

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA



Tesi di Laurea Magistrale

SIMULAZIONE NUMERICA E CONFRONTO SPERIMENTALE DI UN COMPONENTE IN LAMIERA PER IMPIEGO AUTOMOBILISTICO

RELATORE

Prof. Luca Iuliano

TUTOR AZIENDALE

Luca Calcio Gaudino

CANDIDATO

Giovanni D'Ambrosio, S276788

Anno Accademico 2020/2021

†A mio nonno Giovanni

Sommario

SOMMARIO	I
INDICE DELLE FIGURE	V
INDICE DELLE TABELLE	XII
ABSTRACT	1
SACEL GROUP	3
1 INTRODUZIONE AI PROCESSI DI FORMATURA	5
1.1 Processi di formatura a caldo e a freddo	5
1.2 Confronto fra lavorazioni per deformazione plastica e per asportazione di truciolo	7
2 MATERIALI ADOPERATI IN AMBITO <i>SHEET METAL FORMING</i>	9
2.1 Caratterizzazione dei materiali	9
2.1.1 La prova di trazione	9
2.1.2 Forming Limit Diagram (FLD)	14
2.2 Ottenimento dei <i>coils</i>	17
2.2.1 Direzione di laminazione e dimensione dei grani.....	17
2.2.2 Trattamenti termici.....	19
2.3 Proprietà che caratterizzano i materiali adoperati in ambito sheet metal forming.....	20
2.3.1 Anisotropia	20
2.3.2 Incrudimento.....	22
2.4 Materiali da stampaggio lamiera	23
2.4.1 Scelta dei materiali.....	23
2.4.2 Principali tipologie adoperate.....	24

2.4.3	Acciaio inossidabile ferritico AISI430.....	26
3	STAMPAGGIO DELLA LAMIERA	29
3.1	Tranciatura	29
3.1.1	Gioco punzone-matrice	30
3.1.2	Stato superficiale del tranciato.....	31
3.1.3	Forza di tranciatura	32
3.2	Piegatura	34
3.2.1	Meccanica della piegatura	35
3.2.2	Caratteristiche geometriche di una piega	35
3.2.3	Forza di piegatura	37
3.2.4	Raggio massimo e minimo di piegatura.....	37
3.3	Imbutitura.....	39
3.3.1	Stato tensionale dell'imbutito.....	39
3.3.2	Gioco o luce fra matrice e punzone	40
3.3.3	Forza di imbutitura.....	40
3.3.4	Altri parametri di processo	41
3.4	Principali problemi legati alla formatura delle lamiere.....	42
3.4.1	Ritorno elastico o <i>springback</i>	43
3.4.2	Formazione di orecchie o <i>earing</i>	44
3.4.3	Assottigliamenti del materiale e lacerazione o <i>tearing</i>	45
3.4.4	Formazione di grinze o <i>wrinkling</i>	47
3.4.5	Effetto buccia d'arancia o <i>orange peel</i>	47
3.4.6	Graffi e segni	48
3.5	Le presse	49
3.6	Stampi progressivi o <i>a passo</i>	50
3.6.1	Definizione del blank.....	52
3.6.2	Struttura e parti fondamentali	55

3.6.3	Materiali e trattamenti degli utensili per stampi per lavorazione a freddo.....	64
4	SOFTWARE DI SIMULAZIONE STAMPAK XPRESS®.....	69
4.1	Generalità sulle simulazioni agli elementi finiti o <i>FEM</i>	69
4.2	Caratteristiche del software di simulazione Stampack Xpress®.....	72
5	CARATTERISTICHE DEL COMPONENTE.....	75
5.1	Generalità e requisiti del componente.....	75
5.1.1	Requisiti geometrici.....	75
5.1.2	Materiale.....	76
5.2	Definizione del processo di stampaggio.....	77
6	PROVE EMPIRICHE.....	79
6.1	Blank.....	79
6.2	Stazione di piega.....	80
6.3	Stampo a passo.....	82
6.4	Prove pratiche iterative.....	83
6.4.1	1° prova.....	84
6.4.2	2° prova.....	86
6.4.3	3° prova.....	86
6.4.4	4° prova.....	87
6.4.5	5° prova.....	88
6.4.6	6° prova.....	89
6.4.7	7° prova.....	90
6.4.8	8° prova.....	92
6.4.9	9° prova.....	93
7	PROVE IN AMBIENTE DI SIMULAZIONE.....	95

7.1	Impostazione del processo di stampaggio in ambiente di simulazione	95
7.1.1	Blank	95
7.1.2	Materiale.....	98
7.1.3	Condizioni di vincolo.....	99
7.1.4	Processo.....	101
7.1.5	Simulazione	103
7.2	Risultati della simulazione	113
7.2.1	Pezzi ottenuti	113
7.2.2	Deformazioni e difetti	117
7.2.3	Assottigliamenti	121
7.2.4	TFD.....	122
8	CONFRONTO FRA COMPONENTE REALE E SIMULATO.....	126
8.1	Confronto preliminare	126
8.2	Confronto su CAD con nuvola di punti	131
9	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	149
	APPENDICE.....	151
	Dimensional Report (<i>DR</i>) dei tre particolari misurati ed analizzati:	151
	Pezzo 1	152
	Pezzo 2	154
	Pezzo 3	156
	BIBLIOGRAFIA	158
	RINGRAZIAMENTI	160

Indice delle figure

Figura 0.1: Logo dell'azienda.....	3
Figura 0.2: Attuali sedi di Sacel Group nel mondo.	3
Figura 0.3: Mercato di Sacel Group.	4
Figura 0.4: Settori di business principali.	4
Figura 0.5: Esempi di co-stampaggio (in alto) e componenti in lamiera (in basso).....	4
Figura 1.1: Effetti della temperatura sulle caratteristiche meccaniche del materiale [1].	5
Figura 1.2: Componente in acciaio forgiato [2].	6
Figura 1.3: Componente stampato a caldo [3].....	6
Figura 1.4: Componenti ottenuti per stampaggio a freddo [4].	7
Figura 1.5: Struttura del materiale in base ai processi di fabbricazione di un albero a gomiti: a) asportazione di truciolo; b) da fusione; c) stampaggio a caldo [1].	8
Figura 2.1: Alcuni esempi di stampaggio lamiera [5].	9
Figura 2.2: Curva Sforzo-deformazione [6].	10
Figura 2.3: Differenza fra le caratteristiche sforzo-deformazione vera ed ingegneristica [7].	11
Figura 2.4: Determinazione del carico $R_{p0.2}$ [7].	12
Figura 2.5: Curva di incrudimento [1].	12
Figura 2.6: Curva di incrudimento riportata in scala logaritmica [8].	13
Figura 2.7: Alcune proprietà deducibili dal diagramma sforzo-deformazione [1].	14
Figura 2.8: Griglia impressa su un provino [9].	15
Figura 2.9: Deformazione dell'elemento circolare della griglia.....	15
Figura 2.10: Forming limit diagram [10].	16
Figura 2.11: Differenti zone che caratterizzano il FLD (guida software Stampack®).	16
Figura 2.12: Geometrie dei vari blank dei provini per la prova Nakajima. Il provino (a) permette di ricreare lo stato di tensione uniassiale di trazione; il provino (g) permette di ottenere uno stato di tensione biassiale di trazione [11].	17
Figura 2.13: Schema della macchina per la prova Nakajima [12].	17
Figura 2.14: Laminazione per l'ottenimento dei nastri [13].	18

Figura 2.15: Piegatura e direzione di laminazione: (a) la piega è stata eseguita parallelamente alla direzione di laminazione ed ha dato luogo a fratture; (b) è stata eseguita la stessa piega ma ortogonalmente alla direzione di laminazione [13].	18
Figura 2.16: Diagramma Fe-C (regione di esistenza degli acciai) (Appunti Politecnico di Torino).	19
Figura 2.17: Effetto del ciclo di lavorazione a freddo e conseguente ricottura sulle proprietà meccaniche e sulla microstruttura [8].	20
Figura 2.18: Ottenimento dei provini per materiali anisotropi [14].	21
Figura 2.19: Provino con indicazione delle dimensioni (a destra) e deformazioni (a sinistra).	21
Figura 2.20: Diagramma di Schaeffler [17].	26
Figura 2.21: Schema dei principali tipi di acciai inossidabili ferritici a partire dall'X6Cr17 [17].	27
Figura 2.22: Diagramma che mostra, in funzione della percentuale di elementi in lega, la dimensione delle regioni di esistenza dell'austenite e della ferrite (Appunti Politecnico di Torino).	28
Figura 3.1: Utensili necessari per l'operazione di tranciatura [1].	29
Figura 3.2: Tranciatura (a sinistra) e punzonatura (a destra) [13].	30
Figura 3.3: Operazione di tranciatura. (1) avvicinamento punzone alla lamiera; (2) il punzone inizia ad esercitare una forza via via crescente; (3) innesco frattura; (4) propagazione frattura e separazione delle parti [13].	30
Figura 3.4: Gioco punzone-matrice [13].	31
Figura 3.5: Schema dello stato superficiale del tranciato [1].	32
Figura 3.6: Superficie di trancia di una barra d'acciaio a sezione rettangolare di grosso spessore tranciata alla pressa (E.M.C. S.r.l.).	32
Figura 3.7: Andamento forza di tranciatura.	33
Figura 3.8: Piegatura libera [13].	34
Figura 3.9: Piegatura con stampo [13].	34
Figura 3.10: Altre tipologie di piegatura [13].	34
Figura 3.11: Sollecitazioni in fase di piegatura [18].	35
Figura 3.12: Variazione dello spessore dovuto allo stiramento [19].	36
Figura 3.13: Esempio piega a 90° su un componente in lamiera. (Sacel S.r.l.).	36
Figura 3.14: Schema di un'operazione di piega [1].	37

Figura 3.15: Schema per la determinazione della posizione di una generica fibra di materiale lungo lo spessore.....	38
Figura 3.16: Tensioni presenti su un componente imbutito [20].....	40
Figura 3.17: Identificazione raggi di raccordo di punzone e matrice.....	41
Figura 3.18: Alcuni esempi di difetti: (a) grinze; (b) grinze sulla parete verticale; (c) lacerazione; (d) formazione di orecchie; (e) segni di strisciamento [21].	42
Figura 3.19: Schema delle zone in campo plastico ed elastico di una lamiera in fase di piegatura.	43
Figura 3.20: Sollecitazioni e deformazioni nell'area di piega [22].	43
Figura 3.21: Ritorno elastico [22].....	44
Figura 3.22: Fenomeno dell'earring su un imbutito [13].....	45
Figura 3.23: Effetto dell'indice medio di anisotropia sull'imbutibilità [8].	45
Figura 3.24: Strappo sul fondo di una bugna di un componente in alluminio (Sacel S.r.l.).	46
Figura 3.25: Variazione dello spessore della lamiera di un imbutito cilindrico [23].	46
Figura 3.26: Formazione di grinze [23].....	47
Figura 3.27: A sinistra grana grossa ed increspature elevate (effetto buccia d'arancia più evidente); a destra i grani sono piccoli e l'effetto ad occhio nudo è meno evidente [24]. ..	48
Figura 3.28: Effetto orange peel. A sinistra non è apprezzabile; a destra è chiaramente visibile [24].....	48
Figura 3.29: Schema di una pressa meccanica [1].....	49
Figura 3.30: Schema di una pressa idraulica [1].	50
Figura 3.31: Vista dall'alto della parte inferiore di uno stampo. È possibile osservare a cosa si riferiscono passo e larghezza striscia.....	51
Figura 3.32: Esempio di imbutitura di una coppa e del corrispondente blank o sviluppo iniziale.	52
Figura 3.33: Esempio di studio del blank di un componente in lamiera. Si può osservare come, inclinando il blank, si è in grado di ottimizzare gli ingombri ed ottenere un fabbisogno inferiore, ottenendo un miglior incastro dei pezzi.	53
Figura 3.34: Esempi di trattenitori flessibili (a sinistra) e rigidi (a destra) (Sacel S.r.l.). ...	54
Figura 3.35: Esempio di disposizione e forma dei punzoni di trancia.	54
Figura 3.36: Parte inferiore di uno stampo a passo.	55
Figura 3.37: Basamento dello stampo in acciaio saldato (Sacel S.r.l.).....	56

Figura 3.38: Boccola (Sacel S.r.l.).....	57
Figura 3.39: Pilota (Sacel S.r.l.).	57
Figura 3.40: Solleva (Sacel S.r.l.).....	58
Figura 3.41: Vista in sezione del sistema pilota e solleva (Sacel S.r.l.).	59
Figura 3.42: Esempio di rifila (punzone rosso) e blocchetto del rifila (blocchetto giallo)..	60
Figura 3.43: [Dettaglio a]. Funzionamento rifila: 1) avanzamento striscia e battuta contro il blocchetto del rifila (stampo aperto); 2) discesa punzone di trancia o rifila; 3) apertura stampo; 4) avanzamento striscia e di nuovo battuta contro rifila.	60
Figura 3.44: Sistema di azionamento del microinterruttore (Sacel S.r.l.).	61
Figura 3.45: Molle in elastomero (Sacel S.r.l.).	62
Figura 3.46: Cilindro ad azoto (Sacel S.r.l.).....	62
Figura 3.47: Scivolo per espulsione del componente finito (Sacel S.r.l.).	63
Figura 3.48: Alimentatore pneumatico [25].	64
Figura 3.49: Trattamento termico post cementazione [26].....	66
Figura 3.50: Diagramma Fe-C con le trasformazioni relative al cuore ed allo strato cementato [26].	66
Figura 4.1: Catena di processo senza simulazione: il ciclo di ottimizzazione è lungo e costoso! [28].	71
Figura 4.2: Catena di processo con simulazione: il ciclo di ottimizzazione è veloce ed economico [28].	71
Figura 4.3: Logo e tipologie di processi che il software è in grado di simulare [28].	73
Figura 4.4: Barra di navigazione per accedere alle varie sezioni di impostazione della simulazione.....	74
Figura 5.1: Vista isometrica del componente (sinistro) oggetto di studio.....	75
Figura 5.2: Messa in tavola del componente e requisiti richiesti.	76
Figura 5.3: Studio striscia.....	78
Figura 6.1: Blank.....	79
Figura 6.2: Parte inferiore della stazione di piega e posa del blank e del pezzo appena stampato.....	80
Figura 6.3: Parte intermedia della stazione di piega.....	81
Figura 6.4: Parte superiore della stazione di piega.....	81
Figura 6.5: Sezione longitudinale della stazione di piega.	81

Figura 6.6: Sezione trasversale della stazione di piega.	82
Figura 6.7: Vista laterale dello stampo completo.	82
Figura 6.8: Vista dall'alto della parte inferiore dello stampo completo.	83
Figura 6.9: Stazione di piega staffata alla pressa per l'esecuzione delle prove stampo (Sacel S.r.l.).	84
Figura 6.10: Modifiche utensili 1°prova.	84
Figura 6.11: Strisciamento del punzone sul pezzo.	85
Figura 6.12: Distorsione dei fori sul pezzo reale.	85
Figura 6.13: Modifica eseguite sul blank per la 2°prova.	86
Figura 6.14: Modifiche utensili 3°prova.	87
Figura 6.15: Modifiche utensili 4°prova.	87
Figura 6.16: Modifica eseguite sul blank per la 5°prova.	88
Figura 6.17: Componente con trattenitori aggiuntivi.	89
Figura 6.18: Modifiche utensili 6°prova.	89
Figura 6.19: Modifica eseguite sul blank per la 6°prova.	90
Figura 6.20: Modifica eseguite sul blank per la 7°prova.	91
Figura 6.21: Dettaglio a: modifiche lato fori.	91
Figura 6.22: Dettaglio b: modifiche lato asole.	91
Figura 6.23: Modifiche lato fori.	92
Figura 6.24: Modifiche lato asole.	92
Figura 6.25: Calibro di controllo (Sacel S.r.l.).	93
Figura 6.26: Pezzi destro e sinistro.	94
Figura 7.1: Blank importato in Stampack®.	95
Figura 7.2: Parametri relativi alla mesh del componente oggetto di studio.	96
Figura 7.3: Esempio di un blank con “massima raffinazione” pari a 5.	97
Figura 7.4: Mesh del blank lato asole, vista dall'alto.	97
Figura 7.5: Dettaglio della mesh lungo lo spessore del blank.	98
Figura 7.6: Parametri del materiale.	98
Figura 7.7: Confronto fra: (a) Legge di Hollomon; (b) legge di Swift. La linea tratteggiata rappresenta la curva sperimentale [20].	99

Figura 7.8: Curva di incrudimento dell'acciaio AISI430 adoperato per tale studio.....	99
Figura 7.9: Nodi vincolati in direzione X e Y.	100
Figura 7.10: Effetto dell'utilizzo del pilota.	100
Figura 7.11: Utensili di formatura, pilota e blank importati in Stampack®	101
Figura 7.12: Finestra relativa all'operazione di formatura.	102
Figura 7.13: Caratteristica del cilindro ad azoto U.1600.013 (catalogo DADCO).	102
Figura 7.14: Profili di trancia.	103
Figura 7.15: Fasi di formatura.	105
Figura 7.16: Formatura della piega a Z.	107
Figura 7.17: Modifica velocità teorica della pressa.....	108
Figura 7.18: Formatura corretta.....	110
Figura 7.19: Formatura della piega a Z corretta.	112
Figura 7.20: Blank dopo l'operazione di formatura.	113
Figura 7.21: Blank dopo la prima operazione di tranciatura.	114
Figura 7.22: Pezzo sinistro ricavato dall'ultima operazione di tranciatura (stacco).	114
Figura 7.23: Mesh componente post formatura.....	115
Figura 7.24: Ritorno elastico del componente.....	116
Figura 7.25: Confronto fra pezzo prima e dopo il ritorno elastico (vista XZ).	116
Figura 7.26: Confronto fra pezzo prima e dopo il calcolo del ritorno elastico (vista YZ).117	
Figura 7.27: Ingrandimento pezzo sinistro ottenuto dalla simulazione.....	117
Figura 7.28: Confronto tra pezzo reale e simulato prova 4: distorsione fori.....	118
Figura 7.29: Distorsioni fori ed asole prova 1: confronto fra simulazione e pezzo reale..	119
Figura 7.30: Distorsioni fori ed asole prova 5 (con trattenitori aggiuntivi): confronto fra simulazione e pezzo reale.	120
Figura 7.31: Confronto tra pezzo reale e simulato: punta dovuta ad un difetto di trancia.121	
Figura 7.32: Mappa assottigliamento.	122
Figura 7.33: TFD relativo al componente oggetto di studio.....	123
Figura 7.34: Mappa TFD.....	124
Figura 7.35: Mappa delle zone di sicurezza.	124
Figura 7.36: Mappa TFD e zone di sicurezza in una generica sezione.	125

Figura 8.1: Punti di misurazione sul pezzo.....	126
Figura 8.2: Misurazione dei pezzi con CMM (Sacel S.r.l.).....	131
Figura 8.3: Identificazione del centro del foro sull'STL.....	132
Figura 8.4: Identificazione del centro dell'asola sull'STL.....	132
Figura 8.5: Sovrapposizione ed allineamento fra la nuvola di punti estratta con la CMM (punti in rosso) ed il modello STL esportato da Stampack® (in trasparenza).	133
Figura 8.6: Esempio di scostamento positivo tra punto della nuvola di punti ed STL.....	134
Figura 8.7: Identificazione punti volume sul pezzo.	135
Figura 8.8: Identificazione punti trancia sul pezzo.....	136
Figura 8.9: Sequenza dei punti di misura che definisce l'asse delle ascisse.	139
Figura 8.10: Grafico degli scostamenti dei punti volume fra STL-nuvola di punti.	140
Figura 8.11: Grafico degli scostamenti dei punti trancia fra STL-nuvola di punti.	140
Figura 8.12: Grafico degli scostamenti dei punti volume fra STL e nuvola di punti rispetto al pezzo nominale.	147
Figura 8.13: Grafico degli scostamenti dei punti trancia fra STL e nuvola di punti rispetto al pezzo nominale.	148
Figura 0.1: DR pezzo 1, punti trancia.....	152
Figura 0.2: DR pezzo 1, punti volume.....	153
Figura 0.3: DR pezzo 2, punti trancia.....	154
Figura 0.4: DR pezzo 2, punti volume.....	155
Figura 0.5: DR pezzo 3, punti trancia.....	156
Figura 0.6: DR pezzo 3, punti volume.....	157

Indice delle tabelle

Tabella 5.1: Composizione chimica.	77
Tabella 5.2: Caratteristiche meccaniche.	77
Tabella 5.3: Riepilogo studio striscia.	78
Tabella 8.1: Risultati prova 1.	127
Tabella 8.2: Risultati prova 2.	127
Tabella 8.3: Risultati prova 3.	128
Tabella 8.4: Risultati prova 4.	128
Tabella 8.5: Risultati prova 5.	129
Tabella 8.6: Risultati prova 6.	129
Tabella 8.7: Risultati prova 7.	130
Tabella 8.8: Risultati prova 8.	130
Tabella 8.9: Scostamento punti volume tra nuvola di punti ed STL ottenuto con Stampack [®]	137
Tabella 8.10: Scostamento punti trancia tra nuvola di punti ed STL ottenuto con Stampack.	138
Tabella 8.11: Scostamenti punti volume tra STL-nominale, pezzo reale-nominale (DR) e nuvola di punti-nominale (misurati su VISI).....	142
Tabella 8.12: Scostamenti punti trancia tra STL-nominale, pezzo reale-nominale (DR) e nuvola di punti-nominale (misurati su VISI).....	143
Tabella 8.13: Differenze fra scostamenti DR e scostamenti nuvola di punti-nominale per i punti volume.	144
Tabella 8.14: Differenze fra scostamenti DR e scostamenti nuvola di punti-nominale per i punti trancia.	145

Abstract

I target fondamentali di un'impresa, soprattutto di quelle operanti nel settore *manufacturing*, sono *tempi*, *qualità* e *costi*. Negli ultimi anni però, stanno diventando sempre più importanti gli aspetti energetici, ambientale e lo spreco di materie prime. Essere in grado di gestire in maniera ottimale tutte le risorse disponibili è diventato un ulteriore obiettivo da perseguire. L'idea è realizzare dei processi produttivi efficienti, studiati in modo meticoloso già in fase di progettazione. L'obiettivo dei moderni progettisti, pertanto, non è semplicemente limitarsi a realizzare un prodotto a basso costo, che funziona o ha successo, ma studiare anche il processo produttivo attraverso il quale tale prodotto viene ottenuto in modo efficiente e senza sprechi.

