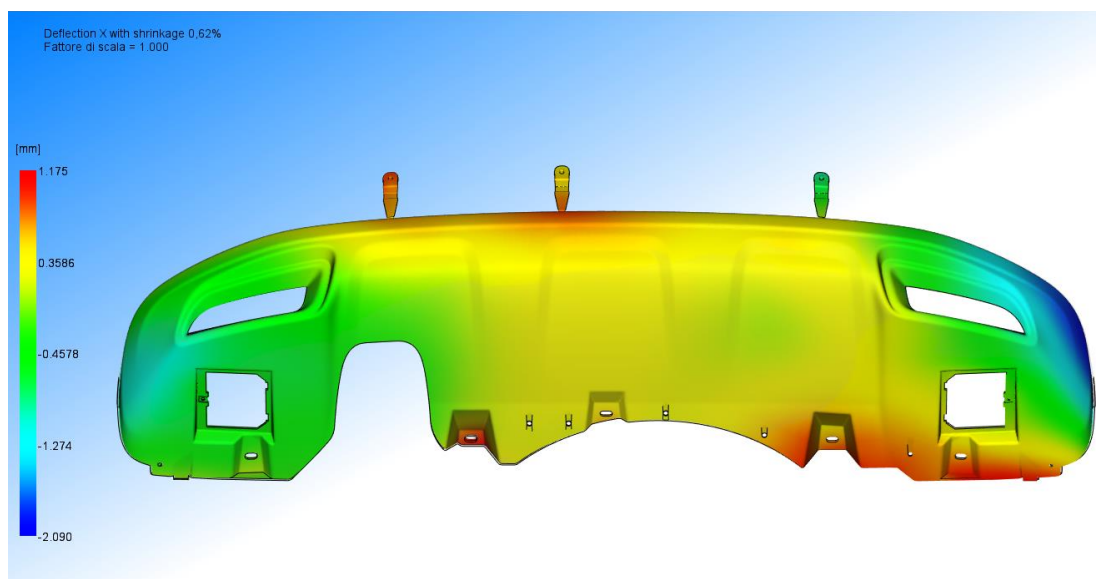


Figura 34 Deformazione in X con ritiro 0,62% applicato

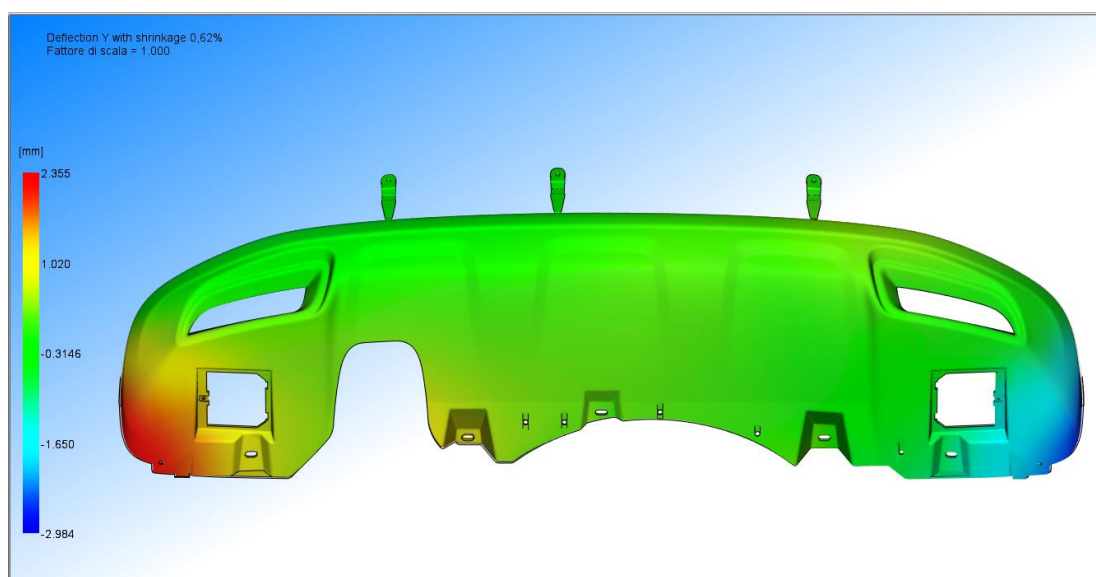


Figura 35 Deformazione in Y con ritiro 0,62% applicato

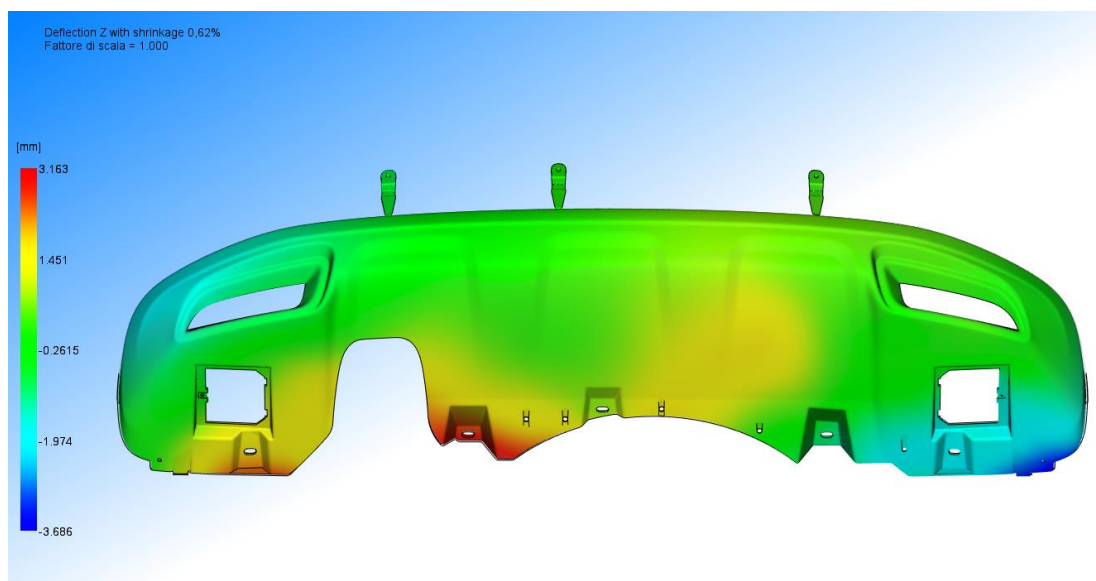


Figura 36 Deformazione in Z con ritiro 0,62% applicato

Oltre al pezzo con una mappa di colori vi è la possibilità di chiedere al post processore di fornire la deformazione localizzata in un punto. Questo sarà possibile confrontando la posizione di un nodo della mesh prima della deformazione e dopo. Ai fini di capire la bontà del risultato rispetto alla realtà è stata realizzata un'analisi puntuale della deformazione.

