



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Utilizzo di tecniche di prototipazione virtuale mediante approccio agli elementi finiti per studio e ottimizzazione del processo di stampaggio a freddo di componenti in acciaio per il settore automotive

Use of virtual prototyping techniques through finite element approach for study and optimisation of the cold stamping process of steel components for the automotive sector

Relatore: Prof. Germani Michele

Tesi di laurea di: Sagrati
Giacomo

A.A. 2019 /2020

Indice

1	Introduzione.....	5
1.1	Introduzione all'azienda	5
1.2	La mia esperienza presso questa azienda.....	6
2	Le presse.....	7
2.1	Tipi di presse.....	7
2.2	Presse meccaniche ad eccentrico o a manovella	7
2.3	Presse a collo di cigno.....	8
2.4	Presse a due montanti.....	9
2.5	Presse a semplice effetto.....	9
2.6	Presse a doppio effetto	9
2.7	Presse a triplo effetto.....	9
2.8	Presse idrauliche	10
2.9	Presse transfer.....	10
3	Taglio lamiera.....	11
3.1	Parametri di taglio	11
3.1.1	Forza sul punzone	11
3.1.2	Gioco tra punzone e matrice.....	12
3.2	Rasieratura	13
3.3	Fine blanking	13
3.3.1	Problematiche nella tranciatura fine	14
3.4	Effetti dell'attrito sullo stampo e sul pezzo	15
4	Piegatura	16
4.1	Piegatura in aria	16
4.2	Piegatura coniata	16
4.3	Piegatura a "V"	16
4.4	Piegatura a "U"	17
4.5	Piegatura semplice.....	17
4.6	Piegatura multipla.....	17
4.7	Sollecitazione del materiale	17
4.8	Ritorno elastico.....	18
5	Imbutitura.....	19
6	Tipologie di stampi	22
6.1	Stampi progressivi.....	22
6.2	Stampi combinati	24

6.3 Stampi a trasferta	24
7 Estrattori.....	26
8 Simulazione agli elementi finiti	28
8.1 Stampack.....	28
8.1.2 Process type	29
8.1.3 General.....	29
8.1.4 Symmetry definition	30
8.1.5 Tool definition	30
8.1.6 Risultati del calcolo	31
8.2 Analisi dei risultati.....	32
8.2.1 Relative thickness (grafico RT)	32
8.2.2 Pressure vector.....	32
8.2.3 Detailed history output	32
8.2.4 FLD	33
8.2.5 Forming zone (FZ)	34
8.2.6 Safety zone (SZ)	34
8.2.7 TFD graph.....	35
8.3 Equazione di governo	36
8.3.1 Formulazione Lagrange	36
8.3.2 Formulazione Eulero	37
8.3.3 Formulazione arbitraria Lagrange-Eulero.....	37
8.4 Metodi d'integrazione	37
8.4.1 Approccio d'integrazione esplicita	37
8.4.2 Approccio di integrazione implicita	38
9 Prototipazione 3D.....	40
9.1 Modellazione a deposizione fusa (FDM)	40
9.1.1 Vantaggi e Svantaggi.....	40
9.3 Stereolitografia (SLA).....	41
9.3.1 Vantaggi e Svantaggi.....	42
9.4 La Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS)	43
9.4.1 Vantaggi e Svantaggi.....	43
10 Esperienza personale	45
10.1 Analisi del componente	45
10.2 Materiale utilizzato	46
10.3 Sviluppo utensili in 2D	46
1a operazione	47

2a operazione	49
3a operazione	51
4a operazione	53
5a operazione	55
10.4 Sviluppo utensili in 3D	56
1a operazione	57
2a operazione	59
3a operazione	61
4a operazione	63
5a operazione	65
11 Analisi dei risultati	67
11.1 Conclusione	69
12 Appendice.....	70
12.1 Immagini e grafici relativi alla 1a operazione.....	70
12.2 Immagini e grafici relativi alla 2a operazione.....	76
12.3 Immagini e grafici relativi alla 3a operazione.....	81
12.4 Immagini e grafici relativi alla 4a operazione.....	86
12.5 Immagini e grafici relativi alla 5a operazione.....	91
13 Bibliografia	98

1 Introduzione

1.1 Introduzione all'azienda



L'ufficio di ricerca e sviluppo della società Bora S.r.l si occupa della progettazione degli stampi e dell'industrializzazione dei prodotti che vengono poi realizzati nelle loro linee di produzione.

Collaborano con i clienti già nella fase di studio del prodotto per ottimizzare la geometria dell'elemento ed il consumo di materiale. Sono in grado di simulare tutte le fasi di stampaggio attraverso l'utilizzo di tecniche di prototipazione virtuale e quindi realizzare modifiche all'elemento per evitare rotture o cricche in fase di produzione.

Assicurano il controllo end-to-end del processo di produzione, dalla simulazione del processo di formatura, alla progettazione, passando per la costruzione delle attrezzature fino alla produzione.

Il reparto produzione stampi segue tutte le fasi della lavorazione dei particolari e si occupa dell'assemblaggio e dell'aggiustaggio degli stampi.

Su un'area di circa 2.000 m² dispongono di macchine utensili di varie dimensioni e caratteristiche, che permettono un'ampia gamma di lavorazioni.

In particolare: fresature, elettroerosioni a filo, elettroerosioni a tuffo, rettifiche, tagli laser e tagli ad acqua.

Il reparto stampaggio dispone di un ampio parco macchinari per garantire ai clienti la produzione di una vasta gamma di prodotti.

A partire dallo stampaggio con tecnologia manuale, progressiva e transfer fino alle linee di assemblaggio, postazioni robot di saldatura e impianti di lavaggio ad immersione

1.2 La mia esperienza presso questa azienda

Il tema principale del tirocinio svolto si è incentrato su sviluppo e analisi ad elementi finiti di un'offerta per un'azienda produttrice di parti per l'automotive. In particolare, la modellazione di uno stampo per la produzione tramite stampaggio a freddo di un volano partendo da una lamiera di acciaio low carbon di 3mm.

Durante la mia esperienza mi sono trovato a lavorare con due programmi.

VISI, un software per modellazione 3D e superficiale, particolarmente utilizzato per progettazione di stampi per lamiera, plastica, pressofusione e per l'industria meccanica.

Stampack, invece, è un software per simulazioni ad elementi finiti.

In conclusione, ho realizzato un modello con stampante 3D del pezzo finale ottenuto per permettere un paragone con l'esempio inviato dal cliente.

In seguito, sono illustrate nozioni teoriche nell'ambito delle lavorazioni a freddo.

2 Le presse

2.1 Tipi di presse

Gli stampi, per poter essere utilizzati, vengono montati su apposite macchine dette presse. Si tratta di “macchine che sviluppano una forza, ed in cui il lavoro di deformazione prodotto, deriva da energia immagazzinata o in un volano in rotazione (presse meccaniche) o sotto forma di pressione idraulica (presse idrauliche)”. Nella definizione di pressa è stata già fatta una distinzione in base al tipo di comando che viene utilizzato per azionare la slitta:

- presse meccaniche, in cui la slitta è mossa da manovellismi e meccanismi vari azionati da un motore elettrico;
- presse idrauliche, in cui la slitta è azionata da un fluido in pressione.

Un'altra classificazione può essere fatta in base al tipo di struttura della macchina; infatti si possono avere presse a “collo di cigno” oppure presse a doppio montante; quest'ultime a loro volta possono distinguono per costruzione modulare o per struttura unica. Un'ultima caratterizzazione viene fatta in base al numero degli effetti di cui una pressa è dotata: si parla infatti di presse a semplice, doppio o triplo effetto.

Parametri per la scelta della pressa

I parametri da tenere in considerazione nella scelta della pressa sono:

- a) lunghezza della corsa: deve essere stabilita in base alle dimensioni dell'oggetto da stampare. In caso di imbutiture, la corsa della slitta dovrà essere pari a circa 2.5 volte l'altezza massima del pezzo imbutito;
- b) distanza tra slitta e bancale (a slitta abbassata): deve essere scelta una macchina adatta ad alloggiare lo stampo più alto che si prevede di utilizzare;
- c) velocità e numero di colpi al minuto (cadenza);
- d) forza sviluppata.

2.2 Presse meccaniche ad eccentrico o a manovella

Sono presse utilizzate in molti settori e la loro versatilità le rendono adatte a lavorazioni di tranciatura, imbutitura, piegatura ecc. rendendole le più diffuse nel settore della lavorazione a freddo della lamiera.

In Figura è riportato un esploso di una pressa ad eccentrico, dove: A è la struttura; B è il bancale; C è la slitta; D è l'ingranaggio di trasmissione; E è la manovella; F è il freno/frizione; G è il motore elettrico; H è il volano.

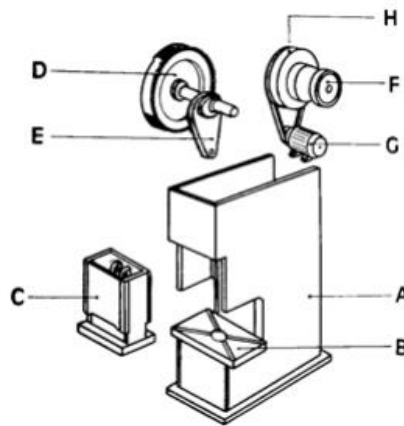


Figura 1: Vista esplosa di una pressa ad eccentrico

2.3 Presse a collo di cigno

Una pressa a collo di cigno è una pressa ad un montante di piccole dimensioni che genera forze limitate. Alcune di queste presse sono inclinabili mediante dispositivi che rendono sicuro questo orientamento della macchina, tale funzione può essere impiegata rendere più semplice sia l'alimentazione automatica dei pezzi che lo scarico dei pezzi finiti.

In Figura un esempio di pressa a collo di cigno.



Figura 2: Pressa a "collo di cigno"

2.4 Presse a due montanti

Quando la forza sviluppata supera determinati valori o quando è necessario un piano di lavoro di dimensioni abbastanza rilevanti, si utilizzano le presse a due montanti che possiedono una struttura che assicura una maggiore rigidità.

Queste presse si distinguono in due tipi costruttivi:

- 1) presse in cui il piano ha dimensioni massime 1500 x 1000 mm: la cui struttura può essere costruita in un unico pezzo di acciaio, saldata e trattata termicamente
- 2) presse in cui il piano ha dimensioni maggiori di 1500 x 1000 mm: la cui struttura è composta da più elementi di lamiera saldata uniti fra loro con tiranti.



Figura 3: Pressa a due montanti del tipo ad eccentrico

Quest'ultima tipologia è vantaggiosa in quanto permette lo smontaggio veloce di una pressa per il suo trasferimento e anche il successivo rimontaggio. Sui montanti laterali, che fungono da distanziali tra il basamento e la testata, sono ricavate le guide di scorrimento della slitta e gli spazi per gli asservimenti elettrici e pneumatici.

Le guide sono ricoperte di bronzo fosforoso e vengono lubrificate da un sistema di lubrificazione centralizzato e temporizzato.

2.5 Presse a semplice effetto

Le presse a semplice effetto sono presse dotate, di solito, di una sola slitta. Vengono generalmente utilizzate per lavori di tranciatura e piegatura. Alcune di queste sono fornite di cuscino premilamiera sotto il bancale che permette di effettuare imbutiture profonde.

2.6 Presse a doppio effetto

Nel caso in cui le slitte sono due, separate, indipendenti e agenti una internamente all'altra si parla di presse a doppio effetto. La slitta interna effettua lo stampaggio mentre quella esterna ha la funzione di trattenere il foglio di lamiera ("premilamiera").

2.7 Presse a triplo effetto

Le presse a triplo effetto hanno un doppio sistema di premilamiera; uno azionato dai soliti comandi sopra il piano mobile, l'altro con sistema "a cuscino" situato nella parte inferiore del piano fisso della macchina.

2.8 Presse idrauliche

Le presse idrauliche sono macchine autonome e funzionanti ad olio compresso da ogni singola pompa accoppiata e indipendente. Il gruppo motore-pompa è installato nell'incastellatura della pressa. La pompa a portata variabile permette di regolare la velocità di discesa e salita della slitta: a pressione minima o nulla la velocità è massima, invece, a pressione massima la velocità è minima. Nella fase di stampaggio quindi la slitta scende rapidamente a vuoto senza esercitare nessuna pressione, una volta giunta a contatto con la lamiera, precedentemente posta sul piano dello stampo, inizia lo stampaggio e la pressione aumenta in contemporanea con una diminuzione della velocità. Terminato lo stampaggio il piatto della pressa ritorna verso l'alto ad una velocità superiore in quanto ha bisogno di una pressione che serve solo per vincere il peso dello stampo e del corsoio. Le presse idrauliche possono essere a semplice effetto, a doppio effetto e a triplo effetto.

2.9 Presse transfer

Le presse transfer sono macchine utilizzate per l'utilizzo degli stampi a trasferta; sono quindi presse dotate di piani di grandi dimensioni in quanto devono poter ospitare due, tre o anche quattro stampi singoli.

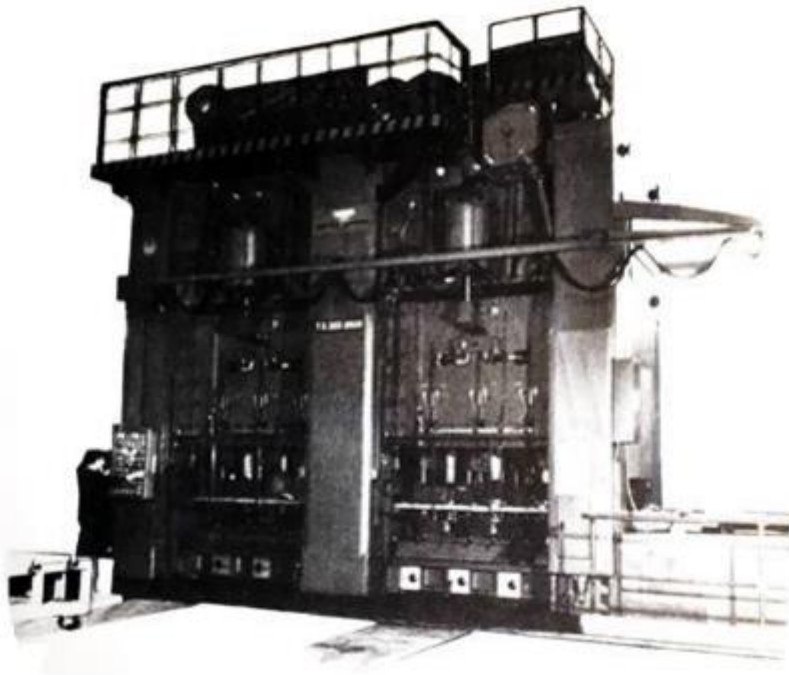


Figura 4: Pressa transfer

3 Taglio lamiera

3.1 Parametri di taglio

Il processo di taglio (shearing) di una lamiera viene effettuato applicando elevati sforzi di taglio sul laminato impressi utilizzando una matrice (die) ed un punzone (punch) aventi forma consona al pezzo da ottenere. I parametri principali che influiscono sul processo sono:

- forza sul punzone
- velocità del punzone
- lubrificazione
- gioco nel taglio
- raggi di curvatura degli spigoli
- materiale della matrice e del punzone

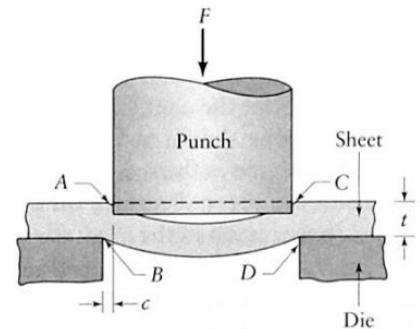


Figura 5: Rappresentazione di un processo di tranciatura

3.1.1 Forza sul punzone

La forza da applicare richiesta nel taglio deve essere ricavata in base alle caratteristiche del laminato da lavorare.

Per stimare la forza massima richiesta si usa la seguente formula:

$$F_{max} = 0,7(UTS)tL$$

Dove UTS è lo sforzo a rottura, t lo spessore e L la lunghezza di taglio.

Fra punzone e striscia di lamiera agiscono anche pressioni radiali di compressione che determinano forze di attrito da vincere nella corsa di ritorno del punzone. Queste forze possono assumere valori dall'1% al 40% della forza di tranciatura, in funzione delle condizioni di attrito, di lubrificazione, della finitura superficiale del punzone e delle tensioni radiali. In figura si vede la scomposizione della forza di tranciatura in una componente orizzontale F_h in

una verticale F_d .

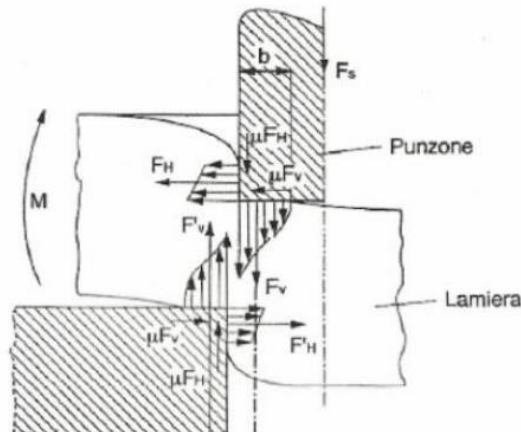


Figura 6: Scomposizione delle forze agenti sulla lamiera nel processo di tranciatura

La tranciatura del laminato avviene grazie alla creazione di una cricca che si propaga fino a raggiungere l'intero spessore della lamiera causandone il cedimento.

Dal grafico riportato si può notare come la forza applicata dalla pressa, dopo aver raggiunto un picco massimo al quale segue la formazione della cricca, diminuisca velocemente con il suo propagarsi fino al raggiungimento della rottura.

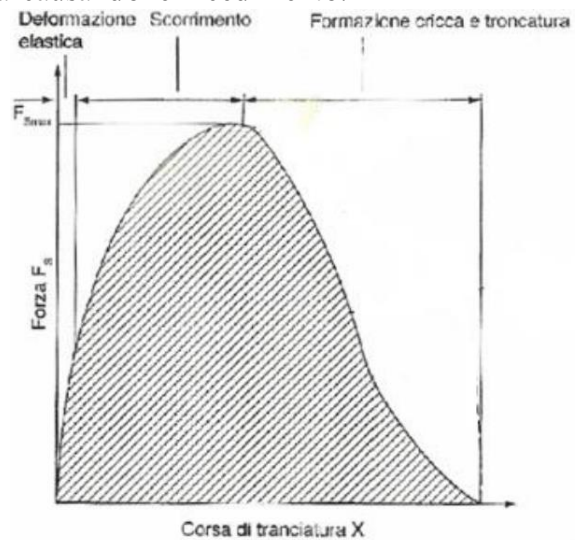


Figura 7: Grafico forza di tranciatura – corsa di tranciatura

3.1.2 Gioco tra punzone e matrice

È definito gioco la distanza presente tra punzone e matrice di tranciatura.

Affinché il processo avvenga in maniera ottimale e senza portare al danneggiamento della pressa con lavoro ripetitivo è necessario in primo luogo che il gioco risulti uniforme, ossia uguale in tutti i punti dello sviluppo; la sua entità dipende principalmente dallo spessore del materiale da tranciare, dalle caratteristiche meccaniche, dalla valutazione dello sforzo di tranciatura e dalle conseguenti sollecitazioni sullo stampo e sulla pressa. Poiché la matrice si usura, deve essere periodicamente riaffilata. Per pezzi da tranciare caratterizzati da elevate esigenze di precisione, il foro della matrice (a partire dal tagliente della stessa verso il basso) viene realizzato senza spoglia per un'altezza pari a tre volte lo spessore della lamiera ma non superiore a 2 mm, solo a partire da questa profondità può essere realizzata la spoglia con un angolo fino a circa 2°. Sebbene una spogliatura che parta già dallo spigolo tagliente della matrice stessa determini una forza di taglio inferiore a quella richiesta dal tagliente con angolo di 90°, un tratto cilindrico iniziale della cava della matrice consente di mantenere costante il profilo di tranciatura anche dopo varie affilature, inoltre garantisce il mantenimento dell'effetto di forzamento tra pezzo tranciato e pareti della cava matrice, effetto gradito perché impedisce la risalita degli sfridi. Quanto minore è il gioco, tanto minore è il pericolo della risalita degli sfridi.

Dalla figura a fianco è possibile notare come le superfici ingrandite del taglio non sono né dritte, né lisce, in particolare con il crescere del gioco aumenta la deformazione e la rugosità delle superfici. I lembi tranciati della lamiera si presenteranno circa per un 30% lisci, corrispondente alla zona tranciata a contatto con la matrice e per un 70% rugosi, formatosi a seguito della propagazione della cricca. La zona tagliata incrudisce e questo può avere conseguenze su formature e lavorazioni successive.

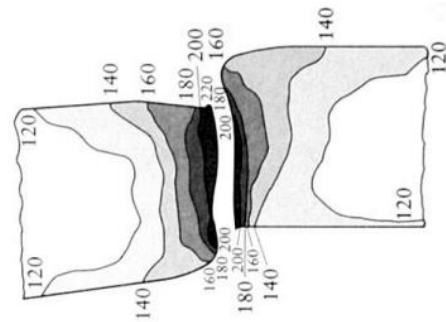


Figura 8: Esempio di bordo tranciato

3.2 Rasieratura

Per poter ottenere un bordo tranciato più definito è possibile effettuare una rasieratura, ossia, un ulteriore processo di rimozione del materiale con gioco inferiore. Tale passaggio può essere effettuato in secondo luogo o concatenato al processo di tranciatura, come rappresentato in figura.

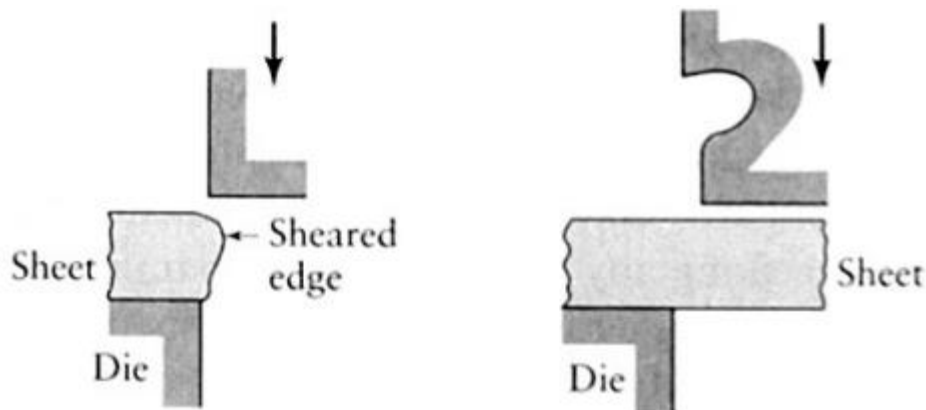


Figura 9: Processo di rasieratura a due passaggi (sinistra), ad un passaggio (destra)

3.3 Fine blanking

Il processo di "tranciatura fine" permette di ottenere in un solo colpo e con un solo stampo, dei particolari tranciati molto precisi, calibrati, con deformazioni minime, con un profilo definito e senza strappi. Con la tranciatura fine si genera inoltre un'elevata planarità, grazie alla presenza nella matrice di un elemento a funzionamento idraulico, antagonista al punzone, che controlla la penetrazione del pezzo in matrice.

Durante la tranciatura fine, il punzone si appoggia a bassa velocità sul materiale da tranciare. Quest'ultimo è bloccato all'esterno del perimetro di taglio dal premilamiera e dalla matrice e, all'interno della linea di taglio stessa, dal punzone e dall'estrattore. Fondamentale è l'azione del bordino perimetrale: per lamiere di spessore fino a 4,5 mm la tranciatura fine richiede il bordino unicamente sul premilamiera, mentre per spessori

superiori è richiesto un secondo bordino sulla matrice. Nella tranciatura tradizionale il gioco fra punzone e matrice ha un valore intorno al 10% dello spessore del materiale. In quella fine, invece, il gioco viene ridotto di circa 10 volte. Con 4 mm di spessore lamiera si ha infatti un gioco di 0,04 mm, contro uno di 0,4 mm nella tranciatura tradizionale. Se la superficie di taglio non è richiesta liscia al 100%, il gioco può però essere leggermente aumentato, a vantaggio dei maggiori intervalli di affilatura.

3.3.1 Problematiche nella tranciatura fine

Uno delle problematiche più significative del processo di tranciatura fine è costituito dalle straordinarie condizioni di usura a cui sono sottoposti gli elementi attivi dello stampo. Essi sono soggetti a pressioni e ad un attrito tale da rendere indispensabile l'adozione di metodi per evitare che queste sollecitazioni si traducano in una durata antieconomica degli stampi. Nel processo, l'attrito è generato dalle due forze F_{fp} e F_{fd} .

La prima è legata all'attrito generato dallo scorrimento della superficie esterna del punzone sul materiale di tranciatura; la seconda riguarda l'attrito tra le superfici verticali della matrice e le nuove superfici del pezzo che sta per essere tranciato. Altre forze di attrito si sviluppano tra le facce principali della lamiera e le superfici frontali del punzone, del contropunzone (estrattore), della matrice e del premilamiera. Queste ultime svolgono un ruolo attivo solo nei casi di operazioni complementari quali imbutiture o coniare. Nella tranciatura fine gli spigoli trancianti della matrice e dei punzoni per i profili interni vengono arrotondati affinché il materiale possa scorrere su di essi senza che si verificano "strappi". A differenza di quanto avviene nella tranciatura tradizionale, che genera superfici tagliate soltanto su un terzo circa dello spessore del pezzo, nella tranciatura fine una superficie perfettamente liscia rimane a contatto con la matrice per tutto lo spessore del pezzo, con la conseguente generazione di una forza normale di entità molto maggiore. Lo spigolo vivo del tagliente del punzone, a stampo affilato, genera una forza normale inizialmente ridotta, che poi aumenta progressivamente sia per il progredire dell'usura del punzone, sia per effetto dell'azione del cordone perimetrale.

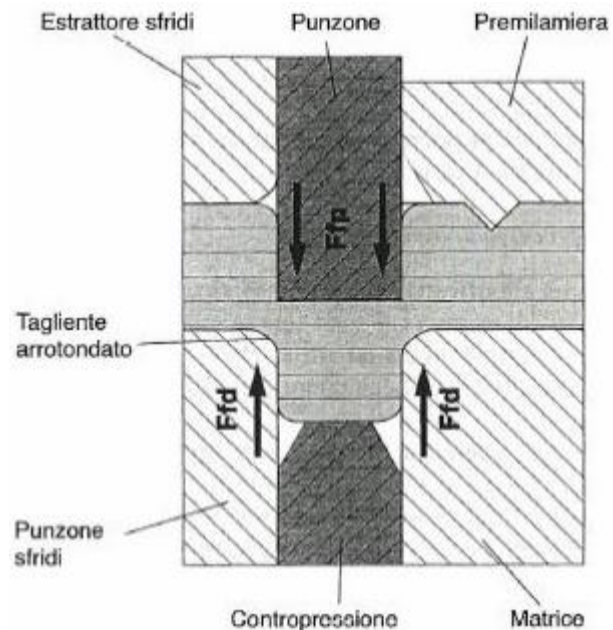


Figura 10: Azione delle forze nel processo di tranciatura fine

3.4 Effetti dell'attrito sullo stampo e sul pezzo

La forza di attrito orizzontale sul pezzo deve essere sufficientemente elevata per impedire lo scorrimento orizzontale del pezzo stesso mentre entra progressivamente in matrice, ma, allo stesso tempo gioca un ruolo negativo ai fini della loro progressiva usura. È necessario quindi adottare contromisure limitative di questi effetti, sia in sede di progettazione dello stampo, sia nella scelta dei criteri lubrificativi. Per lo stampo è fondamentale che si raggiunga il valore massimo tra la durezza degli elementi attivi e quella del materiale di tranciatura, inoltre gli spigoli trancianti e le superfici attive devono essere sempre in buono stato senza "aree deboli" sugli elementi attivi dovute ad una cattiva elettroerosione. Giocano un ruolo fondamentale anche i bassi valori di rugosità delle superfici attive dello stampo, una soluzione sono i lubrificanti, scelti accuratamente in base al tipo di operazione da svolgere; hanno lo scopo di ridurre l'attrito intermetallico tra stampo e materiale di tranciatura e di impedire che si verifichino fenomeni di saldatura a freddo. Oggi sono disponibili sul mercato prodotti con differenti caratteristiche E.P. (attitudine del film lubrificante a sopportare le estreme pressioni) e differenti gradi di viscosità. In generale, quanto più impegnativa è l'operazione di tranciatura fine da eseguire, tanto più elevato è il valore di viscosità e di attitudine richiesti al lubrificante.

4 Piegatura

La piegatura è una lavorazione di deformazione plastica che consente di ottenere elementi a sezione aperta, sviluppati essenzialmente in direzione della lunghezza. Consiste nel sottoporre la lamiera ad una sollecitazione di flessione con carico superiore al limite elastico, in modo da deformarla permanentemente. L'attrezzatura utilizzata è uno stampo costituito da un punzone e da una matrice di forma opportuna, in funzione del tipo di piegatura che si vuole realizzare. Il punzone è azionato da una pressa piegatrice che fornisce la forza da imprimere al punzone necessaria per eseguire la lavorazione. In base alla corsa del punzone si distinguono i seguenti tipi di piegatura.

4.1 Piegatura in aria

Effettuata in modo che lo spigolo della lamiera non raggiunga il fondo della matrice; variando la profondità della corsa del punzone si può ottenere una serie di piegature con diversi angoli, senza cambiare la matrice.

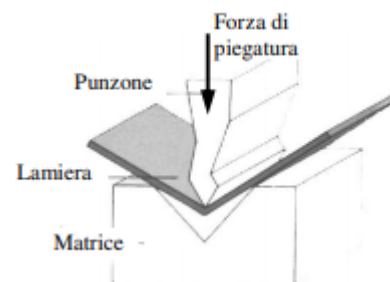


Figura 11: Esempio di piegatura in aria

4.2 Piegatura coniata

Si ha una piegatura coniata quando è effettuata in modo che lo spigolo della lamiera raggiunga il fondo della matrice; la punta del punzone comprime la lamiera, la stira e conferisce maggiore rigidità al profilo.

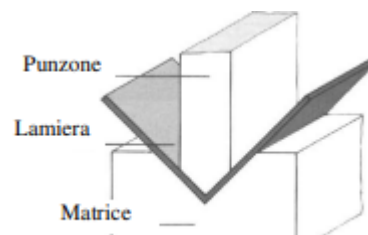


Figura 12: Esempio di piegatura coniata

4.3 Piegatura a "V"

Il procedimento serve a produrre pieghe ad angolo. Il particolare non ancora deformato è sistemato nella parte inferiore dell'utensile di piegatura, dopodiché si abbassa il punzone fissato alla slitta della pressa, ed ha inizio la deformazione. Durante il procedimento il pezzo assume in ciascuna fase curvature diverse. Nella posizione finale del punzone il pezzo è soggetto ad una pressione più elevata con lo scopo di spianarne i lati. Il ritorno elastico del pezzo dipende dall'entità di questa pressione, dalla forma del punzone e dal materiale in deformazione. Si possono ottenere particolari di elevata precisione quando la forma definitiva viene impartita attraverso un colpo breve e secco, per tale motivo si usano spesso presse ad azione d'urto.

4.4 Piegatura a "U"

Si tratta di un procedimento analogo alla piegatura a "V", con la differenza che in questo caso lo stampo e il punzone sono sagomati ad "U". In questo tipo di piegatura occorre porre molta attenzione al ritorno elastico che varia sensibilmente a seconda del materiale deformato e delle dimensioni del pezzo. L'operazione si esegue con ganasce a registrazione laterale fine, per cui la piegatura a "U" è eseguibile su qualsiasi pressa.

4.5 Piegatura semplice

Si ha una piegatura semplice quando punzone e matrice sono sagomati in modo da potere eseguire una sola piegatura per ogni corsa. Per realizzare più piegature si devono eseguire più corse del punzone e posizionare, di volta, in volta, la lamiera nel modo opportuno.

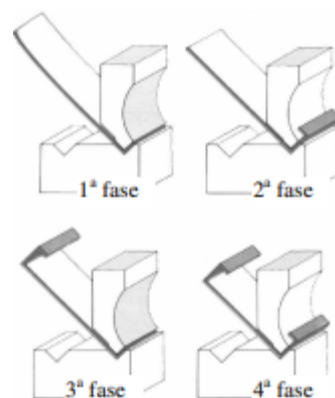


Figura 13: Esempio di piegatura semplice

4.6 Piegatura multipla

Si ha una piegatura multipla quando punzone e matrice sono sagomati in modo da ottenere, in una sola corsa del punzone le pieghe volute. In questo caso il tempo per eseguire la lavorazione è ridotto, ma lo stampo di piegatura può effettuare solo quel tipo di piegatura e quindi, questo processo risulta conveniente solo per grandi produzioni in serie.

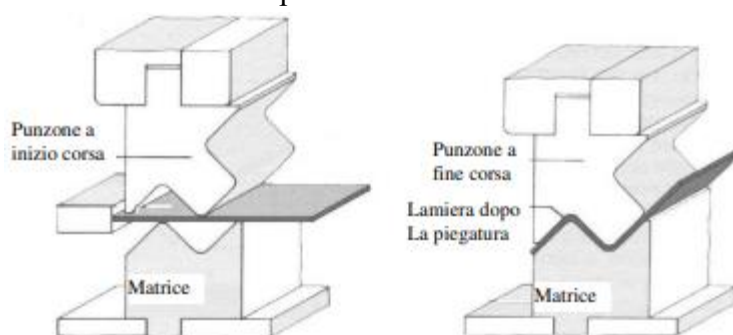


Figura 14: Esempio di piegatura multipla

Si possono utilizzare anche stampi più complessi in funzione della piegatura che si vuole realizzare. Questi stampi hanno sempre un estrattore, azionato da una molla, che provoca la fuoriuscita del pezzo piegato al termine dell'operazione. In figura sono riportati lo schema per la piegatura a U e uno stampo per piegatura multipla, dove si nota l'estrattore.

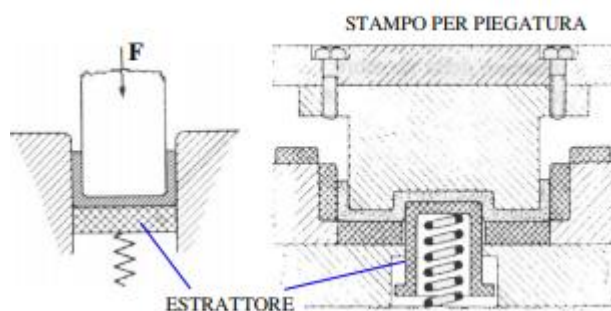


Figura 15: Stampo per piegatura multipla con estrattore

4.7 Sollecitazione del materiale

La sollecitazione varia lungo la sezione dell'elemento piegato. La fibra interna è compressa lungo la direzione delle ali e stirata trasversalmente alla direzione della forza.

La fibra esterna è allungata nella direzione delle ali, è compressa trasversalmente alla direzione delle ali. La fibra neutra non subisce variazioni di lunghezza e si trova a metà della sezione ma il suo posizionamento si sposta verso la curva di raggio minore, in relazione allo spessore s della lamiera ed al raggio r di piegatura.

4.8 Ritorno elastico

I fattori da tenere in considerazione durante la piegatura sono:

- limite di snervamento del materiale
- tipo di piegatura (libera o in stampo)
- raggio di piegatura (quanto minore, tanto maggiore è la zona deformata plasticamente)

La lamiera, dopo la piegatura, ha un ritorno elastico, ossia un parziale ritorno alla sua forma di partenza, per cui l'angolo di piegatura reale deve essere maggiore di quello teorico. Il ritorno elastico è dovuto al fatto che in prossimità dell'asse neutro, il materiale ha subito principalmente deformazioni elastiche, mantenendo la loro tendenza a tornare alla forma iniziale una volta cessato il carico. I valori degli angoli necessitano di un supplemento di sovrapiiegatura, che generalmente varia tra 5° e 15° . Il valore esatto può essere stabilito con esattezza solo nella fase di messa a punto del processo di fabbricazione.

5 Imbutitura

È una lavorazione che permette di passare da una lamiera di forma piana a una di forma concava. Gli utensili utilizzati sono generalmente gli stampi per imbutitura azionati da una pressa costituiti da una matrice, un punzone, un premilamiera e un espulsore azionato da una molla. La lamiera è deformata dall'azione del punzone che obbliga il materiale ad assumere la forma dello stampo inferiore o matrice. A imbutitura effettuata, la molla dell'espulsore compressa durante l'imbutitura, restituisce l'energia immagazzinata spingendo fuori dalla matrice il pezzo imbutito. La lavorazione viene, di solito, eseguita a freddo utilizzando presse meccaniche, solamente per forti imbutiture e per lamiere di grosso spessore si fa la lavorazione a caldo utilizzando presse idrauliche.

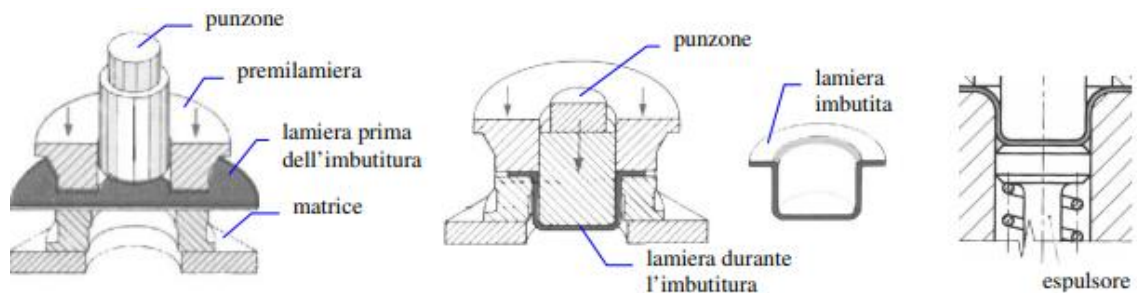


Figura 16: Esempio di imbutitura

Le fasi principali del processo di imbutitura sono 4:

1^a Fase

Il punzone e il premilamiera si trovano in alto, al di sopra della matrice; il disco piano di lamiera viene posizionato sulla matrice. La molla del premilamiera non è compressa.