Questo lavoro di tesi, svolto presso l'ufficio tecnico dell'azienda Sacel Group di Ozegna (TO), nasce dall'esigenza di introdurre un software di simulazione a supporto della preventivazione e dello sviluppo del prodotto/processo di componenti in lamiera, in modo da avere un valido riscontro di natura numerica che possa supportare le idee e le ipotesi del progettista prima che vengano realizzate le attrezzature. In questa maniera, è possibile verificare a priori la fattibilità di un progetto, eseguire delle ottimizzazioni, essere più competitivi e ridurre gli sprechi di materiali ed energia. Inoltre, i risultati della simulazione possono essere sfruttati per dare chiarimenti in modo rapido, semplice ed efficace al cliente in merito a problemi riscontrati o per supportare la richiesta di eventuali modifiche, dimostrando la mancata fattibilità di una determinata geometria o di un processo.

L'obiettivo di tale lavoro di tesi è testare la bontà del software di simulazione Stampack Xpress®. Questo prodotto, sviluppato da Stampack® GmbH, è compatibile con VISI CAD ed è un software di simulazione per la formatura della lamiera o *sheet metal forming*. L'attività consiste nell'esecuzione delle simulazioni FEM parallelamente alle prove di tipo empirico. L'idea è capire quanto sia affidabile e preciso il software rispetto ai risultati reali ottenuti.

Trattandosi di uno studio di validazione dei risultati, sono state svolte le classiche prove empiriche, basate sull'esperienza. Questo tipo di procedura è ancora molto adoperata in un settore complesso come lo stampaggio lamiera in quanto le variabili che possono influire (in maniera anche importante) sul processo e sui pezzi prodotti sono tantissime. A valle delle decisioni prese sulla base dell'esperienza, sono state impostate ed eseguite le simulazioni per verificare la veridicità e la precisione dei risultati fra pezzo ottenuto dalla simulazione e pezzo stampato realmente.

In prima battuta, sono state confrontate in modo grossolano le misure eseguite con un calibro con quelle realizzate in ambiente di simulazione con gli strumenti di misura presenti nel software. Successivamente, i pezzi realizzati con le attrezzature definitive sono stati misurati in sala metrologica con una macchina di misura a coordinate ed è stata estrapolata per tre campioni la nuvola di punti. Il confronto definitivo è stato eseguito su VISI CAD, sovrapponendo ed allineando al solido nominale la nuvola di punti ed il componente

esportato da Stampack[®]. Dai risultati è emerso che per il componente oggetto di studio il simulatore adoperato, compatibilmente con la precisione dei dati inseriti, è stato in grado di fornire dei risultati piuttosto precisi ed attendibili, il che lo rende un valido supporto per la progettazione dei componenti in lamiera.

Sacel Group

Sacel Group (Figura 0.1) è un'azienda che realizza stampi progressivi e termoplastici ed opera nel settore stampaggio lamiera, stampaggio plastica, co-stampaggio, saldatura laser, assemblaggio ed automazioni.



Figura 0.1: Logo dell'azienda.

L'azienda è stata fondata nel 1975 ad Ozegna (TO). Negli anni ha subito un'importante espansione sia dal punto di vista degli stabilimenti produttivi, ma anche dal punto di vista del mercato. Attualmente la sede storica di Ozegna, dove è stato svolto il tirocinio ed il presente lavoro di tesi, è sede dell'ufficio tecnico e dell'attrezzatura; lo stabilimento produttivo italiano ha sede a San Giorgio Canavese (TO), dove ha luogo la produzione sia di componenti in lamiera che in materiale polimerico.

SACEL TOOL	SACEL MET	SACEL PLAST	SACEL ESC	SACEL MEX
Località Risera, snc 10080 Ozegna (TO) Italia	Str. del Paschetto S/N - 10090 SAN GIORGIO C.se - (TO) ITALY	Juzna Trieda, 125 00401 Kosice Slovak Republic	Acceso 3, N° 42 - Nave 2 Fracc. Industrial Benito Juárez 76120 Querétaro - MEXICO	

Figura 0.2: Attuali sedi di Sacel Group nel mondo.

Oltre alle sedi italiane, vi è uno stabilimento produttivo anche all'estero, precisamente a Kosice, in Slovacchia ed un polo logistico in Messico (Figura 0.2). Questo permette all'azienda di servire, oltre il mercato italiano ed europeo, anche il mercato asiatico ed americano e nella mappa in Figura 0.3 sono evidenziati in rosso i paesi che attualmente hanno rapporti commerciali con l'azienda.

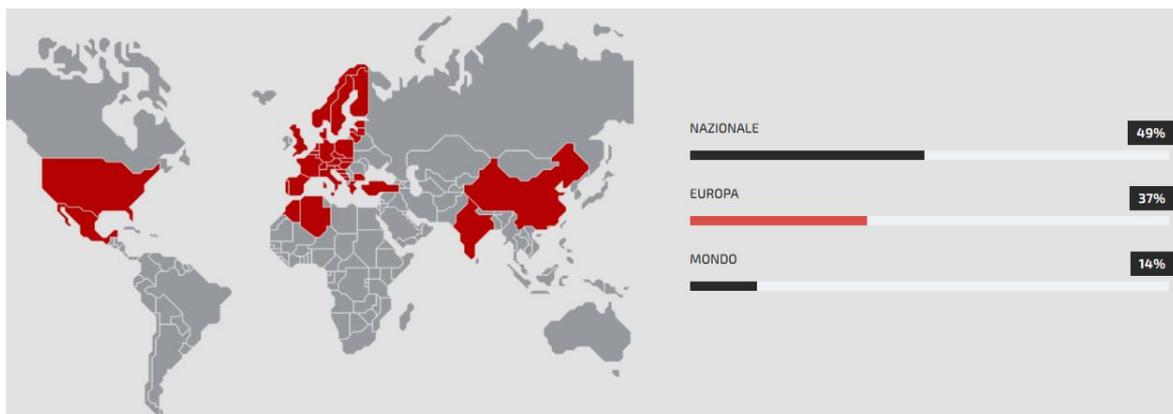


Figura 0.3: Mercato di Sacel Group.

Il settore di business più importante è sicuramente quello automotive, ma altri settori altrettanto importanti sono quello industriale e medicale (Figura 0.4). Sacel è specializzata nella produzione di componentistica elettrica e meccanica come ad esempio connettori, staffe, supporti e tanto altro ed alcuni esempi sono riportati in Figura 0.5. In ogni caso, lo stampaggio (sia lamiera che termoplastico) non si limita solo a tali settori. Basti pensare ai tanti oggetti di uso quotidiano, sia realizzati in materiale metallico che in materiale polimerico.

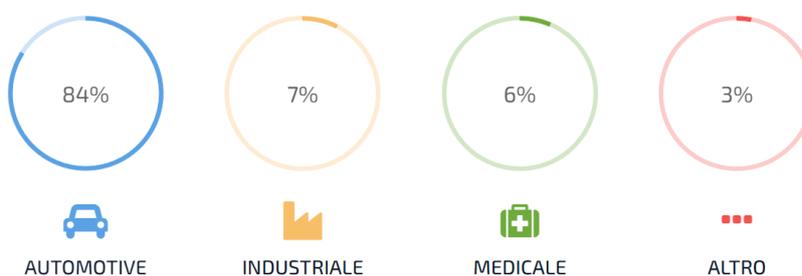


Figura 0.4: Settori di business principali.



Figura 0.5: Esempi di co-stampaggio (in alto) e componenti in lamiera (in basso).

1 Introduzione ai processi di formatura

Il presente capitolo ha l'obiettivo di fornire una panoramica sintetica sulle differenti lavorazioni per deformazione plastica. Infine, saranno confrontati tali processi con le lavorazioni convenzionali per asportazione di truciolo.

1.1 Processi di formatura a caldo e a freddo

I processi di deformazione plastica (a caldo o a freddo) hanno origini antiche e consistono nel sottoporre il materiale a carichi esterni tali da indurre una deformazione permanente.

Un processo di formatura a freddo si differenzia da quello a caldo per le temperature raggiunte dal materiale; nel primo caso la lavorazione avviene a temperatura ambiente o poco superiore, mentre nel secondo caso il grezzo viene riscaldato fino ad una temperatura superiore a quella critica di ricristallizzazione¹. Tale preriscaldamento permette di aumentare la duttilità e la lavorabilità. In Figura 1.1 è possibile osservare come la temperatura influenza fortemente le caratteristiche meccaniche del materiale.

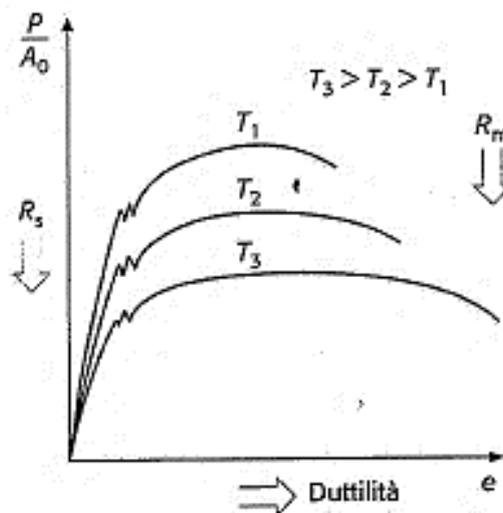


Figura 1.1: Effetti della temperatura sulle caratteristiche meccaniche del materiale [1].

Il vantaggio dei processi a caldo è che è possibile provocare forti deformazioni impiegando forze modeste (rispetto ad un processo di deformazione a temperatura ambiente), plasmando componenti con forme complesse ed elevata resistenza. Gli svantaggi sono legati alla necessità di spendere ulteriore energia per riscaldare il grezzo ed alla tempestività con la quale avviene la lavorazione per evitare che il materiale si raffreddi troppo. Inoltre, si ottengono semilavorati dalla pessima qualità superficiale, dimensionale e geometrica. Ciò è dovuto all'ossidazione che si verifica ad alta temperatura ed al fatto che questo processo

¹ Tale aspetto sarà approfondito nel sottoparagrafo 2.2.2.

esegue una formatura piuttosto grossolana. Per questo motivo, i componenti ottenuti per stampaggio a caldo o per fucinatura quasi sempre sono sottoposti a lavorazioni successive per migliorare lo stato superficiale e la precisione dimensionale e geometrica.

I componenti che vengono realizzati attraverso i processi di fucinatura e stampaggio a caldo sono in genere elementi che devono avere determinate caratteristiche resistenziali, come per esempio alberi a gomiti, alberi di trasmissione, bielle, flange eccetera. In Figura 1.2 è visibile un componente in acciaio forgiato: a sinistra il grezzo; a destra lo stesso componente dopo le lavorazioni di finitura per asportazione di truciolo.



Figura 1.2: Componente in acciaio forgiato [2].



Figura 1.3: Componente stampato a caldo [3].

Il vantaggio dei processi a freddo è che è possibile ottenere componenti con buone caratteristiche dimensionali e di finitura superficiale rispetto alle lavorazioni a caldo. Lo svantaggio consiste nel fatto che a temperatura ambiente i materiali metallici sono più resistenti e meno malleabili, pertanto sono necessarie forze elevate. Un esempio di componenti ottenuti attraverso tale processo è visibile in Figura 1.4.



Figura 1.4: Componenti ottenuti per stampaggio a freddo [4].

Lo stampaggio della lamiera è un processo che convenzionalmente avviene a freddo ed il materiale sottoposto alla lavorazione è fornito in fogli o nastri.

1.2 Confronto fra lavorazioni per deformazione plastica e per asportazione di truciolo

I processi di deformazione plastica, a differenza di quelli per asportazione di truciolo, vanno a modificare l'orientamento delle fibre del materiale. Al contrario, i processi per asportazione di truciolo non le orientano, bensì le “tranciano”, creando interruzioni in esse. Questo è uno dei motivi per cui, insieme all'incrudimento, i prodotti ottenuti per deformazione plastica hanno resistenza migliore a parità di pezzo prodotto (ovviamente se tale pezzo può essere realizzato con entrambe le lavorazioni). Inoltre, i processi di deformazione plastica consentono, grazie all'azione di compressione, di avere maggior compattezza e l'eliminazione di gran parte dei difetti interni che normalmente molti semilavorati ottenuti per fusione presentano, come ad esempio le porosità.

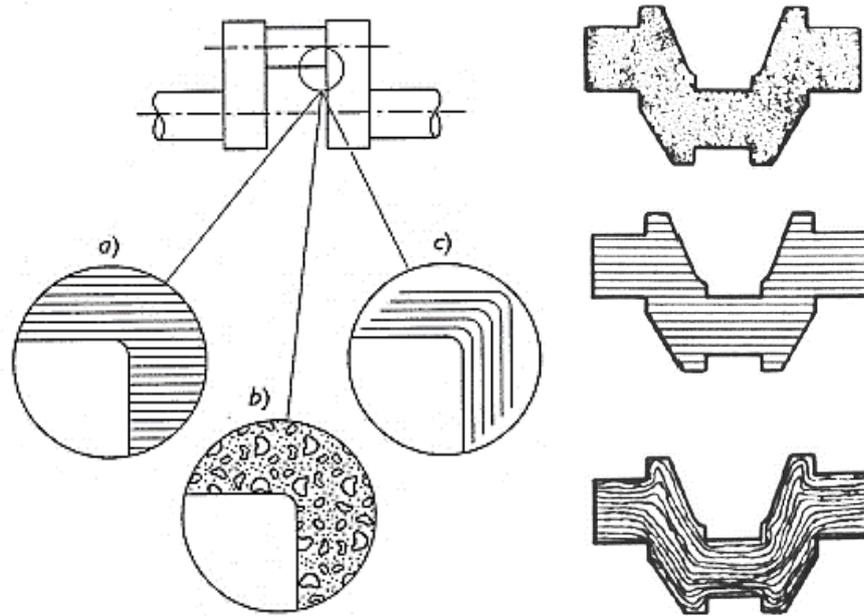


Figura 1.5: Struttura del materiale in base ai processi di fabbricazione di un albero a gomiti: a) asportazione di truciolo; b) da fusione; c) stampaggio a caldo [1].

Come è possibile notare in Figura 1.5, in base ai processi di lavorazione adoperati, si ottengono differenti strutture cristalline, il che equivale ad avere differenti proprietà dello stesso componente. Nel caso (a) si può osservare che le fibre del materiale sono interrotte ed infatti, tale componente è stato ottenuto con lavorazione alle macchine utensili da una barra. Nel caso (b) invece, si intuisce che il pezzo è stato ottenuto per fusione perché non si ha una struttura fibrosa, bensì i grani sono orientati casualmente. Infine, nel caso (c), si osserva che le fibre sono orientate secondo la geometria del pezzo; quindi, si intuisce che tale componente è stato ottenuto per deformazione plastica.

2 Materiali adoperati in ambito *sheet metal forming*

Per lamiera si intende un foglio metallico ottenuto attraverso una serie di processi di laminazione e caratterizzato da una dimensione (lo spessore) molto minore rispetto alle altre due dimensioni.

Lo stampaggio della lamiera è un processo che ricopre quasi tutti i settori della produzione industriale. Alcuni esempi, riportati anche in Figura 2.1, sono:

- Industria automobilistica (per es. portiere, cofani, parafranghi...)
- Industria aeronautica (per es. ali, fusoliera...)
- Industria degli elettrodomestici (per es. lavelli, cappe, congelatori, lavatrici...)
- Industria alimentare (per es. pentole, lattine, scatolame...)
- Settori biomedicale, elettronico...



Figura 2.1: Alcuni esempi di stampaggio lamiera [5].

2.1 Caratterizzazione dei materiali

La determinazione delle proprietà di un materiale e delle sue caratteristiche fisiche, meccaniche eccetera è fondamentale per poter capire in che ambito e per quali applicazioni può essere adoperato. Esistono tantissime tipologie di materiali, ognuno con le proprie qualità e saper individuare quello opportuno è la base di un buon progetto.

2.1.1 La prova di trazione

La prova di trazione è uno dei test più importanti per la caratterizzazione di un materiale. Essa consiste nel sottoporre a trazione un provino opportunamente lavorato, con determinate caratteristiche geometriche. Lo scopo della prova è ricavare per il materiale testato la curva sforzo-deformazione. Un esempio qualitativo per un materiale metallico è visibile in Figura 2.2.

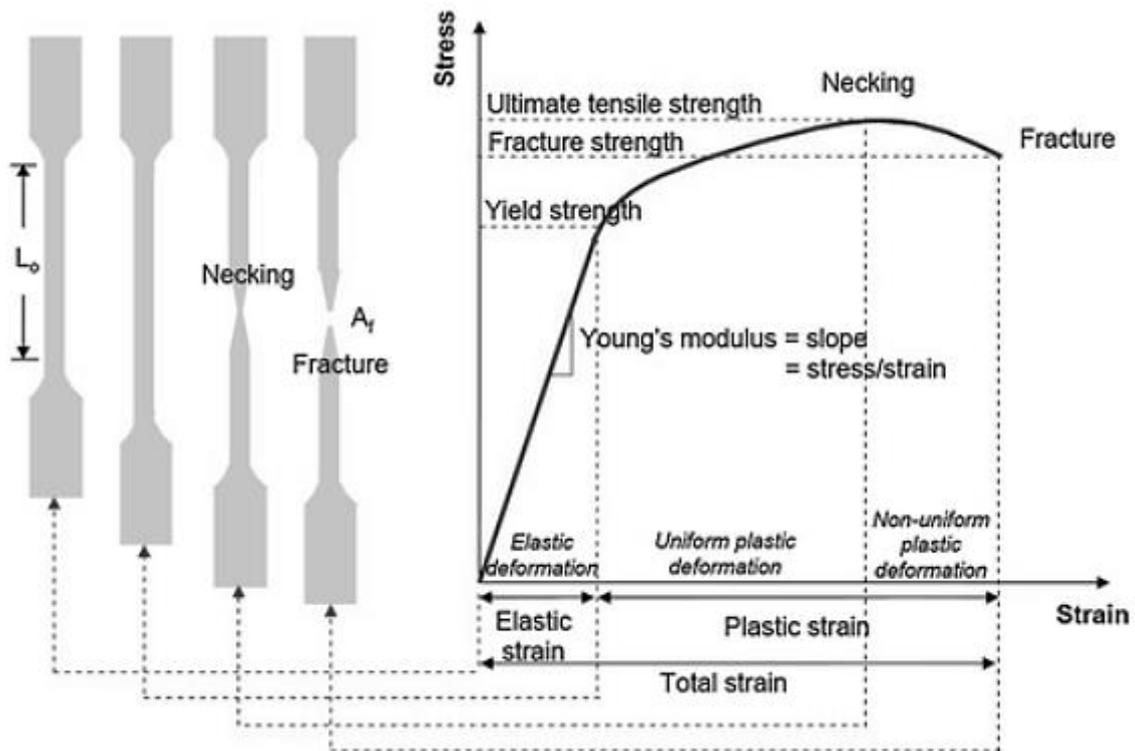


Figura 2.2: Curva Sforzo-deformazione [6].

Da tale curva è possibile ricavare tutta una serie di informazioni, alcune di fondamentale importanza, per poter scegliere correttamente un materiale e capire se può essere idoneo per una certa applicazione.

Le grandezze fondamentali che caratterizzano un materiale sono:

- Carico di rottura: σ_R oppure R_m
- Carico di snervamento: σ_{SN} oppure R_e
- Allungamento percentuale: A

La caratteristica sforzo-deformazione però può essere rappresentata in diversi modi, cioè considerando sforzi e deformazioni *vere* o *ingegneristiche*. La differenza è chiaramente nella definizione di queste grandezze. Le sollecitazioni *vere* sono ricavate considerando la sezione istantanea del provino man mano che questo si deforma. Quella *ingegneristica* invece, considera la sezione iniziale del provino nella condizione indeformata. Per questo motivo, superato il carico di rottura, la caratteristica *vera* continuerà ad avere un trend crescente; al contrario, quella *ingegneristica* avrà un andamento decrescente (Figura 2.3).