22 CONFRONTO TRA SOFTWARE E MISURAZIONI

Dopo lo stampaggio del componente è stato misurato il pezzo tramite una macchina di misura a controllo numerico. Per eseguire la misura il pezzo viene montato su un calibro di controllo e vengono scelti dei punti sui quali effettuare la misurazione. Tramite un post processore viene creato un report dimensionale nel quale per ogni punto si riporta la deviazione lungo i tre assi e quella totale.

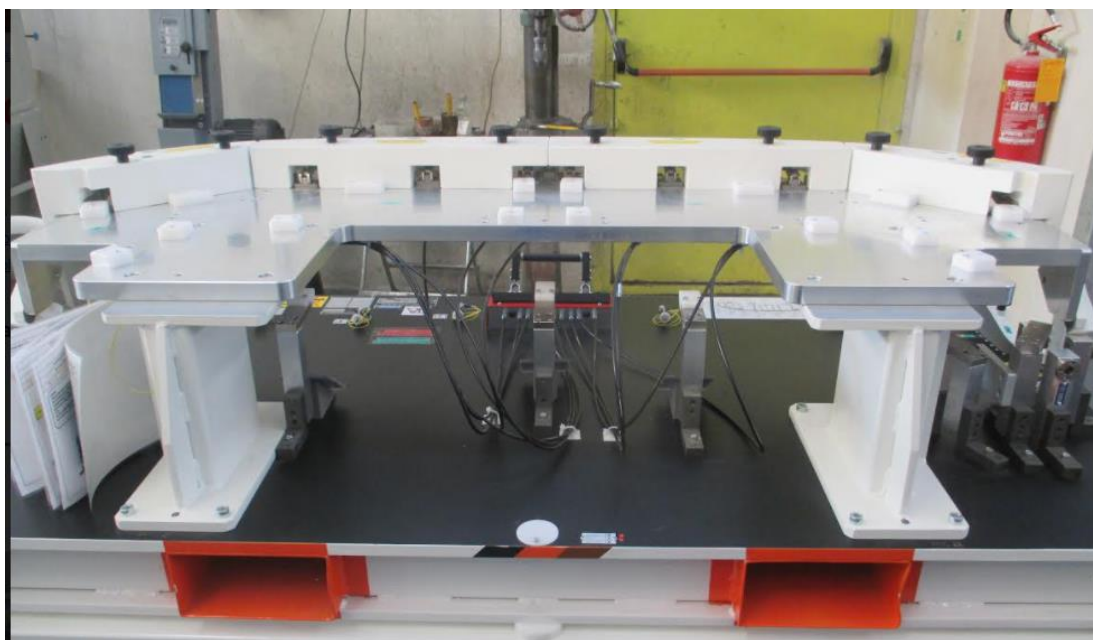
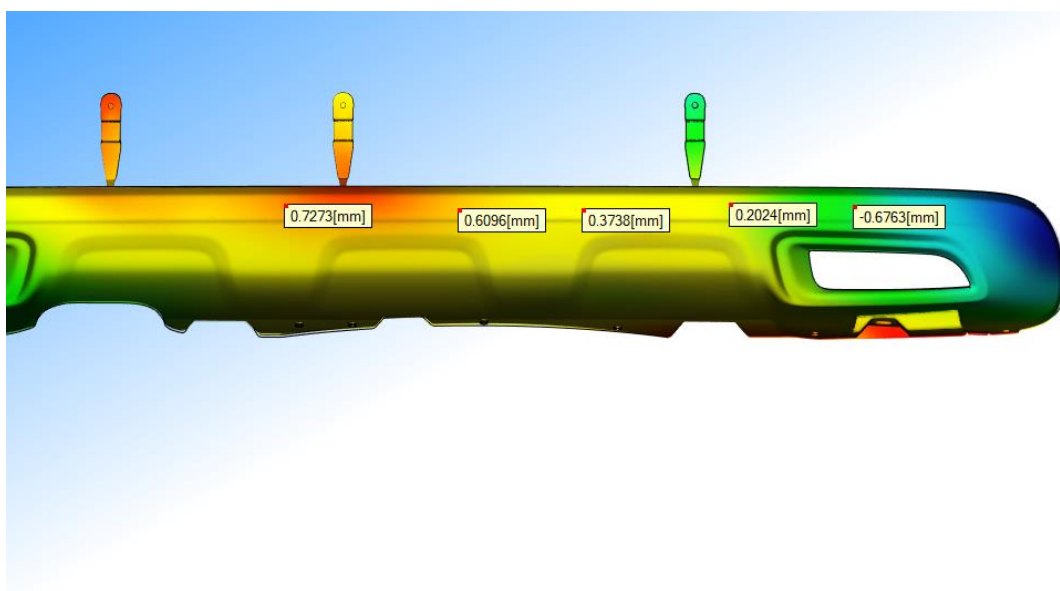