2^a Fase

Il premilamiera compie la sua corsa verso il basso, fino ad appoggiarsi sulla lamiera posizionata; in tal modo la corona circolare esterna del disco viene pressata fra le superfici anulari della matrice e del premilamiera. Il valore della pressione sulla lamiera dipende dal materiale che si sta utilizzando e dal suo spessore. Il punzone inizia la sua corsa verso il basso in ritardo rispetto al movimento della lamiera.

3^a Fase

Il punzone, continuando a scendere, viene a contatto con il disco di lamiera ed inizia l'imbutitura, la forza esercitata dal punzone costringe la lamiera a deformarsi e a scorrere verso l'interno della matrice assumendo la forma del punzone. La forza del premilamiera deve avere un'intensità tale da non impedire lo scorrimento della lamiera (ciò è facilitato attraverso un'opportuna lubrificazione che riduce l'attrito), ma adatta a contrastarne il raggrinzimento conseguente al moto imbutente del punzone.

4^a Fase

Il punzone effettua la sua corsa di ritorno verso l'alto, seguito con un po' di ritardo dal premilamiera; nel mentre il pezzo, per l'azione della molla dell'espulsore, viene spinto

fuori dalla matrice. La molla viene compressa durante l'imbutitura immagazzinando l'energia che restituisce in questa fase.

Si riportano i parametri fondamentali del processo d'imbutitura:

$$\text{Rapporto d'imbutitura} = \frac{\text{diametro corpo cilindrico del pezzo finale ottenuto}}{\text{diametro iniziale disco}} = \frac{d}{D}$$

Solo se $R_i \geq 0,5$ la lavorazione è realizzabile con una sola imbutitura, altrimenti l'imbutitura finale si ottiene progressivamente, con una sequenza di più imbutiture. Tale parametro, inoltre, influenza il valore della forza necessaria per eseguire la lavorazione.

Gli spigoli di matrice e punzone sono raccordati con raggi di valore $6 \div 10$ volte lo spessore della lamiera. I raggi di raccordo del punzone sono sempre più grandi di quelli della matrice. I raccordi sono necessari per evitare che avvenga la tranciatura della lamiera, ma allo stesso tempo, non devono essere molto grandi perché provocherebbero la formazione di pieghe e grinze in seguito ad un insufficiente contatto tra matrice e premilamiera.

Per il funzionamento dello stampo è necessario un gioco fra punzone e matrice, ottenibile rendendo il diametro del foro della matrice maggiore di quello del punzone

$$d_{\text{matrice}} \cong d_{\text{punzone}} + 2,5 \cdot s$$

con s = spessore lamiera

Un valore del gioco grande aumenta il rischio di formazione di pieghe o irregolarità sulle pareti dell'imbutito, mentre un valore piccolo, incrementa il rischio di un eccessivo assottigliamento della lamiera fino ad eventuali rotture.

La velocità d'imbutitura varia da $0,2 \div 0,75$ m/s in base al metallo da deformare. La pressione p del premilamiera varia da 1 a 2 N/mm² a seconda del materiale e dello spessore della lamiera. La forza esercitata dal premilamiera vale

$$F_{\text{premilamiera}} = p \cdot A = p \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$$

A = area di una corona circolare di diametro esterno D (diametro disco) e diametro interno d (diametro del corpo cilindrico del pezzo)

La forza d'imbutitura è influenzata dal tipo di materiale, dalla lubrificazione, dalla geometria dei componenti dello stampo, dalla pressione del premilamiera, dalla velocità d'imbutitura e assume il valore orientativo dato dalla relazione

$$F_{\text{imbutitura}} = \pi \cdot d \cdot s \cdot R_m \cdot m$$

Con $m = 1 \div 0,4$ coefficiente che diminuisce all'aumentare di $R = \frac{d}{D}$

L'imbutitura è l'operazione che più sollecita la lamiera durante la deformazione e per questo richiede lamiere di qualità con comportamento quasi isotropo. Basti pensare che nel caso semplice di realizzazione di un contenitore cilindrico rappresentato in figura, la trasformazione geometrica richiede che il materiale costituente i triangoli tratteggiati venga eliminato, per potere ottenere le pareti verticali del prodotto finale.

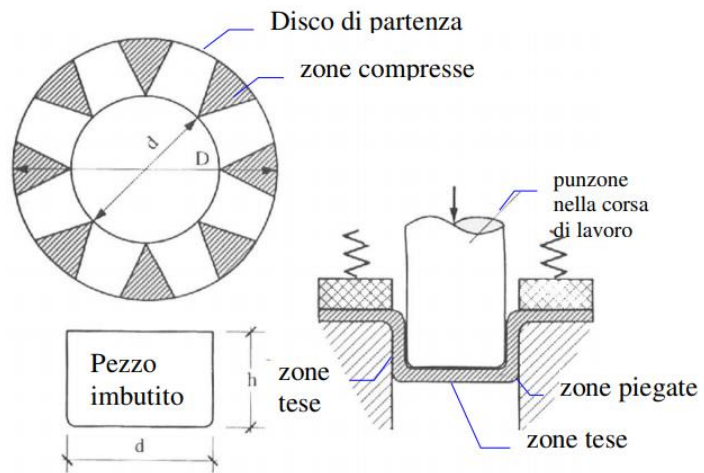


Figura 17: Esempio di imbutito, con le parti soggette a maggiore deformazione evidenziate con il tratteggio

Durante la lavorazione questo materiale è soggetto a compressione e tende a formare delle pieghe, che comunque sono impedito dal premilamiera. Inoltre, la lamiera in deformazione nella matrice è soggetta a forza di trazione lungo le pareti verticali. Queste sollecitazioni provocano variazioni di spessore ed in particolare assottigliamenti nelle parti tese ed ispessimenti nelle parti compresse, pertanto i pezzi imbutiti non hanno uno spessore costante.

Nello studio dell'imbutitura è necessario calcolare lo sviluppo primitivo del pezzo di lamiera da posizionare nello stampo. Mentre nel caso generale di pezzi qualsiasi il calcolo non è possibile (e si ricorre quindi a delle prove pre-serie), esso è possibile nel caso di pezzi che sono solidi di rivoluzione. Infatti, in tali casi la forma dello sviluppo primitivo è un cerchio con un diametro D ricavabile dalla formula

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} = \sum A_i$$

con $\sum A_i$ = somma delle aree degli elementi di superficie che compongono l'imbutito da cui è possibile calcolare il diametro del disco di partenza $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \sum A_i}$

6 Tipologie di stampi

Le aziende che operano nella meccanica di precisione così come le carpenterie metalliche e tutte le realtà che più in generale hanno la necessità di dare vita a lamiere e pezzi metallici di varia tipologia hanno bisogno, per poter portare avanti la loro attività nel miglior modo possibile, di stampi per lamiera di alta qualità.

Tra gli stampi in assoluto più diffusi dobbiamo ricordare gli stampi progressivi (a passo), Stampi combinati (a blocco) e Stampi a trasferta.

6.1 Stampi progressivi

Sono detti stampi progressivi o a passo quegli stampi che comprendo “una serie di operazioni successive che trasformano gradualmente, su uno stesso stampo, una lamiera piana, o una striscia, o un nastro, al fine di staccare degli oggetti di altra forma”. Tali stampi vengono utilizzati per ottenere, mediante un solo colpo e un solo stampo, una serie di lavorazioni successive che, diversamente, dovrebbero essere effettuate singolarmente su stampi semplici. Gli stampi progressivi possono essere composti da due o più operazioni; il più semplice è costituito da due operazioni che possono essere:

- Tranciatura e piegatura;
- Imbutitura e tranciatura;
- Foratura e tranciatura.

I pezzi prodotti mediante stampi progressivi sono molto vari e quindi non è possibile definire le caratteristiche delle varie fasi; per questo è indispensabile immettere nello stampo tanto materiale quanto necessita il pezzo ultimato. La progettazione e realizzazione di uno stampo progressivo è molto complessa; prima, infatti, è necessario eseguire prove pratiche con stampi semplici ed indipendenti. Terminata questa fase, è possibile determinare il numero di passaggi che servono per realizzare il pezzo e quindi valutare se vale la pena o meno realizzare uno stampo progressivo. Quando si passa alla progettazione di uno stampo progressivo è necessario che i punzoni, oltre ad essere paralleli tra di loro, debbano lavorare in modo sincrono. Gli stampi progressivi sono montati di solito su presse a piccolo tonnellaggio che lavorano ad una velocità che varia dai 60 ai 150 colpi/min. La loro alimentazione può avvenire, come per uno stampo semplice, manualmente o automaticamente: nell'alimentazione automatica è necessario impostare, nel dispositivo di alimentazione, l'avanzamento del materiale del passo per passare da un'operazione a quella successiva

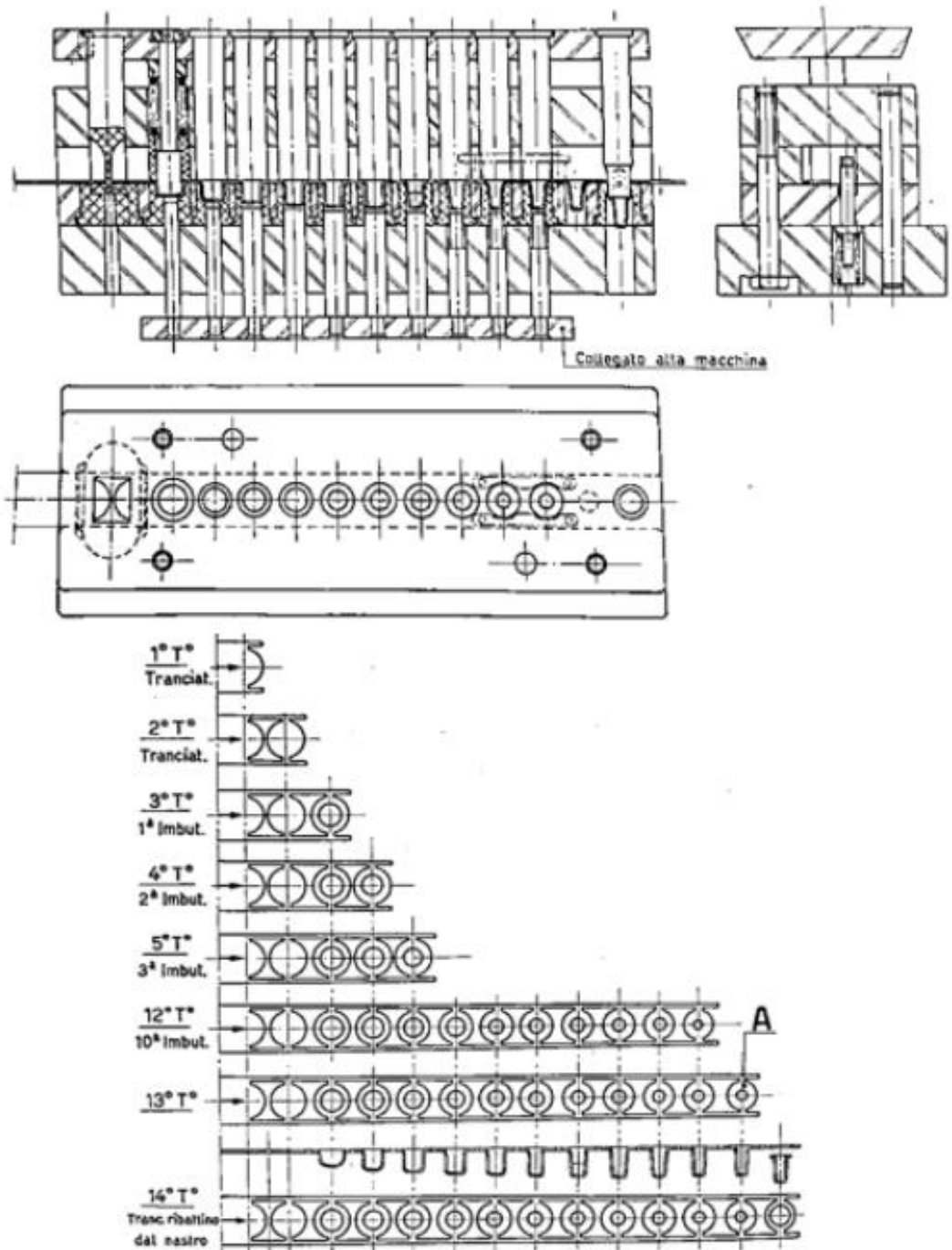


Figura 18: Esempio di stampo progressivo

6.2 Stampi combinati

Gli stampi combinati o a blocco sono “tutti quegli stampi i quali, pur avendo azione mista come negli stampi progressivi, non hanno gli utensili in allineamento, ma combinati in modo da svolgere un’azione simultanea senza necessità di ripresa”. In pratica, questi stampi sono utilizzati per effettuare due o più azioni contemporaneamente su una stessa porzione di lamiera, realizzando così in un solo passaggio il pezzo finale. In Figura è riportato un esempio di stampo combinato che funziona nel seguente modo:

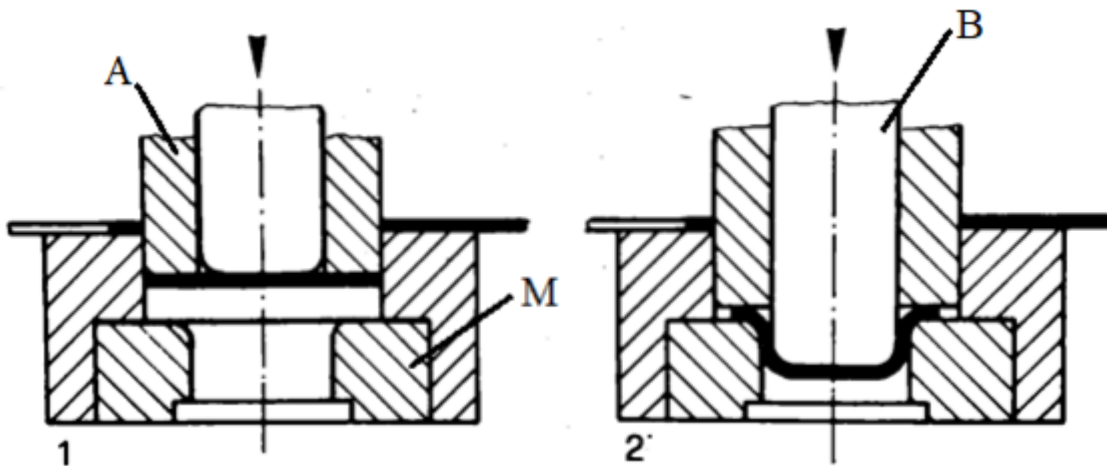


Figura 19; Esempio di stampo combinato

- 1) il punzone A trancia la lamiera spingendo il pezzo tranciato sulla matrice M;
- 2) il punzone A funge da premilamiera per la successiva operazione di imbutitura;
- 3) la discesa della slitta aziona il punzone B di imbutitura;
- 4) ultimata l’imbutitura il pezzo cade attraverso la matrice M.

6.3 Stampi a trasferta

Quando le lavorazioni si limitano a due o tre passaggi, e cioè quando gli stampi necessari sono quindi due o tre, gli stessi stampi vengono montati in linea sotto il piano mobile di un’unica pressa. Questa è la definizione di stampi a trasferta; può succedere che il piano mobile di una pressa non abbia dimensioni tali da accogliere tutti gli stampi e quindi in questo caso si può montare uno stampo all’esterno della pressa, come nell’esempio in figura.

Ovviamente, questa tipologia di stampaggio è possibile effettuarla in apposite presse per la realizzazione di pezzo di dimensioni e forme varie. Quando la linea di produzione prevede numerose stazioni di lavorazione, gli stampi possono essere montati su due, tre o più presse.

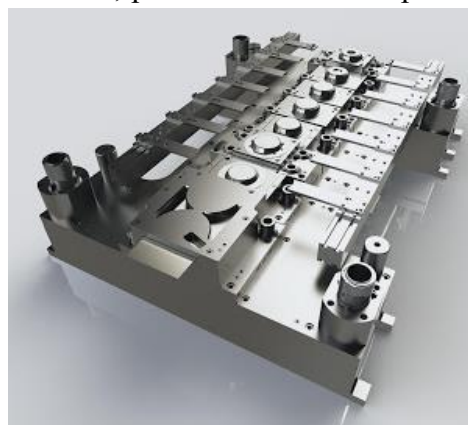


Figura 20: Pressa per stampaggio a trasferta

L'avanzamento del materiale e la raccolta dei pezzi finiti avvengono in modo automatico tramite dispositivi che funzionano in sincronia con l'apertura della pressa.

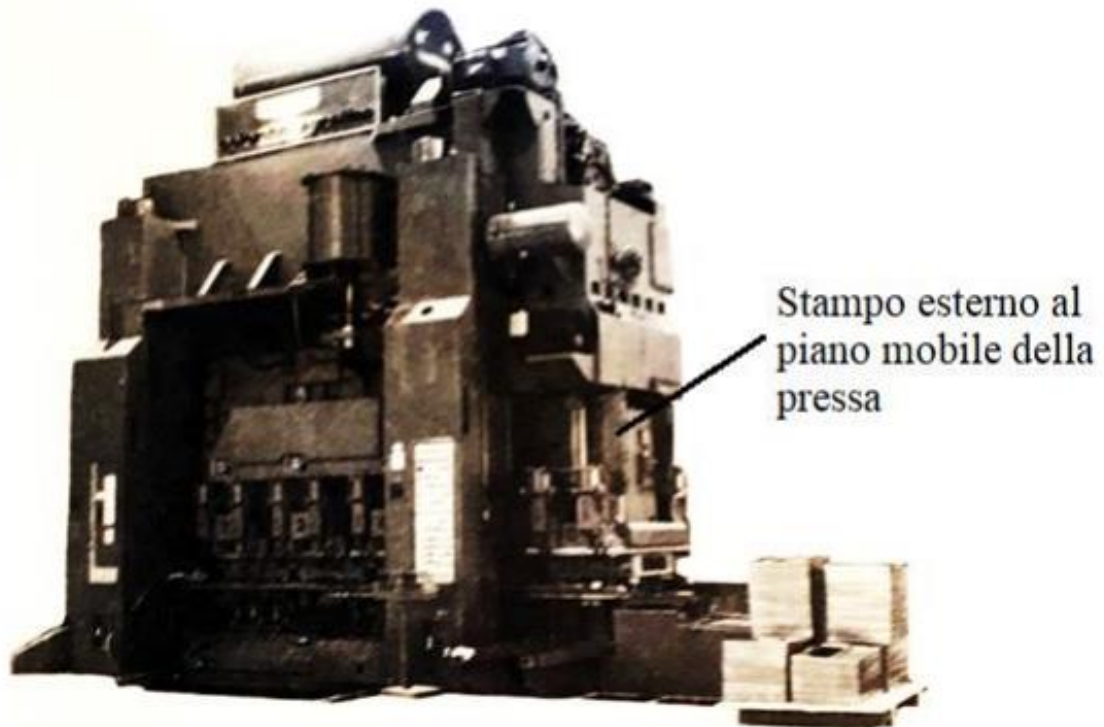


Figura 21: Esempio di stampo esterno alla pressa

7 Estrattori

La funzione degli estrattori è l'espulsione del materiale dal punzone dopo la tranciatura. La parte interna che resta nel punzone è completamente "sigillata", per questa ragione è necessario prevedere un canale di scarico dell'aria oppure un foro così da permettere all'aria di fuoriuscire. Quando fra profilo interno e profilo esterno vi sono sezioni molto sottili nelle quali potrebbe crearsi un accumulo di calore a causa dell'attrito durante la tranciatura, si può prevedere una connessione per soffiaggio permanente di aria. Questo raffreddamento consente spesso un notevole aumento del numero di pezzi prodotti tra una affilatura e l'altra. Per impedire che sfridi di ampia dimensione restino sull'estrattore, quest'ultimo viene spesso leggermente bombato in testa e può essere anche dotato di un perno centrale a molla che collabori al distacco. Se vi è il pericolo che sfridi di piccole dimensioni possano cadere in aperture più ampie presenti nel punzone, sugli estrattori, in corrispondenza di dette aperture, va disposta una piastra mentre se gli estrattori possono essere realizzati con dimensioni sufficienti, è vantaggioso fissare direttamente la piastra agli stessi mediante viti. Piccole cave incrociate ricavate sulla piastra fanno sì che lo sfrido venga soffiato via facilmente. Quando vengono usati stampi a punzone fisso e le dimensioni del profilo interno da generare sono 10 o più volte superiori allo spessore di lamiera, anche sugli estrattori viene previsto un bordino a V.

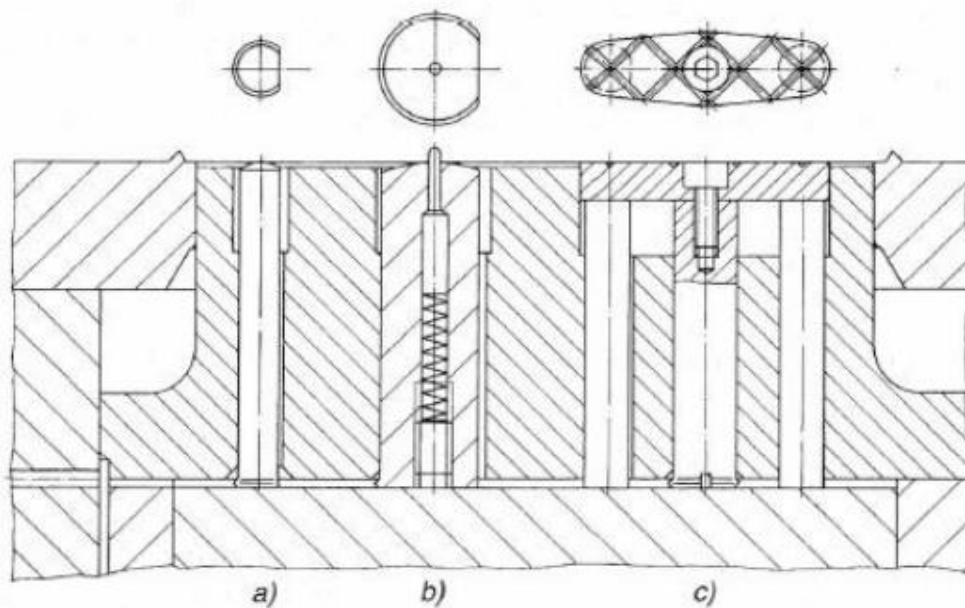


Figura 22: Esempio di perni di estrazione: a) canale di sfiato ricavato mediante spianatura del punzone; b) punzone con perno interno a molla per l'estrazione del pezzo; c) punzone con piastra di protezione fissata con vite al perno estrattore

L'estrattore ha tre funzioni base:

- bloccare saldamente il materiale contro il punzone durante la tranciatura
- assicurare la guida positiva per il punzone preposto alla tranciatura del profilo interno
- espellere il pezzo tranciato dalla matrice dopo la tranciatura.

L'estrattore può inoltre essere utilizzato per operazioni di coniazione e di marcatura sui pezzi e per fare piegature prima della tranciatura. Se possibile, una spina a molla di espulsione va prevista nell'estrattore allo scopo di sollevare leggermente il pezzo e assicurare che esso venga soffiato via dalla zona dello stampo mediante un getto d'aria. Per impedire disallineamenti fra punzone e punzone per profilo interno nei casi in cui si abbiano pezzi di forma circolare con profilo interno eccentrico, il movimento angolare dell'estrattore viene impedito mediante una sorta di chiavetta. Dato che la piastra di pressione è fissata con viti all'estrattore, quest'ultimo non può fuoriuscire dallo stampo. Stampi senza piastra di pressione sull'estrattore richiedono che la testa dell'estrattore stesso sia leggermente allargata per impedirne la caduta

8 Simulazione agli elementi finiti

8.1 Stampack

Stampack è un software che permette di svolgere simulazioni dei processi di formatura dei metalli, divisi e semplificati in operazioni più semplici, come: gravity, holding, forming, trimming, fixing, spring-back, flanging, hemming. Ogni operazione viene gestita con l'ausilio di utensili precedentemente sviluppati in programmi di modellazione e poi importati da file CAD, una volta conclusa la simulazione è possibile ottenere grafici ed un modello visivo in video del processo di formatura con cui poter analizzare il risultato finale.

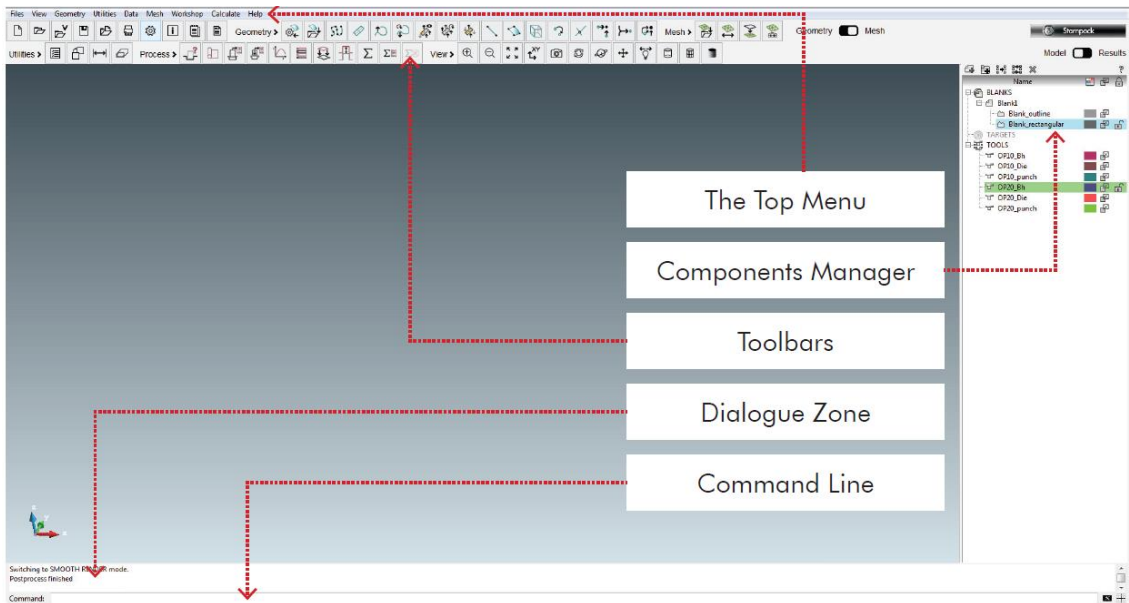


Figura 23: Pagina principale dell'interfaccia di Stampack

In figura si può visualizzare l'interfaccia iniziale dell'utente ed in particolare sulla destra è possibile osservare la lista dei tools delle varie operazioni. Gli strumenti si suddividono in due categorie principali, blank e tools. Nelle blank figurano tutte le lamiere (importate e definite da file CAD) che verranno deformate dai tools; nei tools figurano tutti gli utensili che svolgeranno i processi di deformazione.

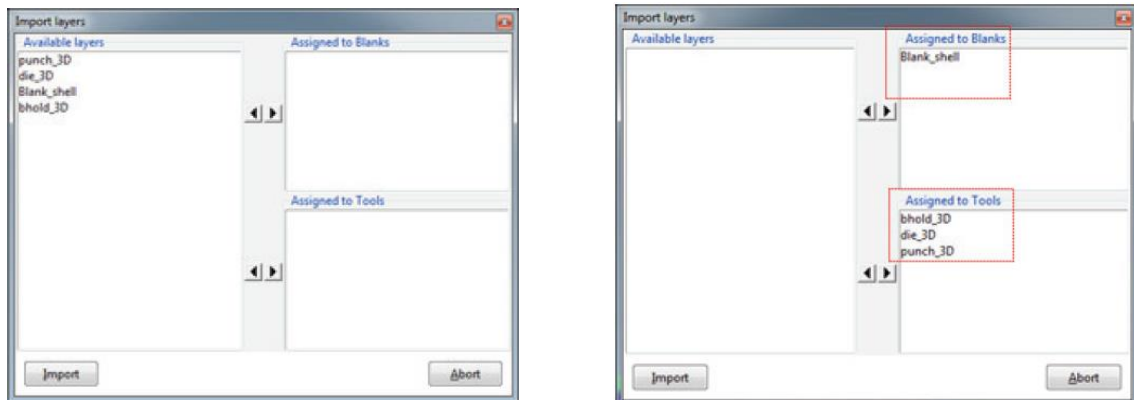


Figura 24: Interfaccia di importazione degli utensili

Le blank, al momento dell'importazione, devono essere ricostruite in una mesh, più o meno fine in base alla necessità dell'utente, mentre i tools vengono altresì ricostruite in mesh ma necessitano anche di ulteriori informazioni a riguardo del compito da svolgere.

Per poter definire la lamiera è necessario inserire il tipo di materiale da utilizzare, selezionabile in una lista di materiali di default di stampack o creabile con l'inserimento dei dati delle caratteristiche del metallo nell'apposita scheda di creazione del materiale.

I parametri da definire per i tools sono:

- process type
- General
- Symmetry definition

8.1.2 Process type

Definizione dell'operazione che si andrà a svolgere e simulare.

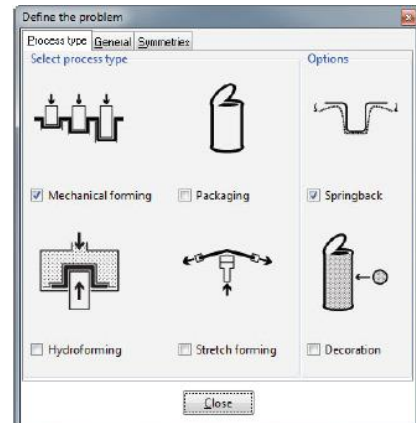


Figura 25: Selezione del processo

8.1.3 General

Si definirà: la costante di gravitazione da utilizzare

Direzione della gravità: La direzione della gravità e il suo senso deve essere specificato.

Per le simulazioni 3D l'asse Z è l'asse predefinito e per le simulazioni 2D l'asse Y è di default.

Dimensione del problema: Stampack rileva automaticamente se il problema è 2D o 3D.

Tipo di problema 2D: selezione del tipo di problema 2D

Tipo di elemento: Stampack rileva automaticamente se il problema è 2D, shell 3D o il solido 3D



Figura 26: Impostazioni dei parametri di gravità e dei piani di lavorazione

8.1.4 Symmetry definition

Possono essere definiti uno o due assi o piani di simmetria in caso di simulazioni simmetriche

8.1.5 Tool definition

In questa sezione verrà trattata solamente il caso di mechanical forming.

Ogni tool viene definito in base alla funzione che dovrà svolgere, in particolare definendo l'entità dello spostamento e la direzione in cui quello strumento si muoverà.

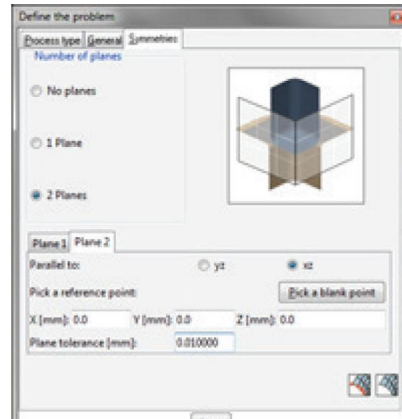


Figura 27: Definizione dei piani di simmetria

8.1.5.1 Blankholder

I parametri da definire del blankholder (prelamiera) sono corsa, direzione di movimento e tonnellaggio.

Il corretto tonnellaggio permette di ottenere un modello privo di pieghe e nervature senza incorrere nello strappo o eccessivo assottigliamento del laminato.

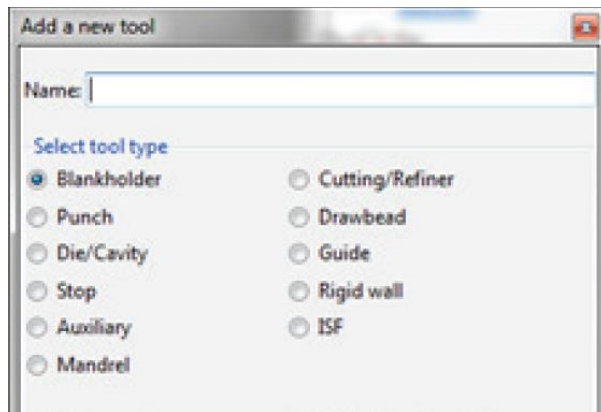


Figura 28: Schermata di selezione della tipologia di tool

8.1.5.2 Punch

Il punch (punzone) è l'utensile che traslando va a deformare la lamiera, quindi, necessiterà di un esatto valore di stroke (corsa); valori troppo elevati porterebbero alla sovrappressione del modello, quindi un assottigliamento dello spessore ed una forza necessaria per effettuare l'operazione elevatissima, al contrario, una corsa troppo breve porterebbe ad un non totale riempimento dello stampo, rendendo il pezzo finale ottenuto impreciso ed inutilizzabile.

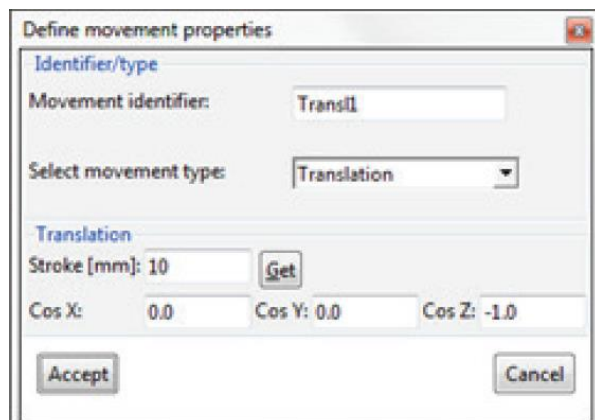


Figura 29: Definizione dello spostamento

8.1.5.3 Die

Il Die (matrice) essendo un componente fisso non necessita di corsa e tonnellaggio, quindi nell'importazione dell'utensile dal file CAD non occorre definire ulteriormente il tool.

8.1.6 Risultati del calcolo

Svolta l'operazione di calcolo, il software presenta una interfaccia grafica in cui sono elencati le operazioni e gli step calcolati.

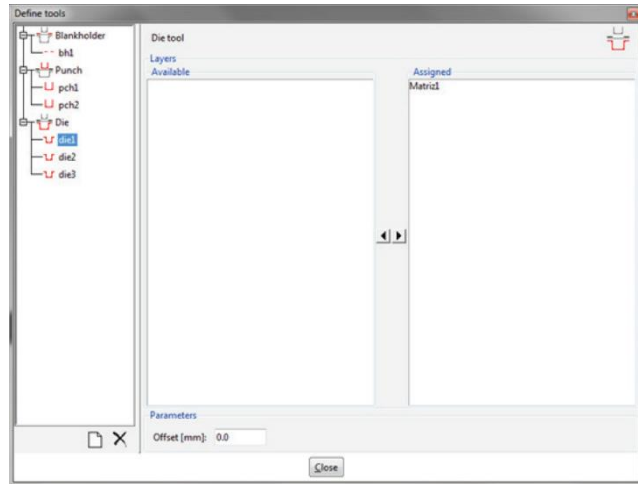


Figura 30: Schermata di impostazione delle operazioni

I tempi di calcolo del software variano di gran lunga passando da una simulazione in 2D ad una simulazione 3D, passando da pochi minuti di calcolo a decine di ore.

I fattori che influenzano le tempistiche sono:

- Hardware dell'utente, ossia potenza di calcolo del computer utilizzato
- Velocità di movimento dei tools
- Densità delle mesh della lamiera da utilizzare
- Numero di operazioni da simulare
- Complessità delle operazioni

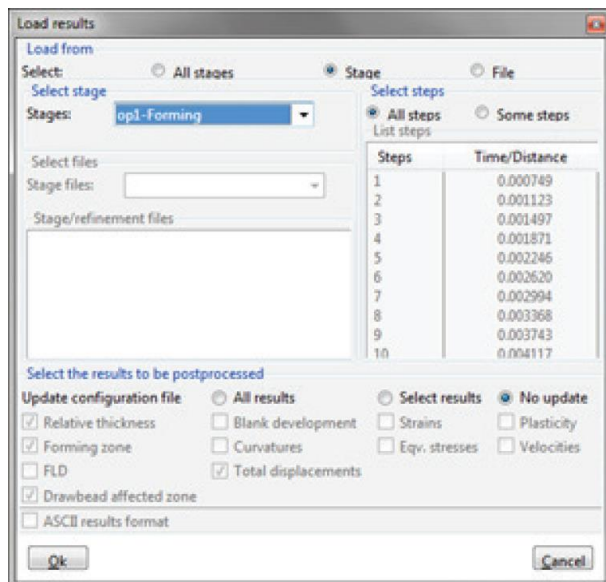


Figura 31: Finestra "Risultati del calcolo"

8.2 Analisi dei risultati

Il modello può essere analizzato tramite gli strumenti della barra "results", in seguito ne sono riportate due immagini, una per simulazioni in 2D e la seconda per simulazioni 3D



Figura 32: Barra "Results" 2D

8.2.1 Relative thickness (grafico RT)



Permette di osservare le variazioni di spessore nel modello, valori minori indicano di un assottigliamento, valori maggiori di uno indicano un ispessimento, graficamente evidenziati da una variazione di colore nel modello.