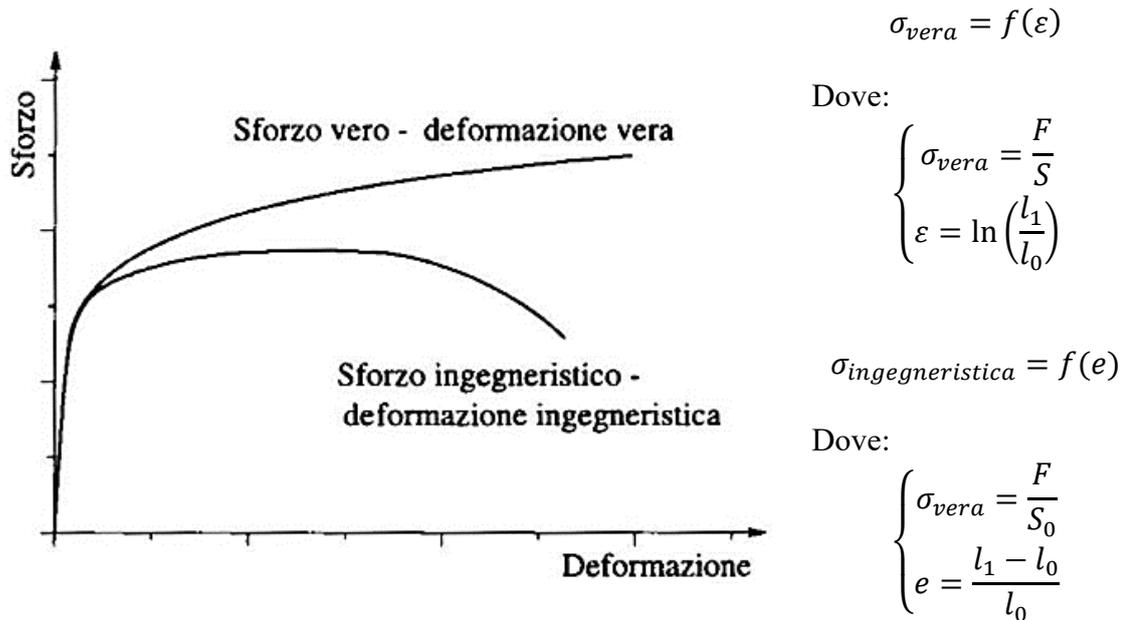


Figura 2.3: Differenza fra le caratteristiche sforzo-deformazione vera ed ingegneristica [7].

Per i materiali duttili che presentano un comportamento elastoplastico, la curva sforzo-deformazione può essere suddivisa in due tratti distinti, caratterizzati da andamenti e comportamenti del materiale differenti. Le zone sono:

- Tratto in campo lineare o campo *elastico*.
- Tratto in campo *non* lineare o campo *plastico*.

La zona di transizione è quella in cui inizia a manifestarsi lo snervamento.

Molto spesso, non si è in grado di individuare un tratto della caratteristica tale da poter ricavare un valore preciso del carico di snervamento. Per questo motivo viene adoperato il carico di snervamento allo 0.2% o $Rp_{0.2}$, cioè la sollecitazione che comporta una deformazione plastica dello 0.2%. Tale carico viene determinato tracciando una parallela al tratto elastico come illustrato in Figura 2.4. Il valore di $Rp_{0.2}$ sarà dato dall'intersezione tra questa retta e la caratteristica, leggendolo sull'asse delle ordinate [6].

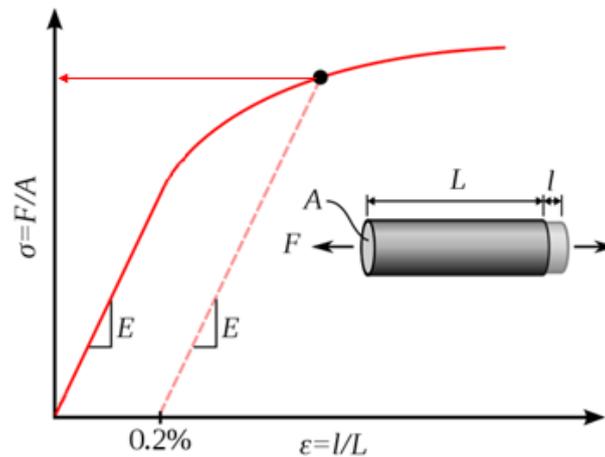


Figura 2.4: Determinazione del carico $R_{p0.2}$ [7].

Il tratto elastico è determinato da una legge di tipo lineare, detta legge di Hooke, che lega sforzi e deformazioni:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Dove:

- E : modulo di Young o modulo di elasticità ed è espresso in [MPa]
- ε : è la deformazione relativa al solo tratto elastico ed è una grandezza adimensionale.

Nell'ambito dei processi di deformazione plastica, il tratto di interesse della caratteristica sforzo-deformazione è quello non lineare. Per correlare in maniera analitica sforzi e deformazioni, si utilizzano le grandezze reali o vere. In questo modo, la caratteristica può essere descritta dalla legge di Hollomon o legge di flusso plastico, che è una legge di tipo esponenziale (Figura 2.5).

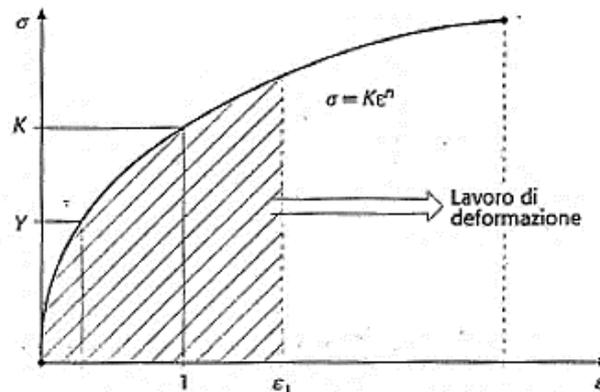


Figura 2.5: Curva di incrudimento [1].

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n$$

Dove:

- σ : sollecitazione *vera*
- ε : deformazione plastica (logaritmica)
- K : coefficiente di resistenza e rappresenta una tensione [MPa]
- n : esponente di incrudimento

I coefficienti K ed n vengono ricavati anch'essi dalla prova di trazione, andando a riportare ed interpolare i dati sperimentali ottenuti su un grafico di tipo logaritmico. Su scala logaritmica il tratto della caratteristica in campo plastico può essere trattato come una retta avente una certa inclinazione ed una certa ordinata all'origine. Alla luce di ciò, il coefficiente di resistenza K rappresenta l'ordinata per $\varepsilon=1$, mentre n rappresenta la pendenza (Figura 2.6).

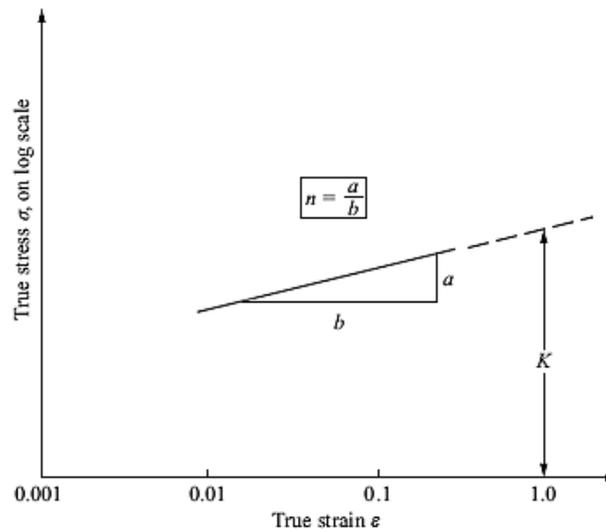


Figura 2.6: Curva di incrudimento riportata in scala logaritmica [8].

Altre proprietà del materiale che possono essere dedotte dalla caratteristica sforzo-deformazione sono (Figura 2.7):

- **Rigidezza:** è la capacità del materiale ad opporsi alla deformazione elastica. Questa proprietà è legata alla pendenza del tratto lineare, quindi al modulo di Young.
- **Duttilità:** è la capacità del materiale di deformarsi plasticamente prima di raggiungere la rottura. Tale proprietà dipende dall'estensione della caratteristica meccanica lungo l'asse delle ascisse.
- **Malleabilità:** è la capacità del materiale di subire importanti deformazioni plastiche, senza manifestare forti incrudimenti. Tale proprietà è funzione della pendenza del primo tratto della caratteristica in campo plastico.

- Resistenza meccanica: è la massima sollecitazione che il materiale è in grado di sopportare, oltre la quale si manifesta la rottura. La resistenza meccanica è associata al carico di rottura.
- Tenacità: è la capacità del materiale di assorbire energia in campo plastico, senza che si manifestino rotture. Questa proprietà è legata all'area sottesa alla caratteristica.

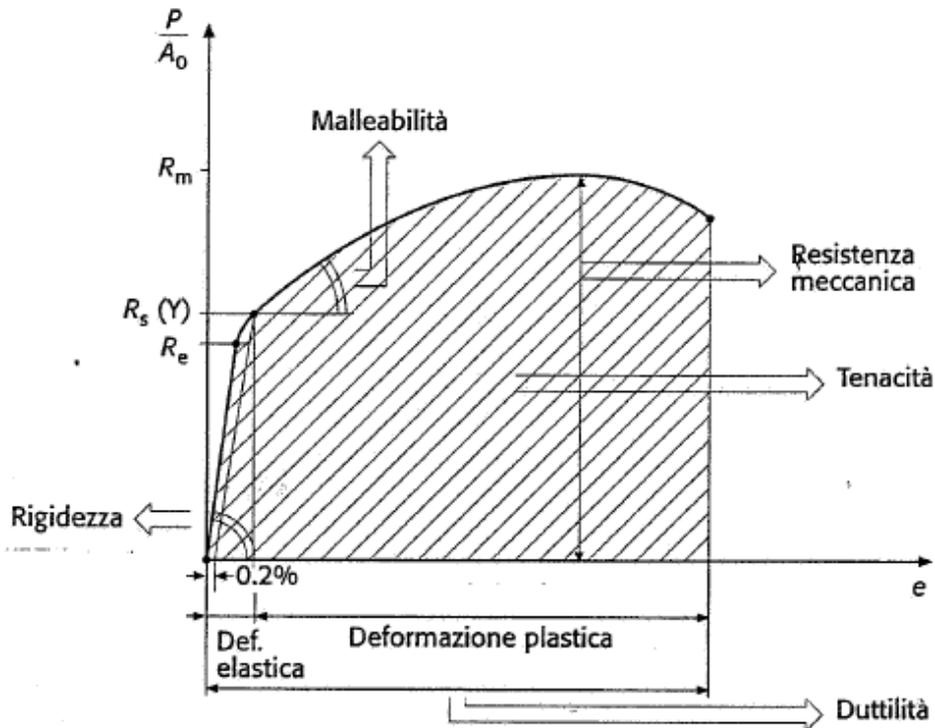


Figura 2.7: Alcune proprietà deducibili dal diagramma sforzo-deformazione [1].

2.1.2 Forming Limit Diagram (FLD)

Il *forming limit diagram* (FLD) è uno strumento fondamentale per lo studio dei componenti stampati. In base allo stato di deformazione che si ottiene in una determinata zona della lamiera in seguito all'operazione di formatura, il diagramma offre una rappresentazione grafica di tale condizione rispetto ad una curva limite, ottenuta attraverso dei test eseguiti sullo stesso materiale.

La curva sopra citata è detta *curva limite di formabilità* (CLF), cioè è il luogo dei punti ottenuti da coppie di deformazioni critiche, al variare delle dimensioni del provino ed è funzione del materiale e dello spessore della lamiera. Tale curva suddivide la regione inferiore "sicura" da quella superiore di "cedimento". Se una regione della lamiera presenta una combinazione di deformazioni tale da essere al di sopra della caratteristica limite, il materiale si rompe.

L'ottenimento di tale curva per la caratterizzazione dei materiali dal punto di vista della formabilità non è affatto semplice. È previsto, infatti, un procedimento molto più laborioso e costoso rispetto alla classica prova di trazione. Sulla superficie della lamiera viene impressa una griglia (per esempio attraverso processi elettrochimici) costituita da cerchi dello stesso diametro che, dopo la deformazione, si distorcono ed assumono una forma ellittica (Figura 2.8). La prova viene eseguita utilizzando una serie di provini con diverse geometrie in modo da ottenere differenti stati di deformazione. In base allo stato di deformazione, si ha una determinata distorsione dei cerchi che costituiscono la griglia. Gli utensili adoperati sono un punzone semisferico opportunamente lubrificato, che esercita sul provino un'azione tale da innescare una frattura ed un prelamiera che blocca, insieme alla matrice, il perimetro del provino. La deformazione di tale griglia nella regione vicino alla zona danneggiata consente di determinare lo stato di deformazione critico.



Figura 2.8: Griglia impressa su un provino [9].

Ciò che viene riportato sul diagramma sono le deformazioni maggiore e minore delle ellissi, misurate lungo la direzione degli assi maggiore e minore delle stesse, come in Figura 2.9. I vari stati di deformazione possono essere individuati sul FLD in base ai valori assunti dalle deformazioni. In Figura 2.10 è visibile un esempio qualitativo di FLD su cui è riportata una curva limite. Come è possibile osservare, la geometria dei provini è correlata allo stato di deformazione e quindi al modo con cui il singolo cerchietto impresso sul provino si deforma.

In Figura 2.11 sono visibili, sempre da un punto di vista qualitativo, le varie zone presenti sul FLD.

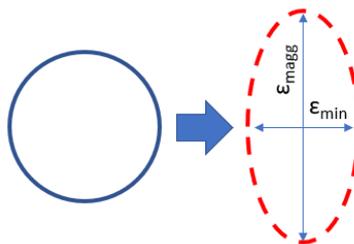


Figura 2.9: Deformazione dell'elemento circolare della griglia.

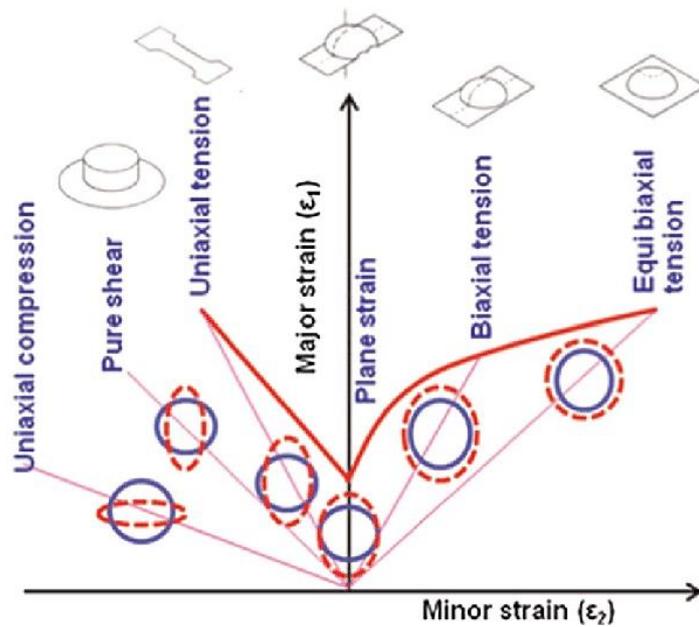


Figura 2.10: Forming limit diagram [10].

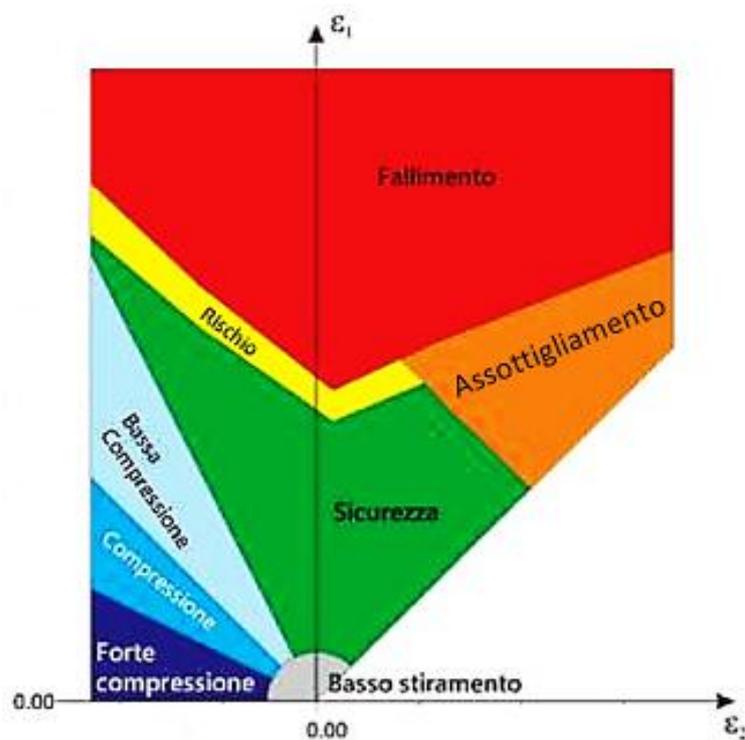


Figura 2.11: Differenti zone che caratterizzano il FLD (guida software Stampack®).

Esistono diversi metodi e tipologie di test per la determinazione della curva limite. Uno di questi, molto adoperato e conosciuto è la prova Nakajima o *Nakajima test*. La geometria dei provini adoperati in questo test è visibile in Figura 2.12. Lo schema della macchina per l'esecuzione del test è riportato in Figura 2.13. La macchina, attraverso un sistema ottico costituito da due telecamere che si interfacciano con un software dedicato, acquisisce i fotogrammi della superficie del provino durante tutta la durata del test. Il software,

elaborando i fotogrammi, è in grado di fornire il valore delle deformazioni critiche e quindi permette di costruire la curva limite.

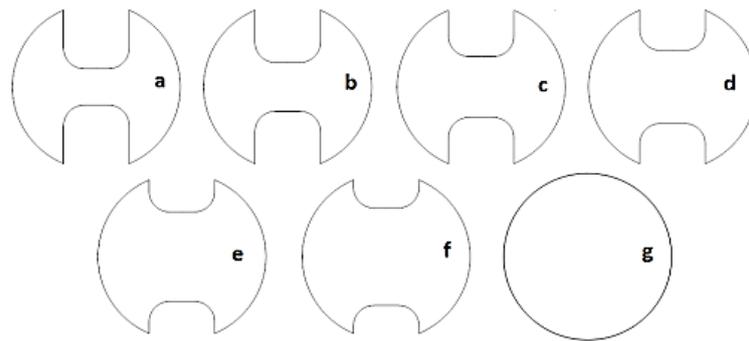


Figura 2.12: Geometrie dei vari blank dei provini per la prova Nakajima. Il provino (a) permette di ricreare lo stato di tensione uniassiale di trazione; il provino (g) permette di ottenere uno stato di tensione biassiale di trazione [11].

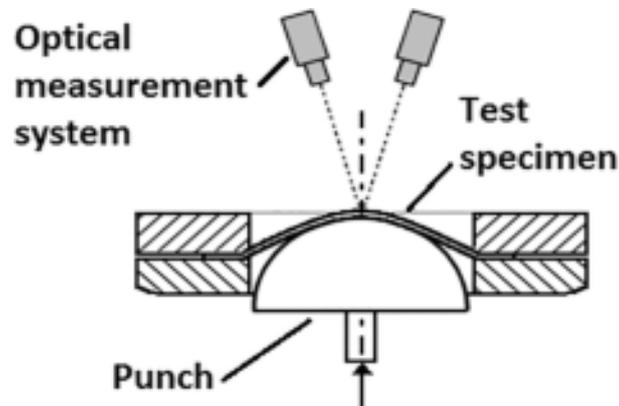


Figura 2.13: Schema della macchina per la prova Nakajima [12].

2.2 Ottenimento dei coils

I semilavorati adoperati in ambito *sheet metal forming*, sono forniti sottoforma di lamiere piane o rotoli di lamiera, anche detti *coils*. Un coil viene realizzato sottoponendo ad una serie di processi di laminazione una bramma, al fine di ottenere dei nastri con determinate caratteristiche dimensionali e meccaniche, in modo da essere idonei ai processi di stampaggio lamiera.

2.2.1 Direzione di laminazione e dimensione dei grani

Il processo di laminazione del materiale, soprattutto se eseguito a freddo, determina un'importante deformazione dei grani. Questi, infatti, tenderanno ad essere schiacciati ed

allungati nella direzione di laminazione, come in Figura 2.14. In seguito a questo processo, la lamiera ottenuta avrà delle proprietà differenti (che verranno evidenziate in seguito) rispetto al grezzo di partenza. Molto spesso, l'ultimo step di laminazione a cui le lamiere sono sottoposte è detto *skin pass*. Questa particolare laminazione viene eseguita a freddo, con un tasso di riduzione dello spessore molto piccolo, circa del 2%. Lo *skin pass* si esegue per la regolazione e controllo dello spessore del nastro, per il controllo della finitura superficiale e per l'ottenimento di un leggero incrudimento della sola pelle della lamiera, in modo da aumentarne leggermente le proprietà meccaniche.

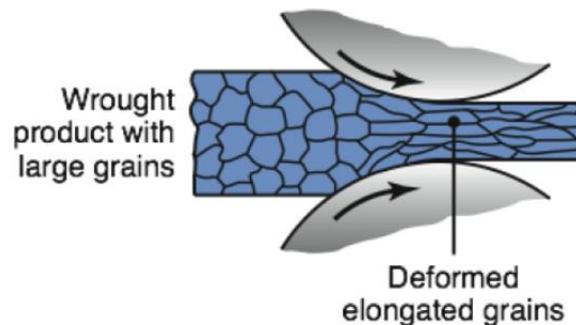


Figura 2.14: Laminazione per l'ottenimento dei nastri [13].

La direzione di laminazione influisce sulla propensione del materiale a generare cricche in funzione delle deformazioni e delle operazioni eseguite. Ad esempio, nel caso di un'operazione di piegatura, se la linea di piega viene generata parallelamente alla direzione di laminazione, la probabilità che si manifestino fratture durante il processo di piega può risultare elevato; al contrario, la probabilità è più bassa se la linea di piega è orientata perpendicolarmente alla direzione di laminazione, come in Figura 2.15.

Tale fenomeno è maggiormente accentuato quando la lamiera è poco duttile.