Figura 37 Calibro di controllo del componente skid plate

Nelle successive pagine si illustrerà il confronto tra i dati misurati e quelli calcolati dal post processore.



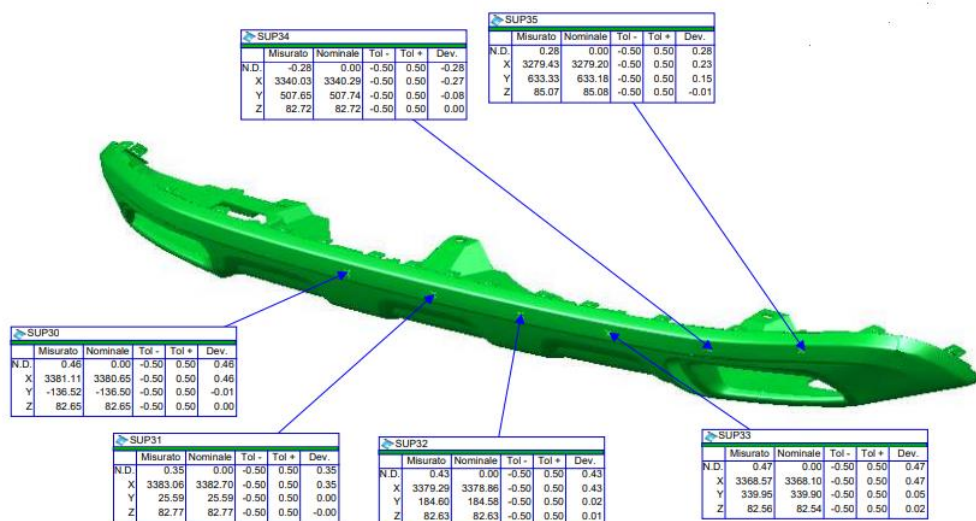
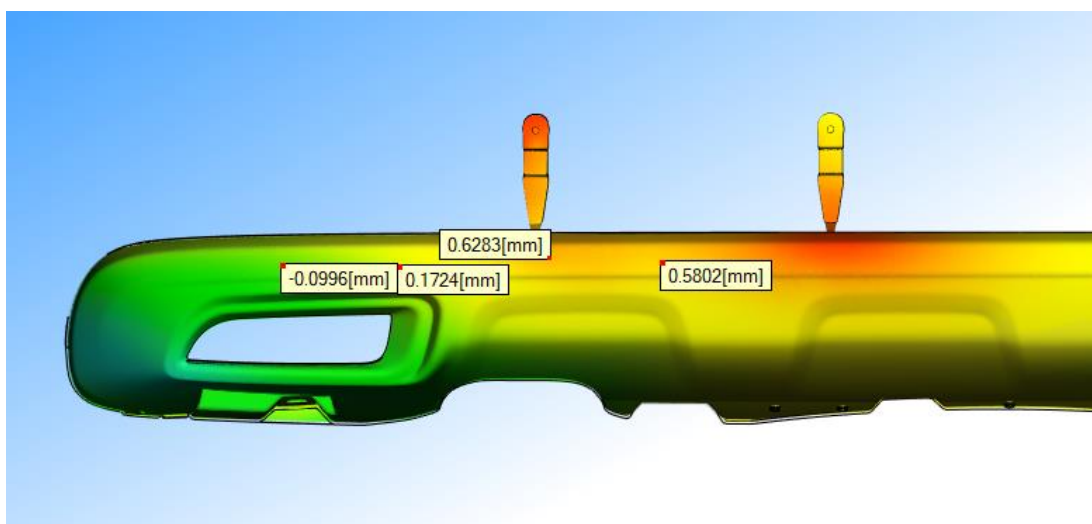