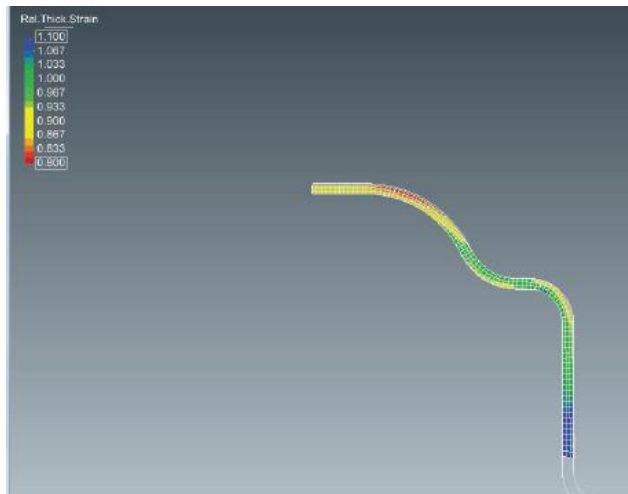


Figura 33: Esempio di grafico RT

8.2.2 Pressure vector



Rappresentazione grafica dei vettori della pressione agenti sulla superficie del laminato, visualizzabili come frecce proporzionali al proprio valore.

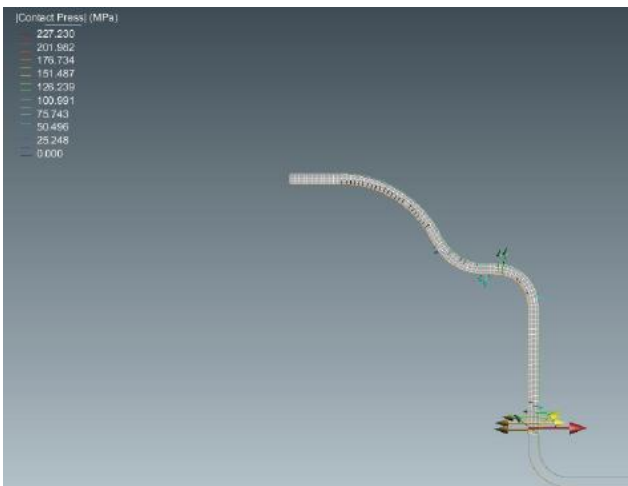


Figura 34: Esempio di grafico Pressure Vector

8.2.3 Detailed history output



Permette di ottenere grafici combinati in funzione di: deformazione, velocità, accelerazione e forze di contatto, facendo riferimento ai valori ottenuti dai nodi della mesh deformata.

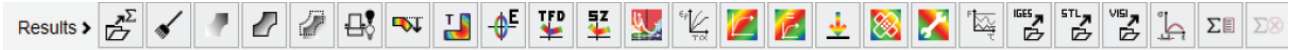


Figura 35: Barra "results" 3D

8.2.4 FLD



Il coefficiente FLD identifica la posizione della cura di deformazione in relazione con la curva limite di formabilità (FLC), un valore pari a 100 indica il caso di coincidenza, ossia, che il materiale è deformato a suo massimo potenziale, valori maggiori porterebbero alla rottura del pezzo.

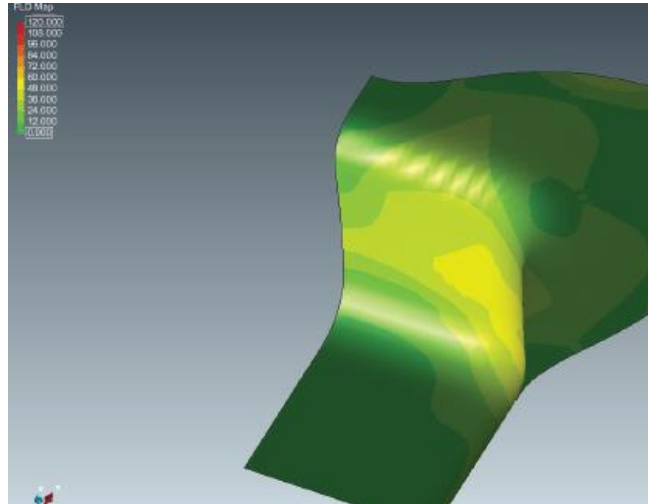


Figura 36: Esempio di mappa FLD su un corpo

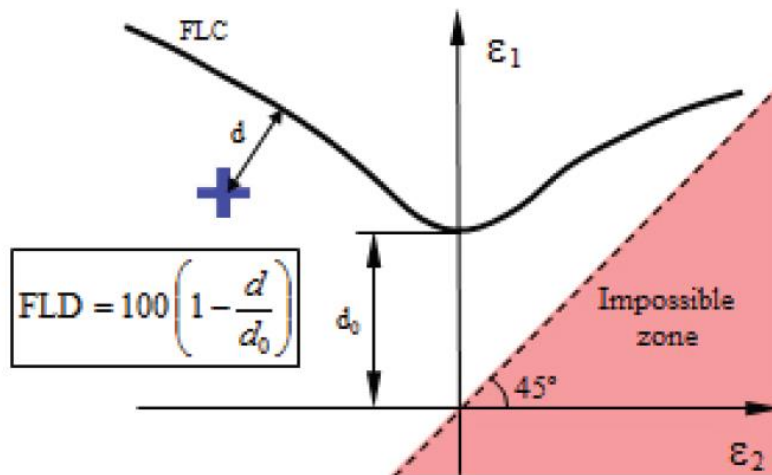


Figura 37: Grafico per il calcolo del coefficiente FLD

8.2.5 Forming zone (FZ)



La forming zone indica la qualità di stampaggio e classifica lo stato di deformazione in base alla posizione relativa. Le “qualità” sono divisibili in sette zone

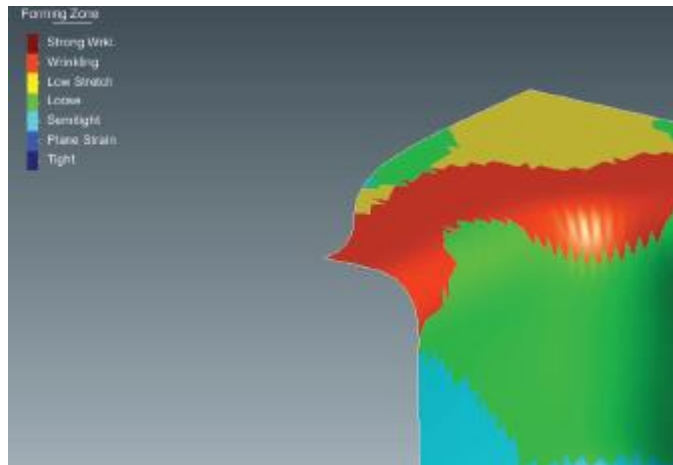


Figura 38: Analisi FZ

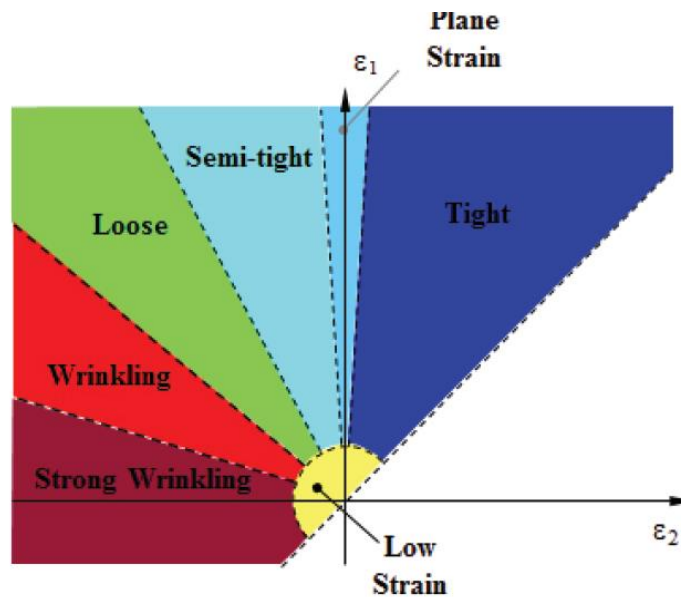


Figura 39: Grafico forming zone

8.2.6 Safety zone (SZ)



Indica lo stato della lamiera dopo la deformazione, indicando la presenza di rotture, forti compressioni o zone particolarmente assottigliate.

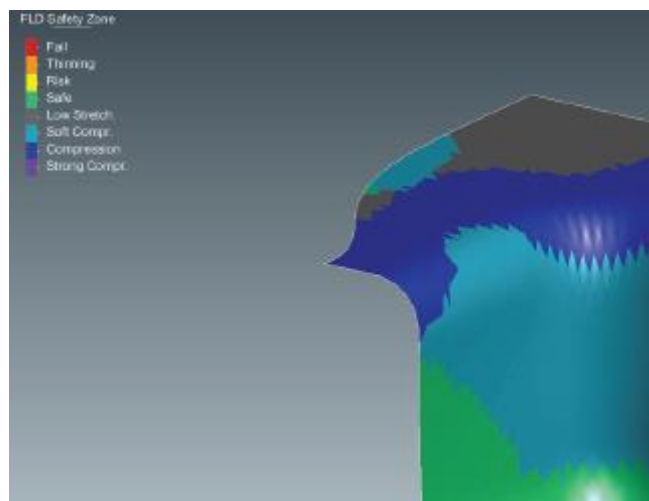


Figura 40: Analisi SZ

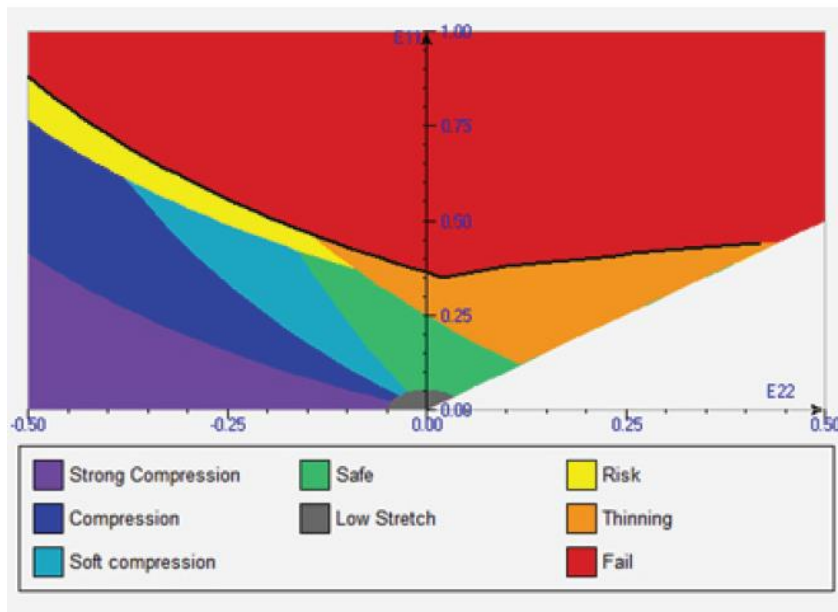


Figura 41: Grafico per la definizione delle SZ

8.2.7 TFD graph



Permette di osservare simultaneamente il coefficiente TFD visto precedentemente con lo specifico grafico TFD del materiale.

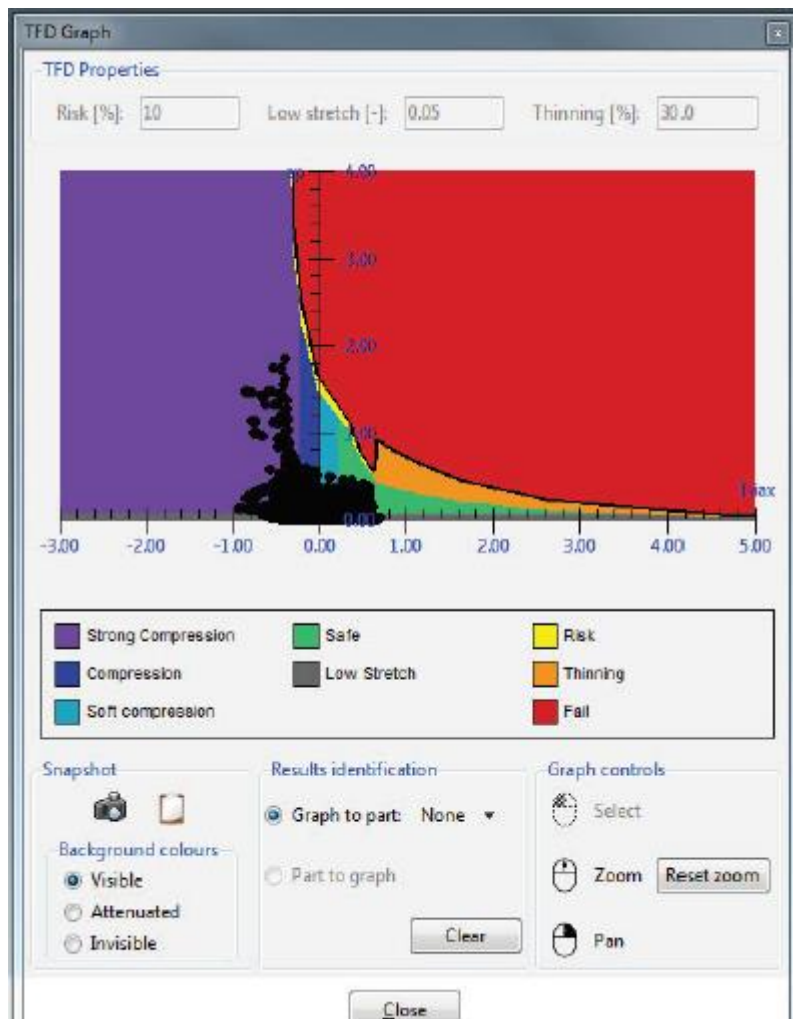


Figura 42: Grafico TFD

8.3 Equazione di governo

Negli ultimi anni il metodo agli elementi finiti ha trovato il più largo uso nei settori dei processi di lavorazione per deformazione plastica perché è il più adatto allo studio dei processi nei loro dettagli quali previsione delle tensioni e delle deformazioni indotte della deformazione. Il nome deriva dal fatto che il corpo di cui si studia la deformazione viene suddiviso in un certo numero di elementi di dimensioni finiti interconnessi attraverso i nodi, che garantiscono la continuità fisica del corpo.

Per ogni elemento viene calcolata la matrice di rigidità, cioè una matrice che mette in relazione le forze applicate ai nodi di ogni elemento con gli spostamenti degli stessi nodi. Le varie matrici elementari vengono composte per formare la matrice di rigidità complessiva del corpo discretizzato, rispettando le condizioni di compatibilità degli spostamenti dei nodi e di equilibrio degli stessi.

L'espressione formale dell'equazione di governo per i corpi deformabili continui risultata dal principio dei lavori virtuali è riportata in seguito:

$$M\ddot{u} = F_{ext} - F_{int}$$

Con: \ddot{u} = vettore di accelerazione per tutti i nodi;

F_{ext} = vettore delle forze esterne applicate;

F_{int} = il vettore delle forze interne;

M la matrice di masse diagonale.

L'equazione di governo può essere integrata utilizzando diversi tipi di formulazione e diversi metodi d'integrazione. In seguito, saranno presentati solo alcuni elementi generali che riguarda questi vari metodi, per poter dopo identificare in pratica le differenze fra i diversi codici agli elementi finiti utilizzati nel campo dello stampaggio di lamiera.

8.3.1 Formulazione Lagrange

In una formulazione Lagrange ogni particella del corpo, approssimata ad un nodo di una mesh, è caratterizzata da coordinati iniziali e tempo, dalle quali è possibile ottenere le coordinate attuali:

$$x = x(x_0, y_0, z_0, t)$$

$$y = y(x_0, y_0, z_0, t)$$

$$z = z(x_0, y_0, z_0, t)$$

In una rappresentazione Lagrange con elementi finiti, le variabili dipendenti indicheranno la posizione dei nodi della rete che si confondono con quelli dei punti fisici materiali, quindi avremo lo spostamento della mesh insieme al materiale.

8.3.2 Formulazione Eulero

La formulazione di Eulero è opposta a quella di tipo Lagrange:

$$v_x = v_x(x, y, z, t)$$

$$v_y = v_y(x, y, z, t)$$

$$v_z = v_z(x, y, z, t)$$

In questo caso le variabili dipendenti sono le velocità, la rete con gli elementi non si sposta, ma si spostano i punti materiali verso la rete stazionaria.

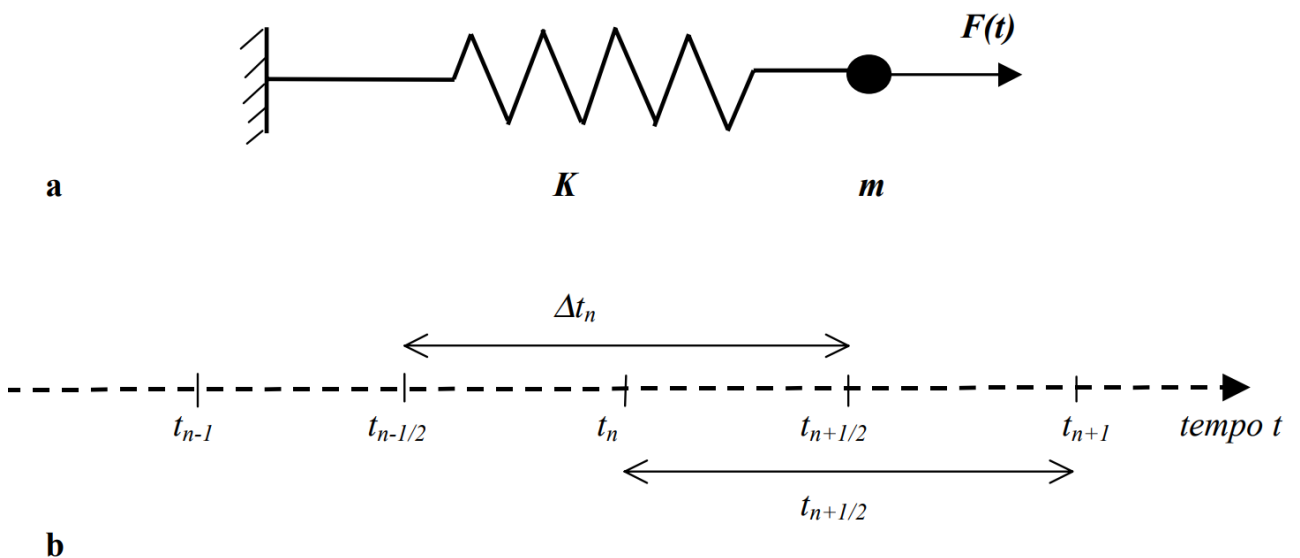
8.3.3 Formulazione arbitraria Lagrange-Eulero

Questo modo di formulazione combina i due tipi di formulazioni presentate prima. In questo caso la rete con gli elementi finiti si sposta in accordo con lo spostamento definito di utilizzatore e il materiale fluisce sopra il spostamento della mesh.

8.4 Metodi d'integrazione

8.4.1 Approccio d'integrazione esplicita

Per esemplificare questo metodo d'integrazione si considera un sistema elastico oscillatorio che ha una massa m una costante k e una forza esterna $F(t)$, figura a, e una asse di tempo discretizzata, figura b.



L'equazione che esprime l'equilibrio dinamico del sistema elastico è un'equazione differenziale:

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + k \cdot x = F(t)$$

In questa equazione si considerano conosciuti: x_n e $(dx/dt)_{n-1/2}$ e bisogna trovare x_{n+1} e $(dx/dt)_{n+1/2}$.

L'equilibrio dinamico al tempo t_n è espresso dalla prossima equazione:

$$m \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + k \cdot x = F_n - k \cdot x_n$$

Come la parte destra è conosciuta in questo caso si può applicare la differenza centrale:

- (a) $\left(\frac{d^2x}{dt^2} \right)_n = m^{-1} (F_n - k \cdot x_n)$
- (b) $\left(\frac{dx}{dt} \right)_{n+1/2} = \left(\frac{dx}{dt} \right)_n + \Delta t_n \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right)_n$
- (c) $x_{n+1} = x_n + \Delta t_{n+1/2} \left(\frac{dx}{dt} \right)_{n+1/2}$

Che sono valide quando:

$$\Delta t_n < \sqrt{\frac{2m}{k}}$$

Dove m è la massa nodale e k rigidità nodale, oppure la forza necessaria per ottenere un'unità di spostamento nella direzione del grado di libertà considerato. Questo nel caso in quale tutti i nodi vicini sono fissi nella situazione di una struttura con più di un grado di libertà. Risulta che bisogna fare attenzione al modo in quale viene scelto Δt in tale modo da rispettare la condizione:

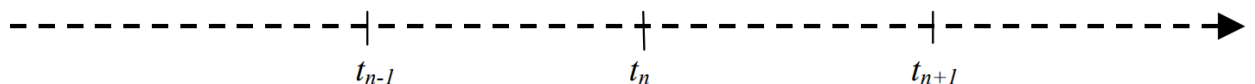
$$\Delta t_{n+1/2} = t_{n+1} - t_n$$

$$\Delta t_{n=t_{n+1/2}} = t_{n-1/2} - t_n$$

In conclusione, si può affermare che quest'approccio è stabile ma in modo condizionato.

8.4.2 Approccio di integrazione implicita

Si considera lo stesso sistema elastico illustrato in figura 33.a, e un'asse di tempo discretizzato come in figura.



L'equazione differenziale di riferimento è:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = F$$

In questo caso si conoscono: x_n e $(dx/dt)_n$. Bisogna trovare: x_{n+1} e $(dx/dt)_{n+1}$. L'equilibrio dinamico al momento t_{n+1} è espresso dalla prossima equazione:

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right)_{n+1} + kx_{n+1} = F_{n+1}$$

in cui x_{n+1} non è conosciuto. Anziché cercare una soluzione diretta per x_{n+1} e $(d^2 x/dt^2)_{n+1}$ in questo caso si usano le prossime relazioni di sostituzione:

$$\left(\frac{dx}{dt} \right)_{n+1} = (x_{n+1} - x_n) / \Delta t$$

$$\left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right)_{n+1} = \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)_{n+1} - \left(\frac{dx}{dt} \right)_n \right] / \Delta t$$

In questo modo si ottiene:

$$\left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right)_{n+1} = (x_{n+1} - 2x_n + x_{n-1}) / (\Delta t)^2$$

Che sostituendo nell'equazione precedente si ottiene:

$$\left(\frac{m}{\Delta t^2} + k \right) \cdot x_{n+1} = F_{n+1} - \frac{m}{\Delta t^2} (2x_n - x_{n-1})$$

La quale può essere risolta dallo spostamento sconosciuto al tempo t_{n+1}

$$x_{n+1} = \left(\frac{m}{\Delta t^2} + k \right)^{-1}$$

Quest'approccio d'integrazione lavora indipendente dal valore di Δt e quindi stabile senza nessuna condizione.

Il passo di tempo, Δt , in un'analisi implicita sarà da 100 fino a 1000 volte maggiore da quello utilizzato in un'analisi esplicita. Comunque, l'incremento di tempo in un'analisi esplicita è piccolo, e approssimazioni per spostamenti piccoli sono giustificate nel corso di un incremento. Questo non è valido in un'analisi implicita. Per risolvere il sistema di equazioni nel metodo implicito bisogna fare iterazioni e imporre condizioni di convergenza, non necessarie nel metodo esplicito.

9 Prototipazione 3D

La produzione additiva, comunemente chiamata stampa 3D, è un processo di fabbricazione che consente di realizzare oggetti fisici partendo da un modello digitale. Numerose sono le tecnologie e i materiali a disposizione, ma il principio di base è lo stesso: attraverso la sovrapposizione di strati di materiale, uno dopo l'altro, un modello digitale viene trasformato in un oggetto solido tridimensionale.

9.1 Modellazione a deposizione fusa (FDM)

Le stampanti 3D da tavolo comportano l'utilizzo di filamenti di plastica. Questa tecnologia di stampa viene chiamata Modellazione a Deposizione Fusa (FDM) ed è una tecnica di produzione additiva che permette di ottenere, tramite estrusione di materiale polimerico termoplastico da un ugello, un modello 3D depositando strato dopo strato il materiale sul piano di costruzione. La prima cosa da fare quando si vuole realizzare un oggetto attraverso il sistema FDM, è creare un file STL (Stereolithography file format) che attraverso un calcolo matematico suddivide il modello digitale in sezioni (o slices) e lo orienta secondo necessità per la fase successiva. Talvolta il software è in grado di generare delle strutture di supporto in maniera automatica. Un filamento di plastica viene condotto da una bobina e spinto attraverso l'ugello di estrusione, che lo fonde e lo deposita sulla piattaforma, al contatto con il piano di costruzione si indurisce e il resto del materiale viene gradualmente rilasciato seguendo una struttura predeterminata fino al raggiungimento della forma desiderata. Quando uno strato si deposita, la piattaforma si abbassa dello spessore di uno strato per permettere all'estrusore di rilasciare lo strato successivo di materiale.

Esiste una vasta gamma di materiali che possono essere impiegati nella stampa FDM. La prima distinzione è quella tra materiali industriali e materiali ad uso domestico. I più comuni sono: ABS (Acrilonitrile-Butadiene Stirene) o Cycolac, PLA (Acido Poli lattico) e Nylon (Poliammide), ma è possibile utilizzare miscele di più materiali come plastica e legno o carbonio. Grazie ai numerosi vantaggi che questa tecnologia presenta, la stampa FDM viene spesso utilizzata per la realizzazione di parti di concept, modelli funzionali, prototipi, parti complesse destinate all'uso finale, e utensili di produzione. In particolar modo, la tecnologia FDM è sfruttabile nella produzione in volumi limitati di prototipi per test di forma, idoneità e funzione. Tra i campi d'applicazione il settore aerospaziale, per la produzione di turbine, e quello medico, per la realizzazione di modelli anatomici.

9.1.1 Vantaggi e Svantaggi

Quando si parla di stampa 3D, una delle principali perplessità ad essa correlate riguarda i costi. L'utilizzo a lungo termine dei materiali può rivelarsi una spesa gravosa, tuttavia coloro che intendono fare uso della tecnologia FDM godono di un vantaggio iniziale. È possibile ottenere geometrie complesse con cavità e forme altrimenti impossibili da

realizzare. Per quanto riguarda l'accuratezza, le stampe 3D non raggiungono lo stesso livello di accuratezza e qualità degli altri oggetti che vengono invece prodotti attraverso l'uso della stereolitografia. Detto questo, il risultato è considerato abbastanza qualitativo, a seconda del settore in cui viene applicata la tecnologia. La risoluzione dipende principalmente dalle dimensioni dell'ugello utilizzato. La precisione della macchina dipende dai movimenti dell'estrusore sull'asse X e Y, ma ci sono altri fattori da prendere in considerazione. Ad esempio, la forza di adesione tra gli strati è inferiore rispetto al processo di Stereolitografia. Di conseguenza, il peso degli strati potrebbe schiacciare gli strati inferiori, il che può quindi influenzare e persino compromettere la qualità della stampa stessa. Contrariamente alla SLA, la tecnologia FDM presenta anche una maggiore complessità. Bisogna tener conto del peso e delle dimensioni, ma anche dei vincoli. È molto importante assicurarsi che il prototipo soddisfi le aspettative rappresentate sullo schermo dal modello 3D digitale. I vincoli sono determinati da diversi fattori, in primis dal materiale impiegato, attraverso il quale è possibile prevedere che dimensioni potrà avere il prototipo. Un altro svantaggio è rappresentato dai tempi di stampa, più lunghi rispetto a quelli richiesti dalla Stereolitografia o dalla Sinterizzazione Laser Selettiva, che sarà analizzata successivamente. Inoltre, la finitura superficiale è considerata accettabile, ma non di qualità. Infatti, un prototipo realizzato con stampante FDM richiederà quasi sempre una fase di post-lavorazione.

9.3 Stereolitografia (SLA)

La stereolitografia (SLA) è un processo basato sulla fotopolimerizzazione, strato dopo strato, di una resina liquida, sensibile alla radiazione ultravioletta emessa da una sorgente laser. È una delle tecnologie di stampa 3D più datate, ma viene largamente utilizzata ancora oggi. Il processo prevede l'uso di un macchinario chiamato "apparato stereolitografico" che converte la plastica liquida in oggetti 3D solidi. Dopo ogni strato, il serbatoio di resina si distacca dal piano di lavoro e rilascia il materiale indurito. La piattaforma di costruzione si sposta di un livello che va dai 25 ai 200 micron, secondo lo spessore del livello scelto, al fine di favorire la solidificazione dello strato successivo. Il prototipo ultimato appare a testa in giù, e per questo parliamo di stereolitografia inversa. La stereolitografia permette di scegliere tra una vasta gamma di materiali che possono essere sintetizzati in tre categorie.

La prima è rappresentata dalle resine verniciabili. In questo caso, il processo si svolge all'interno di un grande serbatoio e ha inizio quando uno strato di polimero liquido viene distribuito su una piattaforma. Un laser UV computerizzato traccia il primo strato che subito si indurisce. La piattaforma si abbassa, e lo strato successivo viene tracciato su quello precedente. L'operazione si ripete fino al completamento del modello. Alla fine del processo, il modello viene sollevato dal serbatoio e il liquido in eccesso scorre via. I supporti vengono rimossi manualmente.

La seconda e la terza categoria sono rappresentate dalla resina trasparente e la resina grigia. Il grado di trasparenza varia da traslucido a cristallino. La resina trasparente garantisce un'ottima qualità di superficie che si presenta liscia ed eventualmente l'effetto ruvido dovuto alla stampa può essere eliminato mediante carteggiatura. Ogni modello viene infine ricoperto da una vernice trasparente per prevenirne lo scolorimento. La

superficie non lavorata di un prototipo in resina trasparente viene definita finitura di base, normalmente più liscia rispetto a quella dei prototipi in polvere. Tuttavia, questo tipo di materiale richiede l'utilizzo di strutture di supporto, che vengono rimosse prima della fase di rifinitura, e pertanto di materiale aggiuntivo. La resina grigia, invece, è quella che meglio si presta alla realizzazione di modelli visivi di qualità, ma con funzionalità limitata. Rispetto ai materiali già menzionati essa presenta una superficie di gran lunga più liscia, di colore grigio avio, "lussuosa" al tatto, ed ha una resistenza meccanica media. La libertà nella progettazione è limitata a causa delle strutture di supporto richieste dal processo di stampa. I prototipi realizzati in resina grigia vengono generalmente utilizzati come modelli da esposizione. I reparti di progettazione e meccanica li utilizzano come prototipi visivi durante le presentazioni, ma questo materiale si è rivelato essere funzionale anche per la creazione di modellini di action figures. La differenza tra la resina trasparente e la resina grigia risiede nel risultato che si vuole ottenere. La resina grigia, ad esempio, ha un'ottima resistenza ed un'elevata precisione nei dettagli. La resina verniciabile, invece, fornisce una maggiore libertà nella scelta dei colori, ma, necessitando di strutture di supporto, pone dei limiti nella scelta del design, contrariamente a quanto accade con le resine grigie. I settori che più ne traggono utilizzo sono: automobilistico, aerospaziale, medico e dei beni di consumo. È molto diffusa anche in ambito domestico: è possibile realizzare oggetti 3D partendo dal proprio modello in maniera facile e veloce.

9.3.1 Vantaggi e Svantaggi

La Stereolitografia è considerata una delle migliori tecnologie di stampa 3D presenti oggi sul mercato. Uno dei maggiori punti di forza riguarda l'alta risoluzione dei dettagli. Permette infatti di stampare oggetti dalle geometrie molto complesse senza comprometterne la qualità. Una delle massime prerogative è la precisione, pertanto la tecnologia SLA è la scelta più azzeccata nel caso in cui forma, adattamento e assemblaggio siano la priorità. Tale precisione è dovuta all'utilizzo delle resine, ovvero, i cosiddetti materiali fotopolimerici, offrendo una certa libertà in termini di colore, grado di opacità e rigidità, garantendo tuttavia un'eccellente qualità della superficie. Nonostante la presenza di tecnologie più rapide e recenti sul mercato, la stereolitografia è in grado di funzionare correttamente e in tempi ragionevoli, consentendo di risparmiare tempo anche su quelle parti che richiedono una precisione elevata. I prototipi possono pertanto essere realizzati senza troppe difficoltà rimanendo fedeli al progetto iniziale. Nonostante le stampanti vengano considerate più o meno accessibili, i materiali fotopolimerici risultano molto costosi, rendendo l'uso di questa tecnologia poco abbordabile. Inoltre, anche se sono disponibili in diversi colori, c'è ancora una scelta limitata di fotopolimeri. Data l'irritabilità e la tossicità delle resine liquide, è sempre consigliato di fare uso delle attrezzature e degli strumenti di sicurezza più adeguati. Tra gli altri svantaggi, le stampe stereolitografiche richiedono normalmente una fase di pulitura, con conseguente impiego di tempo e sforzo non indifferenti. Per raggiungere un livello di qualità ottimale è necessario rifinire il prototipo in fase di post-lavorazione. Il livello di qualità desiderato e la scelta del materiale comporteranno un numero maggiore o minore di passaggi. Contrariamente alla Sinterizzazione Laser Selettiva, tecnologia molto simile ad essa, la Stereolitografia richiede l'utilizzo di strutture di supporto, e di conseguenza una quantità maggiore di materiale, che rende tale tecnologia più costosa.

9.4 La Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS)

utilizza un raggio laser come fonte di energia per creare oggetti 3D solidi. La tecnologia SLS è per molti aspetti simile alla Stereolitografia (SLA). La principale differenza risiede nel materiale contenuto dalla vasca, polvere polimerica piuttosto che resina liquida. A differenza delle tecnologie FDM e SLA, la Sinterizzazione Laser Selettiva non comporta l'uso di strutture di supporto, con conseguente riduzione della quantità di materiale. Durante la fase di stampa, il prototipo è costantemente immerso nella polvere non ancora sinterizzata. Un raggio laser sinterizza selettivamente particelle di polvere che si fondono fino a creare una forma solida. La tecnologia SLS consente l'impiego di una varietà di materiali che vanno dal nylon, al vetro e alla ceramica, all'alluminio, all'argento e persino all'acciaio. Tuttavia, alcuni di essi, come la ceramica, non sono sinterizzati al laser. Spesso è necessario l'impiego di un legante per incollare le parti ed in questo caso parliamo di "Powder & Binder-based 3D printing". Con l'ausilio di un recoater (o rullo) viene depositato un sottile strato di polvere su una piattaforma di stampa speciale (in sostituzione del laser) che posiziona un agente legante in punti specifici, stampando uno strato sottile del modello che è in grado di legarsi agli strati successivi. Questo processo viene quindi ripetuto più e più volte fino a quando il modello non è completo. Dal momento che il prototipo è stato semplicemente "incollato", saranno necessari specifici passaggi di finitura in post-lavorazione in base al materiale impiegato: i modelli multicolore vengono immersi nella super colla, le stampe in ceramica vengono messe in un forno di essiccazione, gli oggetti in acciaio e acciaio inossidabile ad alta definizione vengono posti in un forno per la fusione e caricati con polvere di bronzo per aumentarne la resistenza. I campi di applicazione della tecnologia SLS variano dal settore automobilistico a quello dei beni di consumo. Nel caso delle industrie commerciali tale tecnologia viene impiegata nella fase di sviluppo del prodotto e nella prototipazione rapida, nonché nella produzione a ciclo limitato di parti ad uso finale, come ad esempio la costruzione di prototipi per componenti di aeromobili. Non è economicamente conveniente per le case di produzione costruire stampi fisici per parti di aeroplani. Questi stampi sarebbero troppo costosi da fabbricare e mantenere per lunghi periodi di tempo evitando che vengano danneggiati o corrosi, pertanto, la tecnologia SLS è perfetta per la produzione di piccoli lotti. Ancora più interessante è il fatto che la SLA sia stata lentamente introdotta nel settore dei beni di consumo, in particolare in quello della produzione di scarpe. Secondo le aziende produttrici, l'uso del nylon sinterizzato dalla SLS può produrre un modello di scarpa con un peso ridotto, e con una ridotta customizzazione, riuscendo tuttavia ad adattare la scarpa alle esigenze del cliente.

9.4.1 Vantaggi e Svantaggi

Uno dei vantaggi più evidenti della Sinterizzazione Laser Selettiva, è la mancata necessità di fare uso di strutture di supporto, in quanto essa è completamente autoportante. Consente quindi di costruire parti all'interno di altre parti in un processo chiamato nesting. Ciò comporta due cose: una riduzione dei costi del materiale che sarebbe invece impiegato nella stampa delle strutture di supporto, come nel caso della tecnologia FDM, e la possibilità di gestire con più facilità geometrie ad alta complessità. In generale, la SLS è considerata la tecnologia di stampa 3D più veloce, sia per la stampa di prototipi funzionali durevoli che di parti destinate al consumatore finale. La durabilità è, inoltre,

supportata dall'uso di materiali resistenti come il nylon, che consente anche una certa libertà nella funzionalità della stampa 3D finale. La tecnologia SLS produce parti considerate tra le più forti e rigide, con una buona resistenza chimica, parti complesse con componenti interne o canali, possono essere costruite senza correre il rischio che del materiale rimanga incastrato, o che la superficie del prototipo sia danneggiata a seguito della rimozione del supporto. La precisione è un altro importante vantaggio della tecnologia SLS. Il risultato finale è sempre ad alta precisione. Il processo di stampa è più rapido paragonato alle tecnologie già analizzate. Grazie alla scalabilità del software è possibile realizzare la stampa di un singolo oggetto o di dozzine di pezzi con facilità. Tuttavia, i prodotti stampati tramite SLS presentano una certa porosità sulla superficie, richiedendo una fase di post lavorazione, come nel caso della Modellazione a Deposizione Fusa.