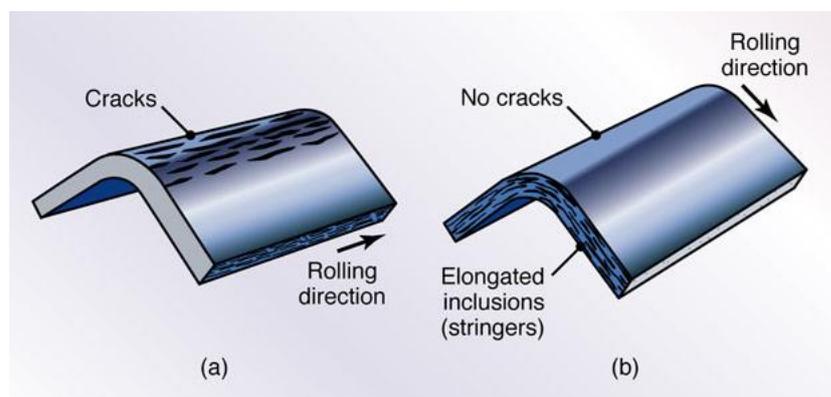


Figura 2.15: Piegatura e direzione di laminazione: (a) la piega è stata eseguita parallelamente alla direzione di laminazione ed ha dato luogo a fratture; (b) è stata eseguita la stessa piega ma ortogonalmente alla direzione di laminazione [13].

2.2.2 Trattamenti termici

Dal punto di vista dei trattamenti termici, la ricottura subcritica è un processo che in genere viene sempre eseguito a seguito di lavorazioni per deformazione plastica importanti. Tale trattamento si esegue per ridurre lo stato di incrudimento e/o tensione residua del materiale ed è detta subcritica perché il riscaldamento (prendendo a titolo di esempio gli acciai, Figura 2.16) avviene fino a temperature di poco inferiori ad A_{e1}^2 , cioè una temperatura tale da non indurre trasformazioni di fase.

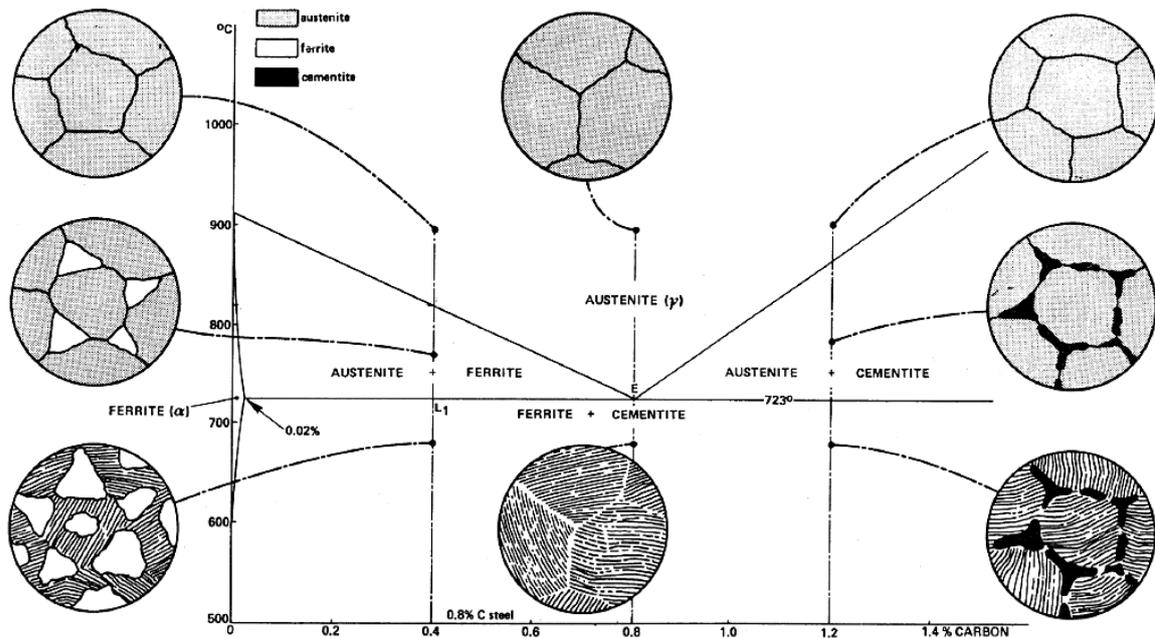


Figura 2.16: Diagramma Fe-C (regione di esistenza degli acciai) (Appunti Politecnico di Torino).

La deformazione a freddo comporta l'aumento della concentrazione dei difetti reticolari (dislocazioni) e la deformazione dei grani cristallini, che assumono una forma ed un orientamento cristallografico anisotropo.

Durante la ricottura, dal punto di vista macroscopico, si ottiene la distensione del materiale e l'eliminazione delle tensioni residue. Dal punto di vista microscopico invece, all'aumentare della temperatura e del tempo di trattamento si verificano in successione le seguenti fasi (Figura 2.17):

- 1) recovery: riduzione della concentrazione dei difetti a livello reticolare; distensione del materiale.
- 2) ricristallizzazione: nucleazione di nuovi grani, quasi privi di difetti. Questa fase determina l'eliminazione della texture.

² A_{e1} corrisponde, nel diagramma di stato Ferro-Carbonio, alla temperatura eutettoidica ed è pari a circa 723°C

3) accrescimento dei grani: crescita o aumento della dimensione media dei nuovi grani.

In genere però, l'obiettivo di tale ricottura è il recovery. L'accrescimento dei grani è indesiderato e si cerca inoltre di mantenere la texture ottenuta dal processo di laminazione per continuare ad avere un materiale anisotropo.

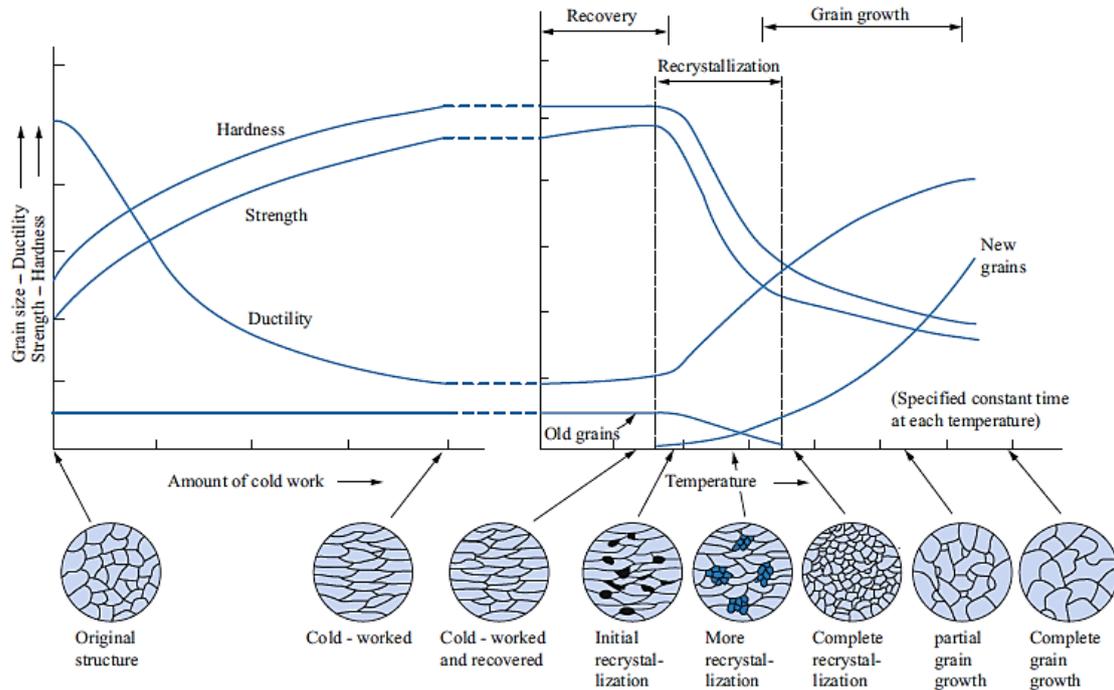


Figura 2.17: Effetto del ciclo di lavorazione a freddo e conseguente ricottura sulle proprietà meccaniche e sulla microstruttura [8].

Nel caso della produzione di lamiere sottili si esegue la laminazione a freddo, la quale comporta un forte incrudimento del materiale. In queste situazioni, per esempio, la ricottura è fondamentale per eliminare le tensioni residue e consentire alla lamiera di poter essere sottoposta a processi di formatura successivi senza problemi.

2.3 Proprietà che caratterizzano i materiali adoperati in ambito sheet metal forming

2.3.1 Anisotropia

Un materiale è detto anisotropo quando le sue proprietà tensili dipendono dalla direzione lungo la quale vengono considerate. L'anisotropia è dovuta alla *texture*, cioè all'orientazione cristallografica del materiale e dalla dimensione dei grani.

In Figura 2.18 è possibile osservare come vengono ottenuti i diversi provini per la caratterizzazione di un materiale anisotropo. I provini sono ricavati dal nastro con diversi orientamenti rispetto a quello di laminazione e vengono sottoposti a prova di trazione.

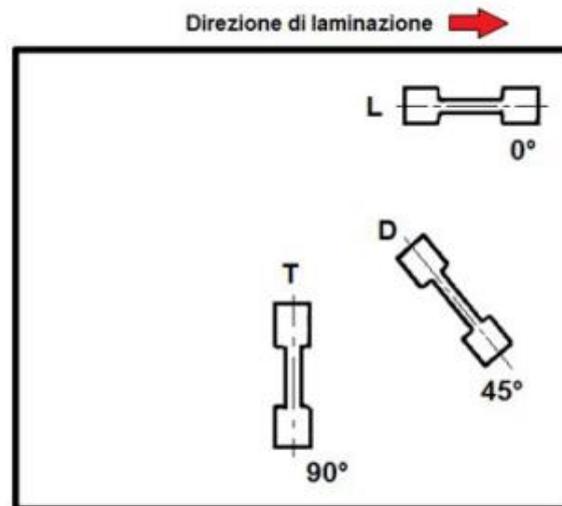


Figura 2.18: Ottenimento dei provini per materiali anisotropi [14].

Le lamiere utilizzate nei processi di imbutitura, per esempio, vengono prodotte anisotrope in modo da non avere una deformazione eccessiva nella direzione dello spessore, affinché non si verificano assottigliamenti o strappi durante il processo stesso.

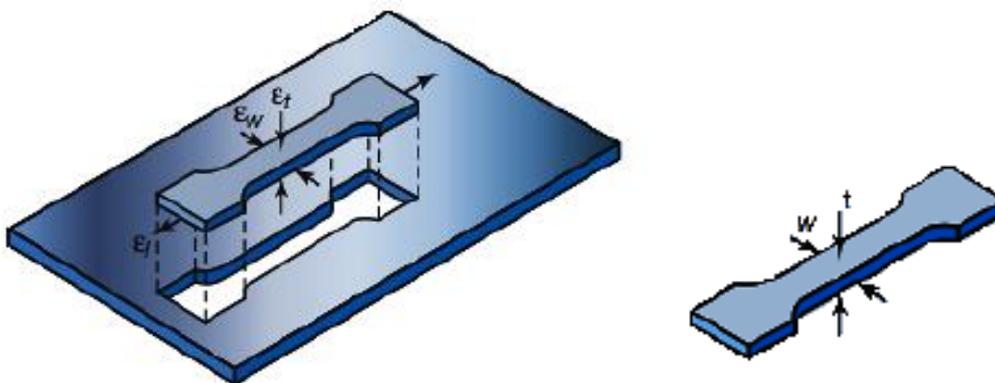


Figura 2.19: Provino con indicazione delle dimensioni (a destra) e deformazioni (a sinistra).

Per quantificare l'anisotropia di un materiale, vengono introdotti degli indici di anisotropia che sono:

- Indice di anisotropia normale:

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \left(\frac{w_0}{w_f} \right)}{\ln \left(\frac{t_0}{t_f} \right)}$$

Dove ε_w ed ε_t sono rispettivamente le deformazioni logaritmiche sulla larghezza e sullo spessore del provino, come visibile in Figura 2.19.

- Indice medio di anisotropia normale:

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2 \cdot R_{45}}{4}$$

- Indice medio di anisotropia planare:

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2 \cdot R_{45}}{4}$$

Dove i pedici 0,45,90 indicano l'orientamento del provino rispetto alla direzione di laminazione. Per poter ottenere tali termini, vengono ricavati dei provini (L, D, T) dal foglio di lamiera come in Figura 2.18.

Per un materiale:

- Perfettamente isotropo: $R_0 = R_{90} = R_{45} = 1$; $\bar{R} = 1$; $\Delta R = 0$
- Anisotropo solo nello spessore (anisotropia normale): $R_0 = R_{90} = R_{45} \neq 1$
- Anisotropo anche nel piano (anisotropia planare): $R_0 \neq R_{90} \neq R_{45} \neq 1$

2.3.2 Incrudimento

Un altro aspetto importantissimo che caratterizza i processi di deformazione plastica è l'incrudimento. Uno dei motivi per cui le lavorazioni per deformazione plastica a freddo danno luogo a manufatti più resistenti è proprio grazie a questo meccanismo di rafforzamento.

L'azione della deformazione oltre il limite elastico provoca, a livello atomico, un aumento della densità delle dislocazioni e la distorsione del reticolo cristallino. L'effetto che ne consegue è che per poter continuare a deformare il materiale è necessario un incremento della forza esterna applicata. Tale fenomeno è fortemente connesso alla temperatura in quanto, se il materiale viene sottoposto a riscaldamento, si ottiene il processo di recovery e ricristallizzazione, che porta all'eliminazione di questi difetti reticolari, come descritto nel paragrafo 2.2.2.

Dal punto di vista delle proprietà del materiale, si ha un aumento della resistenza ma si verifica anche una riduzione della duttilità. Questo fenomeno porta con sé vantaggi e svantaggi:

- Vantaggi:

Nello stampaggio a freddo, come già accennato, i pezzi hanno maggior resistenza di quelli ottenuti per fusione o asportazione di truciolo, a parità di materiale e dimensioni.

- Svantaggi:

Se sono necessarie elevate deformazioni per ottenere il pezzo finito, al fine di limitare l'usura delle attrezzature, le forze in gioco e soprattutto evitare rotture del materiale, allora può risultare necessario suddividere l'operazione di formatura in più fasi ed eseguire dei processi di ricottura intermedi. Questo per consentire la distensione del materiale, cioè l'eliminazione delle tensioni residue post formatura in modo da stabilizzare il reticolo cristallino.

Dal punto di vista analitico, l'incrudimento di un materiale è racchiuso all'interno dell'esponente n . Al di là del rafforzamento, il coefficiente di incrudimento è legato al limite di stabilità del materiale. Più è elevato tale coefficiente, maggiore sarà la capacità del materiale di potersi deformare, senza raggiungere la condizione di incipiente strizione. La strizione inizia a manifestarsi per un valore della deformazione logaritmica $\varepsilon = n$.

2.4 Materiali da stampaggio lamiera

Nei seguenti sottoparagrafi sono descritte le caratteristiche di interesse di un materiale sulla base delle quali si valuta se esso è idoneo o meno ad un determinato processo di formatura. Inoltre, è riportata una sintetica classificazione dei materiali più comuni ed ampiamente utilizzati nell'ambito dello stampaggio lamiera.

2.4.1 Scelta dei materiali

Più l'operazione di formatura è critica, migliore dovrà essere la qualità della lamiera da adoperare. Per "qualità" si intende la capacità della lamiera di poter essere sottoposta a processi di formatura anche piuttosto critici, senza che si manifestino rotture. Gli aspetti da considerare per la scelta del materiale, in relazione anche alla criticità delle lavorazioni da eseguire (per esempio imbutiture profonde o semplice tranciatura), sono:

- Allungamento percentuale: se la lamiera deve subire forti deformazioni, quali imbutiture profonde, è fondamentale che il materiale si deformi senza strapparsi. Un elevato allungamento percentuale consente di ampliare il range di deformazioni ammissibili.
- Coefficiente di incrudimento: maggiore è il coefficiente di incrudimento, migliore sarà la propensione della lamiera a poter subire importanti deformazioni perché aumenta il limite di stabilità, legato alla condizione di inizio strizione. Questo significa che, a parità di operazione e parametri di processo, una lamiera con più alto coefficiente di incrudimento manifesterà la strizione per valori di deformazione più elevati.

- Anisotropia: maggiore è l'anisotropia e minore è l'assottigliamento o riduzione di spessore della lamiera quando questa viene formata.

2.4.2 Principali tipologie adoperate

I materiali utilizzati in ambito sheet metal forming sono molto vari e vengono scelti sulla base delle applicazioni a cui sono destinati. A causa delle numerose tipologie e differenze esistenti, sarà approfondito soltanto il materiale oggetto di studio nel paragrafo successivo, cioè l'acciaio inossidabile "AISI430".

Una possibile classificazione può essere la seguente:

- Lamiera d'acciaio [15], [16]:
 - Acciai semplici, a basso tenore di carbonio laminati a freddo per imbutitura o piegamento a freddo: DCxx.

Questi acciai non legati, a basso tenore di carbonio sono classificati in ordine crescente di formabilità (DC01 – DC06). All'aumentare della formabilità si ha una riduzione del tenore di carbonio. Trovano impiego in settori quali: automotive, elettrodomestici, minuterie, mobili metallici, caldaie e radiatori. Risultano essere molto economici e versatili.

- Acciai semplici, a basso tenore di carbonio laminati a caldo per imbutitura o piegamento a freddo: DDxx.

Anche questi sono classificati in ordine crescente di formabilità e possono pertanto essere utilizzati nelle diverse lavorazioni a freddo, dagli stampaggi meno critici (DD11) fino alle imbutiture profonde (DD14).

- Acciai altoresistenziali microlegati (HSLA: *High Strength Low Alloy*): HCxxxLA.

Sono acciai microlegati (con Ti, Nb, V), caratterizzati da un basso contenuto di carbonio (circa 0.1%). Il rafforzamento si ha per precipitazione di seconde fasi. Sono dotati di elevata duttilità, alto limite di snervamento e resistenza meccanica grazie alla microstruttura a grano fine.

- Acciai Bake Hardening (BH): HCxxxB.

Questa particolare categoria di acciai (a basso contenuto di carbonio) è caratterizzata dal fatto di essere facilmente deformabili durante la fase di formatura ed il rafforzamento avviene per incrudimento post lavorazione e per invecchiamento in forno. Questi acciai sono stati infatti studiati soprattutto per il settore automotive in quanto, il trattamento in forno consente di completare il processo di verniciatura e migliorare le caratteristiche meccaniche.

- Acciai Interstitial Free (IF): HCxxxY.

Sono acciai detti *interstitial free* proprio perché privi di elementi interstiziali, infatti, sono caratterizzati da un bassissimo tenore di carbonio (al massimo 0.01%). Vengono aggiunti elementi quali titanio o niobio che migliorano le caratteristiche meccaniche e consentono di preservare la texture.

- Acciai per impieghi strutturali: Sxxx.

La parte numerica della sigla che segue la lettera S si riferisce al carico di snervamento del materiale. La caratteristica di questi acciai è che presentano una buona saldabilità.

- Acciai laminati a caldo ad alto limite di snervamento: Sxxx.

Sono acciai a grano fine e hanno un carico di snervamento piuttosto importante rispetto agli acciai per impieghi strutturali, ma presentano comunque una buona duttilità. Vengono adoperati in applicazioni laddove è richiesta elevata resistenza e basso peso.

- Acciai inossidabili.

- Leghe d'alluminio: queste leghe, insieme all'acciaio, sono piuttosto utilizzate nel settore stampaggio lamiera perché presentano in genere una buona formabilità anche a freddo³ e si prestano bene in molte applicazioni in quanto sono leggere, relativamente resistenti e conducono bene il calore. Vengono realizzati in lega di alluminio dissipatori termici, cover, scocche ed involucri di protezione, lattine eccetera.
- Rame e leghe: il rame e le sue leghe in genere possiedono una buona duttilità ed una buona propensione alle deformazioni plastiche. La scelta del rame per prodotti stampati non dipende però quasi mai dalle caratteristiche di formabilità, bensì dalla conducibilità termica ed elettrica. Infatti, essendo questa branca di materiali particolarmente costosa, i prodotti che si realizzano sono quasi sempre contatti elettrici e raramente dissipatori termici.
- Leghe di titanio: L'utilizzo delle leghe di titanio nel settore stampaggio lamiera è abbastanza raro ed alcuni dei motivi sono i costi della materia prima e la pessima lavorabilità. L'impiego di queste leghe, così come per il rame, dipende dalle particolari proprietà che il titanio possiede e cioè ottima biocompatibilità, resistenza alla corrosione e rapporto modulo di Young/densità (E/ρ) paragonabile con quello dell'acciaio. I prodotti che possono essere ottenuti per stampaggio lamiera con queste leghe sono per esempio componenti del settore aeronautico, automotive, biomedicale.

³ La propensione delle leghe di alluminio ad essere deformate plasticamente a freddo è strettamente legata innanzitutto al tipo di lega (serie 1xxx, 5xxx...), ma anche allo stato metallurgico (O, H...). Pertanto, alcune si prestano meglio rispetto ad altre ai processi di deformazione plastica.

2.4.3 Acciaio inossidabile ferritico AISI430

Gli acciai inossidabili sono leghe ferrose contenenti una percentuale significativa di cromo (dal 10% circa in su). Oltre al cromo, vengono aggiunti altri elementi chimici come il nichel e il molibdeno. Il punto di forza di questa categoria di acciai è la resistenza alla corrosione, sia a umido (in presenza di soluzioni acide/basiche e saline) che ad alta temperatura [17].

Gli acciai inossidabili sono largamente usati in tantissimi settori, soprattutto quello alimentare, industriale, chimico, biomedicale, navale e per alcune applicazioni per alta temperatura.

Gli acciai inossidabili possono essere classificati in acciai inossidabili austenitici, ferritici, martensitici, austeno-ferritici (anche detti bifasici o *Duplex*). Queste tipologie si differenziano fra loro in funzione della percentuale di elementi in lega presenti. Il diagramma di Schaeffler in Figura 2.20 riporta la posizione delle regioni di esistenza di queste tipologie di acciai inox in funzione di due parametri detti nichel e cromo equivalente, le cui definizioni sono riportate sugli assi.