Figura 38 Confronto perimetro lato destro in X



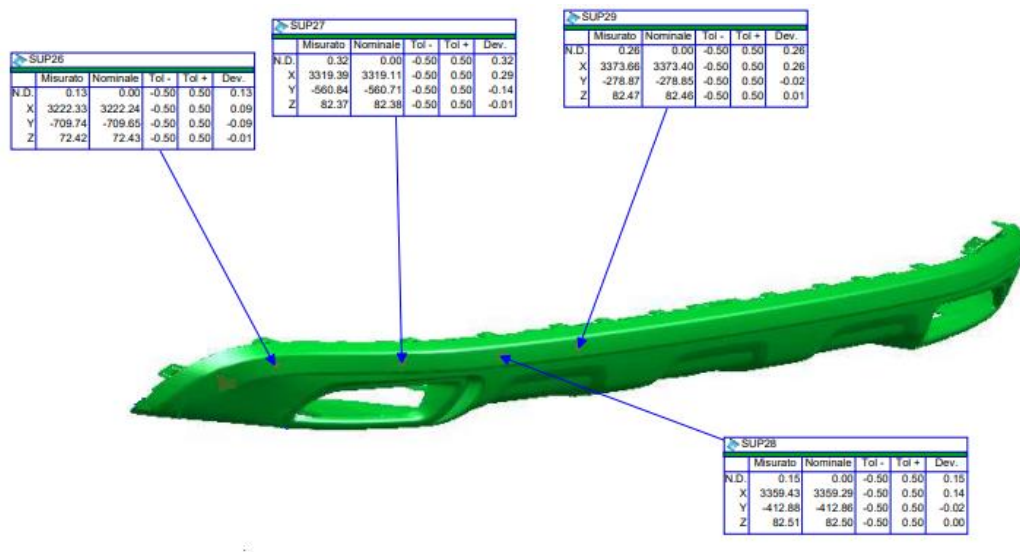


Figura 39 Confronto perimetro lato sinistro in X

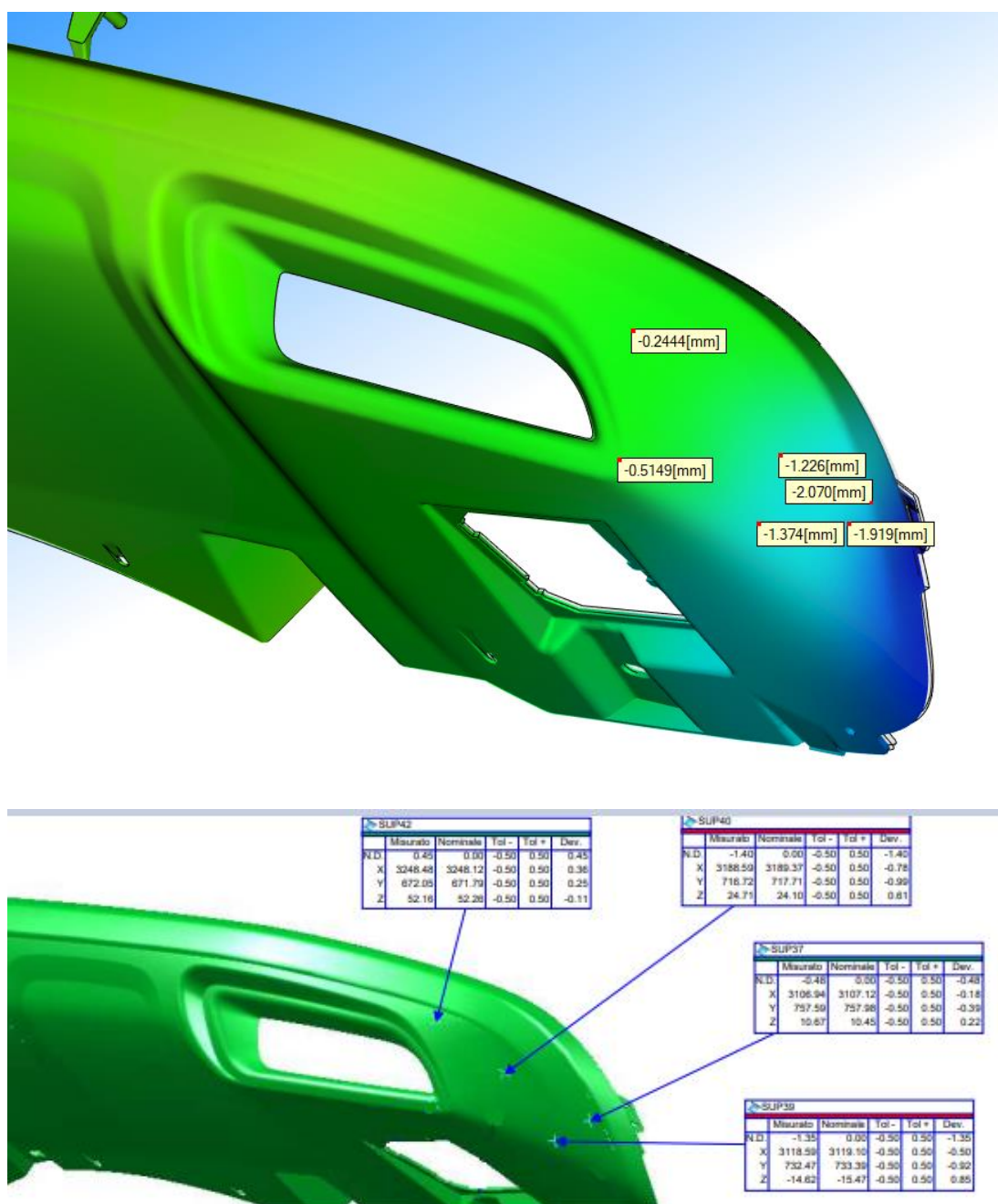


Figura 40 Confronto su lato destro in Y

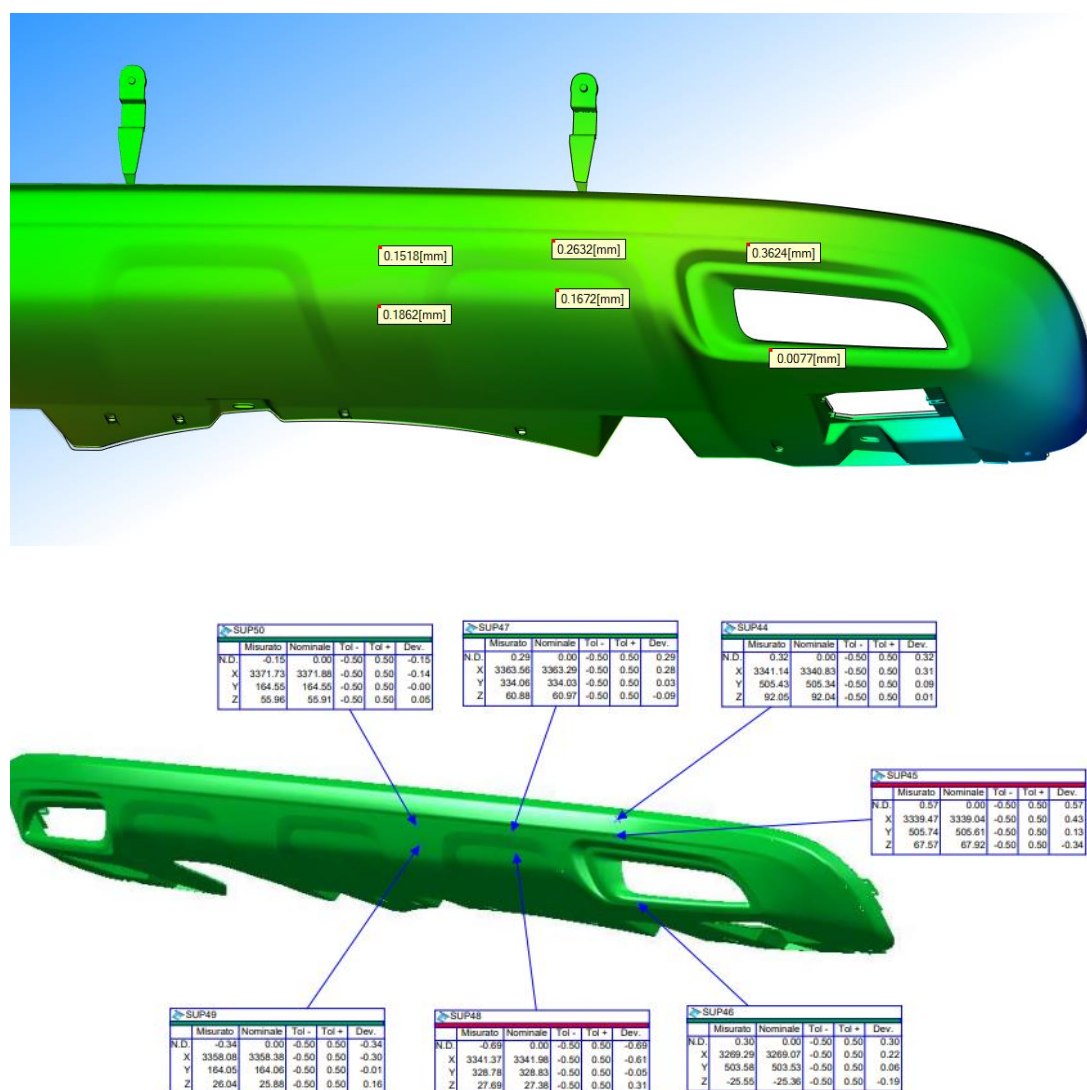


Figura 41 Confronto zona centrale in Y

Nelle figure sopra riportate è stata effettuata un'analisi puntuale della deformazione presa nella direzione più significativa e meno influenzata dal calibro di controllo. Ad esempio nella figura 38 si è analizzato il perimetro del componente che si trova vicino alle zone di fissaggio. Il calibro simula il montaggio e il centraggio del pezzo in vettura. Nella zona presa in esame è presente un centraggio in Y e quindi prendere la misura lungo questa direzione avrebbe riportato dei valori sicuramente diversi dalla simulazione. Infatti il software non tiene conto dei punti di fissaggio del componente. Per avere una