10 Esperienza personale

10.1 Analisi del componente

Il file inviato dal cliente, contenente il pezzo finale da ottenere, era privo di informazioni riguardanti tolleranze o dimensionamenti. Per necessità ci siamo quindi basati prettamente sul modello inviato, mantenendo quindi le stesse dimensioni.

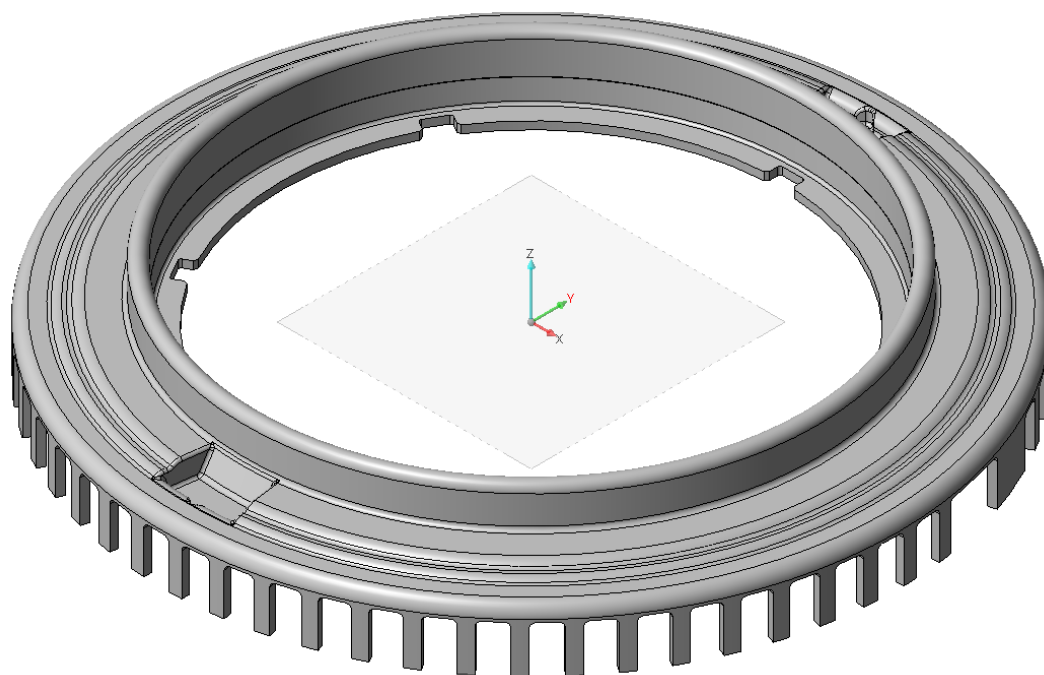


Figura 43: Modello inviato dal cliente

Analizzando il modello abbiamo trovato le criticità e le modifiche necessarie da apportare per favorire la realizzazione. In particolare, i raccordi nelle bugne avevano raggi di raccordo impossibili da ottenere durante il processo di stampaggio, poiché risultavano essere di 1mm sia nella parte superiore che quella inferiore. Considerando lo spessore di 3mm della lamiera utilizzata, abbiamo modificato i raggi di raccordo interni ad 1mm ed esterni a 4mm. La seconda criticità da tenere in considerazione era nel dorso del volano avente un raggio di curvatura quasi nullo, impedendo quindi di svolgere la lavorazione in un unico passaggio con l'ausilio di un supporto nella matrice. Per evitare di sollecitare troppo il materiale abbiamo deciso di procedere con una piegatura progressiva del bordo interno.

10.2 Materiale utilizzato

Il metallo della lamiera che abbiamo deciso di usare è il DD14, un acciaio low carbon spesso utilizzato per lavorazioni di imbutitura, deformazione e per la sua buona capacità nel subire processi di saldatura e di rivestimento.

Material properties

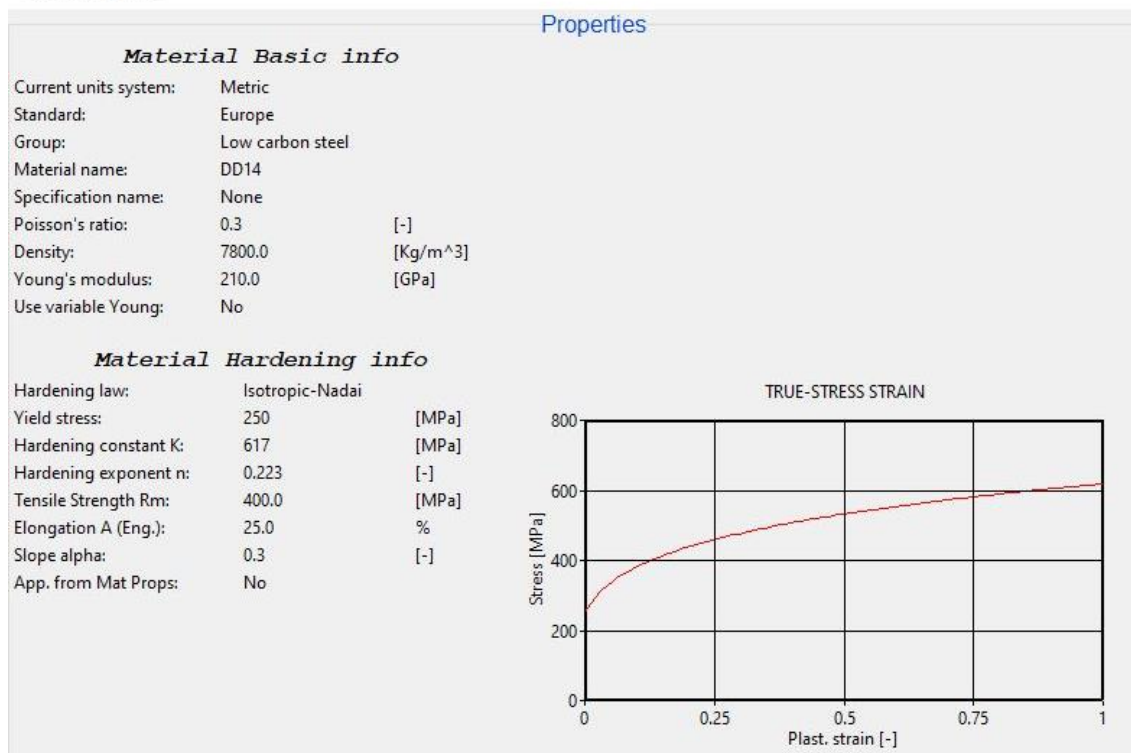


Figura 44: Scheda identificativa del metallo DD14

10.3 Sviluppo utensili in 2D

Come primo passaggio è necessario identificare il numero di step da effettuare per ottenere il pezzo.

Analizzando il pezzo senza considerare bugne e tranciatura, per la formazione dei denti del volano, si può procedere considerandolo assialsimmetrico, rendendo più rapidi ed immediati i primi passaggi di modellazione del laminato.

Tramite il software di modellazione VISI abbiamo sviluppato e modellato gli utensili in 2D, tramite i quali sarà possibile ricavare i tools in 3D per rivoluzione attorno all'asse.

Purtroppo per necessità di tempistiche non sono riuscito ad ultimare e completare il pezzo, quindi qui tratterò lo sviluppo delle prime cinque operazioni escludendo tranciatura e piegatura.

1^a operazione

Nella prima operazione abbiamo effettuato una piegatura grossolana che costituirà la parete esterna del dorso del volano, riducendone drasticamente la formazione di bombature e deformazioni.

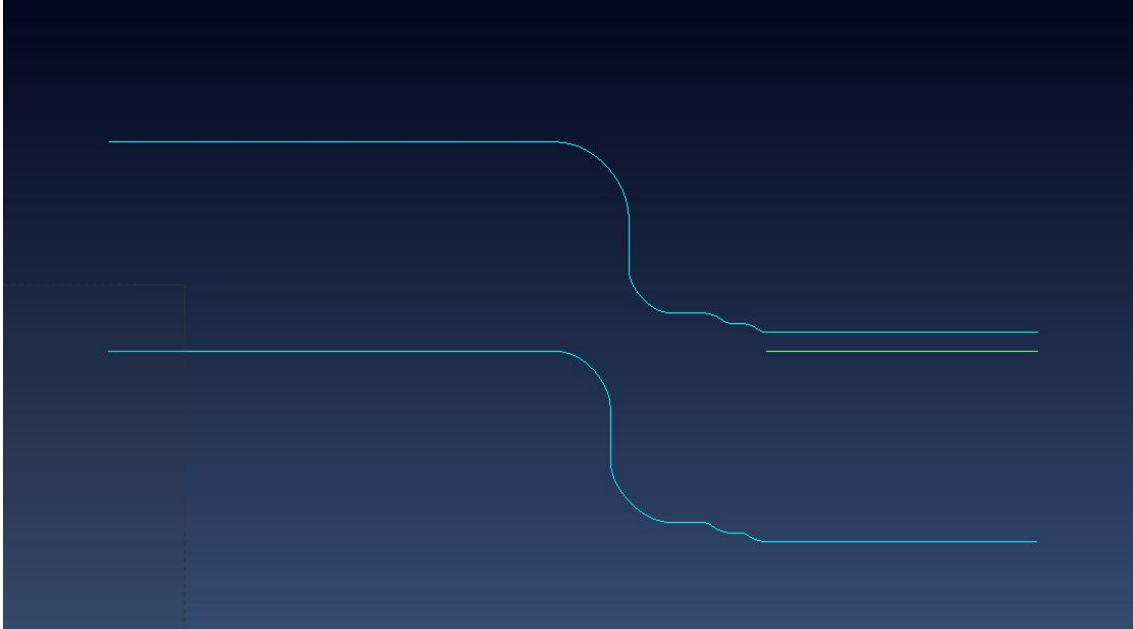
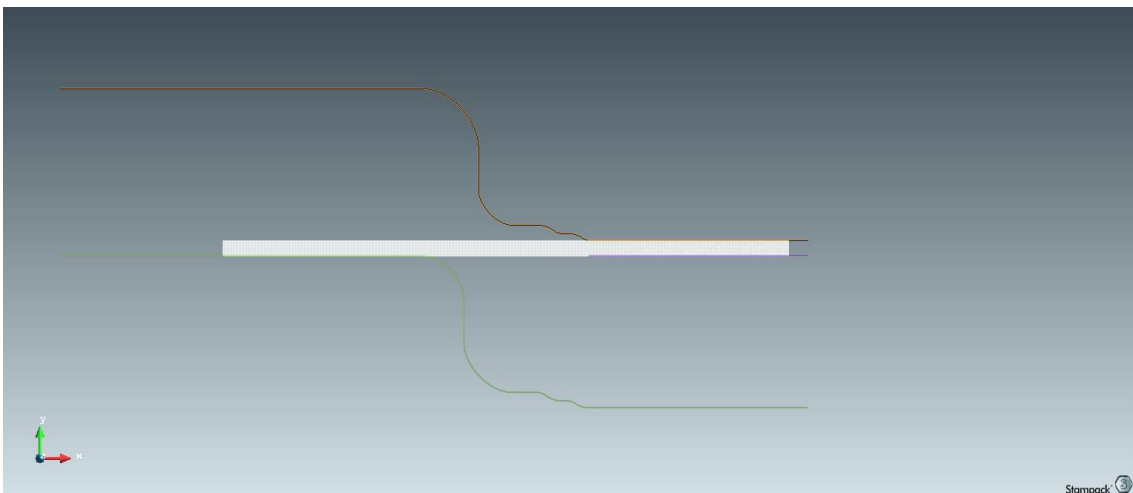
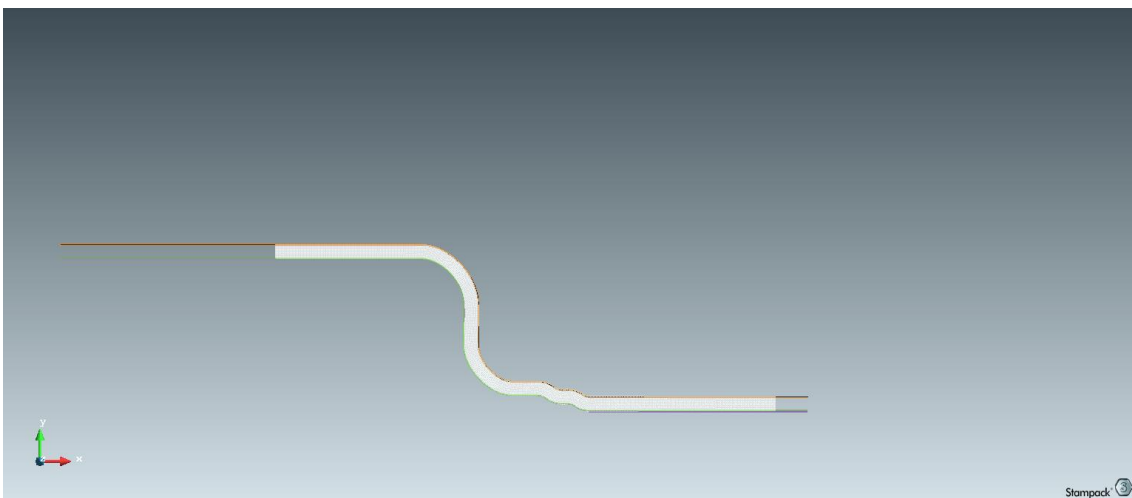
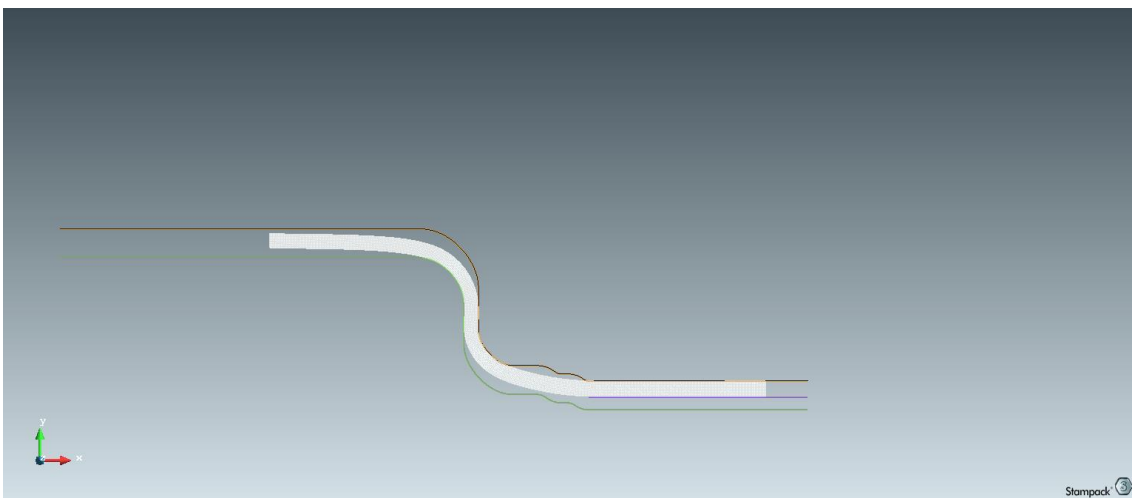
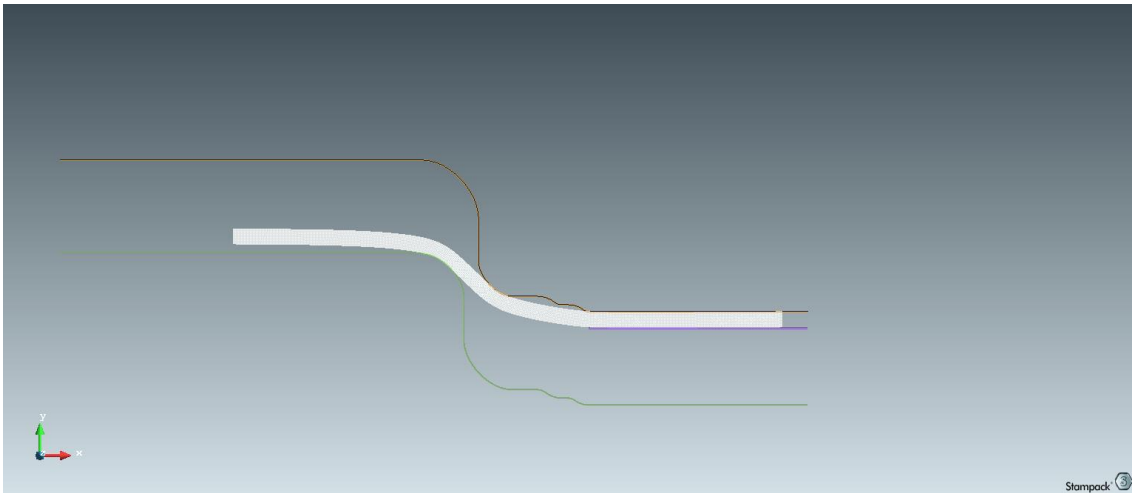


Figura 45: Utensili della prima operazione

In figura sono identificabili i tre profili che costituiranno il nostro stampo, punzone, matrice e premilamiera. Successivamente, tramite una simulazione FEM è stato possibile verificare se la lamiera assumesse la forma desiderata.

Nelle seguenti figure è possibile osservare come la lamiera si deforma progressivamente con l'avanzare degli utensili nel tempo.

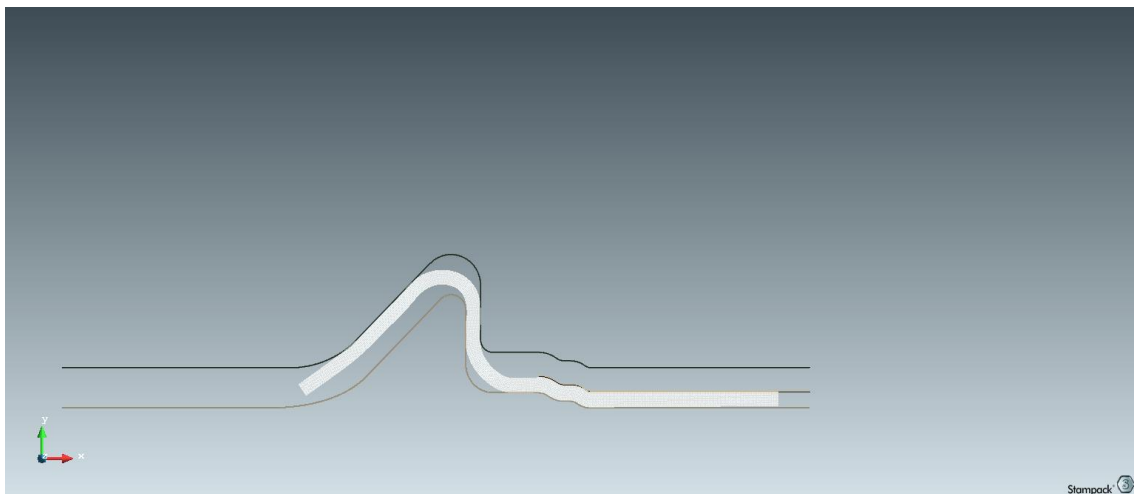
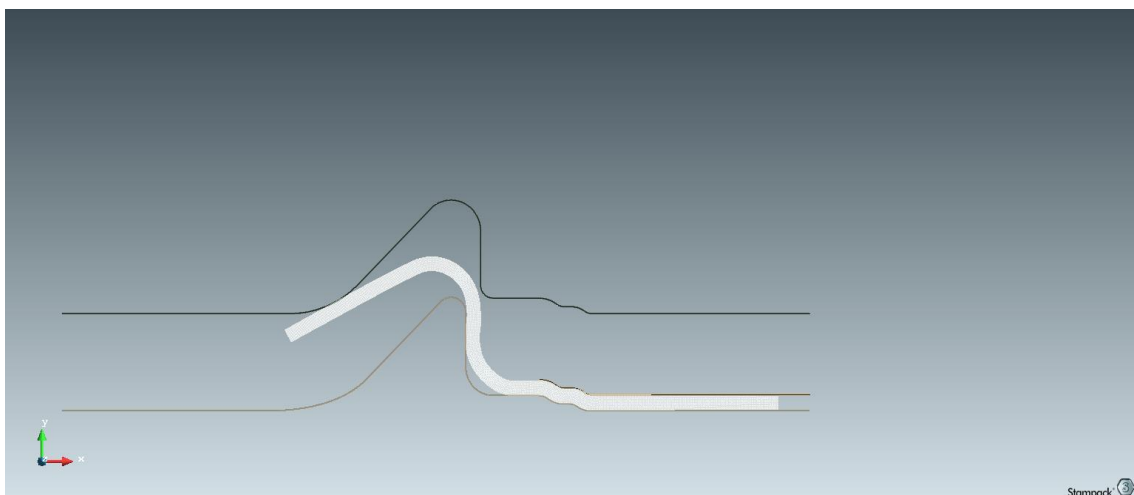
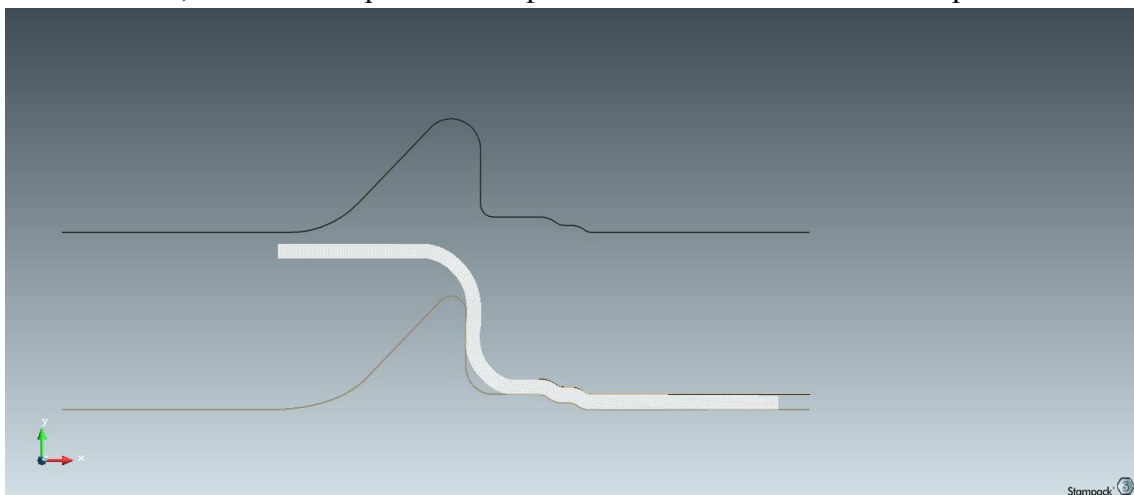


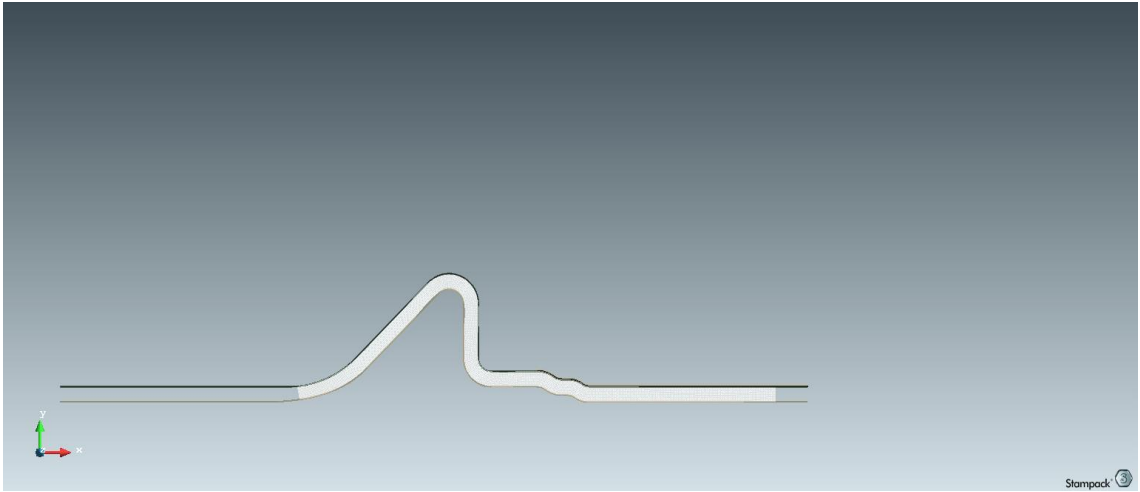


Come osservabile nelle successive operazioni, i raggi di curvatura del prelamiera e della matrice di questo step sono maggiori rispetto alla forma finale così da rendere meno brusca la deformazione del laminato, evitando quindi di incorrere in eccessivi assottigliamenti o rottura del pezzo.

2^a operazione

Nella seconda operazione abbiamo iniziato a dare forma alla parte interna, effettuando una piegatura a 45°. A differenza della precedente operazione il prelamiera agisce sulla matrice inferiore, mantenendo il laminato in posizione durante il processo di deformazione, mentre nella precedente operazione si muoveva insieme al punzone.

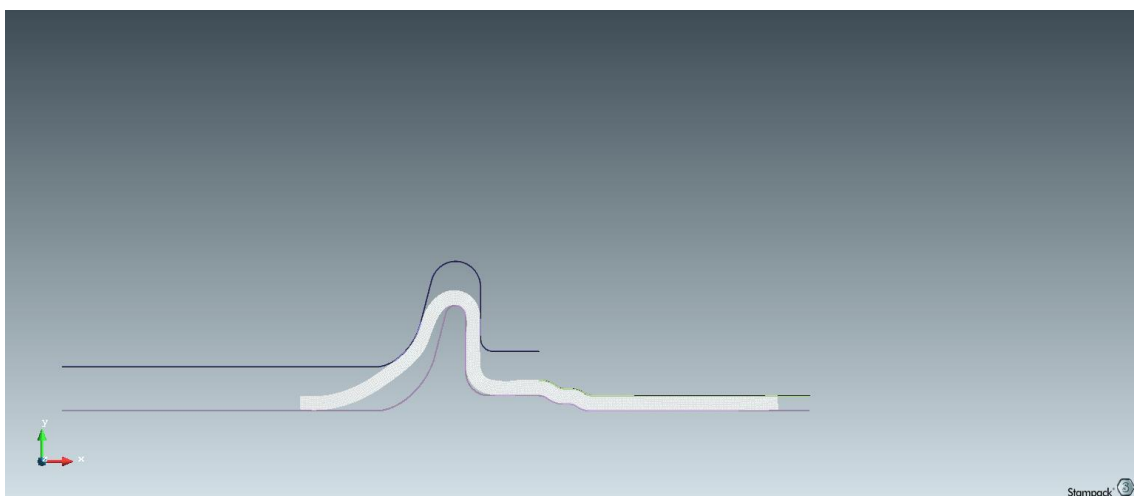
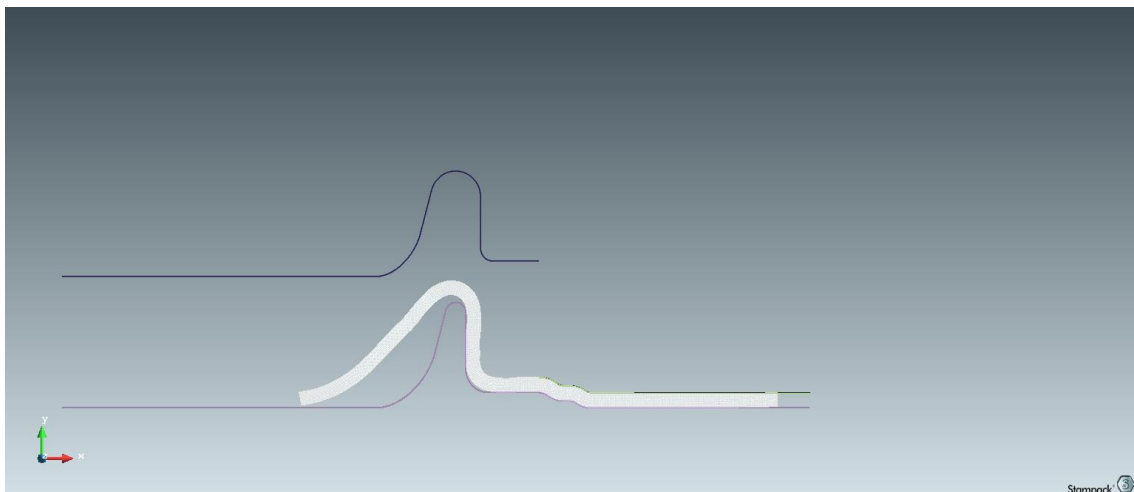


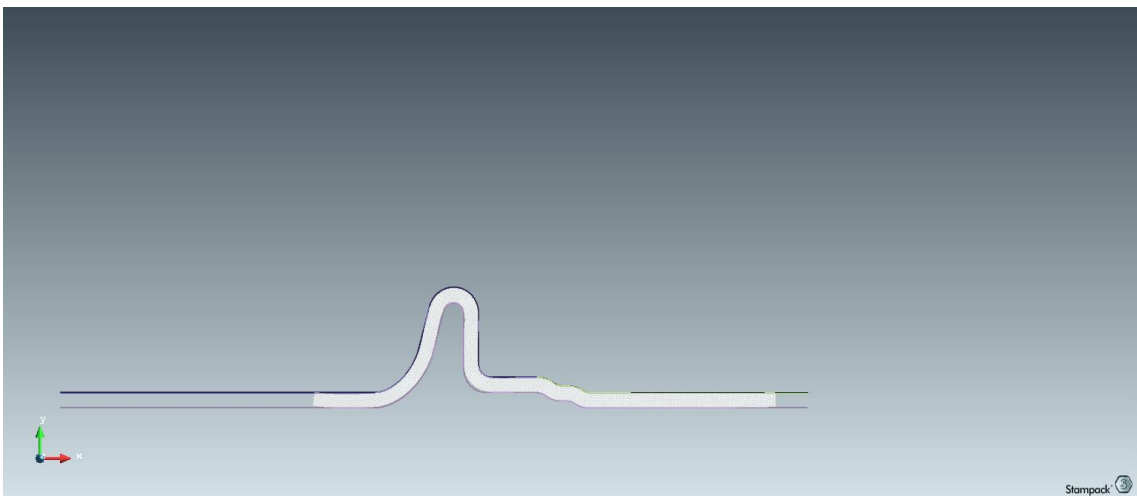
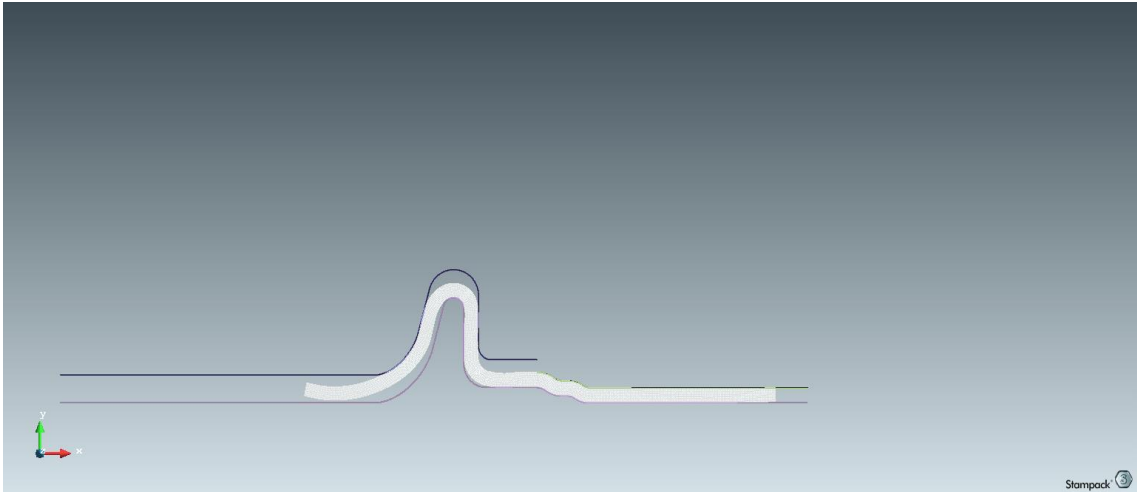


3^a operazione

Inizialmente il processo di formatura era stato pensato in quattro passaggi, passando dalla seconda operazione alla quarta, piegando quindi il dorso interno in soli tre passaggi. Purtroppo, così facendo il pezzo andava in contro a facile rottura e ad una sollecitazione troppo elevata, rendendo indispensabile un ulteriore passaggio intermedio.

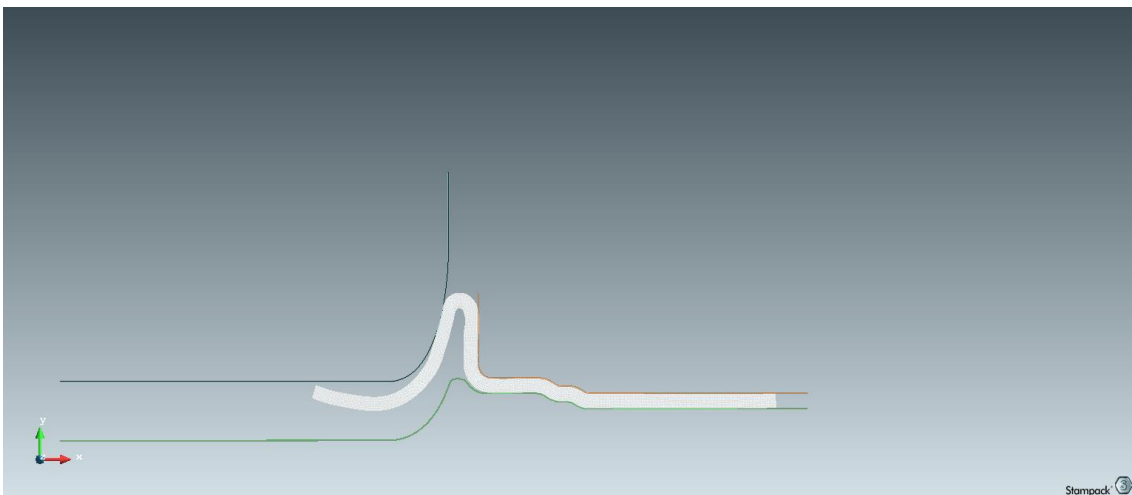
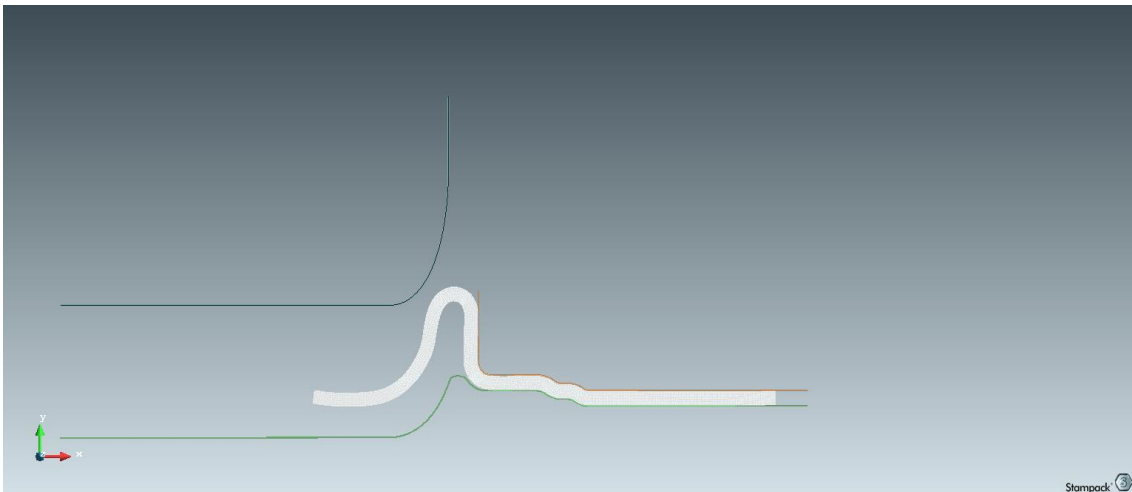
In questa terza fase si effettua una piegatura fino ad un angolo di 15° come osservabile in figura.