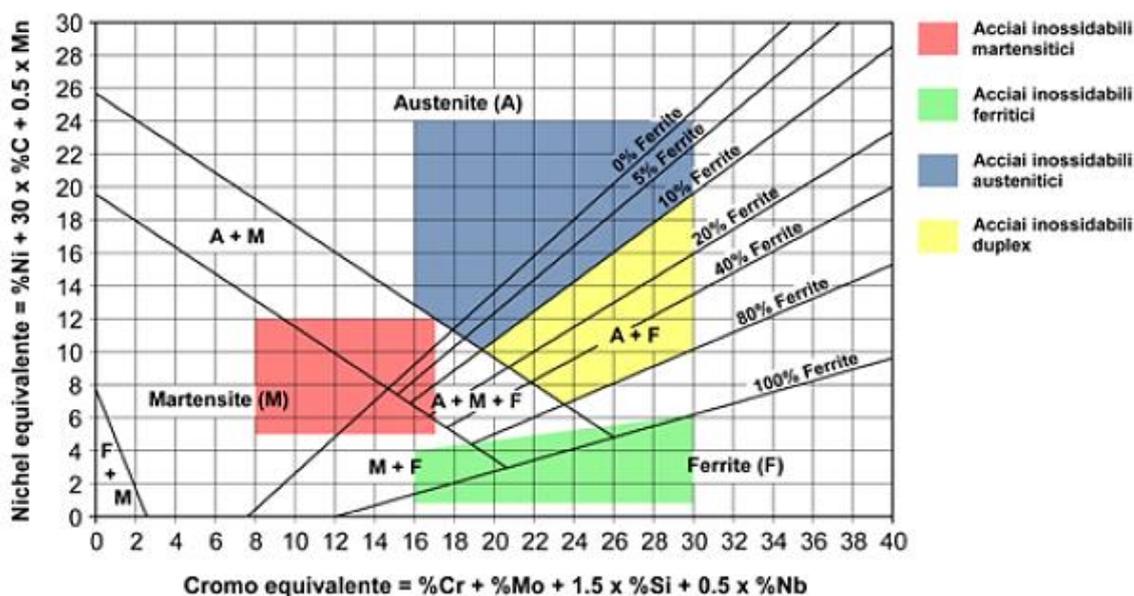


Figura 2.20: Diagramma di Schaeffler [17].

Focalizzando l'attenzione sugli acciai inossidabili di tipo ferritici, la regione di esistenza all'interno della quale ricade questa tipologia è quella in verde. Uno degli acciai ferritici di uso comune è l'AISI 430 o X6Cr17.

In Figura 2.21 è visibile uno schema che riporta le differenti tipologie di acciai inox ferritici (partendo dalla stessa base comune ovvero l'X6Cr17) in funzione delle differenti quantità di elementi in lega per ottenere particolari proprietà.

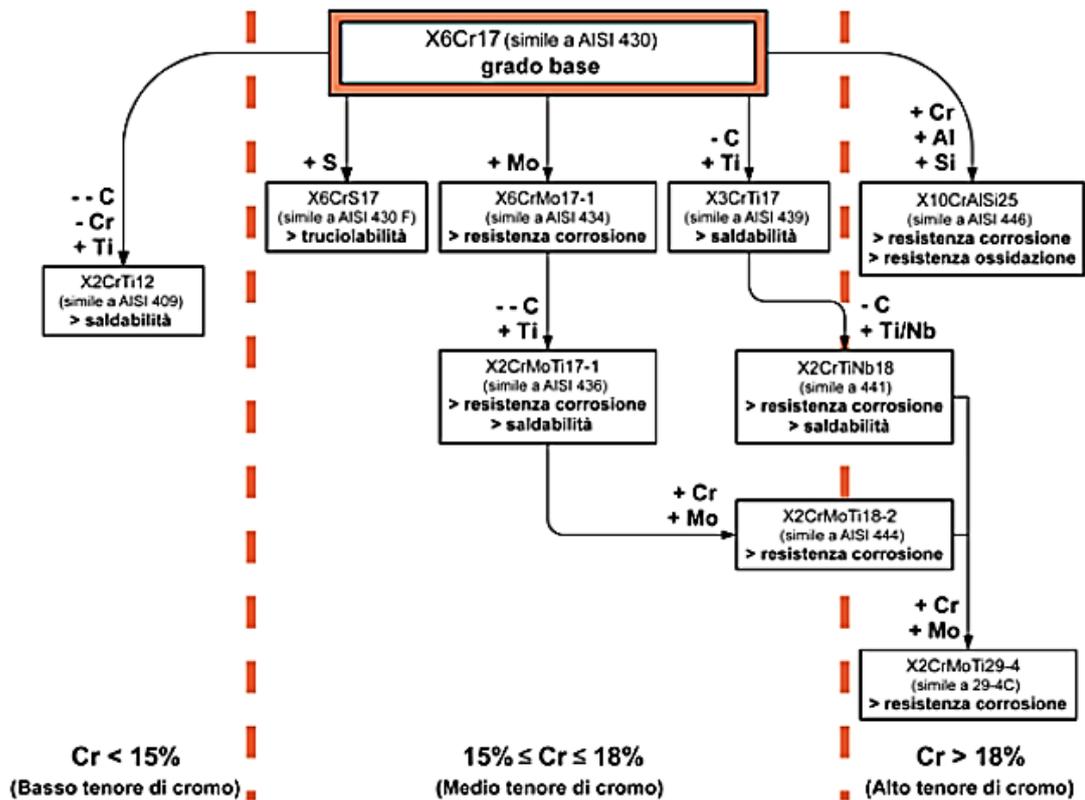


Figura 2.21: Schema dei principali tipi di acciai inossidabili ferritici a partire dall'X6Cr17 [17].

Facendo un rapido calcolo del cromo e nichel equivalente, è possibile ottenere le coordinate relative alla posizione dell'acciaio preso in considerazione rappresentate sul diagramma di Schaeffler.

La percentuale di carbonio è molto bassa e questo implica una serie di conseguenze:

- Il carbonio è un forte austenitizzante⁴ quindi, al fine di ottenere un acciaio di tipo ferritico, è necessario limitare tale elemento. Dal diagramma in Figura 2.22 è possibile osservare come alcuni elementi vanno ad influenzare in maniera più o meno importante le regioni di esistenza di ferrite ed austenite.

⁴ Per elemento austenitizzante si intende un alligante in grado di aumentare, in base alla sua percentuale in peso all'interno della lega, la regione di esistenza dell'austenite. Il carbonio è un forte austenitizzante. Analogamente, un elemento ferritizzante è un alligante in grado di ampliare la regione di esistenza della ferrite. L'alluminio è un forte ferritizzante.

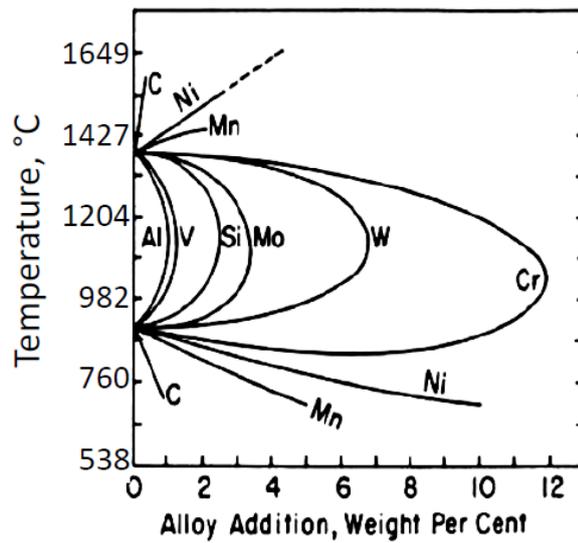


Figura 2.22: Diagramma che mostra, in funzione della percentuale di elementi in lega, la dimensione delle regioni di esistenza dell'austenite e della ferrite (Appunti Politecnico di Torino).

- La riduzione della percentuale di carbonio permette di mantenere una certa duttilità, la quale è fondamentale nei processi di formatura a freddo.
- Essendo in campo ferritico, tale acciaio non può subire alcun trattamento termico. L'unico trattamento che può essere effettuato è la ricottura.

3 Stampaggio della lamiera

Esistono diversi processi di formatura delle lamiere, alcuni particolarmente complessi ed innovativi, altri di nicchia. Le lavorazioni di base più comuni ma allo stesso tempo più importanti sono tranciatura, piegatura ed imbutitura e saranno descritte in dettaglio in questo capitolo.

3.1 Tranciatura

La tranciatura è un'operazione che ha come obiettivo quello di ritagliare dal nastro di lamiera una sagoma piana avente il profilo desiderato. È un processo che può essere applicato sia nelle prime fasi di stampaggio lamiera poiché permette di iniziare a forare, liberare dal materiale alcune zone del blank che possono essere piegate nelle fasi successive, ma anche nelle fasi intermedie e finali, per liberare per esempio il pezzo finito dallo sfrido.

Gli utensili utilizzati per eseguire questa lavorazione sono punzone e matrice, opportunamente affilati e la lamiera viene interposta tra essi, come in Figura 3.1. In genere viene sempre utilizzato anche un sistema di posizionamento, detto pilotaggio, per poter eseguire la tranciatura nella posizione desiderata. Spesso, per garantire una penetrazione più graduale e ridurre gli sforzi di trancia, il punzone viene realizzato con un piccolo angolo di spoglia, in modo da avere un “effetto cesoia”.

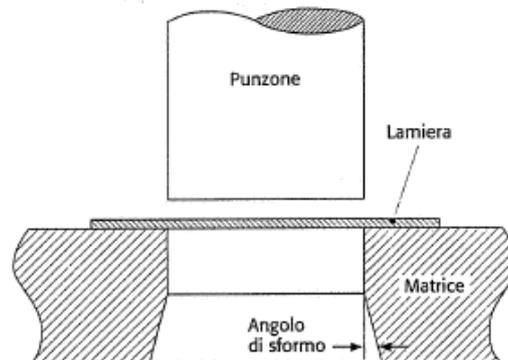


Figura 3.1: Utensili necessari per l'operazione di tranciatura [1].

In base a ciò che si ottiene a seguito dell'operazione di tranciatura, vengono utilizzate due terminologie differenti: *tranciatura* e *punzonatura*. Si parla di *tranciatura* quando il pezzo che si vuole ottenere è ciò che viene tagliato o portato via dal resto del nastro. Viceversa, si parla di *punzonatura* quando il pezzo che si vuole ottenere è la lamiera forata, mentre la parte asportata è lo sfrido (Figura 3.2).

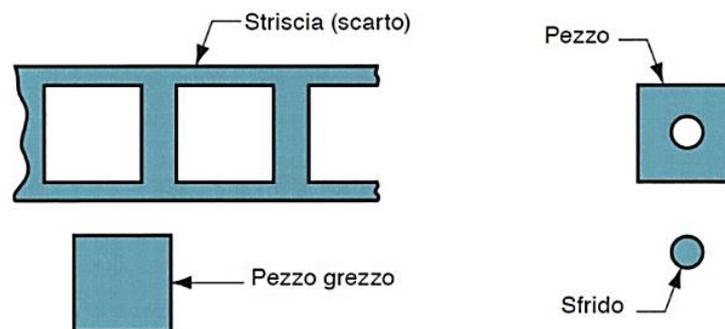


Figura 3.2: Trancitura (a sinistra) e punzonatura (a destra) [13].

Il meccanismo che determina il taglio della lamiera è legato al gioco tra punzone e matrice ed avviene attraverso l'innesco e la propagazione di due fratture concorrenti, che si innescano una nella zona del raggio di raccordo del punzone e l'altra nei pressi del raggio di raccordo della matrice. In Figura 3.3 è visibile il processo di trancitura.

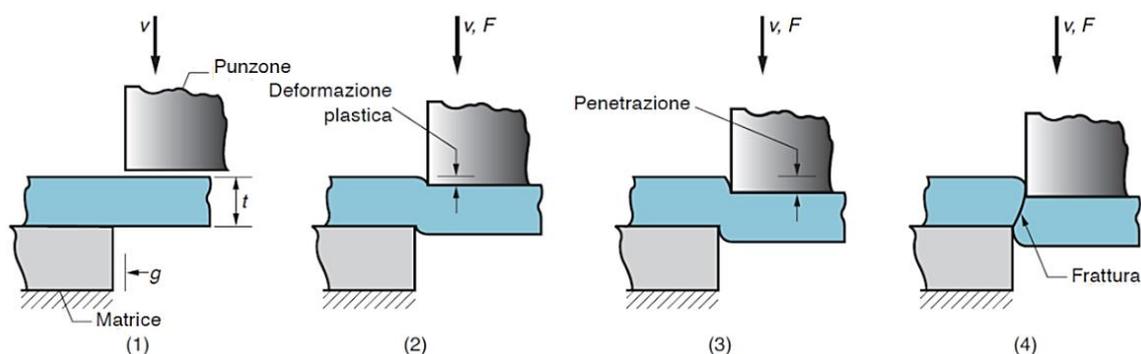


Figura 3.3: Operazione di trancitura. (1) avvicinamento punzone alla lamiera; (2) il punzone inizia ad esercitare una forza via via crescente; (3) innesco frattura; (4) propagazione frattura e separazione delle parti [13].

3.1.1 Gioco punzone-matrice

Come già accennato, la luce o gioco fra punzone e matrice (evidenziato in Figura 3.4) è importante affinché la frattura si propaghi in modo ottimale, altrimenti si rischia di ottenere dei tranciati aventi una superficie laterale di scarsa qualità ed anche forti strisciamenti oppure, se il gioco è troppo grande, di non riuscire ad innescare la frattura ed avere la tendenza ad inflettere ed imbutire la lamiera piuttosto che tranciarla.

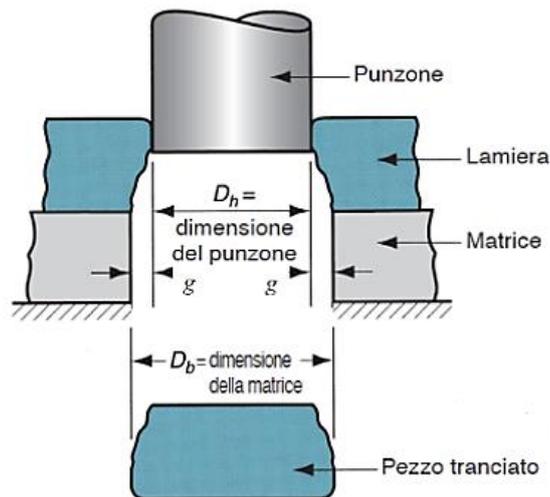


Figura 3.4: Gioco punzone-matrice [13].

Non esiste una relazione univoca e precisa per la determinazione del gioco tra punzone e matrice ed ogni azienda adotta un proprio criterio soprattutto in base all'esperienza. Un'espressione che può essere utilizzata per la determinazione di tale gioco è:

$$g = 0.1 \cdot s$$

Dove s è lo spessore della lamiera da tranciare. In pratica, si può considerare un gioco pari al 10% dello spessore della lamiera.

In ogni caso, il valore del gioco dipende da:

- Spessore della lamiera: aumento del gioco all'aumentare dello spessore.
- Carico unitario di rottura del materiale della lamiera: riduzione del gioco all'aumentare del carico di rottura.

3.1.2 Stato superficiale del tranciato

Lo stato superficiale del tranciato è dovuto al meccanismo di taglio e cioè alla frattura che si propaga attraverso i grani del materiale e questo determina la classica superficie rugosa.

Come si osserva in Figura 3.5, lo stato superficiale del tranciato presenta tre zone salienti con diverse caratteristiche. Partendo dall'alto, si osserva che la superficie è fortemente frastagliata e spigolosa ed è la zona dove è possibile apprezzare meglio l'innesco della frattura. Nella zona centrale invece, avviene la propagazione della frattura e pertanto appare opaca, rugosa. Infine, la zona in basso presenta un arrotondamento e la superficie è più o meno liscia e lucida, con striature verticali. In tale zona si è avuto lo strisciamento fra tranciato ed utensile.

Un esempio reale è visibile in Figura 3.6.

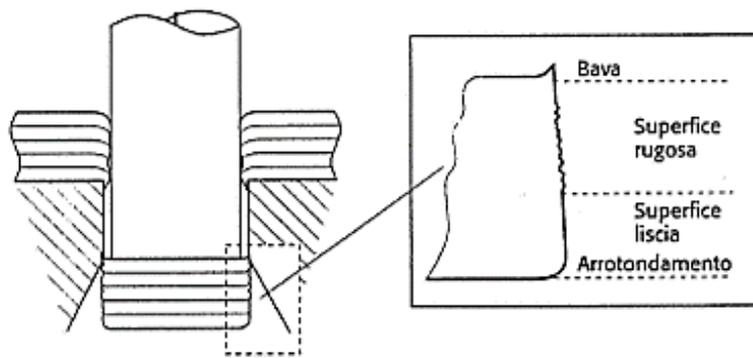


Figura 3.5: Schema dello stato superficiale del tranciato [1].

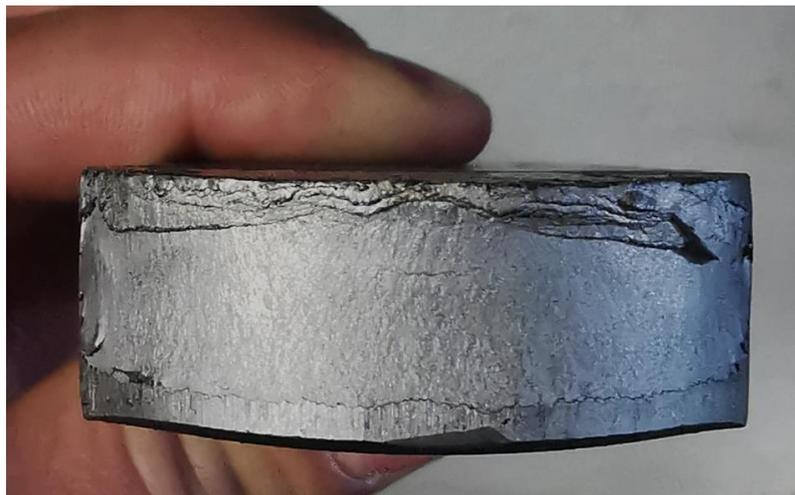


Figura 3.6: Superficie di trancia di una barra d'acciaio a sezione rettangolare di grosso spessore tranciata alla pressa (E.M.C. S.r.l.).

3.1.3 Forza di tranciatura

La forza di tranciatura è un parametro importante da valutare perché permette di individuare la pressa più idonea.

Il valore della forza di tranciatura non è affatto costante ma varia in base alla posizione del punzone e dalla sua geometria. Un andamento qualitativo è visibile in Figura 3.7.

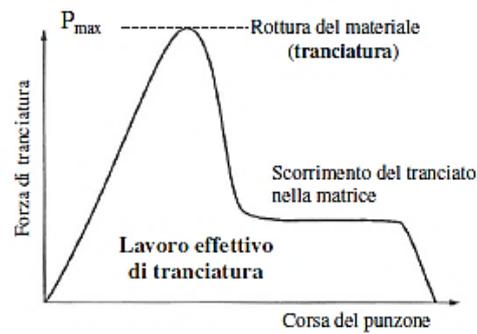


Figura 3.7: Andamento forza di tranciatura.

Come è possibile osservare, nel momento in cui il punzone entra in contatto con la lamiera e quindi inizia la corsa utile, vi è un andamento crescente della forza richiesta, fino al momento in cui si raggiunge un massimo. Tale picco corrisponde alla rottura del materiale e quindi si manifesta quando la frattura si è innescata in corrispondenza dei raggi di arrotondamento di matrice e punzone. A questo punto, il materiale è ormai danneggiato e la forza richiesta inizia a decrescere perché in questa fase vi sarà la propagazione della frattura con conseguente riduzione della sezione resistente della lamiera. Nel momento in cui si ha il distacco fra tranciato ed il resto della lamiera, la forza non sarà nulla dato che ci sarà un tratto di corsa durante il quale si avrà strisciamento fra la superficie laterale del tranciato e la matrice. L'operazione termina con l'espulsione del tranciato e solo a questo punto la forza raggiunge il valore nullo.

Il valore massimo della forza di tranciatura può essere ricavato dalla relazione [1]:

$$P_{max} = 1.2 \cdot l \cdot s \cdot \tau_R$$

Dove:

- τ_R : carico di rottura a taglio. In genere può essere ricavata come $\tau_R \cong \frac{4}{5} R_m$
- s : spessore della lamiera da tranciare
- l : perimetro o lunghezza del contorno del tranciato
- La maggiorazione del 20% (x1.2) viene fatta in maniera cautelativa per tenere conto anche degli attriti dello stampo e dell'usura degli utensili.

L'area sottesa a tale curva rappresenta il lavoro di tranciatura. Esso può essere espresso come:

$$\mathcal{L} = \int_0^s P(s) ds$$

Dove s è la corsa (utile) del punzone.

Dato che la valutazione quantitativa della forza in funzione della corsa del punzone è complessa, viene calcolato il lavoro "teorico" che dato semplicemente dall'equazione:

$$\mathcal{L}_{teorico} \cong P_{max} \cdot s$$

3.2 Piegatura

L'operazione di piegatura può essere di due tipi:

- Libera, senza ausilio di stampo, come in Figura 3.8.

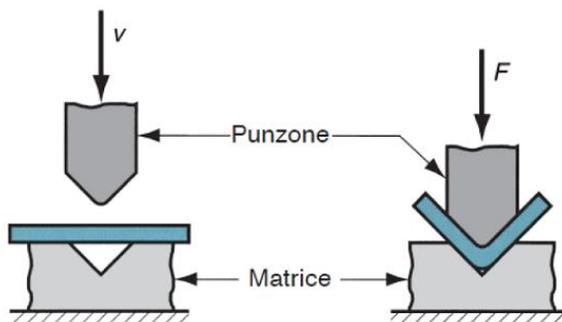


Figura 3.8: Piegatura libera [13].