stima migliore della bontà della simulazione in questo caso si è presa in esame la deformazione in X. Si può notare che nella simulazione il pezzo si deforma da 0,7 mm nel centro fino a -0,6 mm sul lato destro. Nella misura su calibro risulta una deformazione da 0,4 mm nella zona centrale fino a -0,2 sul lato destro. Tralasciando la differenza dei valori riportati tra il simulatore e la misura si può notare che la tendenza alla deformazione è corretta in quanto nella zona centrale il pezzo tende a deformarsi verso la X positiva mentre all'esterno tende a muoversi verso la X negativa. Lo stesso comportamento si può notare per la figura 15 dove nella simulazione si passa da 0,5 mm a 0 mm, invece nella misura si passa da 0,26 mm a 0 mm.

Nella figura 39 la simulazione riporta una deformazione in Y da -0,2 mm sul lato interno a -1,9 mm sul lato esterno, invece la misura su calibro riporta da 0,2 mm sul lato interno a -0,9 mm sul lato esterno. Anche in questo caso i valori puntuali delle deformazioni sono diverse ma la tendenza della deformazione è coerente.

Anche nella figura 40 che riporta la deformazione vicino al foro della marmitta e nella zona centrale si può notare che il valore puntuale della deformazione è diverso ma che la tendenza è la medesima. In questo caso il pezzo nella parte più alta ha una deformazione in Y maggiore rispetto alla zona più in basso.

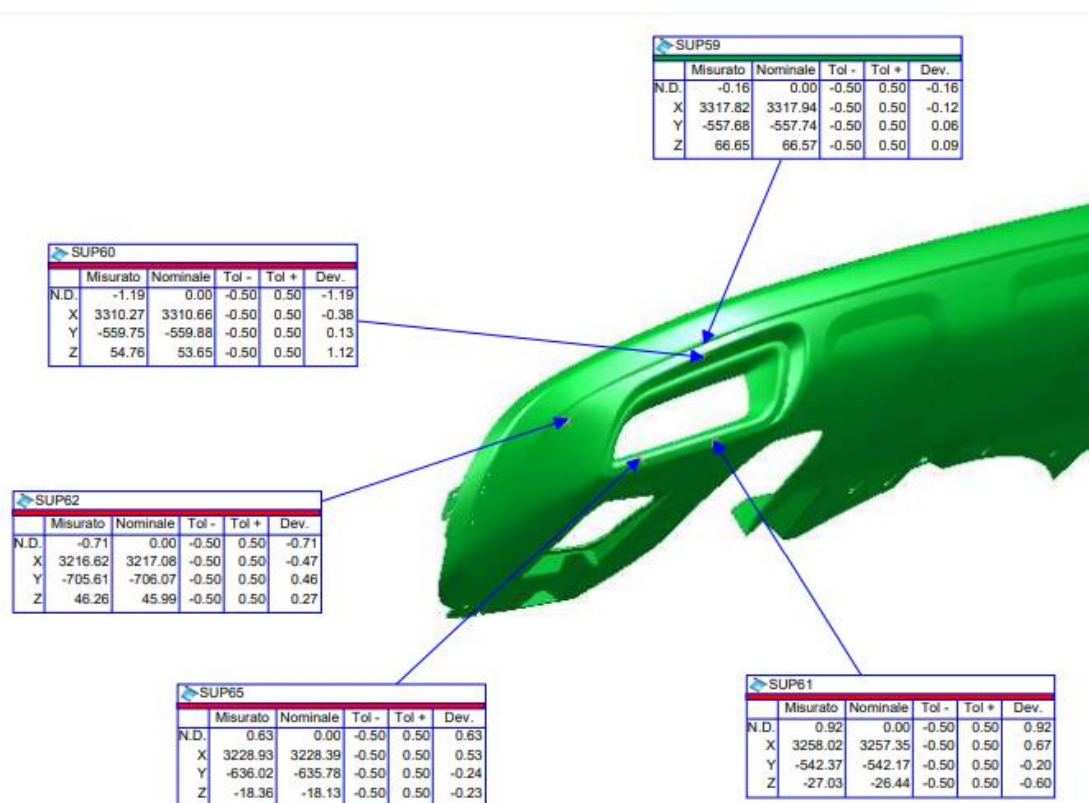
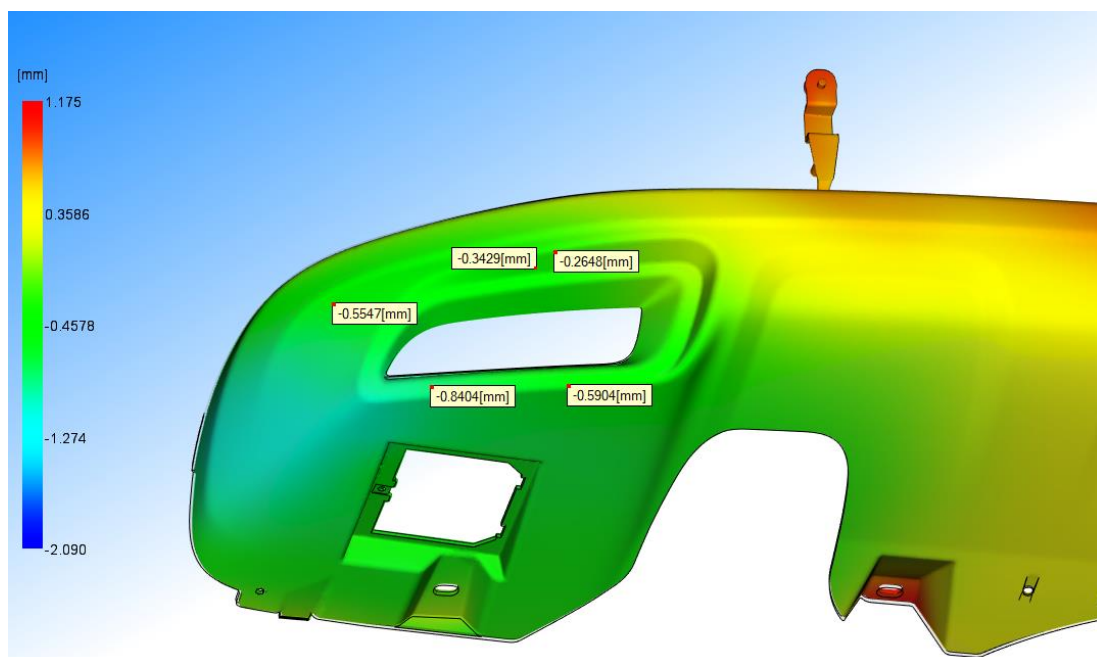