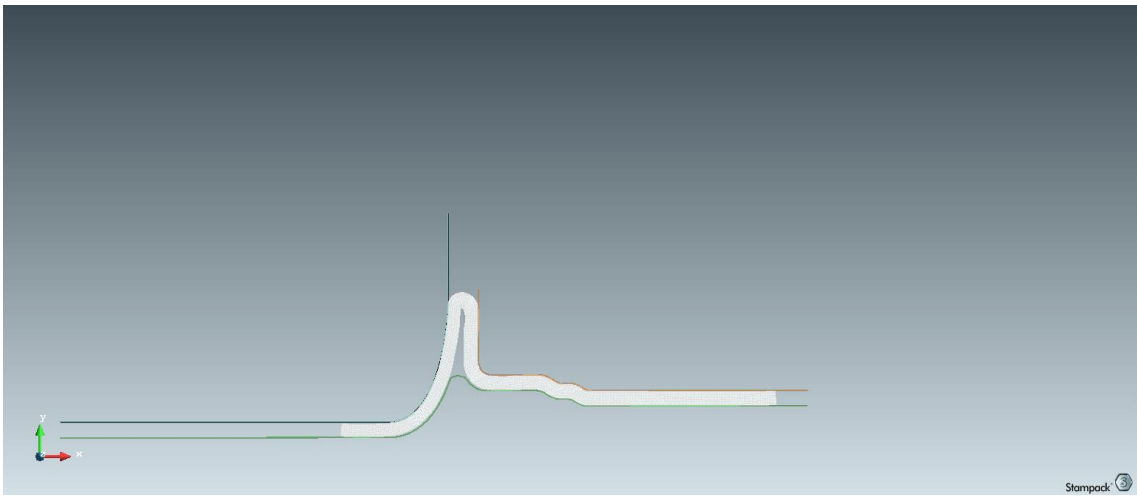
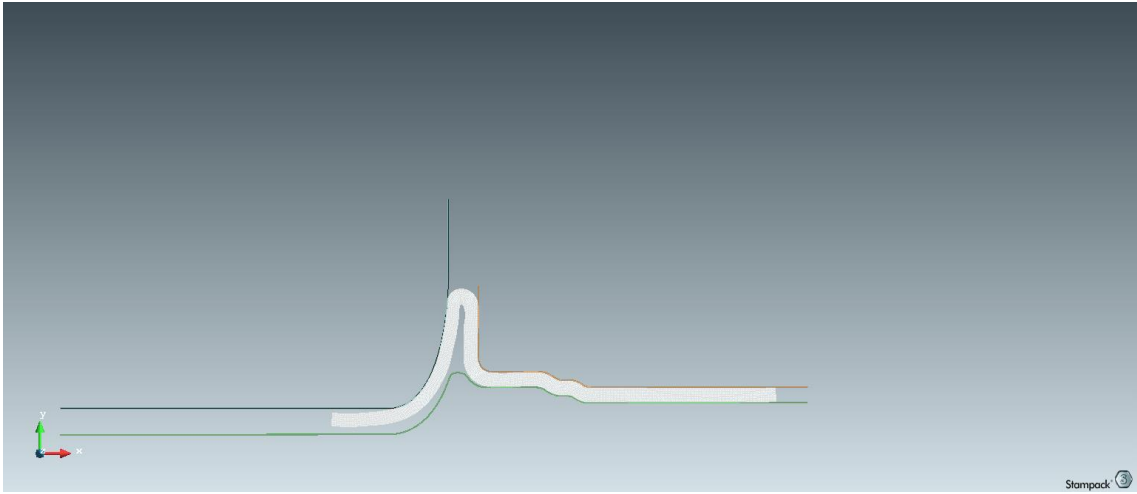




4^a operazione

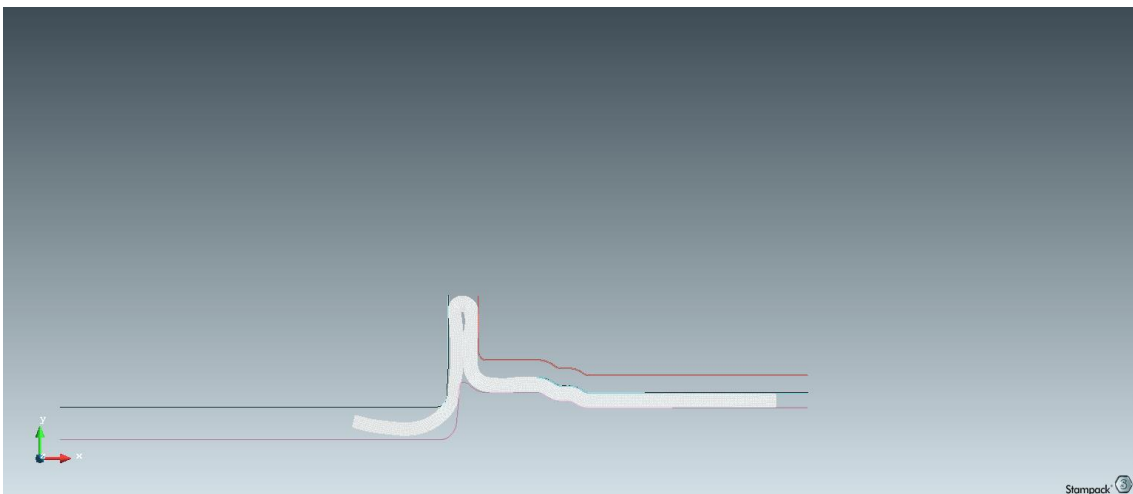
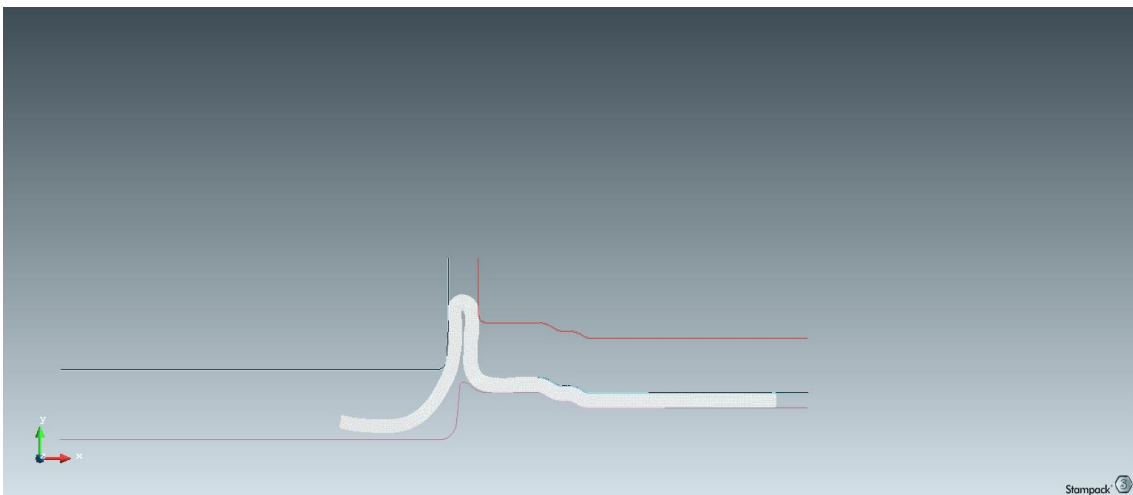
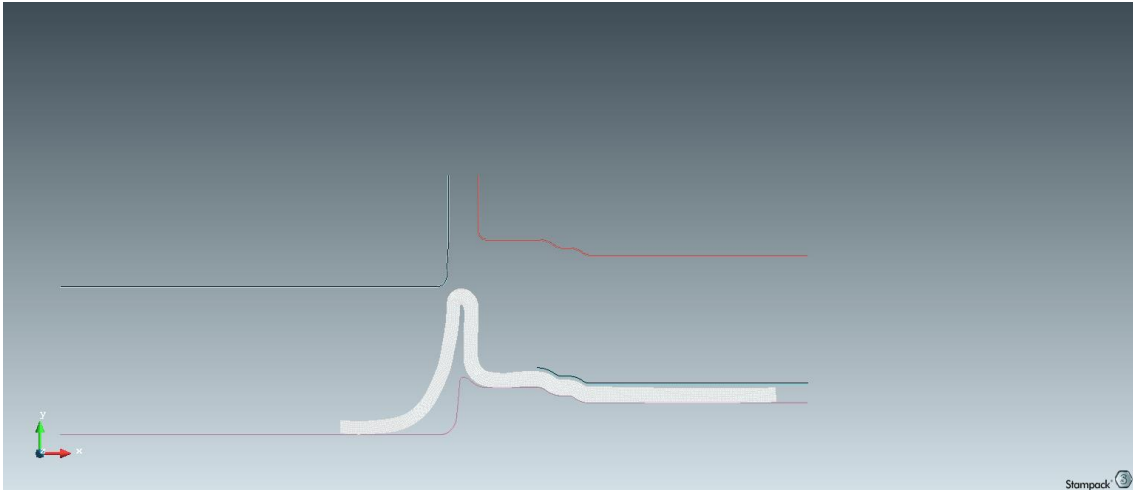
In quest'ultimo passaggio abbiamo riscontrato il passaggio più difficile, in quanto la piegatura avviene con il progressivo scorrimento del punzone sulla lamina fino al contatto con la matrice. Durante la fase di sviluppo spesso si è andati in contro a deformazioni inaspettate o errori da parte del programma di simulazione, in parte era dovuto al fatto che nel processo di deformazione, il punzone sviluppava la sua corsa in tempi molto minori rispetto ad una reale deformazione, simulando lo spostamento con velocità elevate. Inoltre, spesso i nodi delle mesh della lamiera andavano ad intersecarsi con le mesh dell'utensile creando risultati non attendibili. Modificando ed effettuando prove siamo giunti alle forme rappresentate in figura ottenendo un discreto risultato finale.

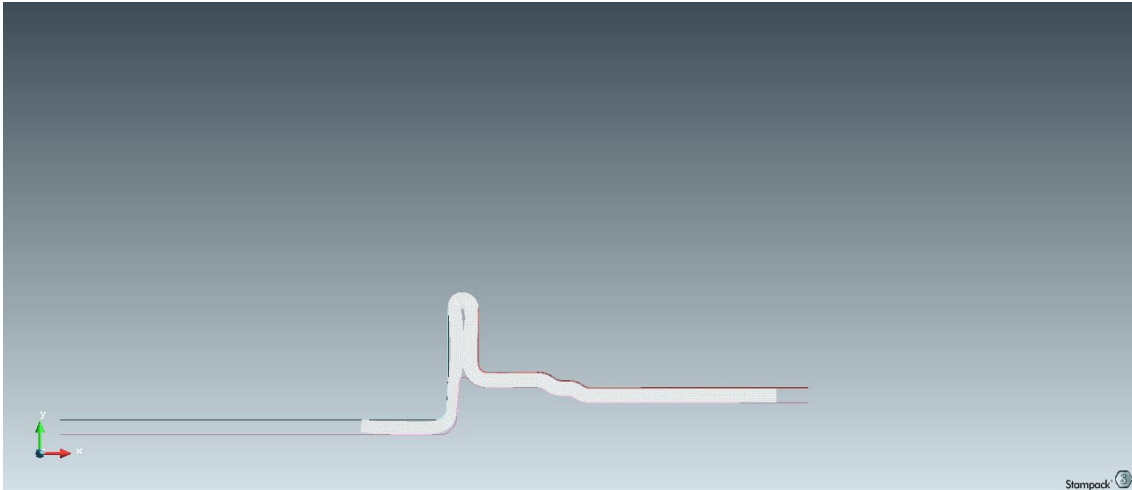




5^a operazione

In quest'ultimo passaggio la lamiera assume la forma finale desiderata, in particolare, abbiamo un punzone diviso in due parti ed un prelamiera. Il punzone diviso eviterà che nella fase di compressione il pezzo vada ad incastrarsi tra i due lembi, sfavorendone quindi l'estrazione.





In conclusione, dopo una fase di ottimizzazione della forma che il pezzo assume durante la deformazione, abbiamo ottenuto un risultato accettabile. Con quest'ultimo passaggio è stato possibile ridimensionare la lamiera iniziale riducendo il materiale che successivamente dovrà essere rimosso per tranciatura.

10.4 Sviluppo utensili in 3D

Una volta ottenuti i profili in 2D degli utensili, tramite rivoluzione intorno all'asse centrale è stato possibile ottenere gli utensili in 3D, ai quali andranno aggiunte le bugne, modellate in riferimento al progetto mandato dal cliente, modificando per necessità i raggi di raccordo tenendo conto della relazione

$$r_{est} = r_{int} + s$$

Con:

r_{est} = raggio esterno di curvatura

r_{int} = raggio interno di curvatura

S = spessore della lamiera

Ad ogni operazione di deformazione è seguita un'analisi dei grafici finali ottenuti per verificare che il pezzo non andasse in contro ad eccessivi ispessimenti, assottigliamenti o rottura.

1^a operazione

Partendo dagli utensili in 2D, abbiamo sviluppato gli utensili in 3D effettuando una rotazione sull'asse centrale ed aggiungendo le bugne. Nelle figure accanto sono visualizzabili premiamiera (rosso), punzone (giallo) e matrice (verde) prima e dopo l'importazione in stampack. Il file viene importato nel programma di simulazione tramite STL (stereo Lithography interface format), un formato che discretizza la superficie in triangoli, attribuendo ad ogni vertice dei triangoli delle coordinate X, Y, Z. Questo formato ha come vantaggio la facilità di generazione e processazione, mentre a suo sfavore presenta una geometria approssimata.

Con la prima operazione la lamiera assume una forma molto grossolana della bugna e del pezzo finale, pronto per essere deformato ulteriormente dalle successive operazioni riducendo il rischio di rottura.

Il premiamiera si muove solidale con il punzone superiore fino al raggiungimento della matrice inferiore, iniziando il processo di formatura.

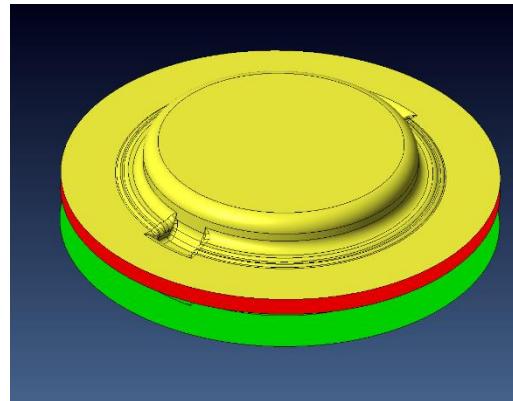


Figura 46: Immagine degli utensili 3D sviluppati su VISI

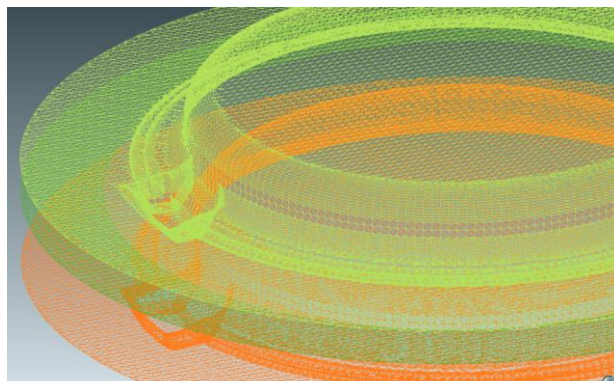


Figura 47: Strumenti della prima operazione importati su Stampack

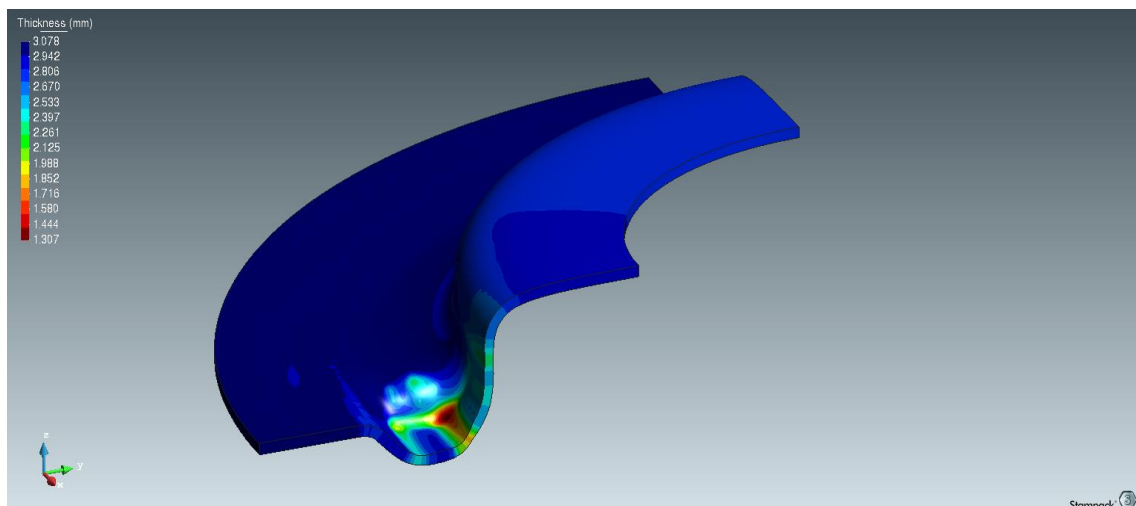
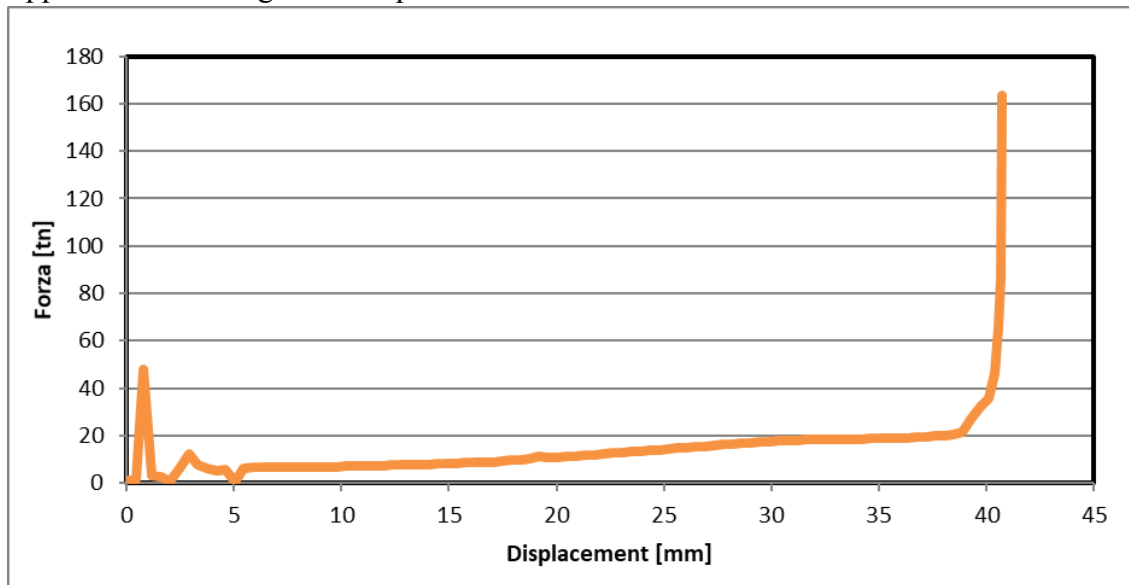


Figura 48: Analisi dello spessore del pezzo ottenuto dalla prima operazione

Nel precedente grafico è possibile vedere quali zone sono le più sollecitate dalla deformazione, il colore rosso denota un punto in cui lo spessore della lamiera raggiunge valori prossimi alla rottura.

Con la funzione detailed history output si possono estrapolare i dati della deformazione e rappresentarli in un grafico displacement – forza.



Dalla curva si può notare come le forze necessarie per svolgere la prima operazione raggiungano valori più che accettabili, circa 160 tn.

In appendice è possibile visualizzare ulteriori immagini e grafici di questa operazione.

2^a operazione

In questa fase del processo si inizia la piegatura della parte interna del dorso e si inizia a definire la forma delle bugne. In questo caso il laminato è bocciato da due premilamiera poiché impiegandone uno solo si avrebbe il pezzo instabile e privo di un saldo punto di appoggio che lo tenga in posizione.

La deformazione avviene solamente nell'ultima parte dello spostamento del punzone, ossia quando sia la matrice che il punzone vengono a contatto con la lamiera come visualizzabile dal grafico sottostante.

La forza viene esercitata solamente negli ultimi 5mm di spostamento del punzone, raggiungendo valori di quasi 350 tn.

L'aumento finale di forza è estremamente ripido ed è causato da un ispessimento della lamiera all'interno della bugna, portando il punzone a

comprimere discrete quantità di materiale fino a fine corsa. Questo fenomeno è stato previsto e voluto in quanto necessario per permettere al laminato di aderire a pieno sulla matrice.

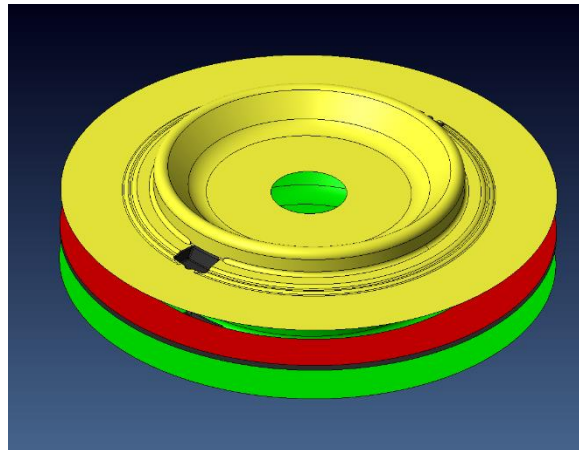


Figura 49: Utensili della seconda operazione sviluppati su VISI

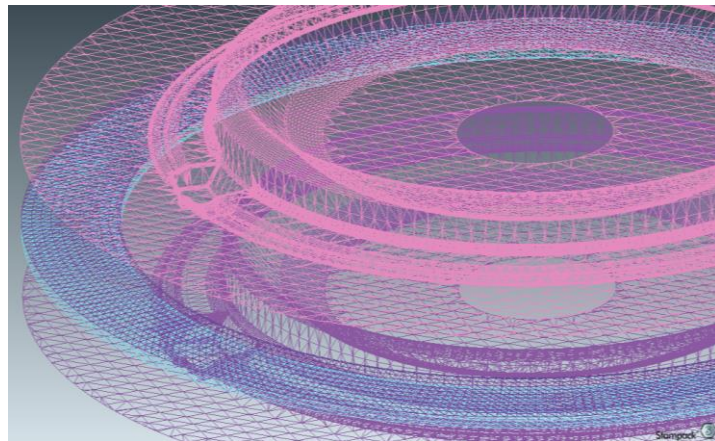


Figura 50: Utensili della seconda operazione importati su Stampack

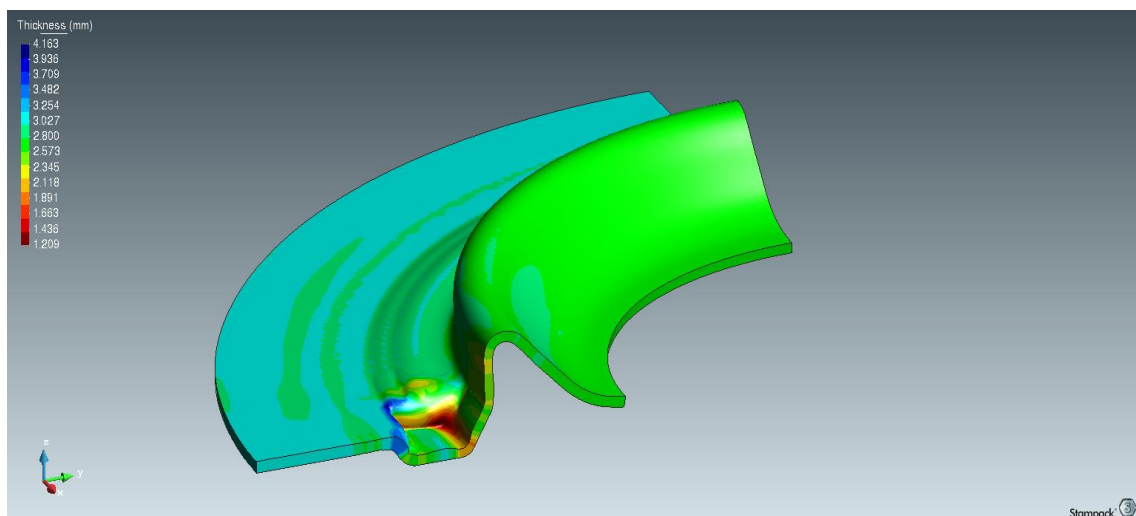
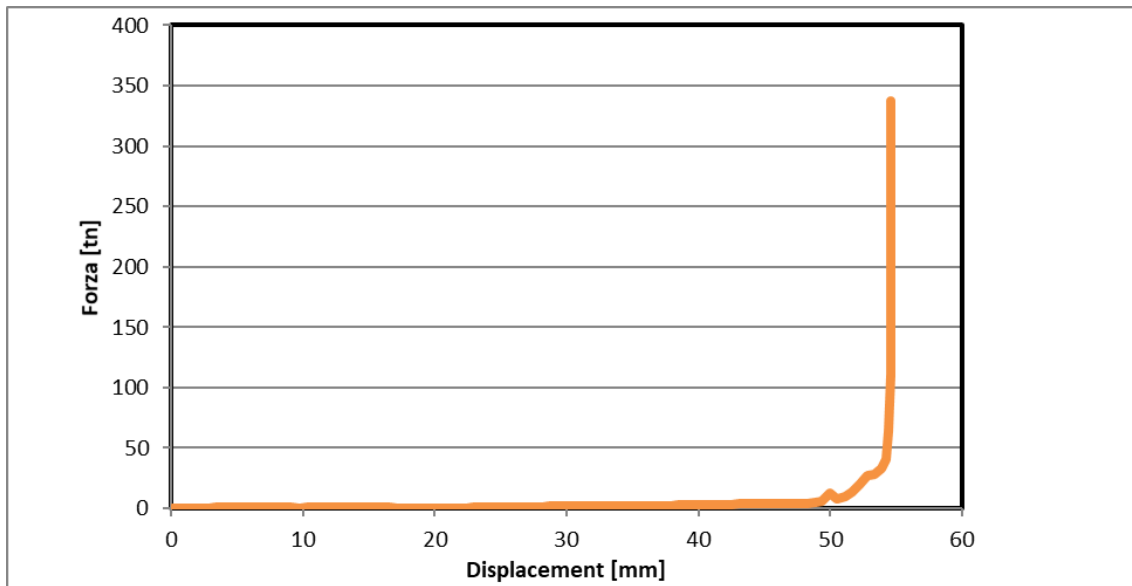


Figura 51: Analisi degli spessori del risultato della seconda operazione



Confrontando i grafici degli spessori dell'operazione 1 e 2 è possibile vedere come la bugna si presenta decisamente più definita e come il laminato raggiunga uno spessore più uniforme.

Il vertice superiore del dorso in seguito a questa prima piegatura non mostra segni di eccessivo assottigliamento o problemi.

In appendice è possibile visualizzare ulteriori immagini e grafici di questa operazione.

3^a operazione

In questa operazione il prelamiera mantiene fermo il pezzo sulla matrice inferiore affinché il laminato subisca una deformazione interna continua ed uniforme, portando l'angolo di piegatura del dorso interno a 45°. Le bugne non sono state inserite in quanto in questo passaggio non è prevista una loro ulteriore formatura.

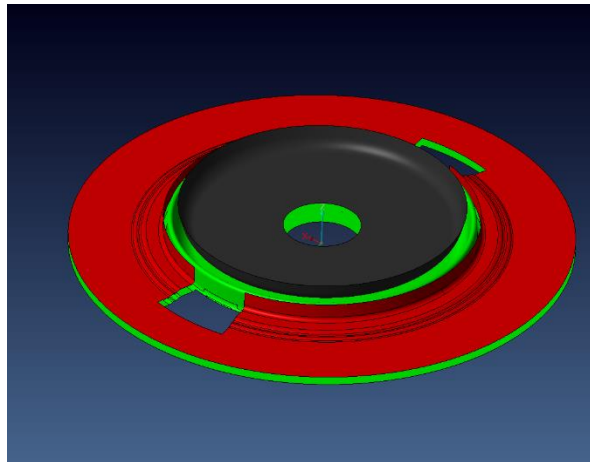


Figura 52: Utensili della terza operazione sviluppata su VISI

Il grafico forza – spostamento in questo caso mostra che nei primi millimetri di spostamento non si ha esercizio di forze, ciò è dovuto al fatto che il punzone inizialmente non è a contatto con la lamiera per poi esercitare una pressione continua e graduale.

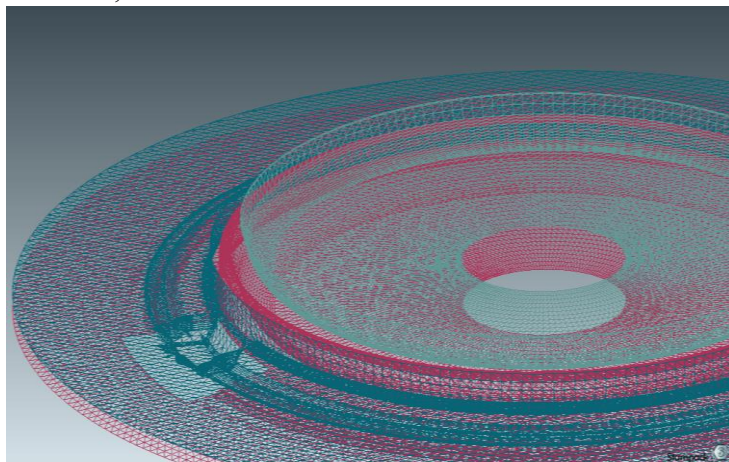
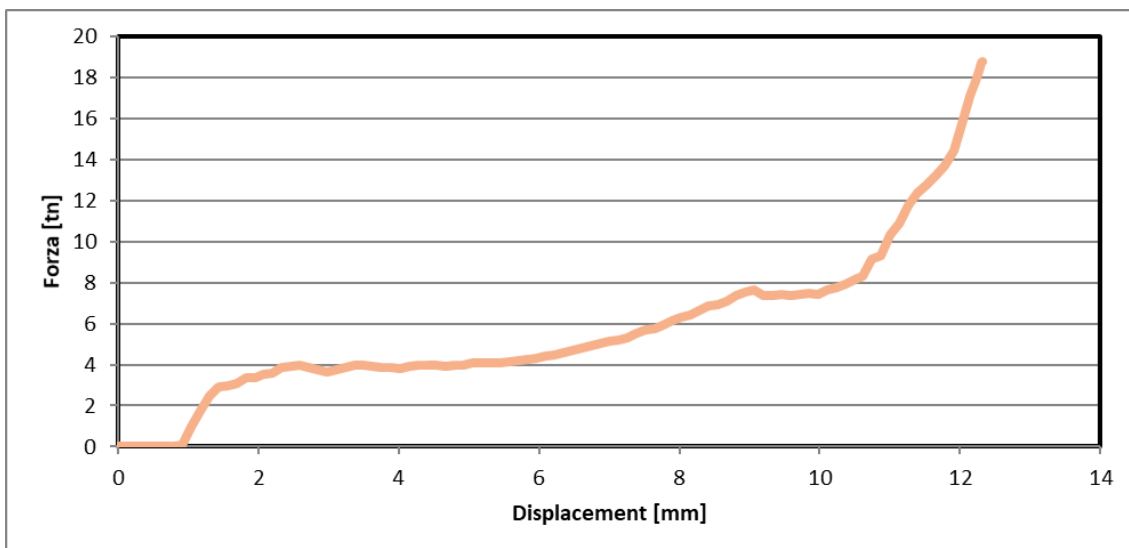


Figura 53: Utensili della terza operazione sviluppata su VISI

È facilmente osservabile che le forze necessarie in questa fase sono sensibilmente minori delle fasi precedenti dovuto al fatto che la deformazione è puramente una piegatura e senza zone di compressione del materiale.



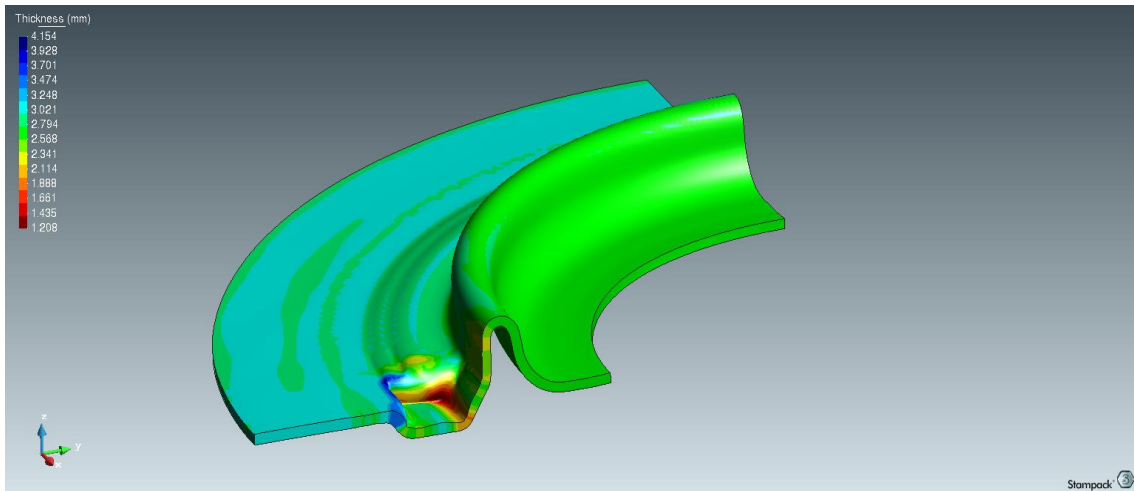


Figura 54: Analisi degli spessori del risultato della terza operazione

In appendice è possibile visualizzare ulteriori immagini e grafici di questa operazione.

4^a operazione

in questo step la lamiera interna subisce una forte deformazione osservabile con chiarezza nel grafico Thickness. La bugna viene ulteriormente deformata, andando a riempire completamente la forma della matrice. Il premilamiera è necessario per mantenere la lamiera bloccata sulla matrice, in quanto se ommesso durante la deformazione si potrebbe andare incontro al sollevamento del laminato e nel peggiore dei casi, all'incastro del pezzo sul punzone.

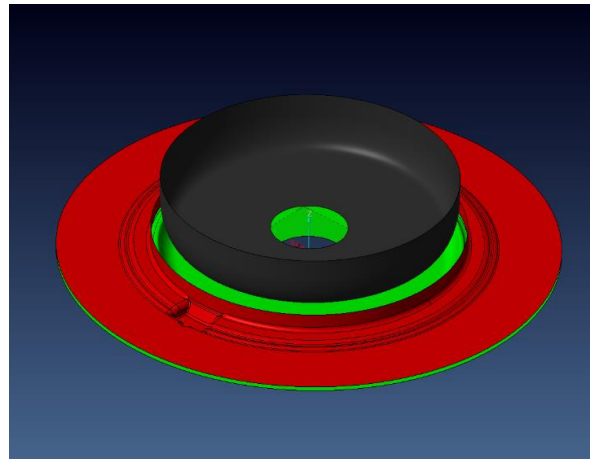


Figura 55: Utensili della quarta operazione sviluppati su VISI

Nel grafico forza spostamento si può osservare come nel caso precedente che si ha un primo spostamento fino al contatto del punzone con il laminato, poi si ha un incremento di carico durante la piegatura del bordo interno e un ulteriore carico una volta che la lamiera arriva a contatto con la matrice inferiore.

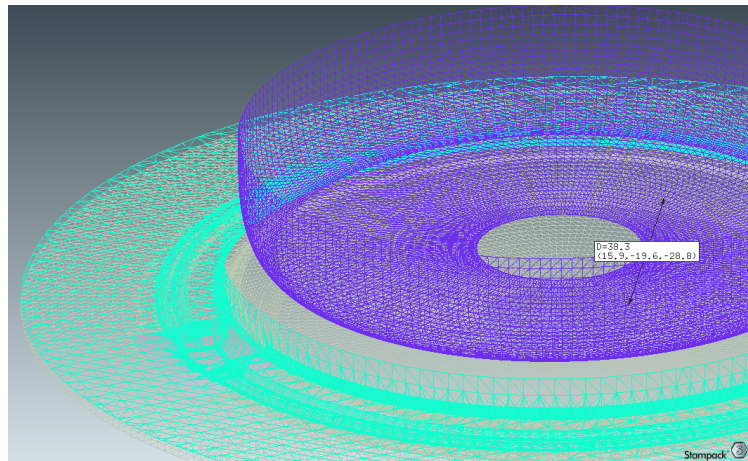


Figura 56: Utensili della quarta operazione sviluppati su Stampack

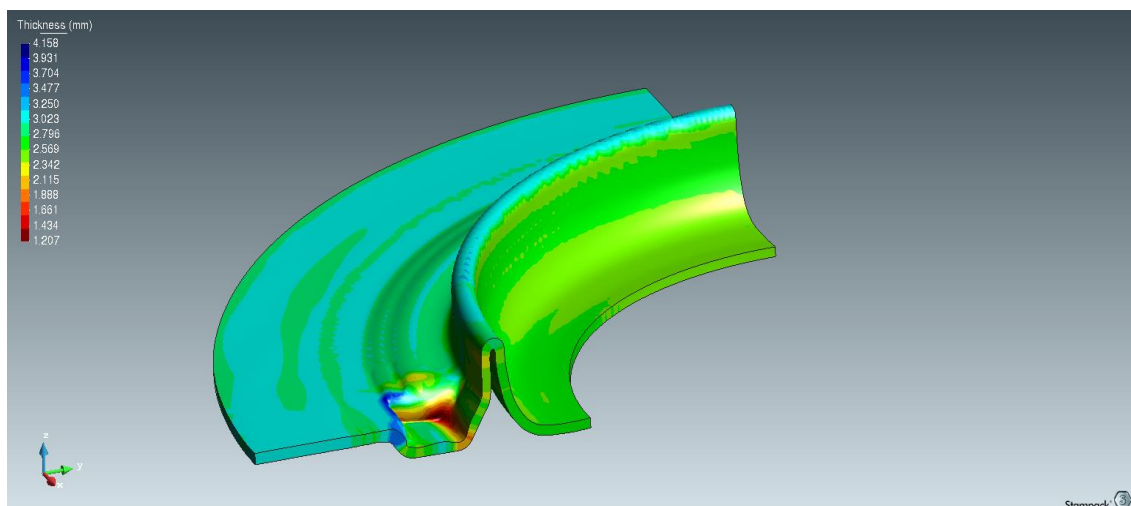
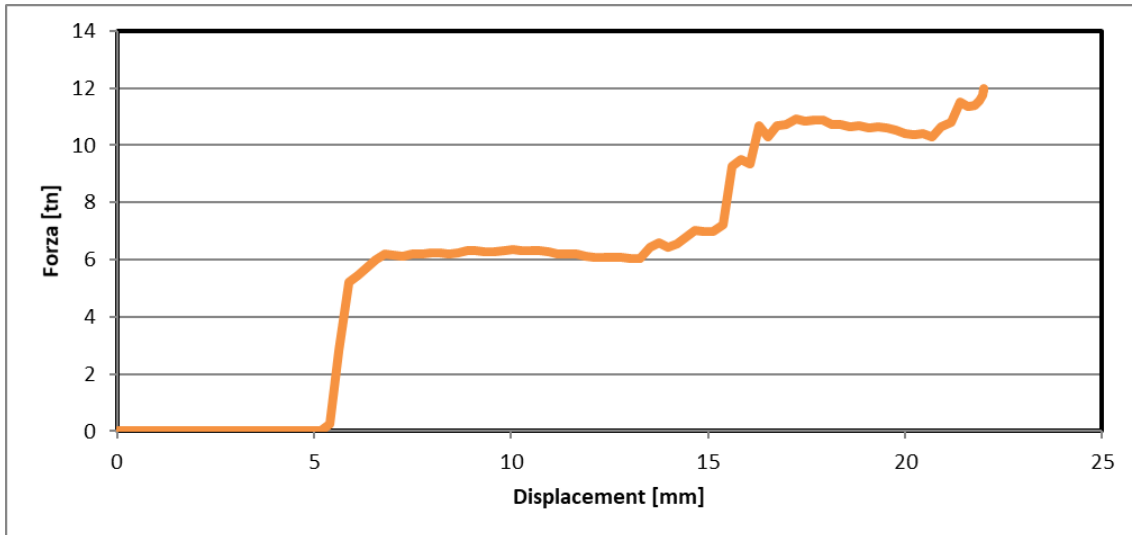


Figura 57: Analisi degli spessori del risultato ottenuto dalla quarta operazione

In questo caso sul dorso si può osservare una variazione di spessore ed inoltre sono visibili delle “creste” sulla parte superiore dovute ad un modello del pezzo con una mesh troppo grossolana e che quindi non riesce ad approssimare bene il bordo. Una soluzione a questo problema sarebbe effettuare simulazioni con una mesh più fine ma ciò non è stato possibile a causa di tempistiche disponibili.