- Con l'ausilio di uno stampo, come in Figura 3.9.

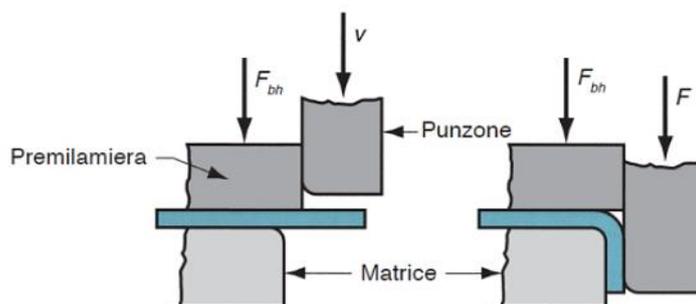


Figura 3.9: Piegatura con stampo [13].

Altre tipologie di piegatura sono riportate in Figura 3.10:

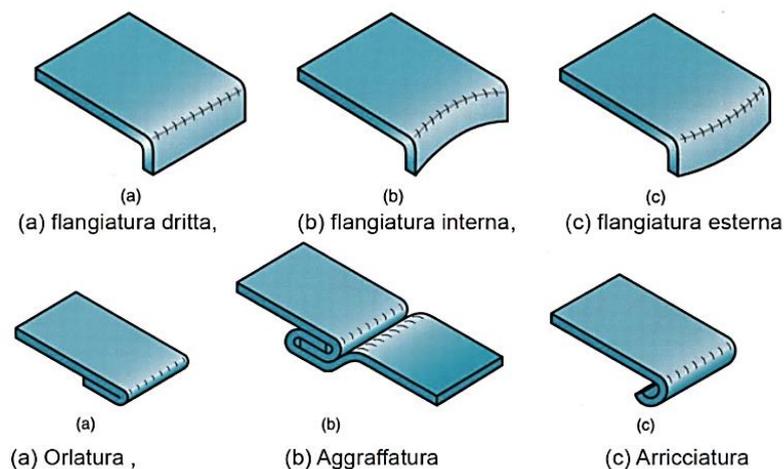


Figura 3.10: Altre tipologie di piegatura [13].

3.2.1 Meccanica della piegatura

I fattori più importanti che influenzano la meccanica della piegatura sono il materiale, lo spessore della lamiera, la larghezza, il raggio di piegatura, l'angolo di piegatura, i macchinari, gli utensili e il processo specifico di piegatura dei metalli.

L'operazione di piegatura consiste nel sottoporre a flessione la lamiera nella zona interessata e le forze da applicare devono essere tali da plasticizzare il materiale nella zona di piega. Il materiale dal lato esterno della piega (estradosso) risulta essere in trazione mentre su quello interno (intradosso) in compressione, come in Figura 3.11. Questa distribuzione di tensioni nello spessore, anche detta "a farfalla", dà luogo ad un piano, definito come *piano neutro*, dove le tensioni si annullano e quindi le fibre del materiale che giacciono su tale piano non risultano essere sollecitate. Andando a considerare un modello bidimensionale della lamiera o comunque una sezione della stessa, non si parlerà più di piano neutro, bensì di *asse neutro*. La posizione di questo asse dipenderà dai diversi fattori e non esiste un criterio univoco per la determinazione della sua posizione. In genere si considera che l'asse neutro sia posizionato a circa $0.4 \times \text{spessore lamiera}$, misurando a partire dal lato interno della piega. Un'altra caratteristica dell'asse neutro è che a causa della mancanza di forze, la sua lunghezza rimane costante anche in condizioni di lamiera deformata.

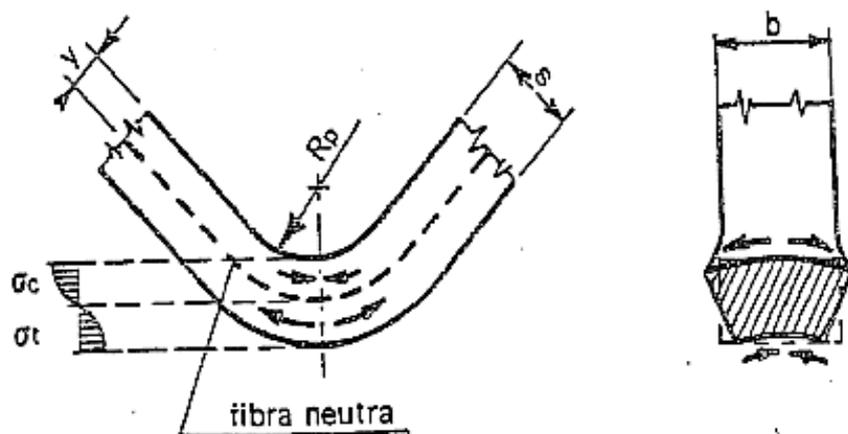


Figura 3.11: Sollecitazioni in fase di piegatura [18].

3.2.2 Caratteristiche geometriche di una piega

Un aspetto interessante dell'operazione di piega è che, a causa dello stiramento che si manifesta sull'estradosso, lo spessore della lamiera nella zona di piega non si mantiene costante, bensì si riduce. In Figura 3.12 è visibile uno schema dove viene evidenziato questo fenomeno.

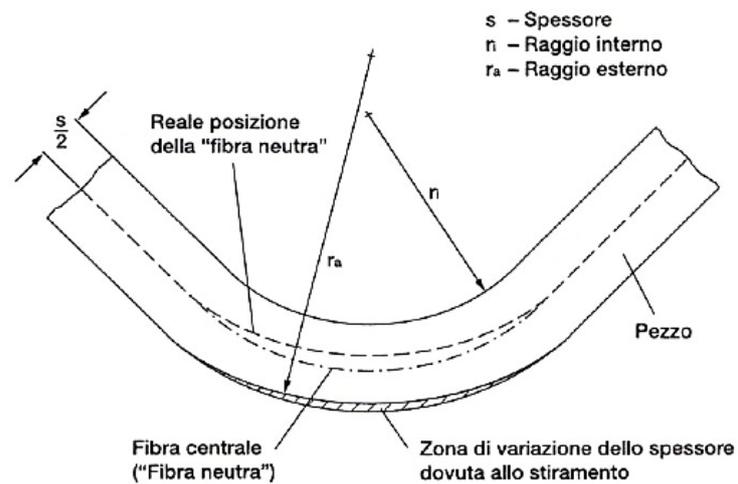


Figura 3.12: Variazione dello spessore dovuto allo stiramento [19].

In Figura 3.13 è riportato un esempio reale di un componente in lamiera piegato ad “L”, dove tale fenomeno è più o meno apprezzabile ad occhio. A causa dello stiramento sulle fibre esterne della piega, lo spessore in tale zona è pari a $S' (< S)$

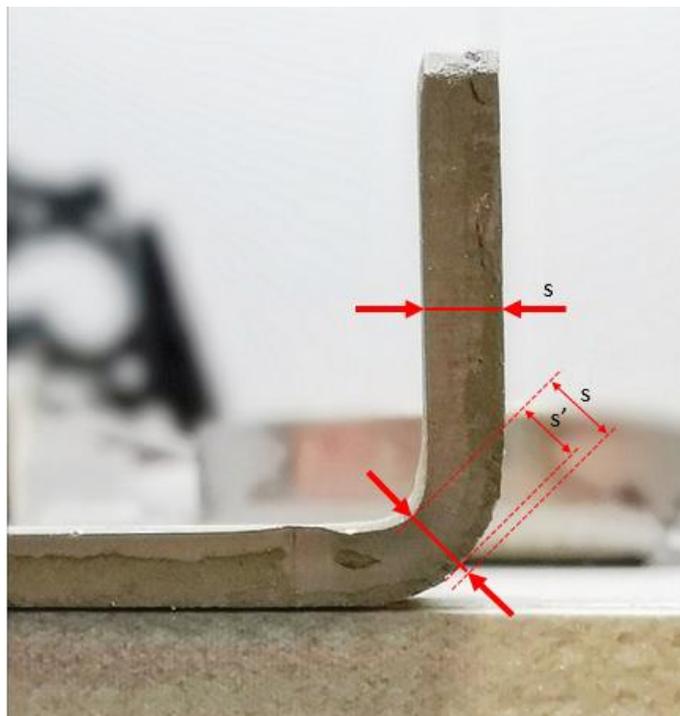


Figura 3.13: Esempio piega a 90° su un componente in lamiera. (Sacel S.r.l.).

3.2.3 Forza di piegatura

Nel caso di piegature semplici come in Figura 3.14, la forza di piegatura può essere valutata studiando la lamiera come se fosse una trave appoggiata-appoggiata.

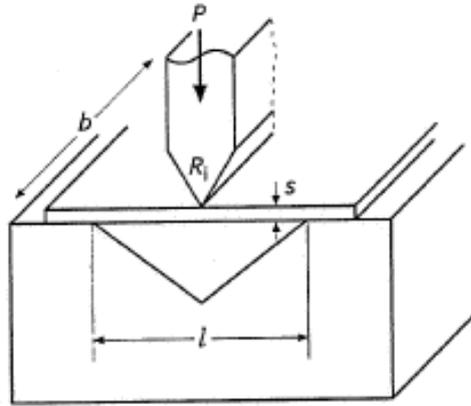


Figura 3.14: Schema di un'operazione di piega [1].

Definendo il modulo di resistenza a flessione:

$$W_f = \frac{b \cdot s^2}{6}$$

La sollecitazione di tipo flessionale può essere scritta come:

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f} = \frac{P \cdot l}{\frac{b \cdot s^2}{6}}$$

Il carico necessario per realizzare una piega del tipo in Figura 3.14 è [1]:

$$P = \frac{b \cdot s^2 \cdot \sigma_{SN}}{1.5 \cdot l}$$

La sollecitazione flessionale σ_f può essere assunta, per valori di $6s < l < 12s$, pari a circa $2\sigma_{SN}$

3.2.4 Raggio massimo e minimo di piegatura

Il raggio massimo di piegatura può essere inteso come il valore oltre il quale non si raggiunge deformazione plastica nella lamiera. In pratica, cessata l'applicazione del carico, la lamiera torna esattamente nella condizione indeformata.

Il valore del raggio massimo di piegatura può essere ottenuto imponendo che la fibra più sollecitata inizia a plasticizzare:

$$\sigma_{SN} = E \cdot \varepsilon_{min}$$

La fibra più sollecitata è quella posta a distanza $y = s/2$ dall'asse neutro (Figura 3.15), quindi:

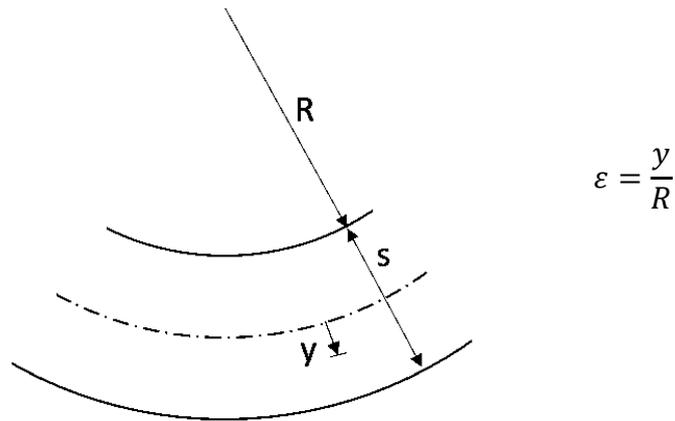


Figura 3.15: Schema per la determinazione della posizione di una generica fibra di materiale lungo lo spessore.

$$\varepsilon_{min} = \frac{s}{2R_{max}}$$

Combinando l'espressione del legame costitutivo con l'espressione di ε_{min} , si ricava il raggio massimo:

$$R_{max} = \frac{E \cdot s}{2 \cdot \sigma_{SN}}$$

Riguardo invece il raggio minimo di piegatura, esso rappresenta quel valore al di sotto del quale si manifesta la rottura della lamiera. Tale valore può essere ricavato imponendo che la fibra di materiale più sollecitata abbia raggiunto la condizione di allungamento a rottura [1]:

$$\varepsilon_{max} = \frac{A_{\%}}{100} \rightarrow \frac{s}{2R_{min}} = \frac{A_{\%}}{100}$$

$$R_{min} = \frac{100 \cdot s}{2 \cdot A_{\%}}$$

3.3 Imbutitura

L'operazione di imbutitura è un processo di deformazione che permette di passare da una lamiera inizialmente piana, ad una di forma concava.

3.3.1 Stato tensionale dell'imbutito

Dal punto di vista delle tensioni, la lamiera è soggetta in fase di imbutitura ad una serie di sollecitazioni in base alle zone prese in considerazione.

Per semplicità, si consideri un imbutito assialsimmetrico come in Figura 3.16. L'imbutito può essere suddiviso in diverse zone:

- Zona A-B (disco ancora da imbutire): le sollecitazioni presenti sono:
 - radiale di trazione: questa sollecitazione è legata al fatto che il punzone tende a trascinare il disco di lamiera verso la cavità della matrice.
 - circonferenziale di compressione: si consideri una corona circolare sul disco in lamiera posta ad una distanza radiale generica, in modo da identificare un certo volume di materiale. Man mano che il punzone avanza, la lamiera viene trascinata verso il centro e quindi il volume di materiale ipoteticamente isolato si verrà a trovare ad una distanza radiale inferiore. Questo effetto determina l'insorgere di sollecitazioni circonferenziali di compressione, le quali generano le cosiddette grinze, cioè il materiale tende a "svergolarsi".
 - assiale di compressione: questa tensione viene esercitata dal premilamiera sul disco per contrastare la formazione di grinze.
- Zona C-D (parete verticale): in questo tratto, lo stato di tensione diventa assiale di trazione.
- Zona E-E (fondo): in questa regione si hanno tensioni radiali di trazione

Le tre zone fondamentali sopra citate, sono connesse fra loro da zone di transizione, dove la lamiera è soggetta a sollecitazioni di natura flessionale. Le suddette zone sono la B-C e la D-E e si trovano in corrispondenza dei raggi di raccordo di matrice e punzone.

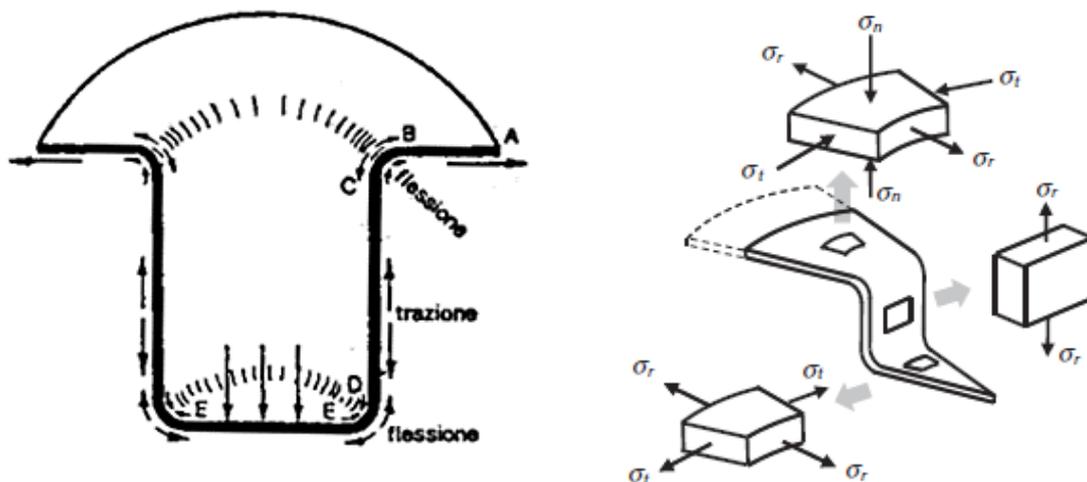


Figura 3.16: Tensioni presenti su un componente imbutito [20].

3.3.2 Gioco o luce fra matrice e punzone

Il valore del gioco fra punzone e matrice deve essere sempre superiore allo spessore della lamiera e risulta essere un compromesso in quanto se tale gioco è ridotto al minimo c'è il rischio di avere forti assottigliamenti della lamiera; se il gioco è troppo elevato c'è il rischio che si creino irregolarità o pieghe sulle pareti dell'imbutito.

In genere, nella pratica viene utilizzata la seguente espressione per il calcolo del gioco [1]:

$$g = s + K \cdot \sqrt{10 \cdot s}$$

Dove:

- s : è lo spessore della lamiera
- K : è una costante adimensionale che varia in funzione dei materiali. Per gli acciai, ad esempio, vale 0.07 [1].

3.3.3 Forza di imbutitura

La forza necessaria per poter eseguire un'imbutitura dipende da diverse variabili quali il materiale, la condizione di lubrificazione, la geometria dell'imbutito, la velocità di imbutitura. In generale può essere calcolata con la seguente espressione:

$$P = \pi \cdot d \cdot s \cdot m \cdot R_m$$

Dove m è un coefficiente che può assumere valori compresi fra 0.4 e 1 ed è funzione del rapporto di imbutitura d/D . All'aumentare di tale rapporto, m decresce.

3.3.4 Altri parametri di processo

- Raggi di arrotondamento di punzone e matrice: questi raggi, indicati in Figura 3.17, sono fondamentali e vanno dimensionati opportunamente perché se troppo piccoli possono determinare rotture indesiderate. Al contrario, se il raggio di arrotondamento della matrice è troppo grande, si potrebbe avere un contatto insufficiente fra matrice e premilamiera, causando la formazione di grinze. Esistono diversi modi per imporre i raggi di raccordo e nella maggior parte dei casi ci si basa su regole empiriche o sull'esperienza pratica.

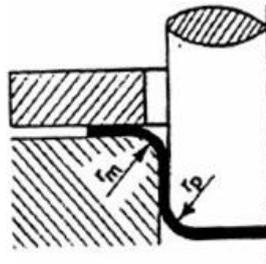


Figura 3.17: Identificazione raggi di raccordo di punzone e matrice.

Per il raggio di raccordo della matrice è possibile utilizzare la relazione di Kaczmarek [1]:

$$r_m = K \cdot \sqrt{(D - d) \cdot s}$$

Per il raggio di raccordo del punzone [1]:

$$5s < r_p < 0.3d$$

Dove:

- K : costante adimensionale (vale circa 0.8-0.9).
 - D : diametro del disco primitivo in lamiera o blank.
 - d : diametro del punzone.
- Pressione del premilamiera: il valore della pressione che viene esercitata dal premilamiera risulta essere un compromesso e deve essere tale da garantire un sufficiente scorrimento del materiale per evitare strappi, ma deve essere anche tale da evitare il sollevamento della lamiera in fase di discesa del punzone, in modo da limitare la formazione di grinze. Molto spesso si fa riferimento all'esperienza pratica per la determinazione di tale pressione.
 - Condizione di lubrificazione: la lubrificazione è un altro aspetto importante del processo, soprattutto nelle imbutiture profonde. Se non vi è una sufficiente lubrificazione si rischia che gli utensili, a causa dell'attrito, possano rigare la lamiera. In casi estremi invece, lo strisciamento potrebbe determinare stiramenti localizzati

tali da strappare la lamiera oppure, si potrebbero verificare microsaldature o grippaggi fra utensili e lamiera.

L'adesione fra lamiera e gli utensili è strettamente legata alla composizione dei materiali, ma anche dalle pressioni in gioco. Per esempio, gli acciai inossidabili austenitici hanno una tendenza maggiore a aderire all'acciaio degli utensili rispetto a quelli a basso tenore di carbonio.

In alcune situazioni è possibile adoperare particolari lubrificanti che evaporano dopo pochi secondi dalla nebulizzazione, garantendo la lubrificazione solo durante la fase di stampaggio per poi dissolversi completamente. Questa tipologia di lubrificanti viene adoperata quando sono richiesti particolari requisiti di pulizia dei pezzi stampati od in base ai settori a cui il componente è destinato. In altri casi invece, è necessario adoperare lubrificanti molto più untuosi al fine di ottenere un sufficiente meato di lubrificante e garantire in questo modo elevato scorrimento. Spesso, a valle del processo di formatura, vengono eseguiti dei lavaggi sgrassanti per eliminare i residui di lubrificante ed eventuali piccole particelle metalliche. La tipologia di lavaggio, come la tipologia di lubrificanti, varia in funzione dei requisiti di pulizia richiesti e dal settore di impiego del componente prodotto.

- Rapporto di imbutitura: è molto raro che un'operazione di imbutitura avvenga in un solo step di formatura, a meno che le deformazioni non siano davvero piccole. Per un'imbutitura profonda, si passa da un certo diametro iniziale D ad un diametro finale d . In base a quanto è elevata la differenza fra diametri, occorrerà eseguire un certo numero di imbutiture intermedie per evitare lacerazioni della lamiera. In genere, per i materiali di uso comune non si eseguono imbutiture con un rapporto d/D minore di 0.5.

3.4 Principali problemi legati alla formatura delle lamiere

Alcuni dei problemi che si possono manifestare in ambito *sheet metal forming* sono visibili in Figura 3.18 e descritti nei seguenti sottoparagrafi.