Figura 42 Confronto su lato sinistro in X zona foro

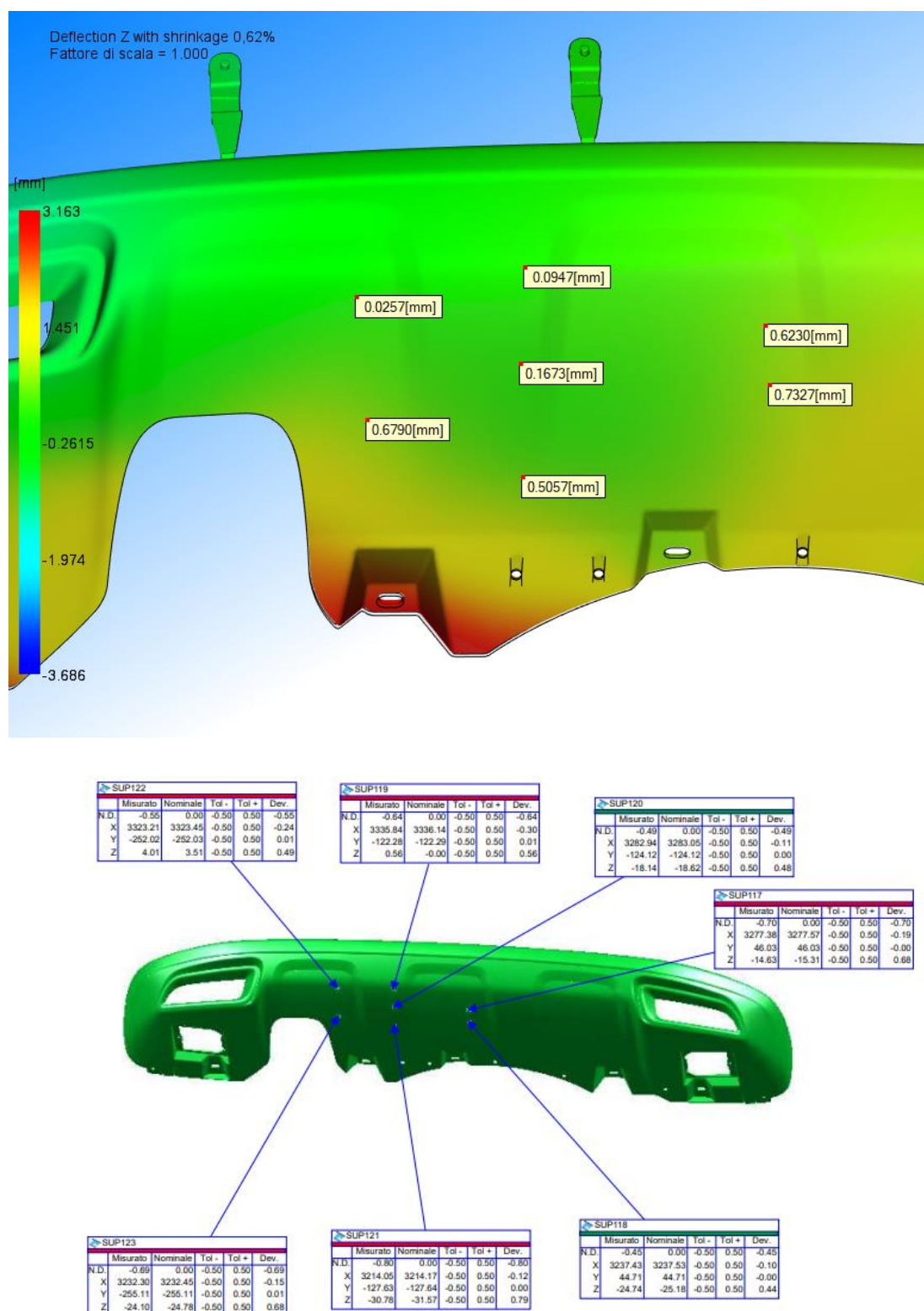


Figura 43 Deformazione zona centrale in Z

Nella figura 42 si può notare come nella parte superiore del foro i valori di deformazione siano molto vicini tra loro mentre nella parte inferiore del foro sia i valori che la tendenza alla deformazione non sono rispettati.