In appendice è possibile visualizzare ulteriori immagini e grafici di questa operazione.

5^a operazione

In quest'ultima operazione il pezzo subisce l'ultima deformazione giungendo quindi alla forma finale (escludendo piegatura e tranciatura). Il prelamiera ferma il pezzo sulla matrice, il punzone invece è diviso in due parti per evitare che durante il processo il laminato vada ad incastrarsi sullo stesso a seguito di eventuali espansioni dovute alle compressioni del materiale del dorso sulla parte inferiore.

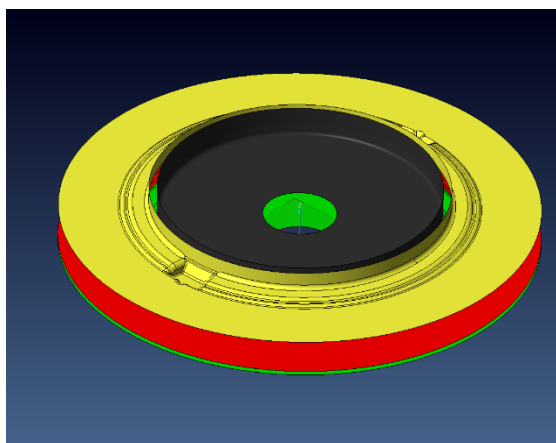


Figura 58: Utensili della quinta operazione sviluppati su VISI

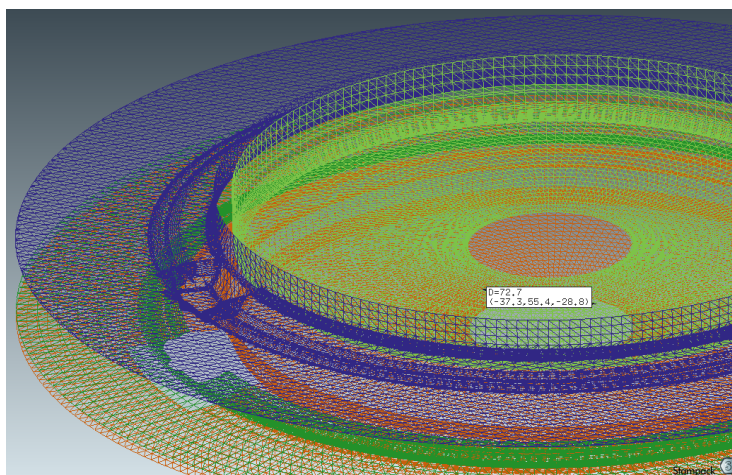
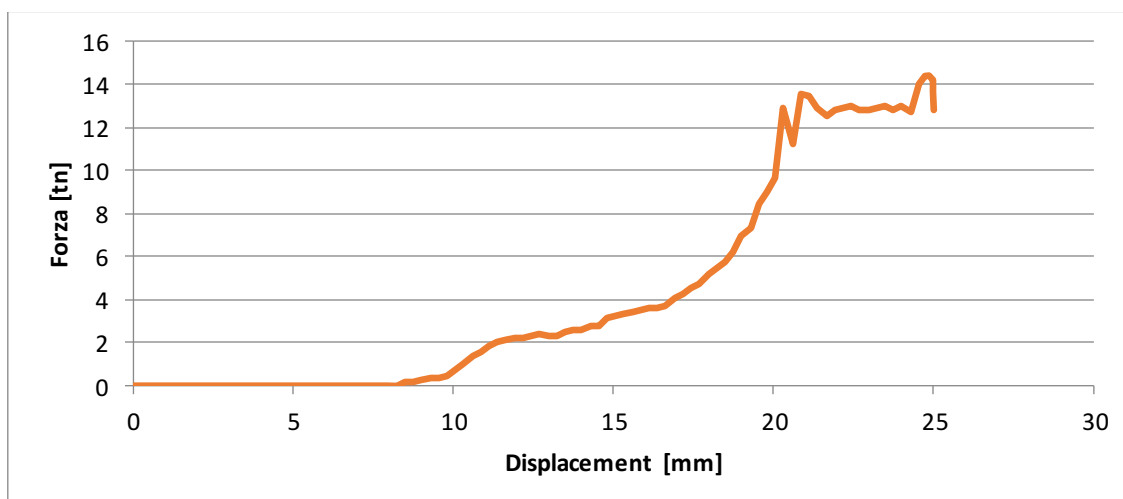


Figura 59: Utensili della quinta operazione importati su Stampack



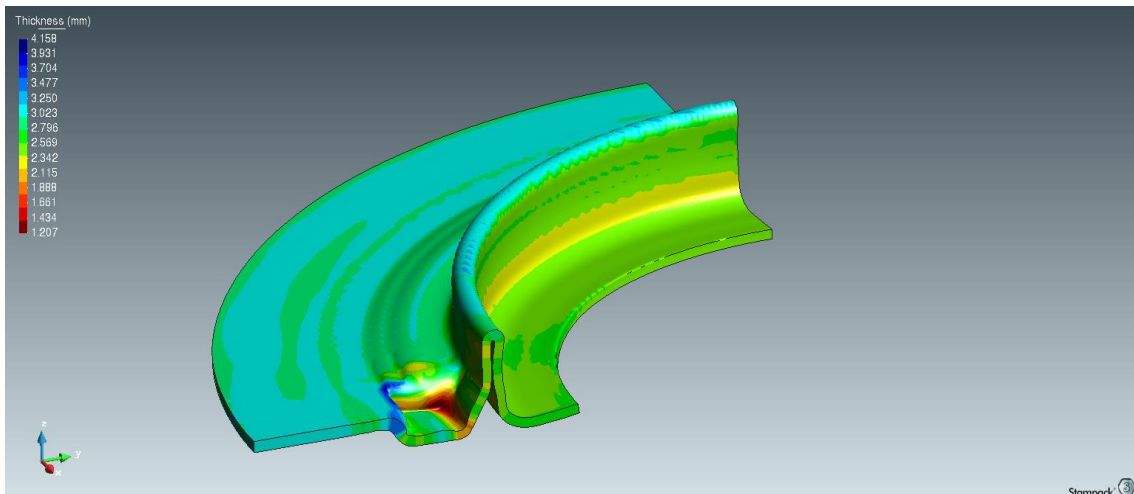


Figura 60: Analisi degli spessori del risultato della quinta operazione

Concludendo l'analisi di deformazione e verificando che la simulazione andasse a buon fine, abbiamo svolto un ulteriore ciclo di simulazione con una mesh di densità quadrupla nell'area circostante alla bugna e doppia nel resto della lamiera ottenendo il modello finale rappresentato nella figura seguente.

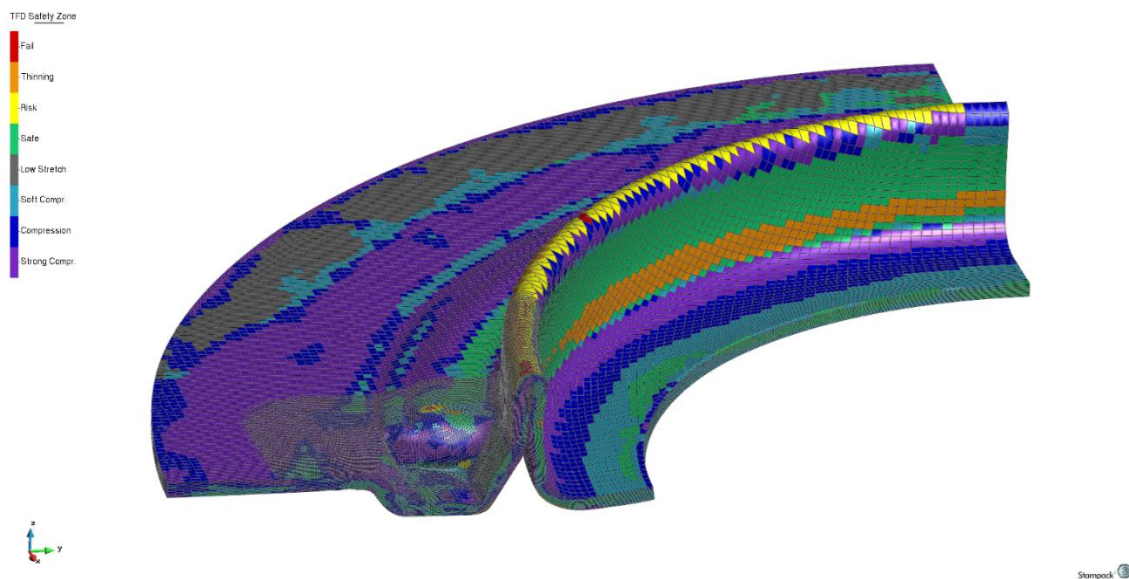


Figura 61: Analisi SZ della quinta operazione svolta con mesh a maggiore densità

In appendice è possibile visualizzare ulteriori immagini e grafici di questa operazione.

11 Analisi dei risultati

Per verificare che il modello finale fosse accettabile e conforme alla richiesta abbiamo calcolato e confrontato i momenti di inerzia di entrambi i pezzi utilizzando VISI.

Modellando il prototipo con la stampante 3D è stato possibile confrontare la forma del risultato ottenuto con quello richiesto dal cliente.

I risultati sono i seguenti:



Figura 62: Risultato ottenuto dalle cinque operazioni



Figura 63: Pezzo richiesto dal cliente

In figura è possibile notare fin da subito dove sono le principali differenze:

- Nella bugna abbiamo del materiale interno aggiuntivo a causa delle varie compressioni effettuate sul pezzo.
- Raggi di raccordo più ampi.
- Sul dorso abbiamo una piegatura minore mantenendo comunque le misure della zona tranciata inferiore.

- È presente uno spazio libero all'interno del dorso, inevitabile in quanto non è possibile piegare completamente la lamiera facendo toccare le due superfici senza andare incontro a gravi rischi di rottura del pezzo.



Figura 64: Vista inferiore del risultato ottenuto dalle operazioni



Figura 65: Vista inferiore del pezzo richiesto dal cliente

Per quanto riguarda la superficie inferiore del pezzo, non abbiamo riscontrato evidenti differenze tra i due modelli.

11.1 Conclusione

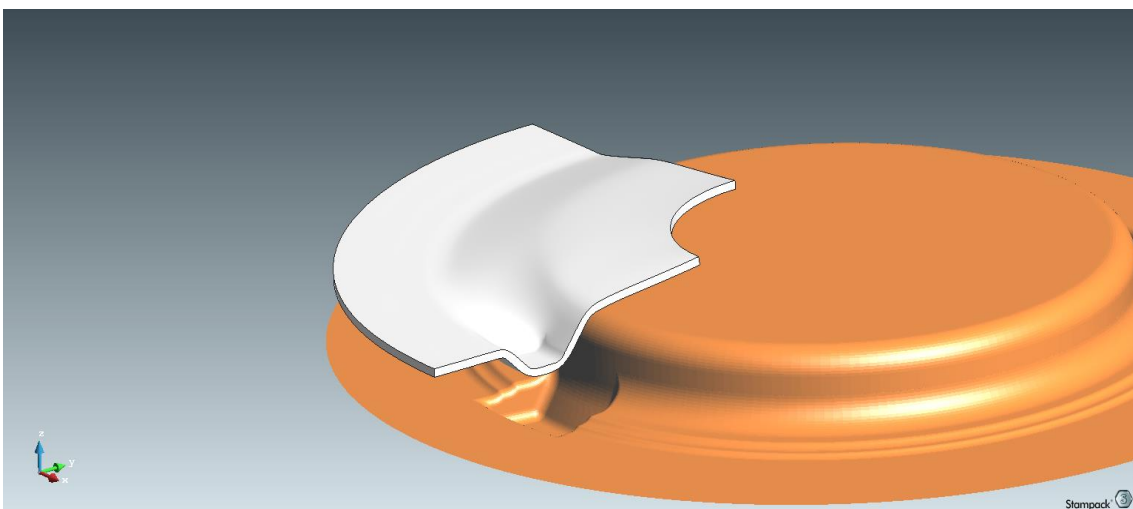
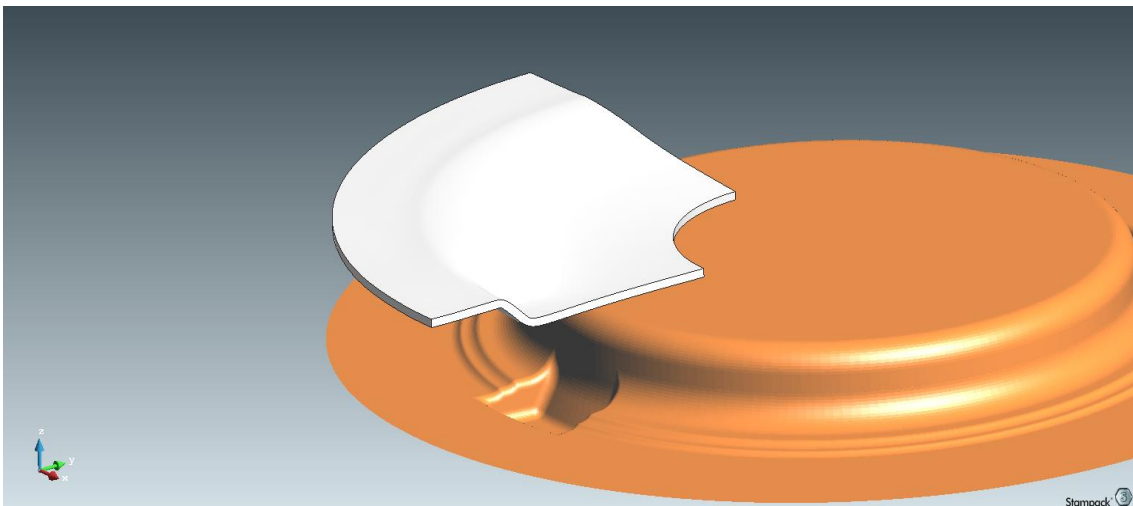
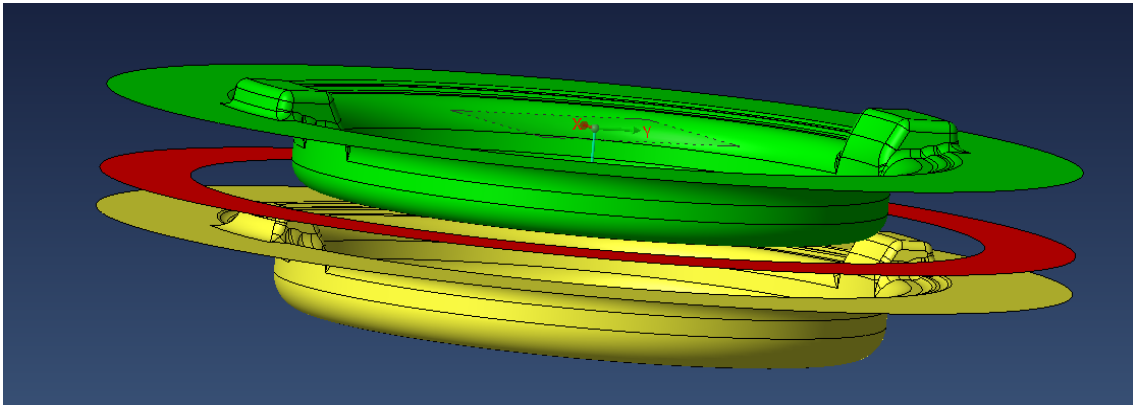
Il risultato finale è accettabile.

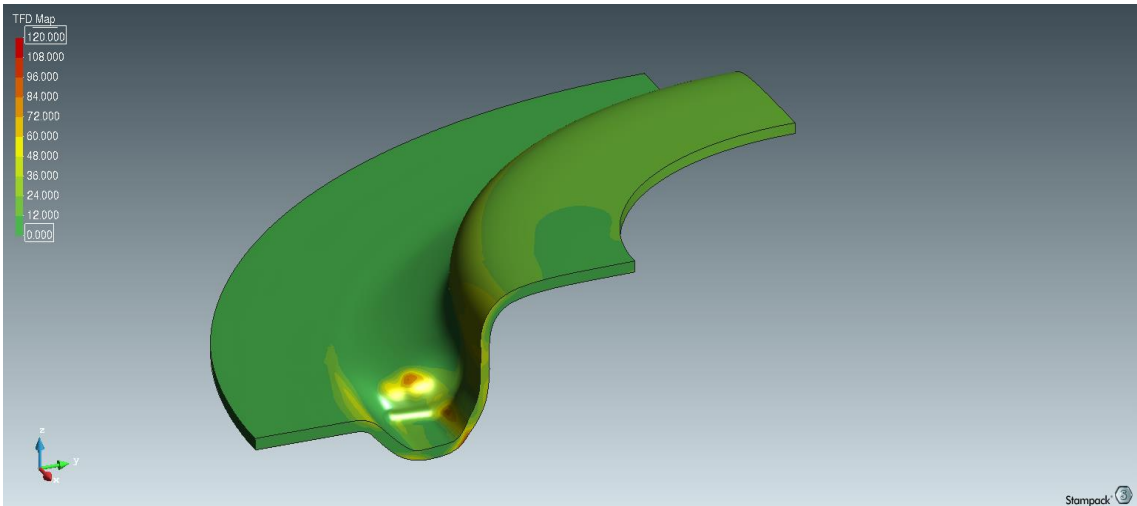
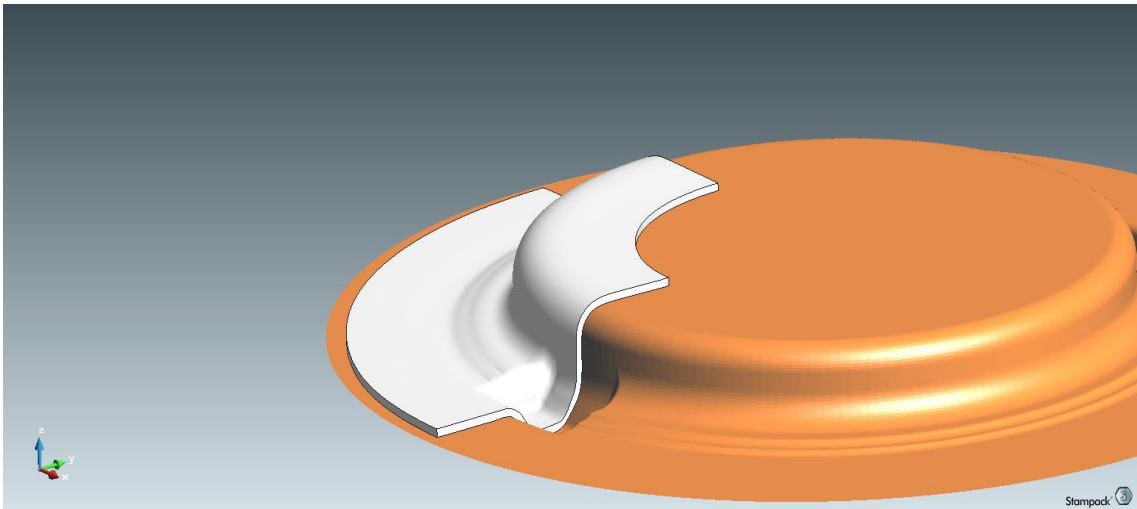
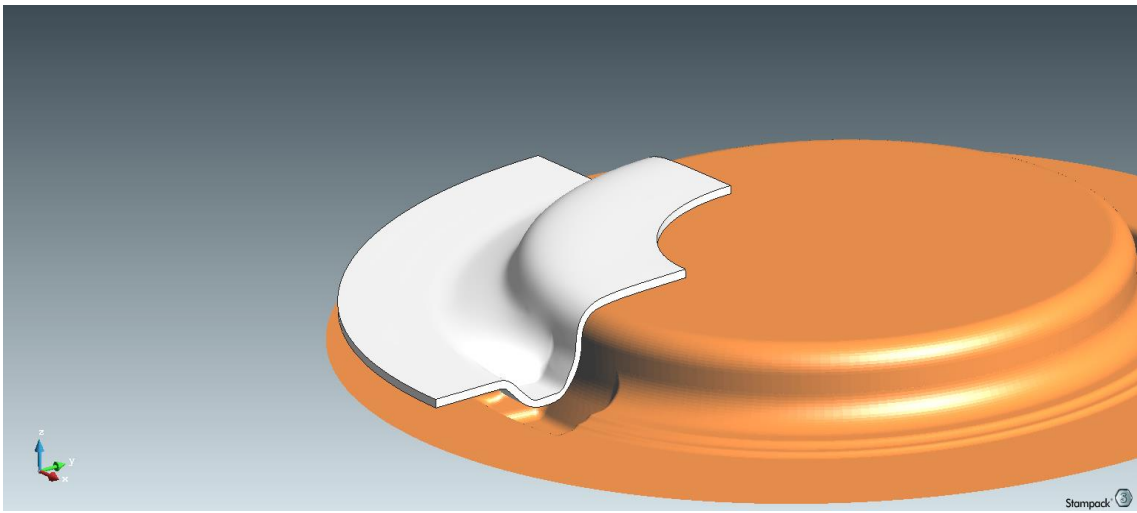
Avendo a disposizione ulteriore tempo si potrebbero ottenere risultati più ottimali e fedeli al pezzo richiesto. Ad esempio, ripetere le simulazioni con un grado di definizione maggiore e modellare ulteriormente gli stampi permetterebbe di ridurre la parte vuota all'interno del dorso e gli accumuli di materiale presenti nelle bugne.

Infine, una volta realizzato un prototipo di stampo è possibile vedere come effettivamente la lamiera viene deformata, permettendo di identificare altre ottimizzazioni possibili.

12 Appendice

12.1 Immagini e grafici relativi alla 1^a operazione





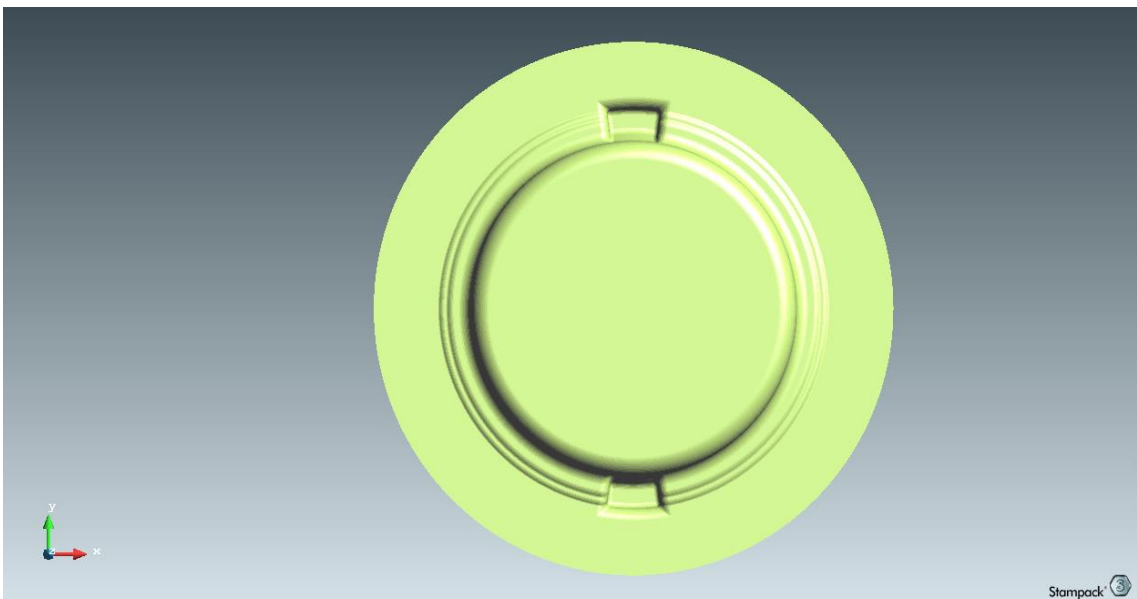
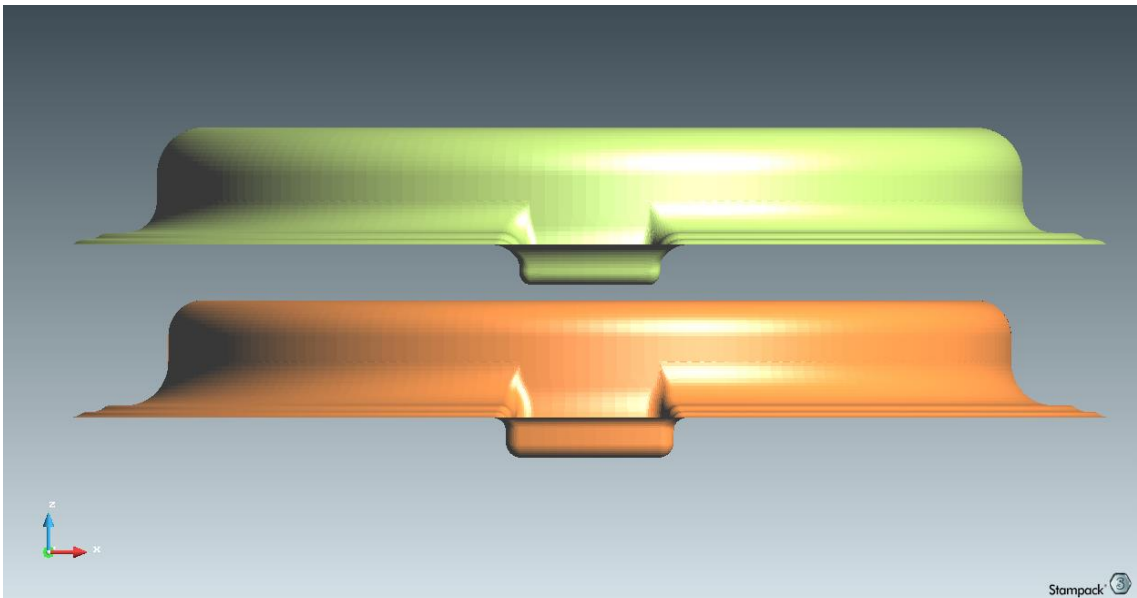
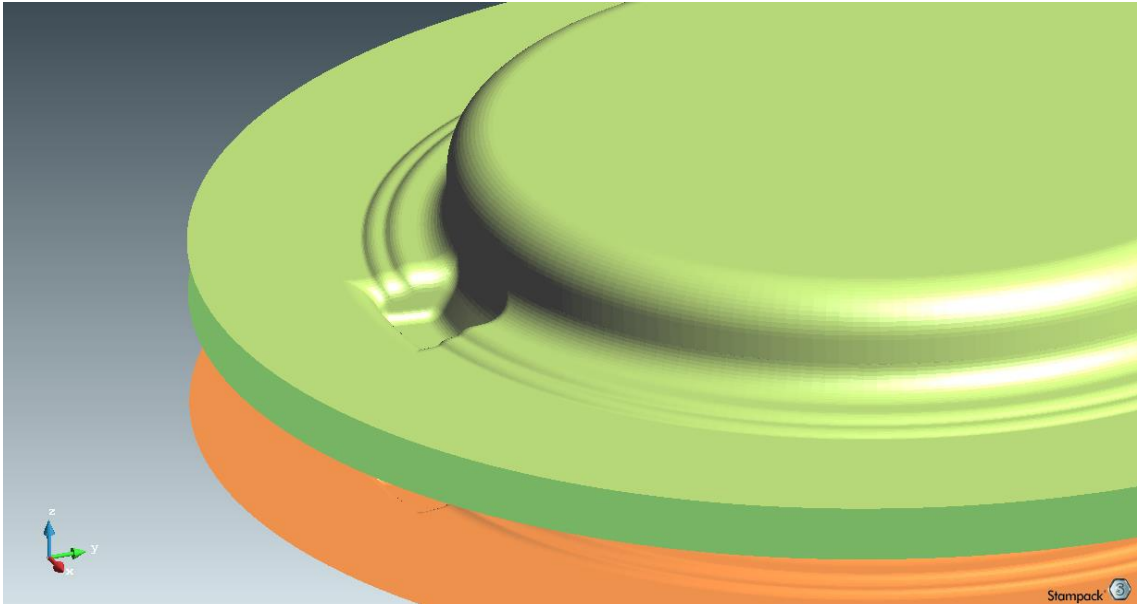
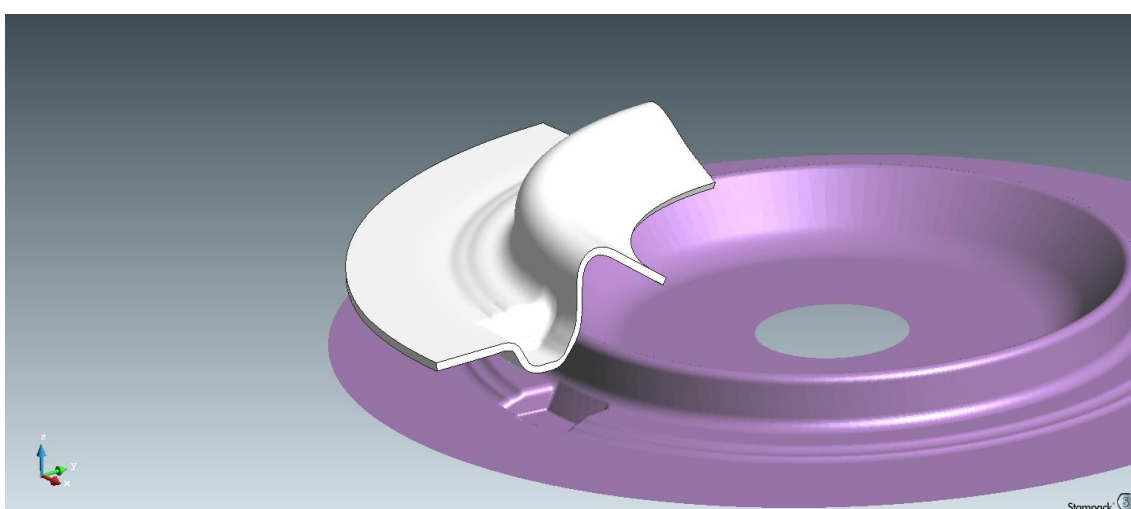
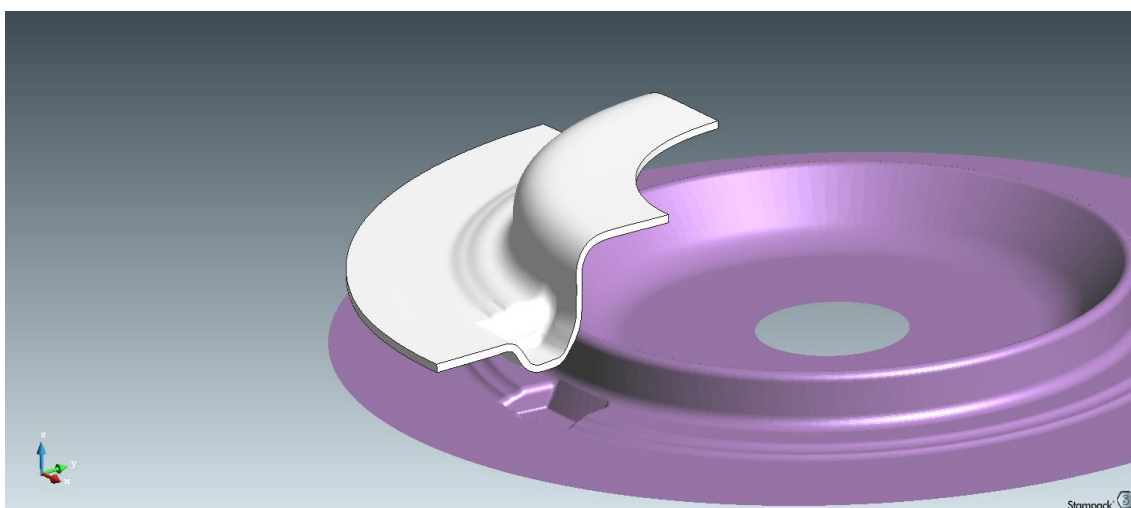
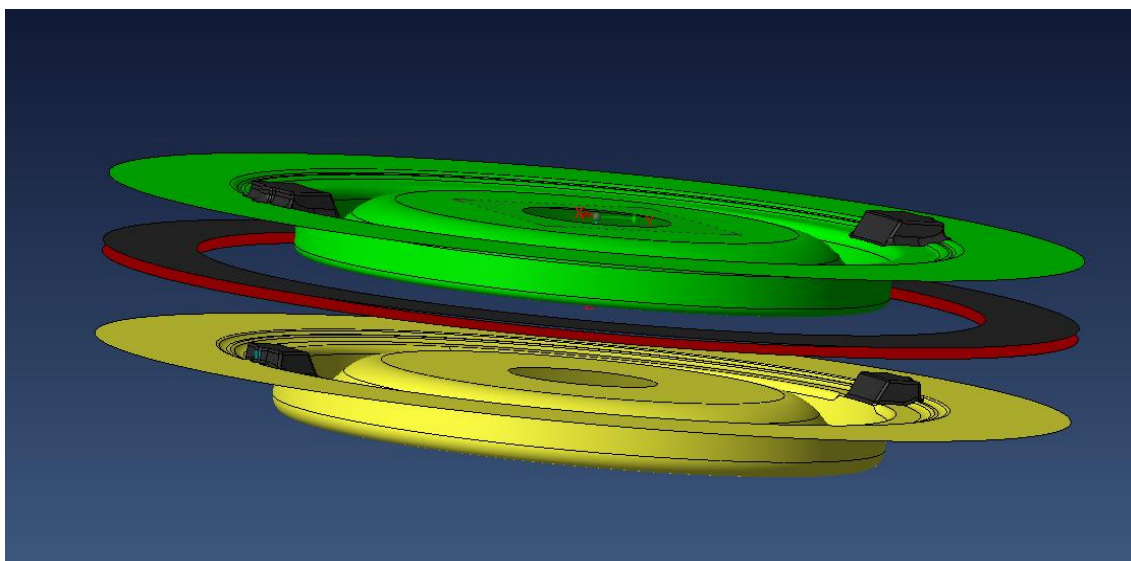