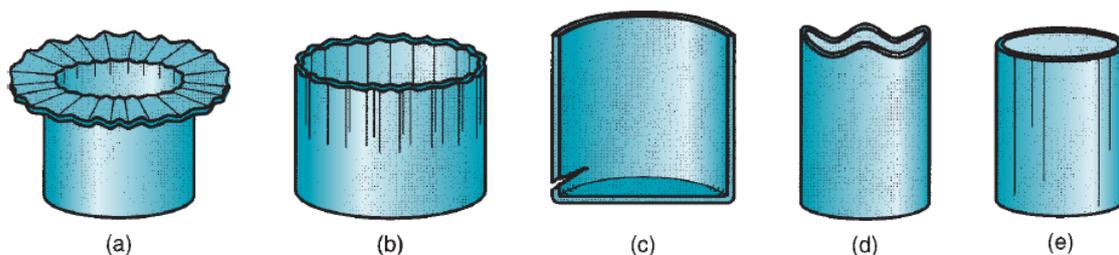


Figura 3.18: Alcuni esempi di difetti: (a) grinze; (b) grinze sulla parete verticale; (c) lacerazione; (d) formazione di orecchie; (e) segni di strisciamento [21].

3.4.1 Ritorno elastico o *springback*

Il ritorno elastico del materiale o *springback* è la variazione geometrica di un elemento al termine del processo di stampaggio che si verifica a causa del rilascio delle forze all'apertura degli utensili.

Tale fenomeno è dovuto al fatto che durante la formatura, non si è in grado di plasticizzare tutta la sezione della lamiera. L'esempio principe di questo fenomeno è l'operazione di piegatura. In tale operazione la lamiera è sottoposta a flessione e quindi la distribuzione delle tensioni nella sezione è a "farfalla". A fronte di uno sforzo di piegatura, ci sarà una fibra neutra (cioè scarica) a ridosso della quale si possono distinguere due zone (Figura 3.19):

- una zona adiacente alla fibra neutra (verde) in cui le tensioni non riescono a raggiungere il valore minimo di snervamento del materiale.
- una zona più esterna (bianca) in cui le tensioni sono maggiori o uguali alla tensione di snervamento e pertanto si è in grado di raggiungere la condizione di plasticizzazione, generando deformazione permanente.



Figura 3.19: Schema delle zone in campo plastico ed elastico di una lamiera in fase di piegatura.

In Figura 3.20 è possibile osservare in dettaglio le sollecitazioni e le deformazioni che si instaurano nell'area di piega quando viene eseguita una piegatura a 90°.

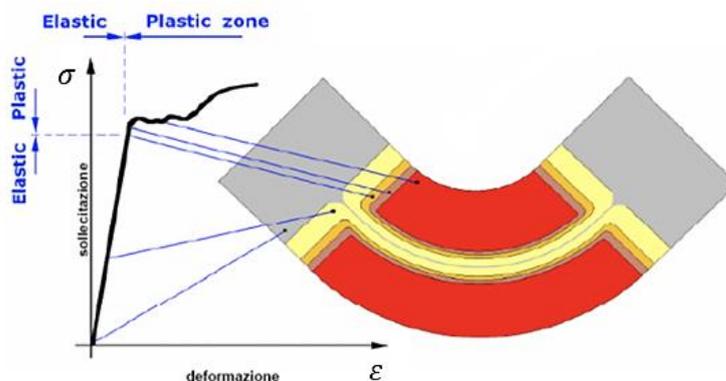


Figura 3.20: Sollecitazioni e deformazioni nell'area di piega [22].

Il fatto che ci sia una zona ancora in campo elastico più o meno ampia a ridosso della fibra neutra determina il fenomeno del ritorno elastico; in pratica, scaricando la lamiera (assenza di forze esterne), la deformazione reale raggiunta non coinciderà con quella finale teorica.

In Figura 3.21 è riportato un esempio del processo di piegatura. A valle dell'operazione è chiaramente visibile la variazione angolare della piega a seguito della rimozione del punzone di piega.

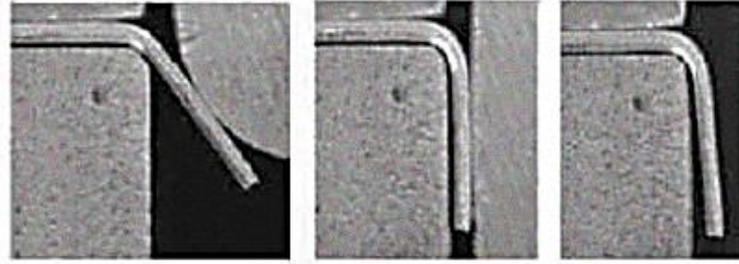


Figura 3.21: Ritorno elastico [22].

Questo fenomeno può causare grossi problemi in fase di produzione perché si potrebbe rischiare di avere pezzi con zone fuori tolleranza. Per questo motivo è molto importante tenerne conto già nella fase di progettazione delle attrezzature.

Per risolvere questo problema nello stampaggio della lamiera ed ottenere la formatura desiderata vengono eseguite le cosiddette “viziature”, cioè si eseguono delle compensazioni o correzioni agendo sulla geometria degli utensili, sulla loro posizione e sulla loro corsa.

In generale, il ritorno elastico è influenzato da diversi fattori:

- Tipo di materiale e stato di lavorazione.
- Tipologia di formatura.
- Pressione esercitata.
- Raggio di piegatura.
- Velocità di deformazione.

3.4.2 Formazione di orecchie o *earing*

La formazione delle “orecchie” può essere un problema abbastanza comune nei componenti imbutiti. Tale difetto è legato all'anisotropia del materiale, in particolare all'anisotropia planare ΔR .



Figura 3.22: Fenomeno dell'earing su un imbutito [13].

Per orecchie si intende fondamentalemente una variazione di quota dell'estremità della lamiera nei componenti imbutiti (Figura 3.22). A seguito dei processi di laminazione, l'anisotropia planare rende la lamiera più resistente in una direzione rispetto alle altre e questo durante il processo di imbutitura provoca una deformazione differente. Se ΔR fosse pari a zero, non si avrebbe tale variazione, cioè non si verificherebbe il fenomeno dell'earing. Se invece $\Delta R > 0$, si formeranno le orecchie in direzione parallela e trasversale alla direzione di laminazione. Più il materiale è anisotropo e più questo effetto è evidente. Maggiore è il valore di \bar{R} invece, maggiore sarà l'imbutibilità della lamiera, come è visibile in Figura 3.23.

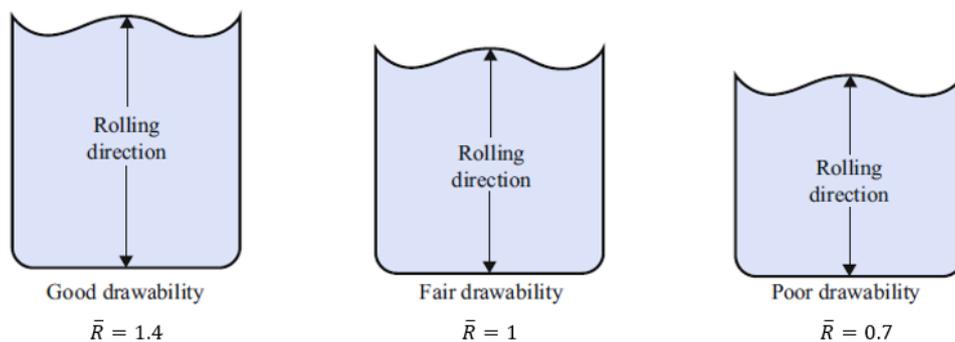


Figura 3.23: Effetto dell'indice medio di anisotropia sull'imbutibilità [8].

In generale, per avere una buona imbutibilità, l'ideale sarebbe avere elevati valori di \bar{R} e bassi valori di ΔR . Inoltre, con questa combinazione, è possibile anche ridurre il rischio di formazione di grinze [1].

3.4.3 Assottigliamenti del materiale e lacerazione o *tearing*

Una delle criticità legata al processo di imbutitura, è l'assottigliamento del materiale ed in casi gravi la lacerazione o strappo. La lacerazione della lamiera avviene a seguito di forti sollecitazioni di trazione che causano elevato stiramento e quindi forte assottigliamento del

materiale. Dal punto di vista del processo, lo strappo si manifesta quando il materiale durante l'operazione non riesce a scorrere correttamente (a causa di una pressione eccessiva del premilamiera ad esempio) e quando i raggi di scorrimento degli utensili sono troppo piccoli.

In Figura 3.24 è visibile l'ingrandimento di una bugna realizzata su una lamiera di alluminio. Il processo di formatura del componente non prevede l'uso del premilamiera ma solamente punzone e matrice. Lo strappo si è manifestato in seguito al forte assottigliamento del materiale in prossimità del raggio di scorrimento del punzone. Le cause sono legate allo scarso scorrimento del materiale ed ai raggi di arrotondamento di punzone e matrice troppo piccoli in tale zona.



Figura 3.24: Strappo sul fondo di una bugna di un componente in alluminio (Sacel S.r.l.).

Da un punto di vista qualitativo, in Figura 3.25 è visibile la variazione dello spessore della lamiera dopo essere stata imbutita. La linea tratteggiata rappresenta il profilo teorico a spessore costante della lamiera mentre la linea continua rappresenta quello reale. La zona più critica, da quello che si può notare, è quella in corrispondenza del raggio di raccordo del punzone.

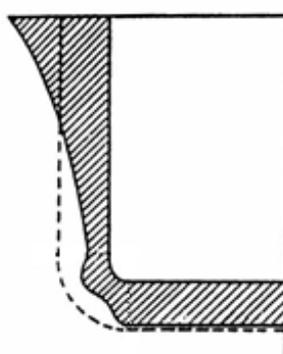


Figura 3.25: Variazione dello spessore della lamiera di un imbutito cilindrico [23].

3.4.4 Formazione di grinze o *wrinkling*

La formazione di grinze è tipica del processo di imbutitura. Queste tendono a formarsi quando tale operazione viene eseguita senza l'utilizzo di un prelamiera ma anche quando la forza esercitata da questo dispositivo non è sufficiente a contrastare il sollevamento della lamiera durante il processo (Figura 3.26).

Le grinze di per sé non rappresentano un vero e proprio pericolo per la resistenza del pezzo stampato, ma sono un difetto di forma ed estetico molto evidente e da evitare. Inoltre, compromettono l'ottimale scorrimento del materiale durante la formatura.

Le grinze si possono formare anche lungo la parete verticale dell'imbutito. In questi casi, la causa può essere legata ad un eccessivo gioco fra punzone e matrice in quanto la lamiera non risulta essere sufficientemente vincolata e guidata durante il processo dagli utensili.

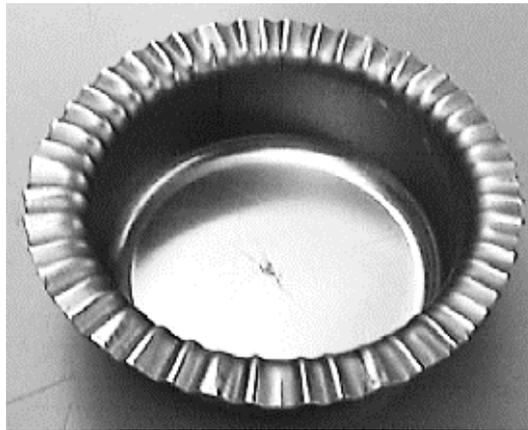


Figura 3.26: Formazione di grinze [23].

3.4.5 Effetto buccia d'arancia o *orange peel*

L'effetto buccia d'arancia o *orange peel* è un difetto estetico del materiale. Tale definizione sta ad indicare che, a seguito della deformazione, la superficie assume un aspetto rugoso.

Dal punto di vista meccanico, questo fenomeno è il risultato visivo dello stiramento che si manifesta nella lamiera. Se si continua ulteriormente a stirare il materiale, le microscopiche creste responsabili della rugosità genereranno delle fratture.

Durante la formatura della lamiera, i singoli grani si deformano indipendentemente l'uno dall'altro. Poiché i grani vicini hanno orientamenti diversi, ci sarà un inspessimento o assottigliamento differenziato del materiale a livello locale. Di conseguenza, i grani spiccano in maniera diversa in superficie. Maggiore è la deformazione e la dimensione dei grani e più evidente sarà l'effetto, come mostrato schematicamente in Figura 3.27. Con un materiale a grana fine, l'inspessimento o assottigliamento è poco apprezzabile ed i singoli grani sono troppo piccoli perché l'occhio possa rilevare le increspature superficiali [24].



Figura 3.27: A sinistra grana grossa ed increspature elevate (effetto buccia d'arancia più evidente); a destra i grani sono piccoli e l'effetto ad occhio nudo è meno evidente [24].

In Figura 3.28 sono riportate le immagini di due campioni di un componente in lamiera. Nell'immagine a sinistra si può notare che i grani sono piccoli; in quella di destra, invece, i grani sono di dimensioni più grandi in corrispondenza della superficie. Il componente con i grani grossi in superficie presenta l'effetto buccia d'arancia.

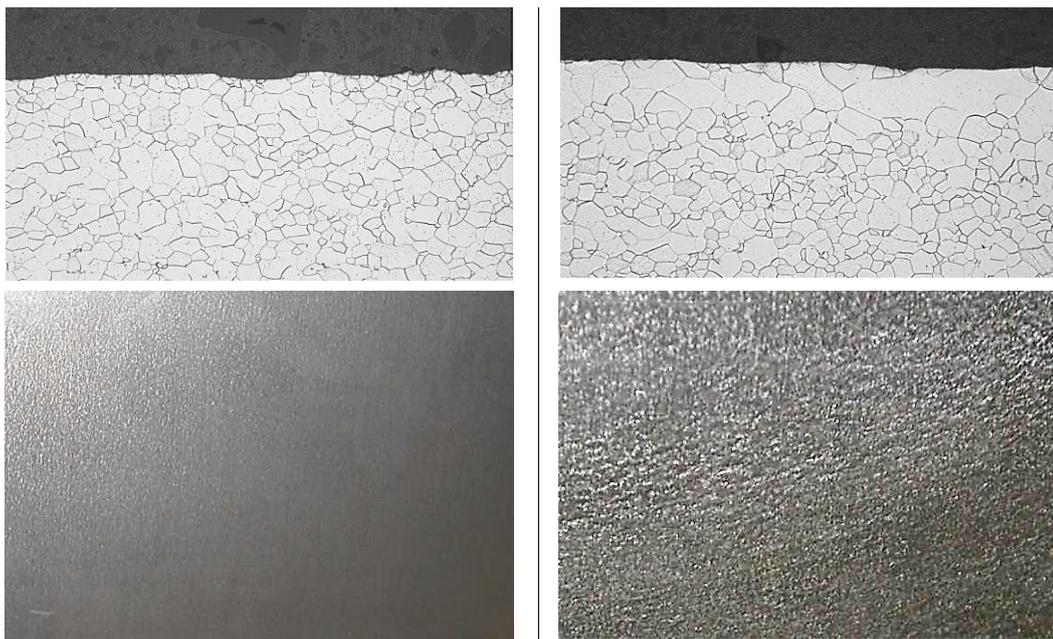


Figura 3.28: Effetto orange peel. A sinistra non è apprezzabile; a destra è chiaramente visibile [24].

Anche in Figura 3.24 è visibile l'effetto buccia d'arancia.

3.4.6 Graffi e segni

Durante il processo di stampaggio può capitare che piccole particelle metalliche appartenenti alla striscia stessa possano saldarsi agli utensili a causa del calore, forti pressioni ed attrito. Tali particelle tendono a rendere la superficie di contatto dell'utensile con il pezzo scabra e se le asperità superficiali sono piuttosto importanti, queste possono tranquillamente danneggiare il meato di lubrificante e segnare o rigare la superficie del pezzo.

3.5 Le presse

Le macchine utilizzate per lo stampaggio della lamiera sono le presse. Queste possono essere:

- Meccaniche (Figura 3.29): un cinematismo biella-manovella è mosso da un motore elettrico supportato da dispositivi ausiliari che sono:
 - Volano: permette di accumulare l'energia cinetica del motore e rendere il movimento più fluido, oltre a creare la spinta necessaria a deformare il pezzo
 - Frizione: necessaria a disaccoppiare l'albero del volano con quello dell'eccentrico
 - Freno: sistema di sicurezza e comunque necessario per evitare che la slitta possa continuare a muoversi anche dopo aver disinserito la frizione.
 - Sistema di regolazione eccentrico

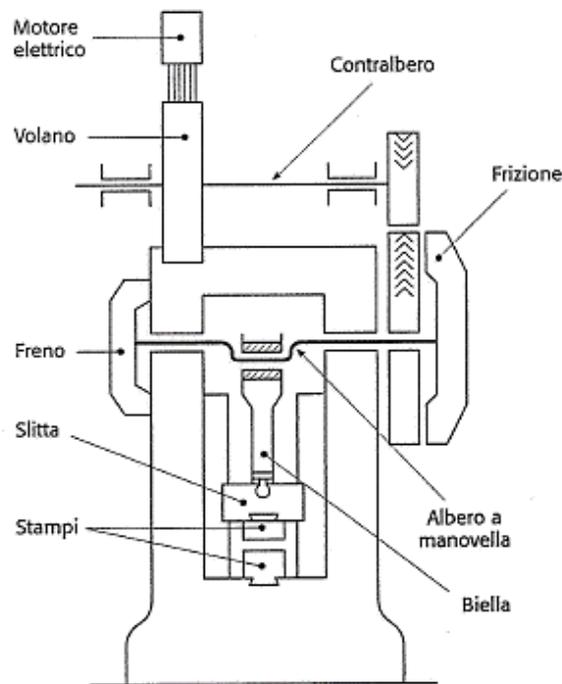


Figura 3.29: Schema di una pressa meccanica [1].

Questa tipologia consente di ottenere una cadenza produttiva elevata. Inoltre, le presse meccaniche sono particolarmente adatte alle operazioni di tranciatura.

- Idrauliche (Figura 3.30): questa tipologia viene azionata attraverso un sistema pistone-cilindro con olio in pressione. Una pressa oleodinamica ha il vantaggio di poter regolare la pressione e quindi la velocità di discesa della slitta che può essere resa costante. Tali presse vengono impiegate soprattutto per le imbutiture profonde perché consentono una discesa del punzone morbida e graduale. Una delle differenze

rispetto alle presse di tipo meccanico è che hanno cadenze produttive generalmente inferiori.

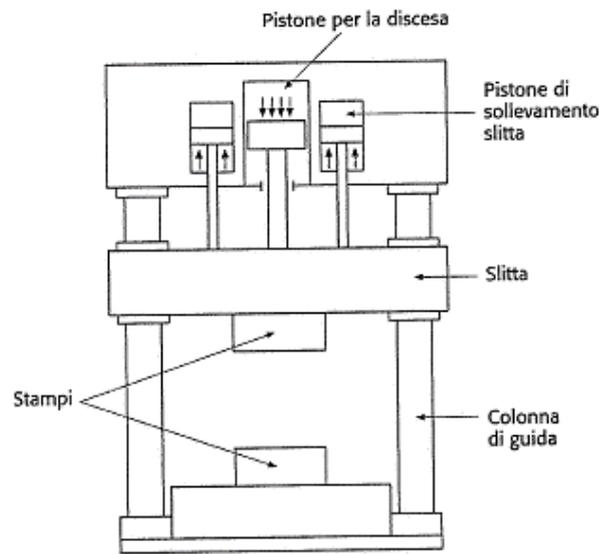


Figura 3.30: Schema di una pressa idraulica [1].

I parametri più importanti di una pressa da considerare sono:

- Tonnellaggio.
- Corsa della mazza battente.
- Velocità di stampaggio.
- Dimensioni del basamento.

3.6 Stampi progressivi o *a passo*

Lo stampo è un'attrezzatura impiegata in alcuni processi di produzione industriale come ad esempio lo stampaggio lamiera, termoplastico, la pressofusione eccetera. Lo scopo è quello di dare forma al materiale grezzo ed ottenere un pezzo finito o un semilavorato.

Nel caso di *sheet metal forming*, uno stampo viene definito *a passo* se è in grado di eseguire una serie di operazioni (tranciatura, imbutitura...) in sequenza. Dopo ogni operazione, la striscia di lamiera viene fatta avanzare per step, di una quantità pari al passo. Il passo rappresenta la distanza (in direzione X o comunque nella direzione di avanzamento della striscia) tra due riferimenti consecutivi, come ad esempio la distanza fra i centri di due fori consecutivi per il pilotaggio della striscia, come in Figura 3.31.

Quando il componente raggiunge l'ultimo passo dello stampo vi è la fase di stacco del pezzo; questo viene svincolato dal resto della striscia attraverso un'operazione di trancia per essere

poi condotto all'interno del cassone dei pezzi finiti attraverso dei sistemi di scivoli o nastri trasportatori.