Nella figura 43 invece si trova una corrispondenza sia nel valore della deformazione sia nella tendenza.

Dopo quanto visto in questi capitoli nel prossimo ed ultimo si affronteranno le conclusioni a cui questa tesi ha portato e i possibili studi che ancora si potrebbero effettuare su questo argomento.

VI CONCLUSIONI

23 CONCLUSIONI DELLO STUDIO

Dopo aver analizzato i risultati ottenuti dalla simulazione e averli comparati con le misurazioni effettuate sul calibro di controllo, si è potuto comprendere che i valori puntuali ottenuti dal software Moldflow non sono del tutto coerenti con la realtà. Questo è legato a una serie di errori fisiologici che non possono essere eliminati. Primo fra tutti si deve ricordare che la simulazione discretizza il modello reale e per forza di cose non può rappresentare a fondo la realtà. Inoltre la deformazione viene calcolata al termine di una serie di analisi effettuate precedentemente (termica, riempimento e impaccamento) e ognuna di queste si trascina dietro degli errori che vengono poi utilizzati come dati di input nel calcolo della deformata.

Nel nostro caso specifico si deve anche tenere conto che il materiale utilizzato nella simulazione non era esattamente lo stesso utilizzato nello stampaggio reale. Questo perché il materiale non è stato trovato nel database presente all'interno di Moldflow e si è dovuto optare per un materiale simile consigliato dal fornitore e con le stesse proprietà di fluidità, ma che è diverso come proprietà termiche e meccaniche influenzando il risultato finale della simulazione.

Anche il metodo di misurazione del componente della macchina di misura ha influenzato il risultato finale. Infatti durante la misurazione il pezzo è stato bloccato nei punti di aggancio previsti dal progetto e questo potrebbe aver modificato la deformazione della plastica in alcuni punti. Per questo motivo nell'analisi si è cercato di prendere in esame la deformazione che nella zona interessata era la meno influenzata dagli agganci vicini.

Anche i tempi di misura hanno influenzato il risultato finale. Dal punto di vista del simulatore il calcolo della deformazione termina quando il componente arriva a temperatura ambiente (in genere 20°C). Nella realtà i pezzi sono stati misurati dopo circa tre giorni dallo stampaggio e il materiale ha potuto continuare a ritirarsi anche dopo aver raggiunto la temperatura ambiente.

In conclusione il simulatore Moldflow è in grado di calcolare la tendenza di deformazione del pezzo ma di sicuro non può riuscire a fornirci un valore esatto della deformazione per i motivi prima citati.

Con le tecnologie nuove sarebbe interessante effettuare un confronto dei valori della simulazione con delle misure effettuate con scansione 3D subito dopo lo stampaggio, ovvero lasciando il tempo al componente di raggiungere solo la temperatura ambiente e verificare se è in grado di avvicinarsi maggiormente al valore reale. Inoltre si potrebbe richiedere al fornitore del materiale di caratterizzarlo per il software Moldflow in modo da ridurre l'errore legato ai dati di input del software.

Dal punto di vista dei costi l'avvento delle simulazioni di stampaggio ha portato ad intercettare molte problematiche che prima si potevano solo teorizzare. Ad esempio la posizione delle linee di giunzione o il mancato riempimento della cavità che richiedevano modifiche importanti sull'attrezzatura. Ciò portava ad aumento dei costi dell'attrezzatura e dei tempi di realizzazione. Oggi infatti l'attrezzatura, al termine della prima prova stampo, necessita solo di messe a punto meccaniche che sono fisiologiche per via delle tolleranze di lavorazione delle varie parti che lo compongono. Facendo riferimento allo stampo dello skid plate senza l'aiuto della simulazione si sarebbe potuto sbagliare il numero di punti di iniezione o la loro posizione ed accorgersene in prima prova stampo. Ciò avrebbe richiesto la modifica della camera calda che impatta sul costo finale dello stampo di circa l'8%. Il costo dello stampo si aggira intorno ai 160000 € e

se si dovesse spostare il punto di iniezione si dovrebbe riacquistare la camera calda e questo porterebbe ad aumentarne il costo della quantità prima indicata. Anche le simulazioni hanno un loro costo di realizzazione che dipende dal tipo di analisi che si deve effettuare. Queste si aggirano intorno ai 3000 € per simulazioni complete, ma visto cosa si rischia nel sbagliare valutazione sul numero di punti o sulla loro posizione è buona norma effettuarne almeno una prima di procedere alla realizzazione dello stampo.

Bibliografia

Manuale dello stampaggio progettato, G. Bertacchi Ed.
Tecniche Nuove