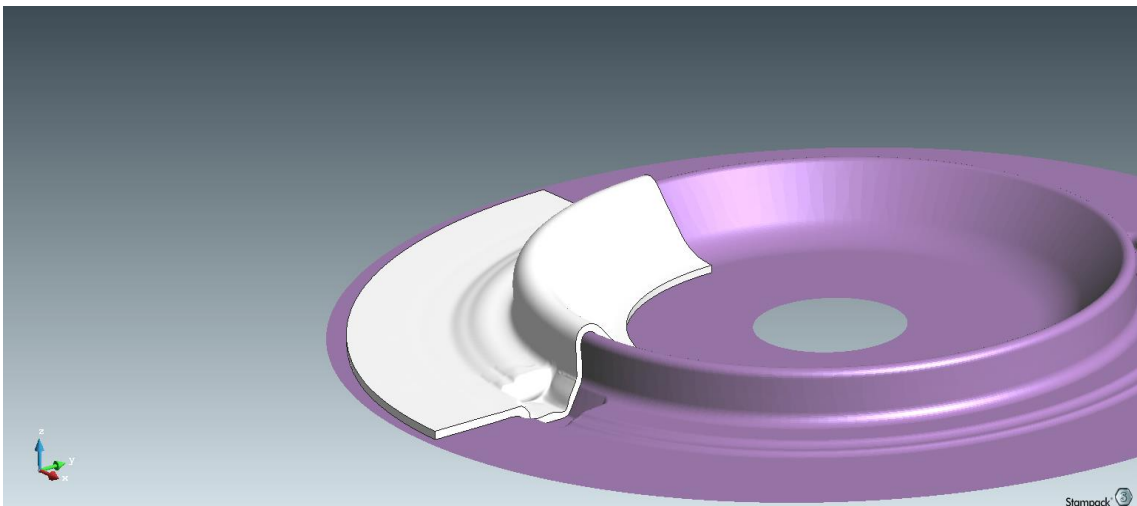
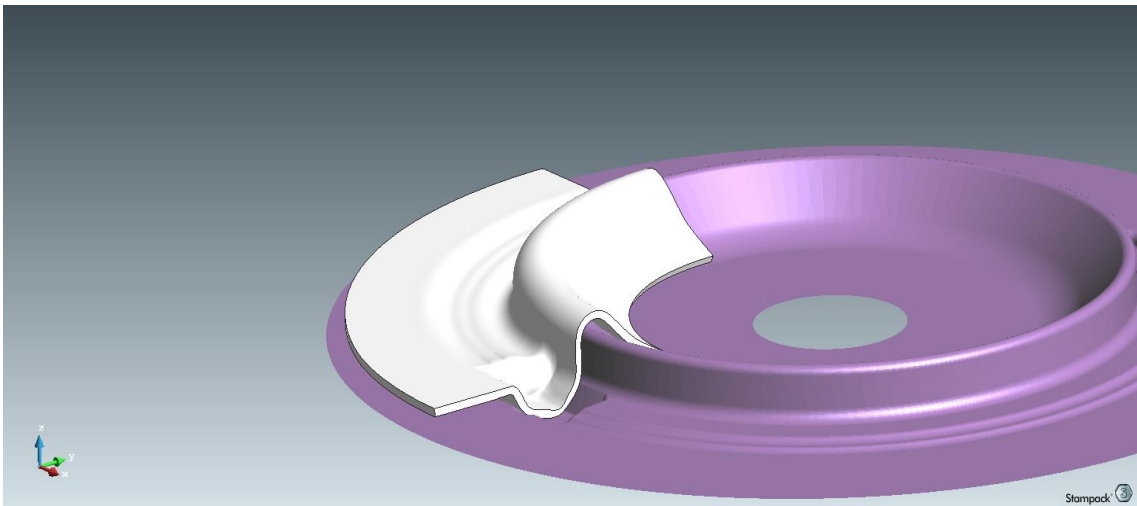
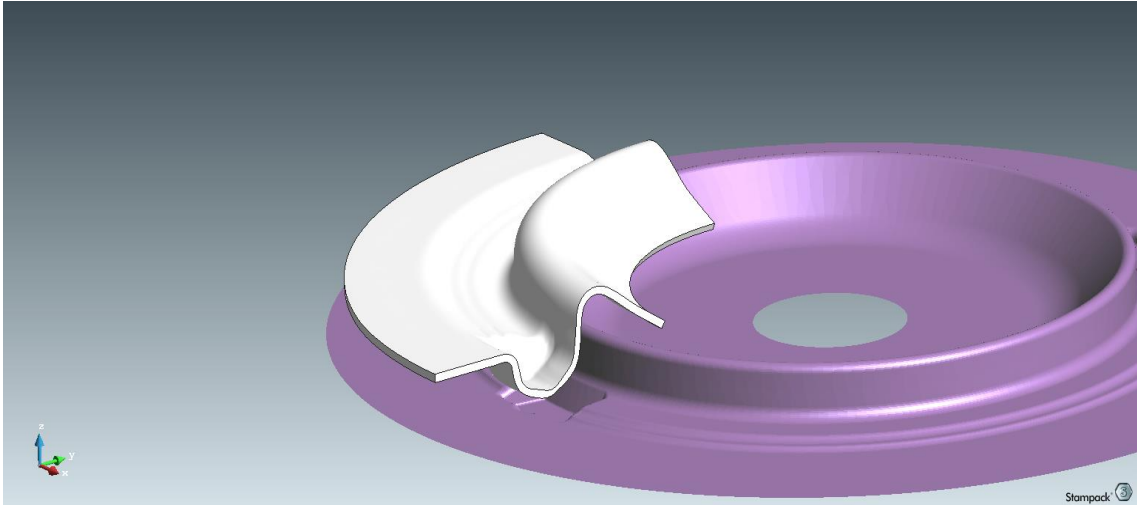
Tabella valori OPI	Displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-0,066584192	0,066584192	9348,8145	0,952988226
-0,2162554	0,2162554	11283,416	1,150195311
-0,45156541	0,45156541	14754,73	1,504049949
-0,77254242	0,77254242	469484,28	47,85772477
-1,1766537	1,1766537	31788,479	3,2404158
-1,6051902	1,6051902	24112,357	2,457936493
-2,0334811	2,0334811	7689,1221	0,783804495
-2,4618988	2,4618988	61224,391	6,241018451
-2,8904259	2,8904259	120970,08	12,33130275
-3,3189435	3,3189435	73518,242	7,494214271
-3,7473967	3,7473967	59304,859	6,045347503
-4,1758146	4,1758146	53225,129	5,425599286
-4,6041937	4,6041937	57791,34	5,89106422
-5,032558	5,032558	6275,172	0,639670948
-5,4609179	5,4609179	62951,934	6,417118654
-5,8894949	5,8894949	64352,824	6,559920897
-6,3178358	6,3178358	64276,363	6,552126707
-6,7461705	6,7461705	63975,316	6,52143894
-7,1747446	7,1747446	63401,938	6,462990622
-7,6030788	7,6030788	63488,125	6,471776249
-8,0314131	8,0314131	64242,66	6,548691131
-8,4599829	8,4599829	65168,813	6,643100204
-8,8883038	8,8883038	66447,148	6,773409582
-9,316865	9,316865	67253,344	6,855590622
-9,7451916	9,7451916	68250,891	6,95727737
-10,173516	10,173516	68858,953	7,019261264
-10,60209	10,60209	69491,016	7,083691743
-11,030412	11,030412	69992,852	7,134847299
-11,458973	11,458973	70196,078	7,155563507
-11,887294	11,887294	72677,961	7,408558716
-12,315609	12,315609	76205,695	7,768164628
-12,74417	12,74417	74809,219	7,625812334
-13,172493	13,172493	76562,469	7,804533028
-13,601056	13,601056	77785,703	7,929225586
-14,029373	14,029373	78060,195	7,957206422
-14,457933	14,457933	79426,883	8,096522222
-14,886256	14,886256	81036	8,260550459
-15,314574	15,314574	81828,102	8,341294801
-15,74313	15,74313	83675,461	8,529608665
-16,171448	16,171448	85048,227	8,669544037
-16,600002	16,600002	86515,219	8,819084506
-17,028316	17,028316	88013,156	8,971779409
-17,456875	17,456875	89157,734	9,088454027
-17,885187	17,885187	94073,242	9,589525178
-18,313742	18,313742	94304,023	9,613050255
-18,742056	18,742056	99125,07	10,10449235

Tabella valori OPI	Displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-19,17037	19,17037	111687,51	11,38506728
-19,598927	19,598927	104684,66	10,67121916
-20,027241	20,027241	107324,03	10,94026809
-20,455795	20,455795	109954,43	11,20840265
-20,884108	20,884108	112776,87	11,49611315
-21,31266	21,31266	115739,32	11,79809582
-21,740973	21,740973	118204,37	12,04937513
-22,169527	22,169527	120930,31	12,32724873
-22,597837	22,597837	123690,76	12,60864016
-23,02639	23,02639	126615,67	12,90679613
-23,454704	23,454704	129445,07	13,19521611
-23,883015	23,883015	132252,14	13,48135984
-24,311567	24,311567	134775,38	13,73857085
-24,73988	24,73988	137378,77	14,00395209
-25,168432	25,168432	140544,67	14,3266738
-25,596745	25,596745	143408,48	14,61860143
-26,025297	26,025297	145912,69	14,87387258
-26,453611	26,453611	148783,45	15,16650866
-26,88217	26,88217	151907,58	15,48497248
-27,310484	27,310484	154927,63	15,79282671
-27,739035	27,739035	158580,86	16,16522528
-28,167345	28,167345	161030,16	16,41489908
-28,595901	28,595901	164300,73	16,74829052
-29,024214	29,024214	167187,69	17,04257798
-29,452524	29,452524	169590,77	17,28754027
-29,881079	29,881079	171972,8	17,53035678
-30,309389	30,309389	173947,09	17,73160958
-30,73794	30,73794	175363,8	17,87602446
-31,166252	31,166252	176924,56	18,03512334
-31,594805	31,594805	178280,42	18,17333537
-32,023113	32,023113	178446,28	18,19024261
-32,451668	32,451668	178846,84	18,23107441
-32,879978	32,879978	179290,02	18,27625076
-33,308533	33,308533	180620,63	18,41188889
-33,736843	33,736843	182098,06	18,56249337
-34,165154	34,165154	182666,19	18,62040673
-34,593708	34,593708	183270,22	18,68197961
-35,022018	35,022018	184450,16	18,80225892
-35,450569	35,450569	184859,42	18,84397757
-35,878883	35,878883	185754,11	18,93517941
-36,30743	36,30743	187511,36	19,11430785
-36,735744	36,735744	189140,78	19,28040571
-37,164295	37,164295	191321,89	19,50274108
-37,592606	37,592606	193397,17	19,71428848
-38,021156	38,021156	195010,67	19,87876351
-38,449467	38,449467	201379,52	20,52798369

Tabella valori OPI	Displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-38,878017	38,878017	210855,77	21,49396228
-39,306328	39,306328	271724,34	27,69870948
-39,732262	39,732262	317603,09	32,37544241
-40,096573	40,096573	349505,09	35,62743017
-40,37524	40,37524	456033,25	46,48656983
-40,568356	40,568356	644655,31	65,71409888
-40,675697	40,675697	852337,31	86,88453721
-40,700001	40,700001	1603235,8	163,4287258

12.2 Immagini e grafici relativi alla 2^a operazione





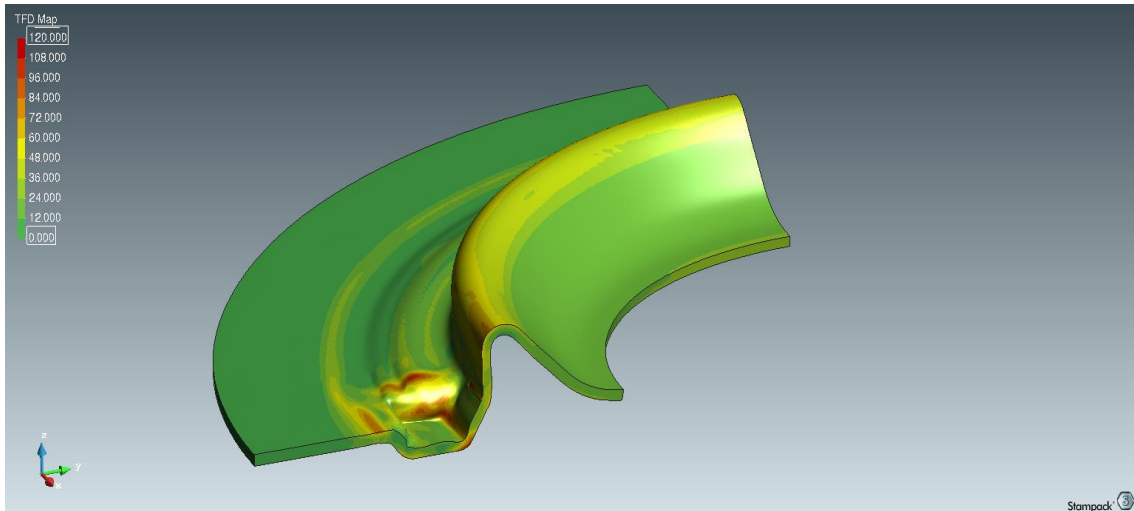
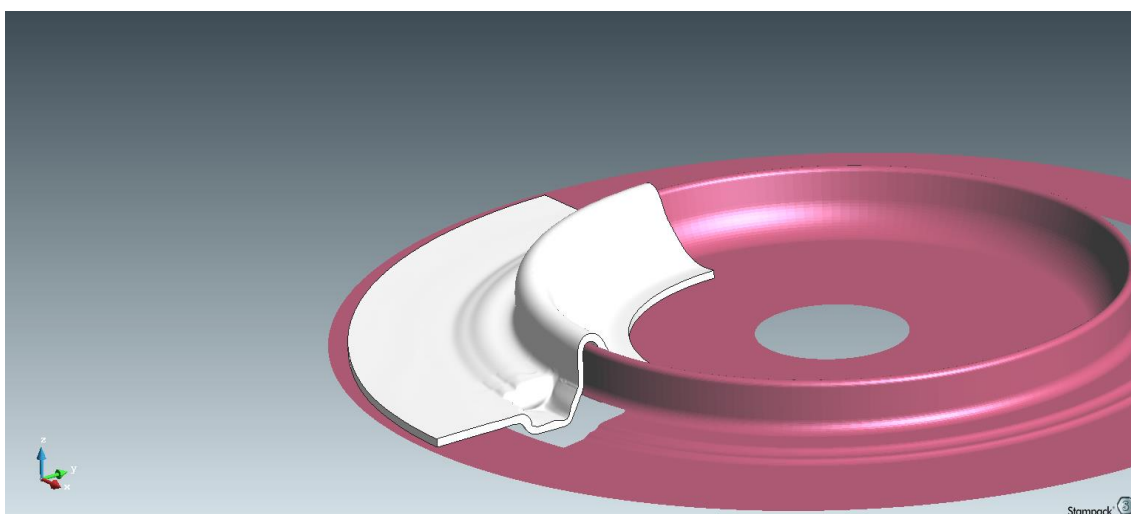
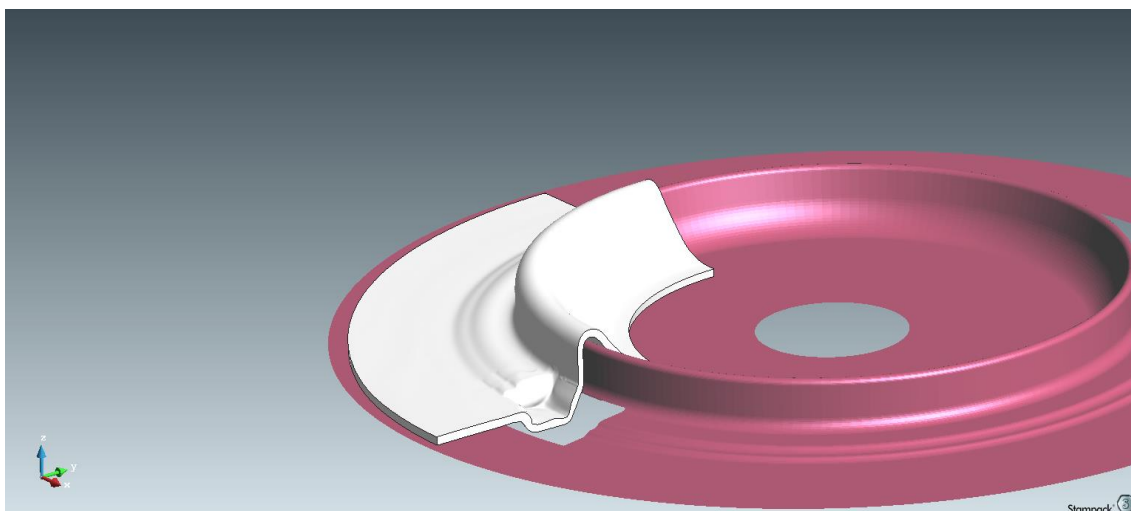
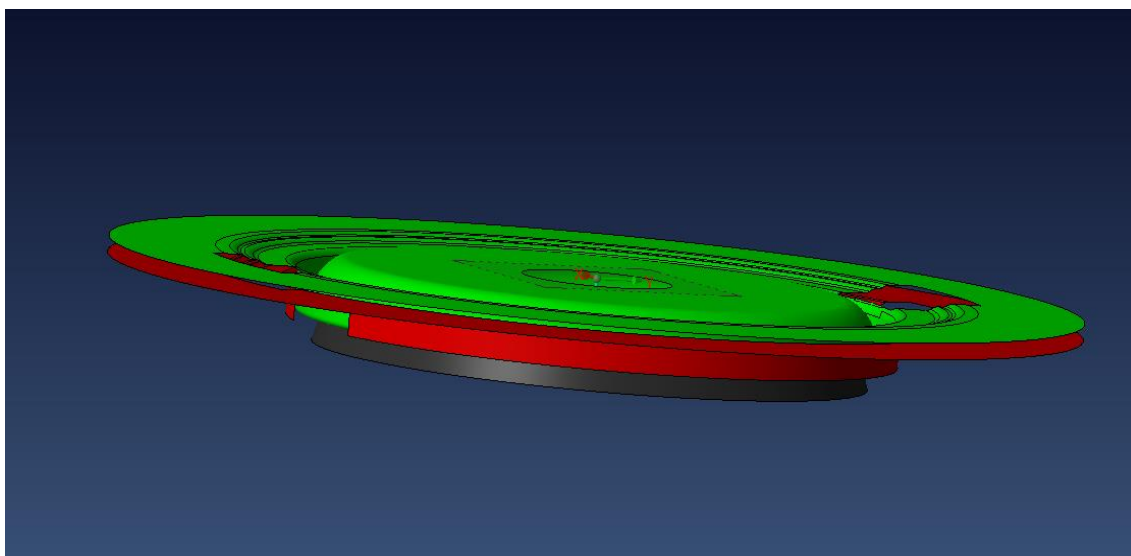


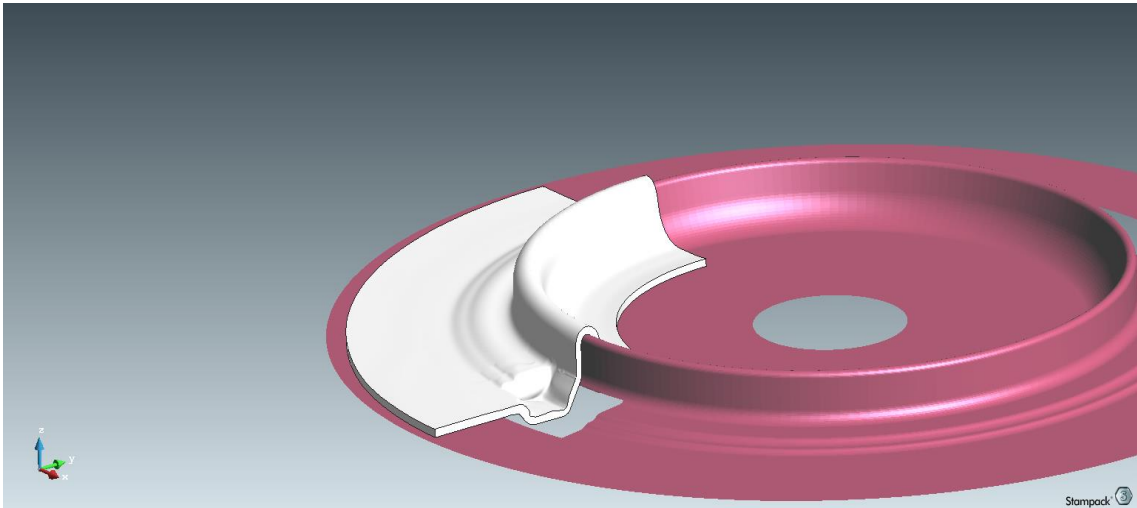
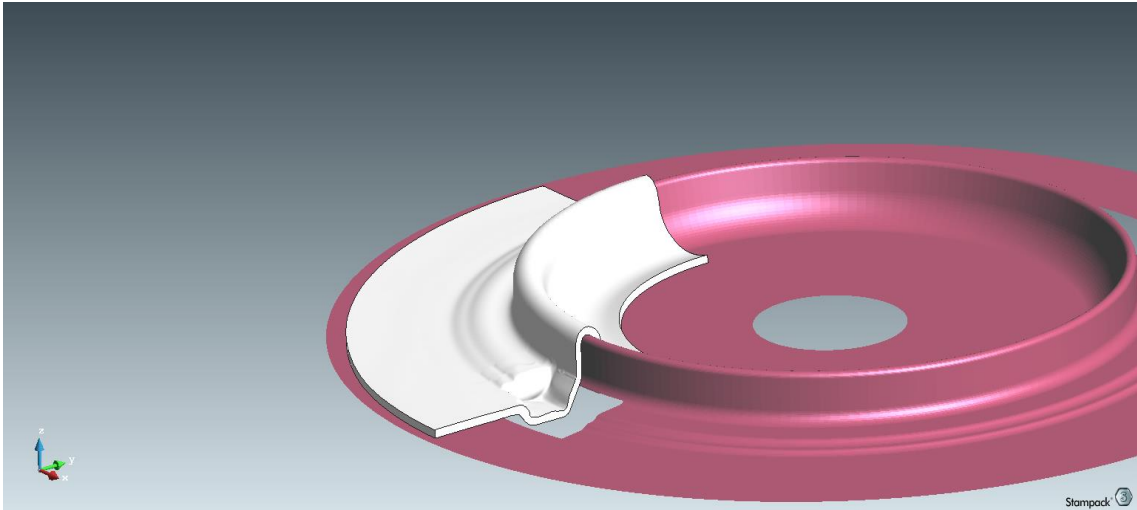
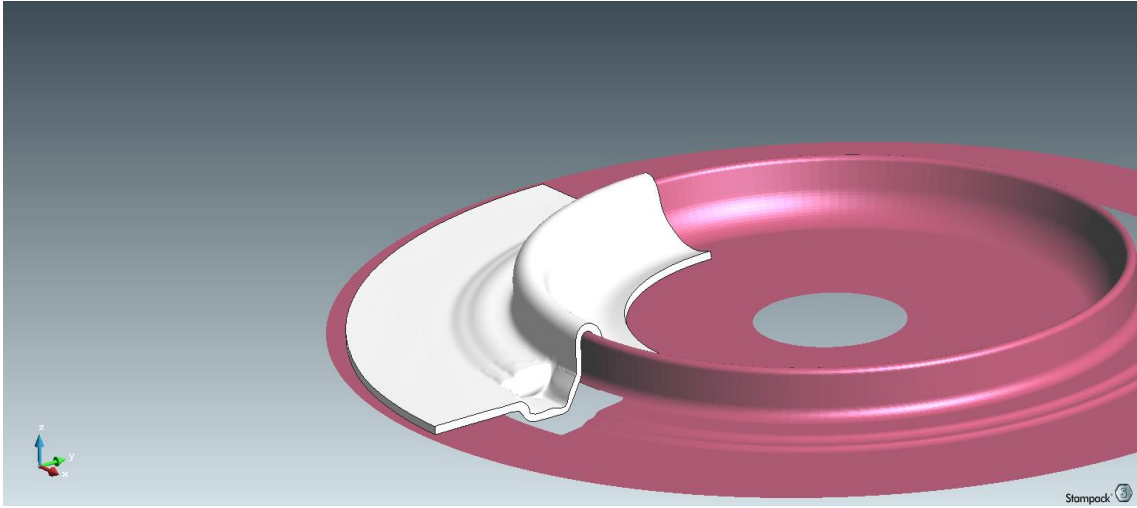
Tabella valori OP2	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-0,11403002	0,11403002	0	0
-0,33336776	0,33336776	0	0
-0,6678648	0,6678648	0	0
-1,1171237	1,1171237	4746,2241	0,483814893
-1,6716731	1,6716731	1062,7617	0,108334526
-2,246341	2,246341	3670,0674	0,374114924
-2,8210192	2,8210192	4827,7134	0,492121651
-3,3960779	3,3960779	6196,4502	0,6316463
-3,9707742	3,9707742	6336,2383	0,645895851
-4,5454884	4,5454884	7164,5464	0,730330928
-5,1202102	5,1202102	7530,0483	0,767589021
-5,6949325	5,6949325	8134,7373	0,829229083
-6,2696538	6,2696538	8322,7656	0,848396086
-6,8443847	6,8443847	8503,9199	0,866862375
-7,4191132	7,4191132	8694,5469	0,886294281
-7,9938493	7,9938493	8974,3926	0,914820856
-8,5685911	8,5685911	9221,1162	0,93997107
-9,1433287	9,1433287	9454,5088	0,963762365
-9,71807	9,71807	966,958	0,098568603
-10,292816	10,292816	9695,1807	0,988295688
-10,86756	10,86756	9824,4746	1,001475494
-11,442306	11,442306	9924,8184	1,01170422
-12,017051	12,017051	10027,753	1,022197044
-12,591799	12,591799	9931,3359	1,012368593
-13,166543	13,166543	9610,1914	0,979632151
-13,741288	13,741288	9128,0215	0,930481295
-14,316036	14,316036	8678,543	0,884662895

Tabella valori OP2	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-14,890781	14,890781	8210,6777	0,836970204
-15,465518	15,465518	7535,4473	0,768139378
-16,040255	16,040255	6674,5356	0,680380795
-16,61499	16,61499	5809,8633	0,592238869
-17,189722	17,189722	5073,4512	0,517171376
-17,764441	17,764441	4507,8984	0,459520734
-18,339151	18,339151	3979,0808	0,40561476
-18,913847	18,913847	3449,499	0,351630887
-19,488562	19,488562	2912,1082	0,296850989
-20,063257	20,063257	2475,3652	0,252330805
-20,638241	20,638241	2134,8977	0,217624638
-21,21286	21,21286	2457,1277	0,250471733
-21,787495	21,787495	3242,5603	0,330536218
-22,362419	22,362419	4327,7573	0,441157727
-22,937166	22,937166	5320,1758	0,542321692
-23,511696	23,511696	6489,1577	0,661483965
-24,086521	24,086521	8130,2349	0,828770122
-24,661402	24,661402	9617,9639	0,980424455
-25,235992	25,235992	10679,157	1,088599083
-25,810644	25,810644	11466,207	1,16882844
-26,38545	26,38545	12185,612	1,242162283
-26,960327	26,960327	12690,705	1,293649847
-27,53513	27,53513	13616,985	1,388071865
-28,109655	28,109655	14552,285	1,483413354
-28,684595	28,684595	15192,252	1,548649541
-29,25919	29,25919	15879,062	1,618660754
-29,833809	29,833809	16696,217	1,701958919
-30,408665	30,408665	17290,643	1,762552803
-30,983337	30,983337	17816,74	1,816181448
-31,558058	31,558058	18469,799	1,882752192
-32,132778	32,132778	19019,826	1,938820183
-32,7075	32,7075	19502,033	1,987974822
-33,282234	33,282234	20181,121	2,057198879
-33,856987	33,856987	20849,701	2,125351784
-34,431763	34,431763	21288,863	2,170118552
-35,006538	35,006538	21699,703	2,211998267
-35,581314	35,581314	22339,893	2,277257187
-36,156078	36,156078	22861,189	2,330396432
-36,73082	36,73082	23136,004	2,358410194
-37,305527	37,305527	23423,594	2,387726198
-37,880417	37,880417	23975,941	2,444030683
-38,45509	38,45509	24332,271	2,480353823
-39,029785	39,029785	24685,428	2,516353517

Tabella valori OP2	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-39,604649	39,604649	25755,889	2,625472885
-40,179317	40,179317	26799,139	2,731818451
-40,753902	40,753902	28451,832	2,900288685
-41,328739	41,328739	30461,762	3,105174516
-41,903587	41,903587	31800,381	3,241629052
-42,478054	42,478054	33243,441	3,388729969
-43,053032	43,053032	34697,941	3,536997044
-43,627598	43,627598	36043,465	3,674155454
-44,202614	44,202614	38502,895	3,924861876
-44,777206	44,777206	40048,246	4,08239001
-45,351841	45,351841	39160,074	3,991852599
-45,92672	45,92672	37719,621	3,845017431
-46,50145	46,50145	37334,738	3,80578369
-47,076122	47,076122	37138,375	3,785767074
-47,651039	47,651039	35769,273	3,646205199
-48,22559	48,22559	36514,324	3,722153313
-48,800304	48,800304	46946,723	4,785598675
-49,375031	49,375031	58810,598	5,994964118
-49,949848	49,949848	121943,96	12,43057696
-50,52459	50,52459	77820,797	7,932802956
-51,099487	51,099487	93809,047	9,562593986
-51,674019	51,674019	131815,52	13,43685219
-52,248909	52,248909	192965,91	19,67032722
-52,823421	52,823421	262256,69	26,73360754
-53,38868	53,38868	275405,63	28,0739684
-53,859016	53,859016	321091,44	32,73103364
-54,214161	54,214161	399610,56	40,73502141
-54,454586	54,454586	623940,31	63,60247808
-54,579929	54,579929	1090450,3	111,1570133
-54,600006	54,600006	3314538,3	337,8734251
# End			

12.3 Immagini e grafici relativi alla 3^a operazione





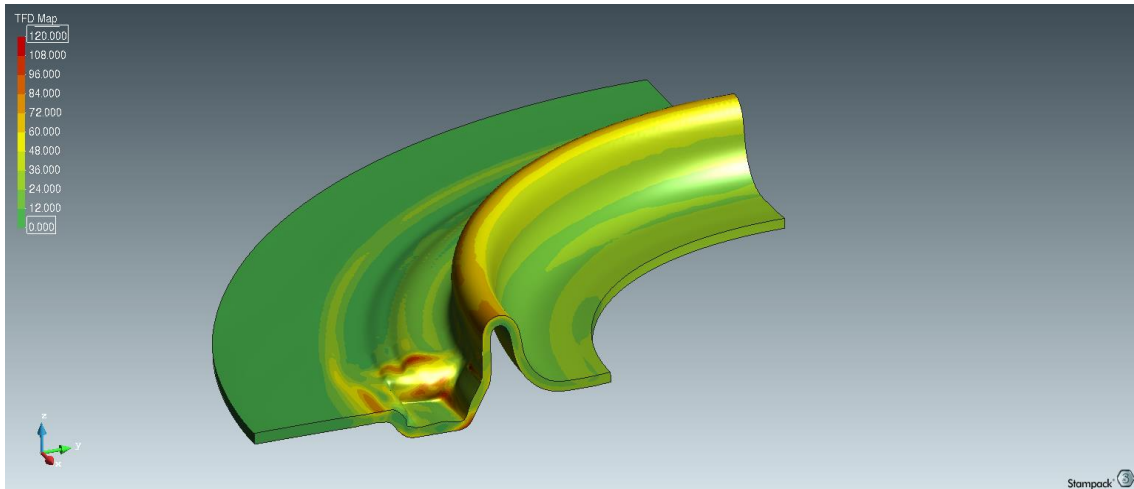
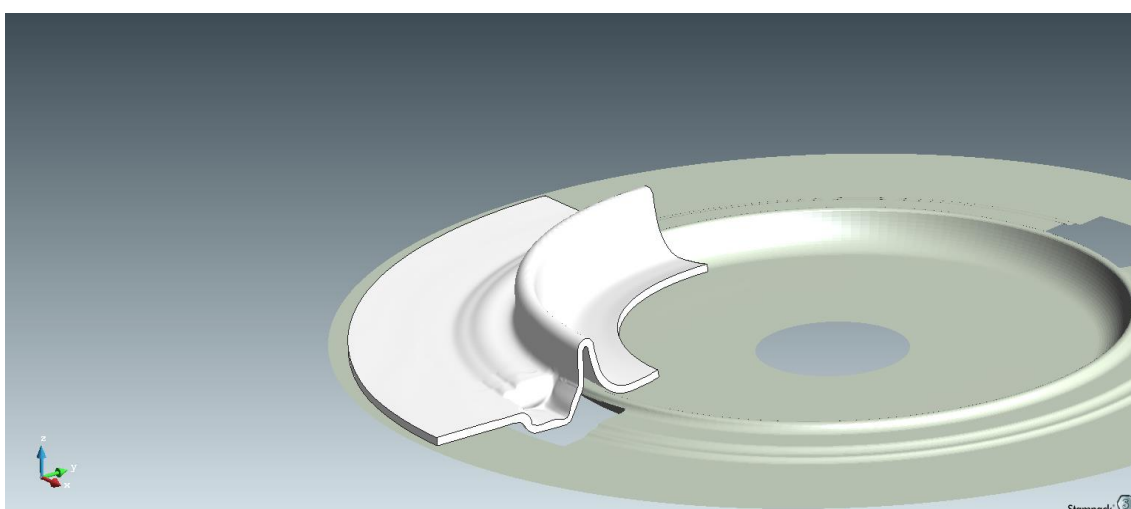
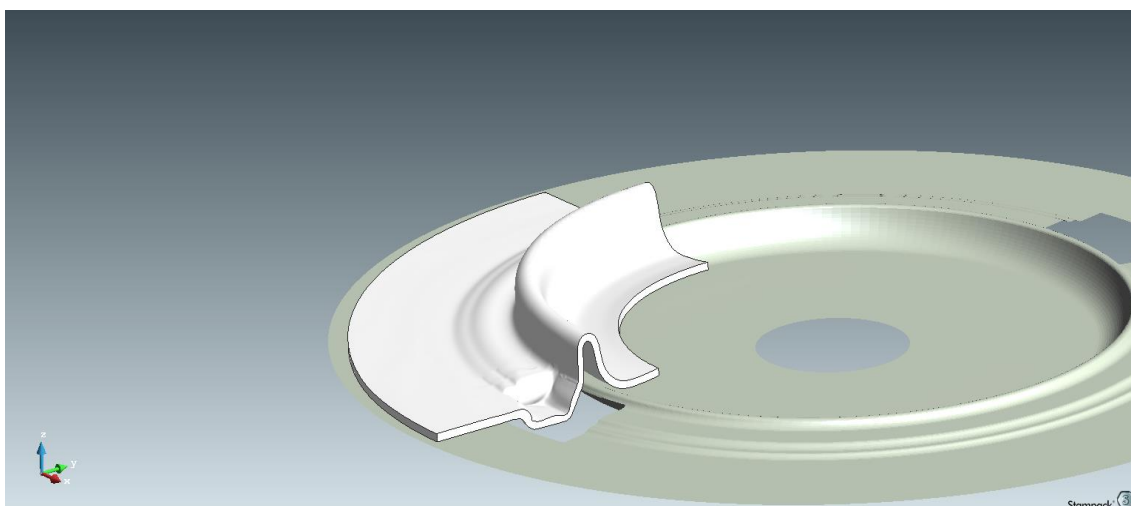
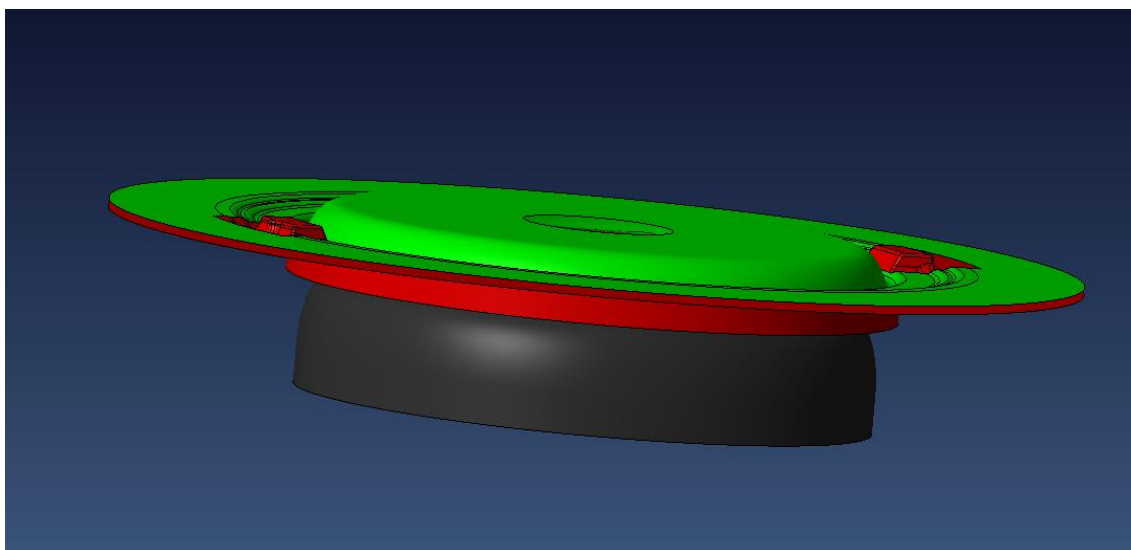


Tabella valori	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
OP3			
-0,003576833	0,003576833	0	0
-0,030173207	0,030173207	0	0
-0,08259508	0,08259508	0	0
-0,16086672	0,16086672	0	0
-0,26520488	0,26520488	0	0
-0,39165792	0,39165792	0	0
-0,52126396	0,52126396	0	0
-0,65062827	0,65062827	0	0
-0,78023469	0,78023469	0	0
-0,90960169	0,90960169	826,3172	0,08423213
-1,0392053	1,0392053	9765,6621	0,995480336
-1,1685658	1,1685658	16974,99	1,730376147
-1,2979279	1,2979279	24406,357	2,487905912
-1,4275303	1,4275303	28871,365	2,943054536
-1,5568962	1,5568962	29279,336	2,984641794
-1,6865003	1,6865003	30461,957	3,105194393
-1,815863	1,815863	32730,318	3,336423853
-1,9454643	1,9454643	32963,59	3,360202854
-2,074827	2,074827	34486,113	3,515403976
-2,2044301	2,2044301	34899,766	3,557570438
-2,3337924	2,3337924	37929,98	3,866460754
-2,4633977	2,4633977	38458,613	3,92034791
-2,5927618	2,5927618	38935,477	3,9689579
-2,7221243	2,7221243	37930,59	3,866522936
-2,8517282	2,8517282	36705,598	3,741651172
-2,9810896	2,9810896	35941,996	3,663812029
-3,1106937	3,1106937	36647,309	3,735709378

Tabella OP3	valori displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-3,240057	3,240057	37644,371	3,837346687
-3,3696599	3,3696599	38924,273	3,9678158
-3,4990234	3,4990234	39209,922	3,996933945
-3,6286256	3,6286256	38537,68	3,928407747
-3,7579892	3,7579892	37944,207	3,867911009
-3,8875937	3,8875937	37692,105	3,842212538
-4,0169582	4,0169582	37386,414	3,811051376
-4,1463218	4,1463218	38253,563	3,89944577
-4,2759242	4,2759242	38965,66	3,972034659
-4,4052868	4,4052868	39126,68	3,988448522
-4,5348897	4,5348897	38843,113	3,95954261
-4,6642528	4,6642528	38409,508	3,915342304
-4,7938566	4,7938566	38759,266	3,950995515
-4,9232197	4,9232197	39119,211	3,987687156
-5,0528216	5,0528216	40083,629	4,08599684
-5,1821861	5,1821861	40194,668	4,0973158
-5,3117919	5,3117919	40086,855	4,086325688
-5,4411554	5,4411554	40341,398	4,112272987
-5,5707593	5,5707593	40739,641	4,152868603
-5,7001214	5,7001214	41238,395	4,20370999
-5,829484	5,829484	41818,281	4,262821713
-5,9590869	5,9590869	42373,422	4,319411009
-6,0884504	6,0884504	43107,73	4,394264016
-6,2180538	6,2180538	44151,336	4,500645872
-6,3474159	6,3474159	45201,672	4,607713761
-6,4770193	6,4770193	46202,836	4,709769215
-6,6063852	6,6063852	46952,887	4,786227013
-6,7359872	6,7359872	48000,945	4,893062691
-6,8653526	6,8653526	49491,063	5,04496055
-6,9949546	6,9949546	50615,367	5,159568502
-7,1243167	7,1243167	51178,906	5,217013863
-7,2536783	7,2536783	52292,621	5,330542406
-7,3832817	7,3832817	54254,926	5,530573496
-7,5126433	7,5126433	55654,156	5,673206524
-7,6422453	7,6422453	56663,578	5,776103772
-7,7716064	7,7716064	58176,945	5,93037156
-7,9012108	7,9012108	60035,59	6,119835882
-8,0305738	8,0305738	61749,105	6,294506116
-8,1601763	8,1601763	63169,207	6,439266769
-8,2895365	8,2895365	65322,301	6,658746279
-8,4191408	8,4191408	67191,031	6,849238634
-8,548502	8,548502	68137,125	6,945680428
-8,6778622	8,6778622	69618,469	7,096683894

Tabella OP3	valori	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-8,8074656	8,8074656	72375,031	7,377679001	
-8,9368277	8,9368277	73902,836	7,533418552	
-9,0664301	9,0664301	74932,789	7,638408665	
-9,1957922	9,1957922	72446,961	7,385011315	
-9,3253937	9,3253937	72092,867	7,348916106	
-9,4547539	9,4547539	72850,281	7,426124465	
-9,5843554	9,5843554	72510,609	7,391499388	
-9,7137165	9,7137165	73029,32	7,444375127	
-9,843318	9,843318	73610,719	7,503641081	
-9,9726791	9,9726791	73104,289	7,452017227	
-10,102281	10,102281	75265,227	7,67229633	
-10,231643	10,231643	75966,641	7,743796228	
-10,361004	10,361004	77737,5	7,924311927	
-10,490606	10,490606	80037,844	8,158801631	
-10,619967	10,619967	81596,391	8,317674924	
-10,749569	10,749569	89809,539	9,154896942	
-10,878933	10,878933	91605,617	9,337983384	
-11,008538	11,008538	101195,61	10,31555657	
-11,137901	11,137901	106962,47	10,90341182	
-11,267505	11,267505	115276,38	11,7509052	
-11,396868	11,396868	121412,97	12,37644954	
-11,526473	11,526473	125119,1	12,75424057	
-11,655836	11,655836	129475,88	13,19835678	
-11,785439	11,785439	134353,05	13,69551988	
-11,914802	11,914802	141890,3	14,46384302	
-12,040608	12,040608	156383,41	15,94122426	
-12,143653	12,143653	167944,88	17,11976351	
-12,220633	12,220633	175142,27	17,85344241	
-12,271836	12,271836	179866,08	18,33497248	
-12,29707	12,29707	183514,73	18,70690418	
-12,3184466	12,3184466	184467	18,80397554	
# End				

12.4 Immagini e grafici relativi alla 4^a operazione



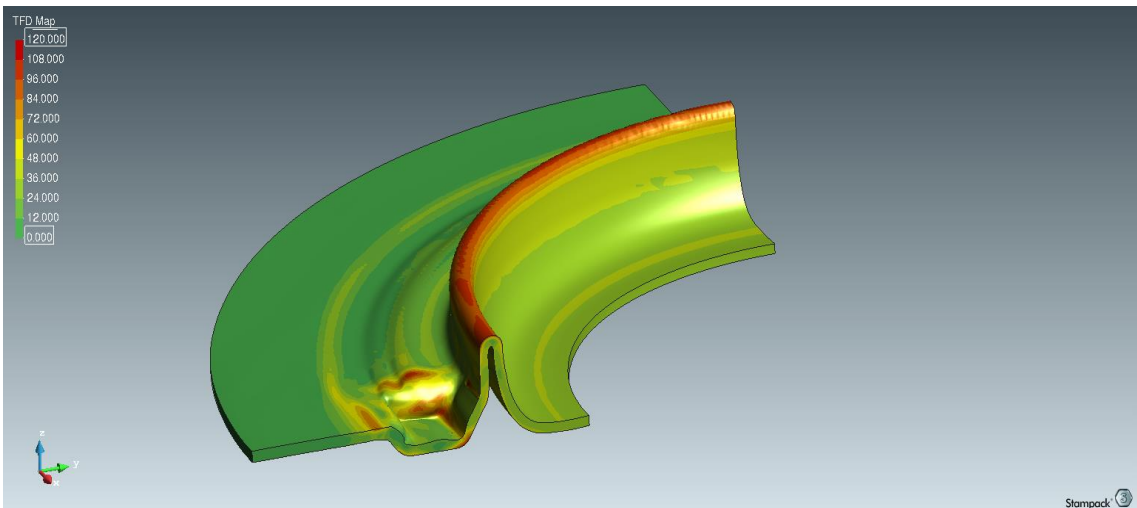
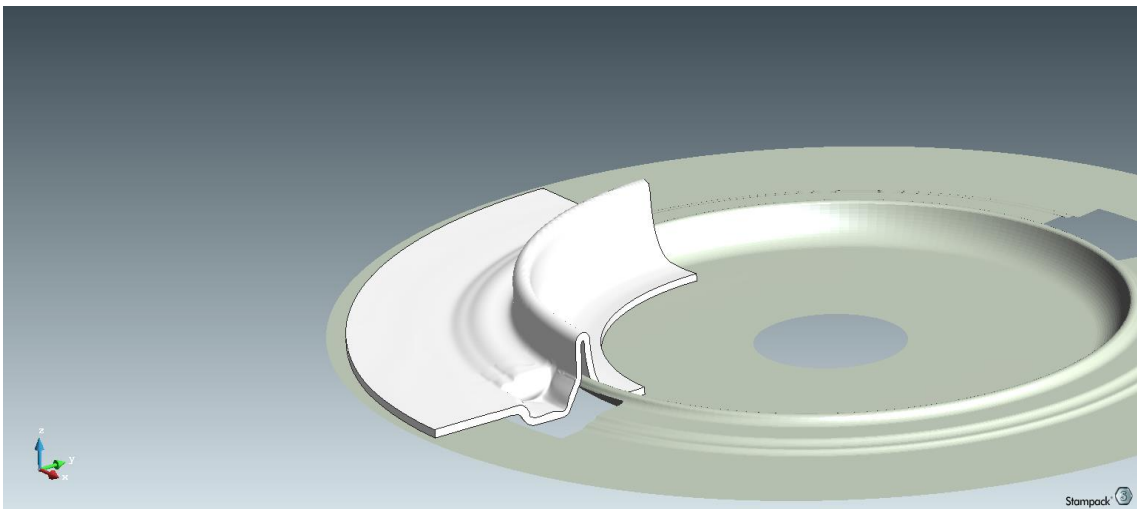
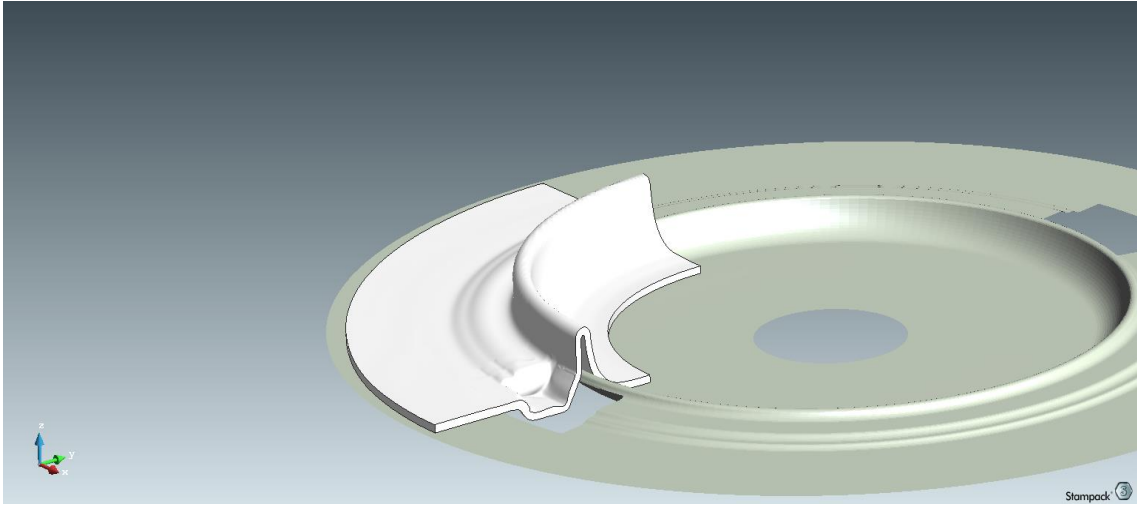
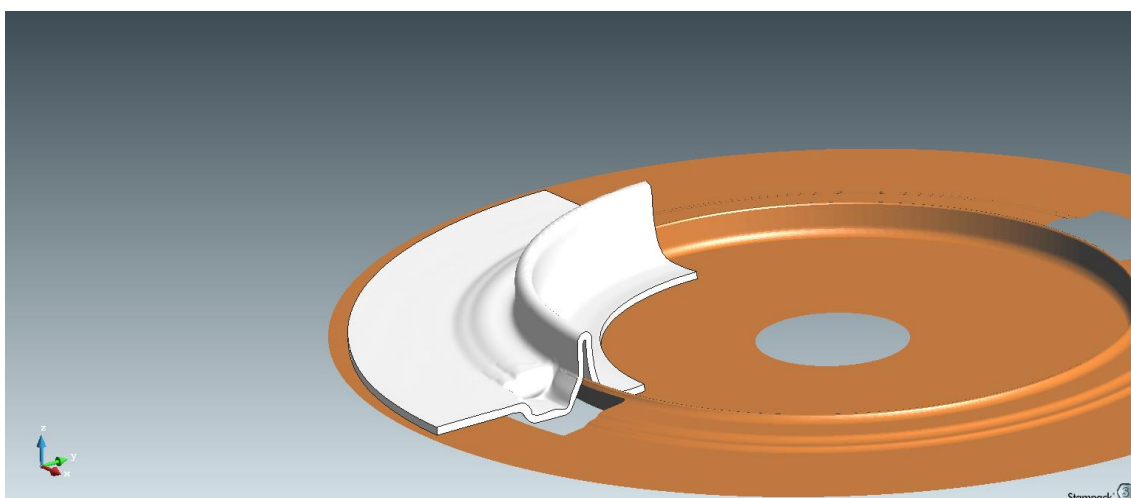
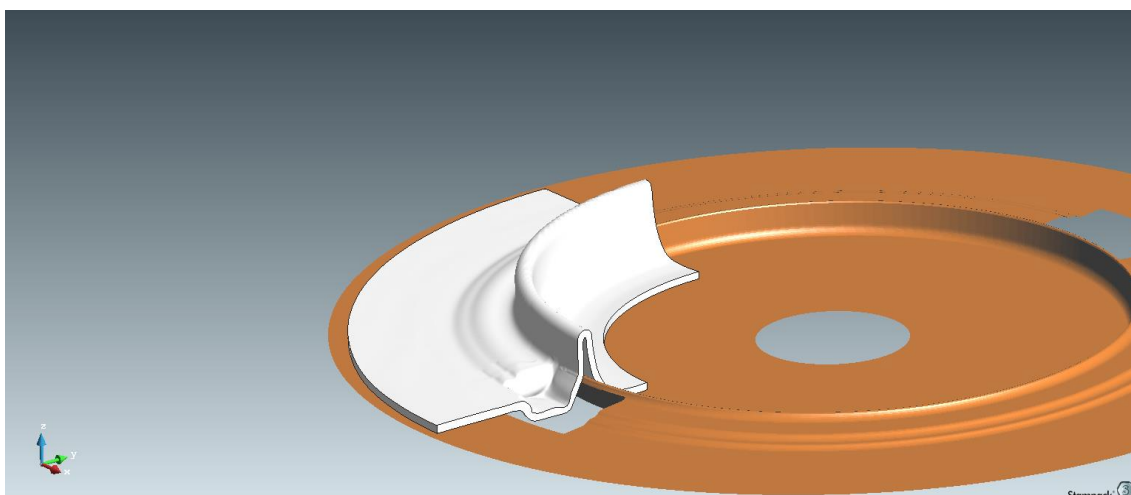
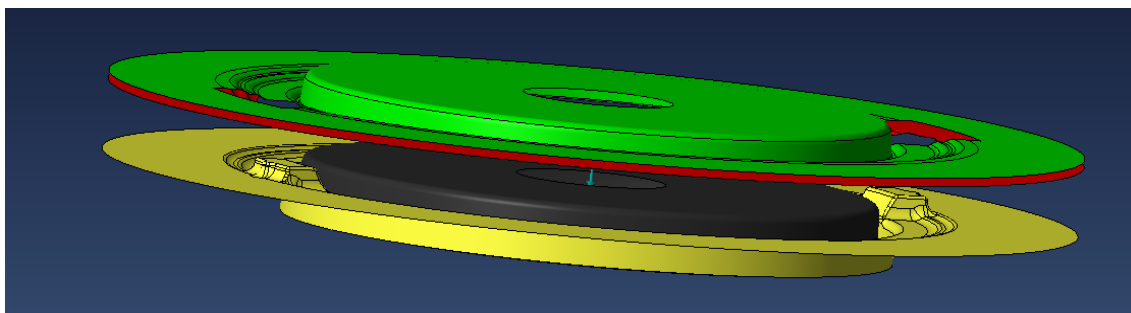


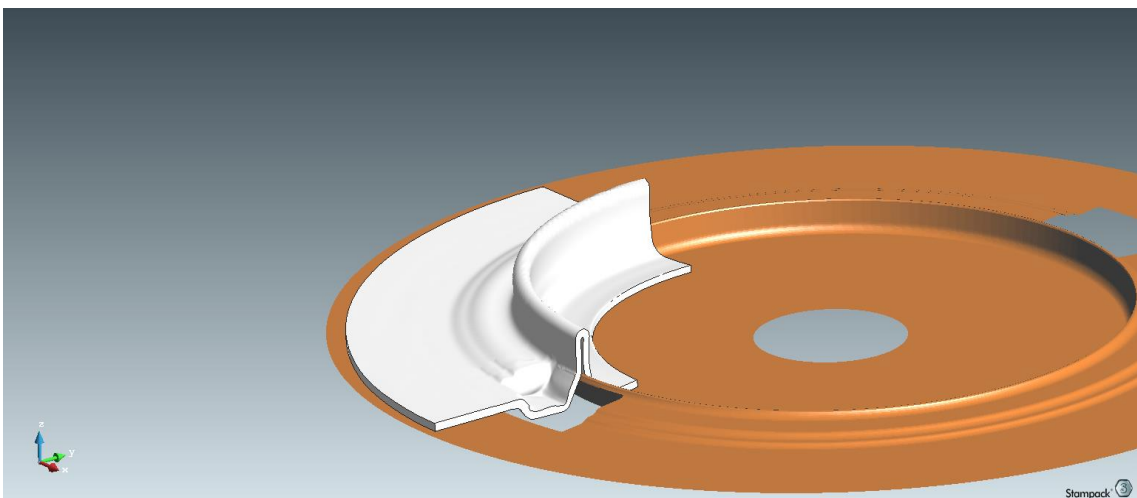
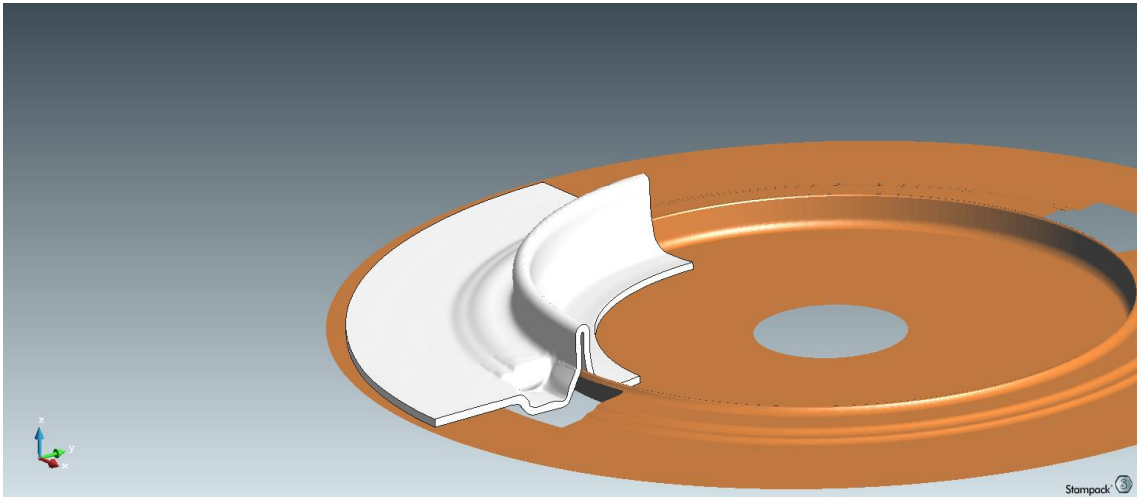
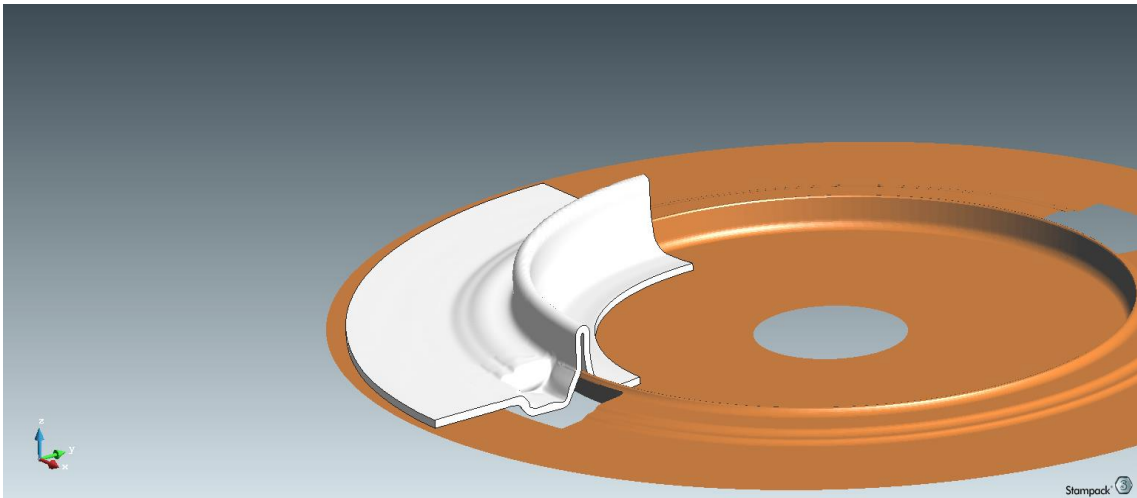
Tabella dei valori OP4	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-0,017074564	0,017074564	0	0
-0,079921864	0,079921864	0	0
-0,1892022	0,1892022	0	0
-0,34468031	0,34468031	0	0
-0,54665112	0,54665112	0	0
-0,77769935	0,77769935	0	0
-1,0092198	1,0092198	0	0
-1,2408866	1,2408866	0	0
-1,472401	1,472401	0	0
-1,7038522	1,7038522	0	0
-1,9354779	1,9354779	0	0
-2,1672297	2,1672297	0	0
-2,3987329	2,3987329	0	0
-2,6302488	2,6302488	0	0
-2,8617618	2,8617618	0	0
-3,0934577	3,0934577	0	0
-3,3249762	3,3249762	0	0
-3,5566919	3,5566919	0	0
-3,7882068	3,7882068	0	0
-4,0197253	4,0197253	0	0
-4,2512426	4,2512426	0	0
-4,4829984	4,4829984	0	0
-4,7145152	4,7145152	0	0
-4,9460301	4,9460301	0	0
-5,1775465	5,1775465	0	0
-5,4093056	5,4093056	2391,0837	0,243739419
-5,640811	5,640811	27424,506	2,795566361
-5,8723121	5,8723121	51178,066	5,216928236
-6,1040559	6,1040559	53318,984	5,435166565
-6,3355608	6,3355608	56111,547	5,719831498
-6,5670671	6,5670671	58957,371	6,009925688
-6,798574	6,798574	60807,434	6,198515189
-7,0303216	7,0303216	60316,711	6,148492457
-7,2618284	7,2618284	60131,441	6,129606626
-7,4933357	7,4933357	60807,801	6,198552599
-7,7250814	7,7250814	60881,922	6,206108257
-7,9565845	7,9565845	61332,418	6,252030377
-8,1880903	8,1880903	61062,449	6,224510601
-8,4198351	8,4198351	60783,426	6,19606789
-8,6513395	8,6513395	61077,414	6,226036086
-8,882844	8,882844	61995,129	6,319585015
-9,1143484	9,1143484	61955,285	6,315523445

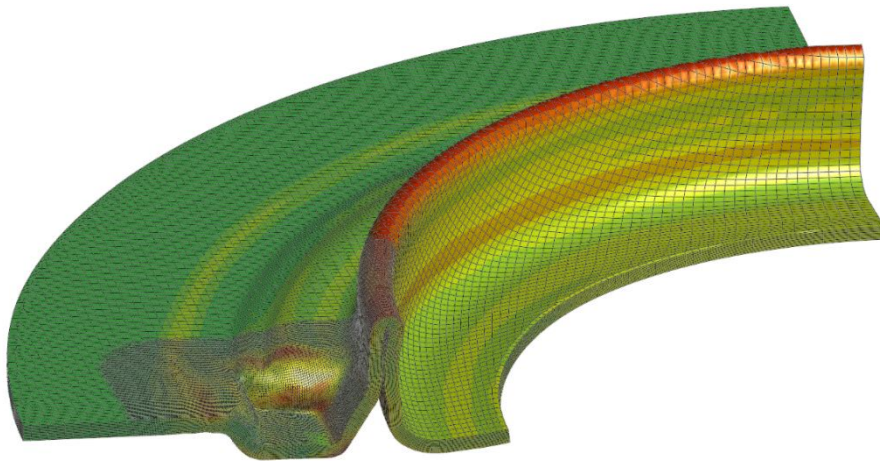
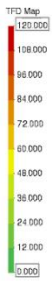
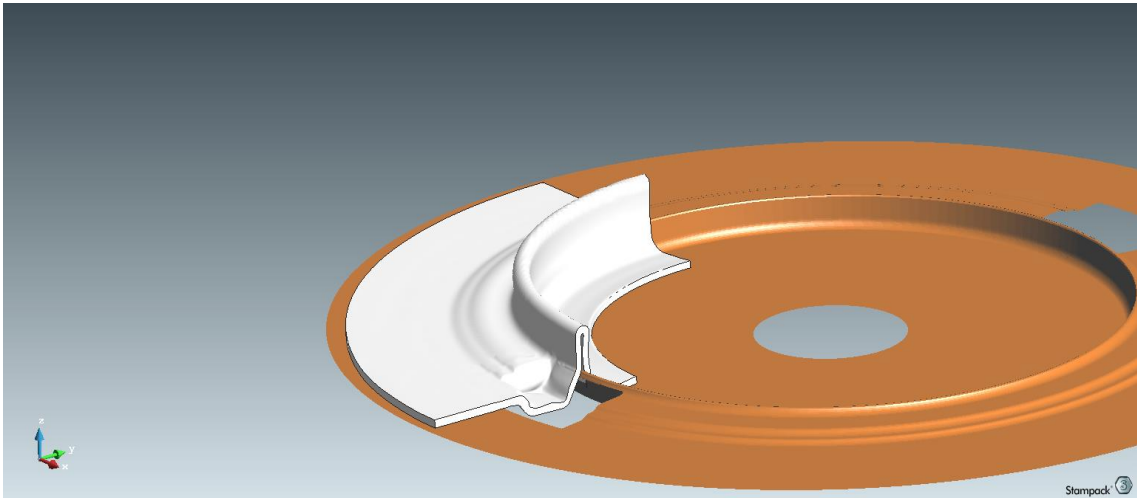
Tabella dei valori OP4	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-9,3460894	9,3460894	61576,977	6,276959939
-9,5775928	9,5775928	61602,914	6,279603874
-9,8090954	9,8090954	61987,141	6,318770744
-10,04084	10,04084	62204,172	6,34089419
-10,272344	10,272344	61831,121	6,302866565
-10,50385	10,50385	61937,391	6,313699388
-10,735599	10,735599	61943,461	6,314318145
-10,967103	10,967103	61479,594	6,267033028
-11,198605	11,198605	60920,305	6,210020897
-11,430108	11,430108	60688,766	6,186418552
-11,661854	11,661854	60651,262	6,182595515
-11,89336	11,89336	60053,742	6,121686239
-12,124864	12,124864	59703,223	6,085955454
-12,35661	12,35661	59704,047	6,08603945
-12,588117	12,588117	59790,094	6,094810805
-12,819623	12,819623	59762,652	6,092013456
-13,051368	13,051368	59424,199	6,05751264
-13,282872	13,282872	59119,461	6,026448624
-13,514379	13,514379	63256,152	6,448129664
-13,745885	13,745885	64755,43	6,600961264
-13,977632	13,977632	63068,227	6,428973191
-14,209139	14,209139	64230,422	6,547443629
-14,440644	14,440644	66476,313	6,776382569
-14,672392	14,672392	68950,063	7,028548726
-14,903897	14,903897	68595,656	6,992421611
-15,135401	15,135401	68663,344	6,999321509
-15,367149	15,367149	70805,813	7,217717941
-15,598654	15,598654	90757,805	9,251560143
-15,830158	15,830158	93070,344	9,487292966
-16,061665	16,061665	91768,453	9,354582365
-16,293413	16,293413	104891,42	10,69229562
-16,524918	16,524918	100958,99	10,29143629
-16,756418	16,756418	104987,42	10,70208155
-16,988161	16,988161	105053,78	10,70884608
-17,219671	17,219671	107245,72	10,93228542
-17,451176	17,451176	106519,97	10,85830479
-17,682919	17,682919	106650,49	10,87160958
-17,914423	17,914423	106699,82	10,87663812
-18,145927	18,145927	105315,12	10,73548624
-18,377432	18,377432	105349,17	10,73895719
-18,609175	18,609175	104574,22	10,65996126
-18,840677	18,840677	104832,31	10,68627013
-19,072182	19,072182	104203,09	10,62212946

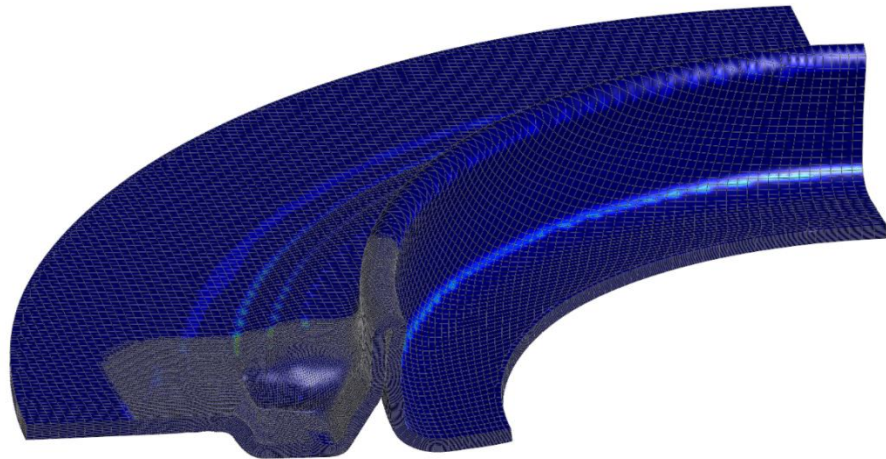
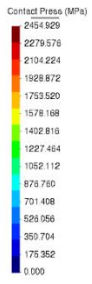
Tabella dei valori OP4	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-19,303928	19,303928	104379,69	10,6401315
-19,535433	19,535433	104206,97	10,62252497
-19,766937	19,766937	103345,32	10,53469113
-19,998678	19,998678	102321,91	10,43036799
-20,230183	20,230183	101617,03	10,35851478
-20,461687	20,461687	102291,21	10,42723853
-20,693436	20,693436	101125,24	10,30838328
-20,924938	20,924938	104286,29	10,6306106
-21,156443	21,156443	105929,96	10,79816106
-21,387947	21,387947	113032,16	11,5221366
-21,602646	21,602646	111589,92	11,37511927
-21,771284	21,771284	111603,21	11,37647401
-21,893642	21,893642	113400,79	11,55971356
-21,969769	21,969769	115306,23	11,75394801
-21,999504	21,999504	117496,01	11,97716718
-21,999975	21,999975	116960,6	11,92258919
# End			

12.5 Immagini e grafici relativi alla 5^a operazione









Stampack

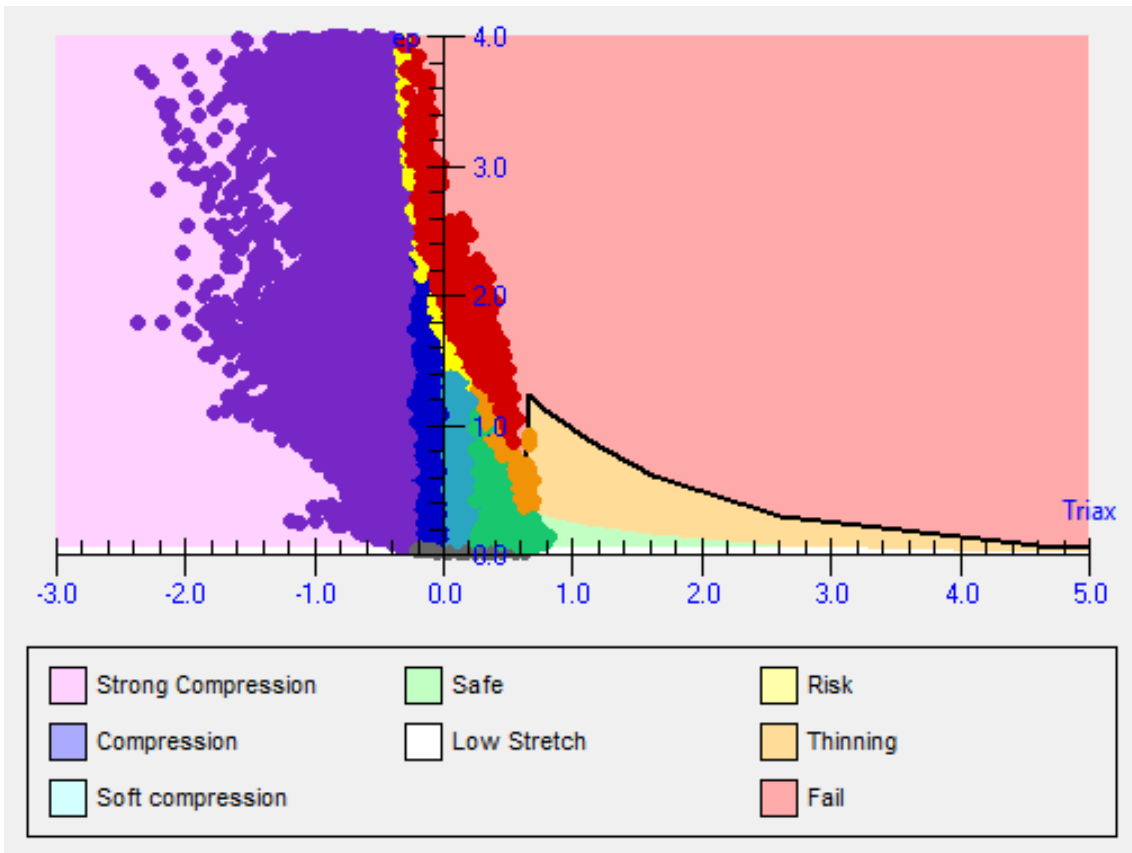


Tabella OP5	valori displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-0,01315	0,013148	0	0
-0,0768	0,076799	0	0
-0,19297	0,192975	0	0
-0,36175	0,361749	0	0
-0,58312	0,583115	0	0
-0,84392	0,84392	0	0
-1,10747	1,107466	0	0
-1,37053	1,370526	0	0
-1,63359	1,633589	0	0
-1,89666	1,896656	0	0
-2,15973	2,159731	0	0
-2,42328	2,423282	0	0
-2,68635	2,686354	0	0
-2,94943	2,94943	0	0
-3,2125	3,212504	0	0
-3,47558	3,475582	0	0
-3,73866	3,738662	0	0
-4,00223	4,002229	0	0
-4,26531	4,26531	0	0
-4,5284	4,5284	0	0
-4,79149	4,791486	0	0
-5,05458	5,054576	0	0
-5,31767	5,317669	0	0
-5,58124	5,581236	0	0
-5,84432	5,844319	0	0
-6,1074	6,107404	0	0
-6,37048	6,370477	0	0
-6,63357	6,633568	0	0
-6,89665	6,896653	0	0
-7,16021	7,160213	0	0
-7,4233	7,423299	0	0
-7,68639	7,68639	0	0
-7,94948	7,949483	0	0
-8,21258	8,212576	166,1638	0,016938
-8,47566	8,475658	2001,717	0,204049
-8,73873	8,738727	2000,328	0,203907
-9,00228	9,002284	2612,413	0,266301
-9,26535	9,265349	3126,702	0,318726
-9,52841	9,528414	3637,388	0,370784
-9,79148	9,791478	4563,495	0,465188
-10,0545	10,05454	7501,622	0,764691
-10,3181	10,31808	9829,398	1,001977

Tabella OP5	valori displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-10,5811	10,58114	13175,38	1,343056
-10,8442	10,8442	15365,2	1,566279
-11,1073	11,10726	17756,19	1,810009
-11,3703	11,37032	19689,16	2,00705
-11,6339	11,63386	21095,02	2,150359
-11,8969	11,89693	22076,51	2,250409
-12,16	12,15999	21555,6	2,197309
-12,423	12,42305	22990,05	2,343532
-12,6861	12,68611	23724,82	2,418432
-12,9497	12,94965	22452,94	2,288781
-13,2127	13,21272	22248,32	2,267922
-13,4758	13,47579	24113,32	2,458035
-13,7389	13,73885	24988,32	2,547229
-14,0019	14,00191	25380,59	2,587216
-14,2655	14,26545	27368,16	2,789823
-14,5285	14,52852	27364,99	2,7895
-14,7916	14,79159	30542,99	3,113455
-15,0547	15,05465	31349,47	3,195664
-15,3177	15,31773	32330,21	3,295638
-15,5813	15,58128	33201,24	3,384428
-15,8444	15,84435	34870,81	3,554618
-16,1074	16,10741	35587,06	3,62763
-16,3705	16,37048	35428,76	3,611494
-16,6335	16,63355	36412,24	3,711747
-16,8971	16,89709	40046,6	4,082222
-17,1602	17,16016	41712,16	4,252004
-17,4232	17,42322	44470,42	4,533172
-17,6863	17,68629	46018,73	4,691002
-17,9494	17,94935	50613,44	5,159372
-18,2129	18,21289	53465,65	5,450117
-18,476	18,47596	56346,21	5,743752
-18,739	18,73902	60982,18	6,216329
-19,0021	19,00209	67935,73	6,925151
-19,2651	19,26515	72102,77	7,349926
-19,5287	19,52869	83045,37	8,465379
-19,7918	19,79176	87836,23	8,953745
-20,0548	20,05482	94729,91	9,656464
-20,3179	20,31788	126149,3	12,85925
-20,5809	20,58094	110372,3	11,251
-20,8445	20,84449	133261,8	13,58429
-21,1076	21,10757	131612,2	13,41613
-21,3706	21,37062	126605,5	12,90576
-21,6337	21,63368	122409,1	12,47799

Tabella valori OP5	displacement [mm]	F [N]	F [tn]
-21,8967	21,89674	125851,1	12,82886
-22,1603	22,16029	126900	12,93578
-22,4233	22,42335	127225,8	12,96899
-22,6864	22,6864	125955	12,83945
-22,9495	22,94947	125703,8	12,81385
-23,2125	23,21253	126565,5	12,90168
-23,4761	23,47607	127363,3	12,98301
-23,7391	23,73914	125995,1	12,84354
-24,0022	24,0022	127504,6	12,99741
-24,2653	24,26526	124529,8	12,69417
-24,5152	24,51515	137701,8	14,03688
-24,715	24,71502	140835,5	14,35632
-24,8619	24,86187	141239,6	14,39752
-24,9561	24,95614	139385,1	14,20847
-24,9978	24,99781	133996,1	13,65913
-25,0001	25,00005	125957	12,83965
# End			

13 Bibliografia

Berruti A., 1964, Stampi e presse, S. LATTES & C. EDITORI, Torino, 4° Edizione

Ariosi V. and Marzi C., 1982, Stampi e lavorazione della lamiera, Editore Ulrico Hoepli Milano, pp.1, [ISBN 88-203-1265-4]

Rossi M., 1979, Stampaggio a freddo delle lamiere Stampi-Matrici-Punzoni-Pressa e macchine, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 10° Edizione, [ISBN 88-203-1111-9]

Lavorazione delle lamiere, CNCItalia

www.ing.unitn.it/lavorazioneLamiera1

Stampack software guide

<http://corsiadistanza.polito.it/corsi/pdf/9638A/sez2.pdf>