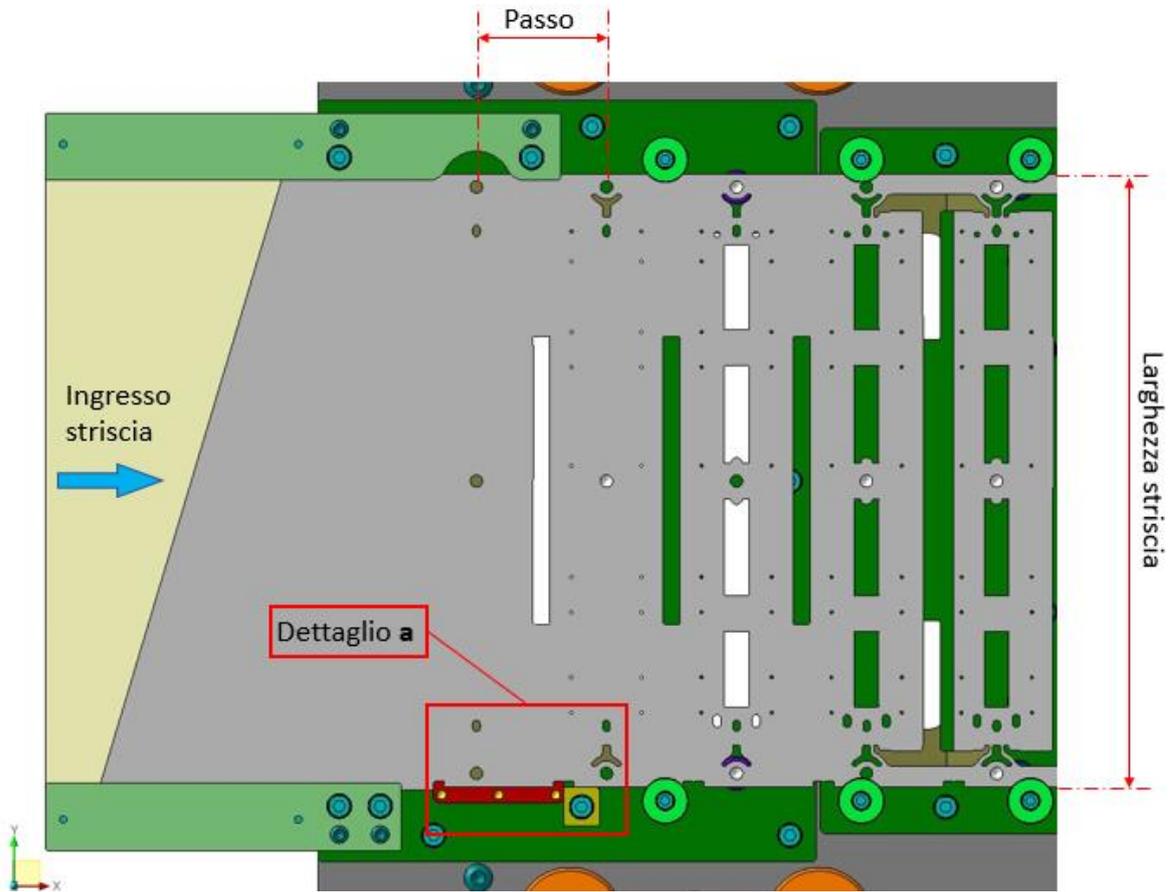


Figura 3.31: Vista dall'alto della parte inferiore di uno stampo. È possibile osservare a cosa si riferiscono passo e larghezza striscia.

Lo stampaggio viene adoperato nella maggior parte dei casi quando il numero di pezzi da produrre è elevato. Uno stampo ha infatti costi relativamente alti, indipendentemente dal settore produttivo. Il motivo è legato ai seguenti aspetti:

- Numero elevato di ore di progettazione, messa a punto, controlli, test.
- Materiali per realizzare lo stampo.
- Lavorazioni meccaniche: intese come tipologie di lavorazioni, macchine utensili necessarie, tempi e costi.
- Complessità dello stampo: intesa come numero e tipologie di operazioni che gli utensili dovranno eseguire sul materiale.
- Precisione dimensionale e geometrica.
- Trattamenti termici e in alcuni casi trattamenti antiusura degli utensili.
- Componentistica ausiliaria (colonne guida, sensoristica, bulloneria...).

3.6.1 Definizione del blank

Per poter ottenere un componente in lamiera attraverso il processo di stampaggio, è necessario definire la sagoma in piano del pezzo che si intende realizzare. Per blank o sviluppo striscia si intende appunto il contorno o boundary del pezzo spianato, in piano.

La fase di definizione del blank in generale non è affatto semplice ed è cruciale perché soprattutto in fase di preventivazione è importante sapere quali sono i fabbisogni ed i costi sia dal punto di vista delle materie prime, ma anche dal punto di vista della complessità di uno stampo. Per questo motivo, la prima operazione che si esegue prima di costruirne uno ed avviare la produzione è lo studio del blank.

Durante lo studio del blank si valuta:

- Dimensioni e forma del blank: partendo dal pezzo finale che si vuole ottenere, si definisce il contorno in piano del pezzo a parità di volume di materiale (Figura 3.32).

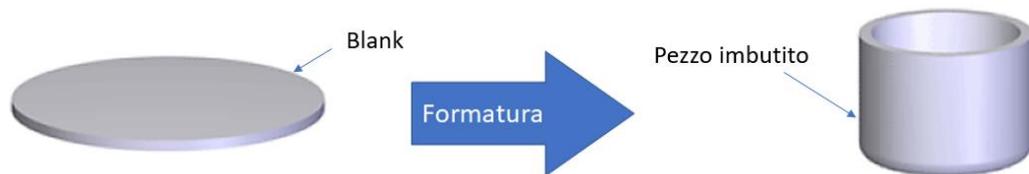


Figura 3.32: Esempio di imbutitura di una coppa e del corrispondente blank o sviluppo iniziale.

- Fabbisogno: ovvero la dimensione del nastro di lamiera che dovrà essere adoperato per la produzione del pezzo. Dato lo spessore, occorre determinare la larghezza della striscia, che rappresenta la minima larghezza del nastro di lamiera per riuscire a stampare correttamente il pezzo. La larghezza striscia non corrisponde praticamente mai alla dimensione in Y del blank. Questo perché in prima battuta è sempre necessario avere un bordo extra per evitare che il pezzo, per motivi di cattivo allineamento, possa mancare di alcune parti a seguito delle operazioni di trancia. In secondo luogo, al fine di consentire l'avanzamento del pezzo all'interno dello stampo prima dello stacco finale, è necessario avere degli elementi di collegamento o bretelle che creano la connessione tra il pezzo ed il resto della striscia. La posizione e la geometria di tali bretelle o trattenitori è variabile e dipende principalmente dalla geometria del blank e dalla forma che man mano la lamiera dovrà assumere.
- Orientamento del blank: l'orientamento sulla striscia è funzione della geometria del blank stesso e dipende dal compromesso tra la minimizzazione degli sfridi e la complessità del processo di formatura (che è legata alla geometria del pezzo finale).

Tale valutazione è molto importante soprattutto quando devono essere realizzati pezzi stampati adoperando materiali costosi, come il rame. Un esempio sulla valutazione dell'orientamento ottimale di un blank è riportato in Figura 3.33.

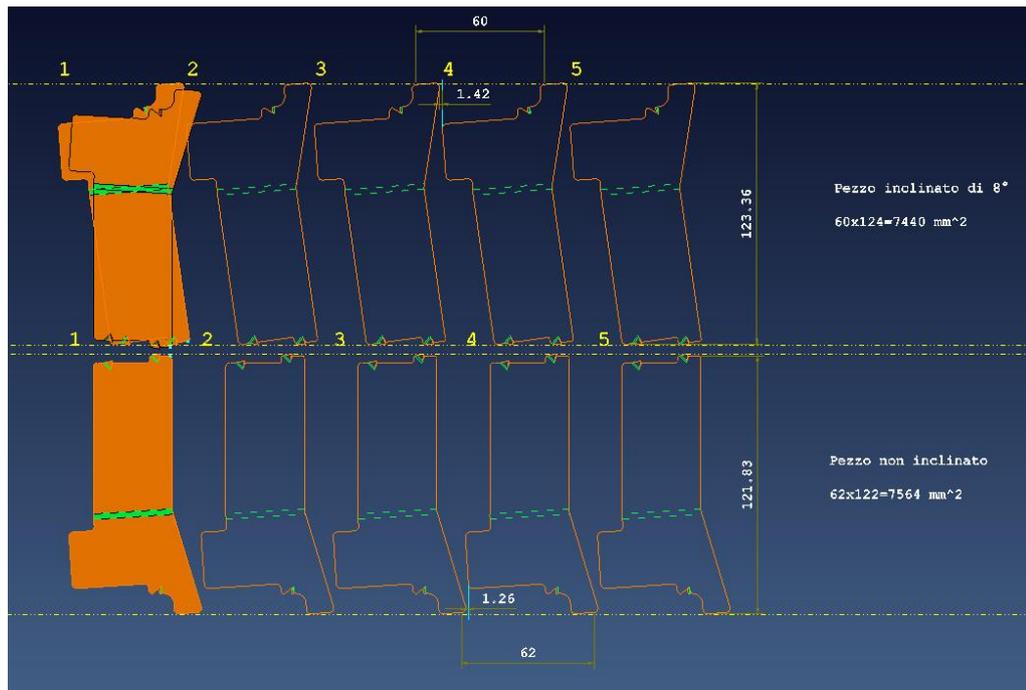


Figura 3.33: Esempio di studio del blank di un componente in lamiera. Si può osservare come, inclinando il blank, si è in grado di ottimizzare gli ingombri ed ottenere un fabbisogno inferiore, ottenendo un miglior incastro dei pezzi.

- Passo: è importante cercare di minimizzarlo compatibilmente alla complessità del pezzo e delle operazioni da eseguire, al fine di minimizzare gli sprechi di materiale.
- Numero di passi o step di formatura: cioè numero di stazioni di trancia e formatura necessarie al fine di riuscire ad ottenere il componente desiderato in tolleranza. È importante sottolineare “in tolleranza” in quanto spesso, per raggiungere i requisiti dimensionali e geometrici richiesti, è necessario eseguire più operazioni per ottenere una singola entità geometria (anche una semplice piega a 90°). Questo perché per tolleranze strette, la precisione degli utensili ed i fenomeni che caratterizzano i processi di formatura (ad esempio il ritorno elastico) iniziano ad essere molto influenti sul risultato finale.

Per questo motivo, a valle di una stazione di formatura presumibilmente critica, vengono aggiunti in maniera preventiva dei passi vuoti. Per esempio, nel caso dell'imbutitura di una coppetta in un dato materiale, potrebbero essere necessari in linea teorica tre passi di imbutitura. Se in fase di collaudo la lamiera si strappa e non è possibile agire sulla geometria degli utensili e sul materiale, si inserisce un quarto passo di imbutitura in corrispondenza del passo vuoto, in modo da non dover realizzare l'intero stampo da zero, ma modificando solamente gli utensili di formatura intermedi.

- Disposizione e forma delle bretelle o trattenitori. Le bretelle possono essere deformabili o rigide (Figura 3.34). Si predilige l'uso di trattenitori deformabili (cioè con una forma tale da potersi deformare facilmente rispetto alle altre zone della lamiera ed avere un'escursione importante) quando il processo di formatura

comporta una forte variazione della geometria del blank ed è allo stesso tempo necessario garantire la presenza di un elemento di collegamento con il resto della striscia.

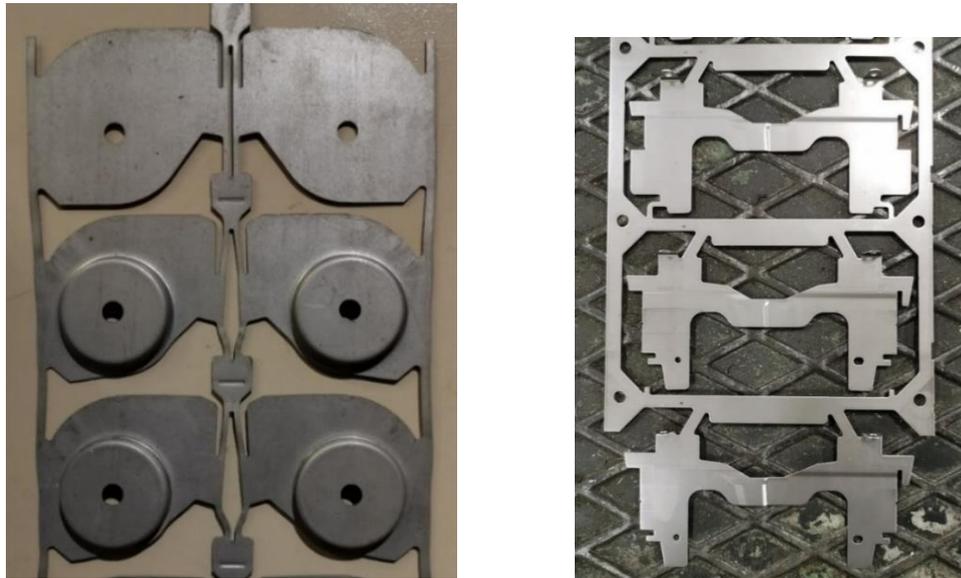


Figura 3.34: Esempi di trattenitori flessibili (a sinistra) e rigidi (a destra) (Sacel S.r.l.).

- Geometrie degli utensili: anche in fase preliminare è importante avere un'idea della geometria degli utensili di trancia e di formatura (Figura 3.35). Può accadere infatti che un punzone, per esempio, sia troppo vicino a quello successivo e questo potrebbe portare a problemi di ingombro ed alla realizzazione di matrici troppo deboli dal punto di vista strutturale.

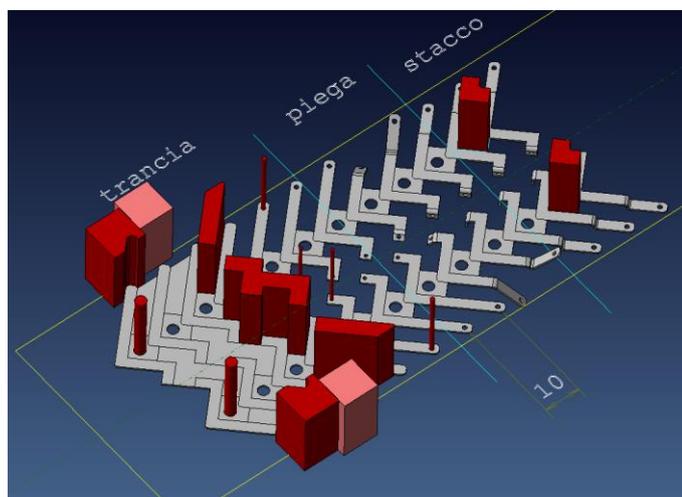


Figura 3.35: Esempio di disposizione e forma dei punzoni di trancia.

3.6.2 Struttura e parti fondamentali

Uno stampo è caratterizzato da un sistema di riferimento posizionato ed orientato in genere nel modo seguente e visibile in Figura 3.36:

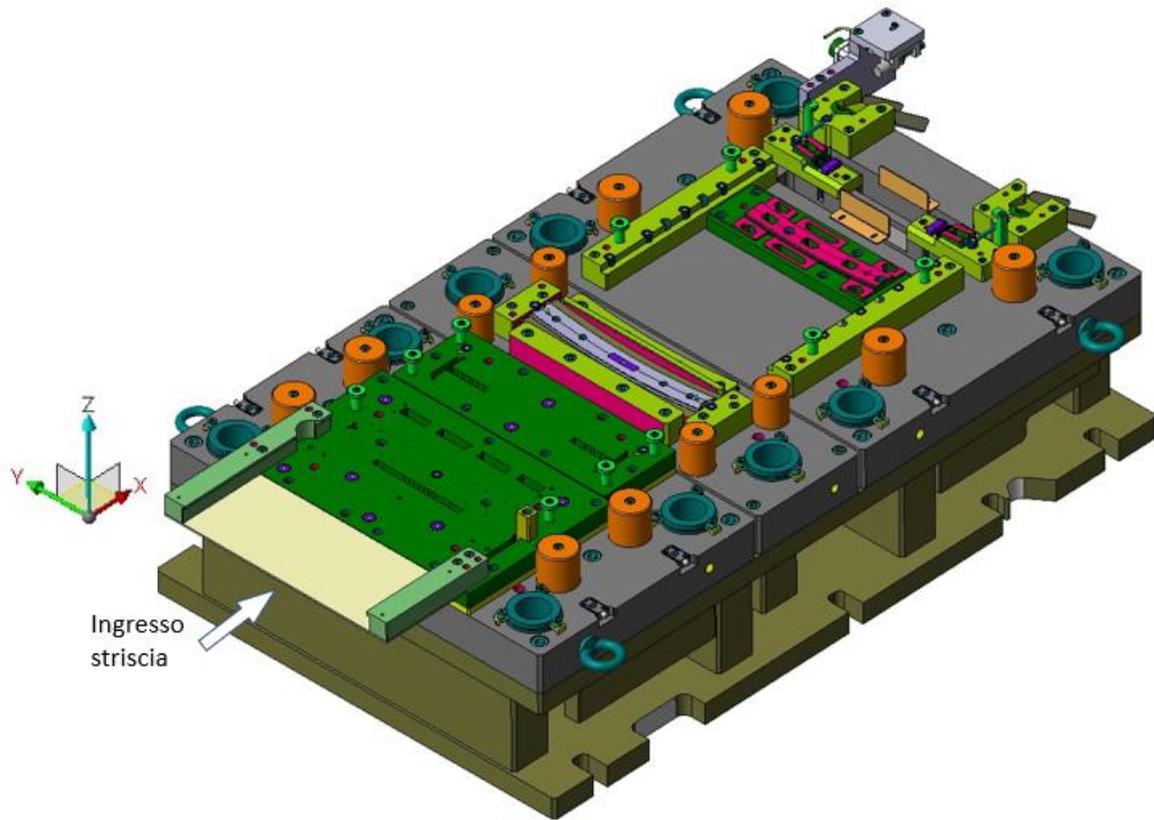


Figura 3.36: Parte inferiore di uno stampo a passo.

- L'asse X punta nel verso di avanzamento della striscia.
- L'asse Z è orientato nella direzione di stampaggio e punta verso la mazza battente.
- L'asse Y sarà ortogonale ai primi due sopra citati ed insieme all'asse X da luogo al piano striscia, cioè il piano sul quale giace la lamiera.

Uno stampo per stampaggio lamiera è sempre costituito da almeno due componenti principali: una matrice ed un punzone. Molto spesso però, è presente un terzo componente detto prelamiera. I primi due sono strettamente legati all'operazione di formatura, mentre il prelamiera ha lo scopo di trattenere la lamiera in modo da evitare la formazione di grinze e tenere sotto controllo lo scorrimento del materiale.

A differenza di punzoni e matrici che sono solidali alla mazza battente ed al basamento della pressa, il prelamiera è collegato attraverso dei dispositivi "mobili", cioè molle o cilindri ad azoto. Questo perché, in fase di chiusura dello stampo, il primo componente ad entrare in contatto con il blank è il prelamiera, e solo in un secondo momento i punzoni. Le molle o cilindri ad azoto servono ad esercitare un carico che aumenta a poco a poco con l'abbassarsi

della mazza battente, consentendo così alla lamiera di essere trattenuta al meglio man mano che i punzoni entrano in gioco.

Esistono poi altri componenti che sono fondamentali ai fini del buon funzionamento dello stampo ma che non interessano in maniera diretta la formatura della lamiera. Alcuni di questi sono:

- **Basamento:** lo stampo viene posizionato su un basamento in acciaio saldato (Figura 3.37), costituito da due piastre e da regoli o lardoni che fungono da distanziali fra le due piastre. Una delle due piastre poggia sul basamento della pressa, mentre sull'altra viene avvitata la piastra inferiore dello stampo. L'altezza del basamento può essere dovuta a diversi fattori, ad esempio la corsa della mazza battente della pressa oppure in base alla possibilità di espellere in maniera agevole attraverso dei nastri trasportatori le parti tranciate dalla parte inferiore dello stampo per evitare che queste si accumulino durante la produzione.



Figura 3.37: Basamento dello stampo in acciaio saldato (Sacel S.r.l.).

- **Colonne guida e boccole:** Questi dispositivi servono a garantire il perfetto allineamento della parte mobile dello stampo con quella fissa quando la mazza battente è in fase di discesa. Inoltre, nei casi in cui ci fossero importanti asimmetrie nei carichi esercitati sulle componenti dello stampo, tali colonne permettono anche di svincolare le guide della pressa dalle forze laterali.

Una soluzione tecnica che permette di avere un ulteriore vantaggio è quella di realizzare almeno una delle colonne guida di diametro leggermente diverso dalle altre in modo da garantire l'unicità del posizionamento della parte superiore con quella inferiore dello stampo.

Le colonne guida vengono realizzate in acciaio cementato e vengono vincolate in una delle due metà dello stampo. Nella metà opposta vengono invece collocate le

boccole (Figura 3.38), realizzate in bronzo con scanalature interne in modo da consentire al lubrificante (grasso) di accumularsi all'interno e garantire un'adeguata e continua lubrificazione a questi organi ogni qualvolta entrano in contatto.



Figura 3.38: Boccola (Sacel S.r.l.).

- **Piloti:** questi elementi sono molto importanti ai fini del posizionamento e centraggio della lamiera rispetto agli utensili. Essi possono essere collocati per esempio nella piastra intermedia, all'interno della quale vengono realizzate le sedi che fungono anche da guida (Figura 3.39). Sul retro dei piloti vengono inserite delle molle in grado di esercitare un certo carico assiale (in genere dell'ordine delle decine di chili) in modo da tener piantato il pilota all'interno del foro di centraggio realizzato sulla lamiera durante tutta la fase di formatura.

I piloti possono essere conici o cilindrici. I primi sono autocentranti ma a causa della loro geometria, se la lamiera dovesse spostarsi, l'azione di una forza laterale tenderebbe a farli sollevare, perdendo l'effetto desiderato. I cilindrici invece, una volta posizionati, anche in seguito all'azione di forze laterali non rischiano di sollevarsi. Per questo motivo, vengono utilizzate delle molle più rigide nel caso dei piloti conici.



Figura 3.39: Pilota (Sacel S.r.l.).

- Solleva: sono dei dispositivi che alloggiati all'interno della piastra inferiore dello stampo, sono azionati a molla e servono a spingere la lamiera verso l'alto allineandola al piano di avanzamento della striscia quando lo stampo è aperto (Figura 3.40). La corsa dei solleva è funzione dell'ingombro del pezzo in Z man mano che questo prende forma all'interno dello stampo. Un componente che presenta pieghe piuttosto lunghe, per esempio, potrebbe avere un ingombro elevato in Z e quindi i solleva devono tenere la striscia sollevata a sufficienza per evitare collisioni in X durante l'avanzamento. In Figura 3.41 è riportata una vista in sezione del sistema pilota-solleva.



Figura 3.40: Solleva (Sacel S.r.l.).

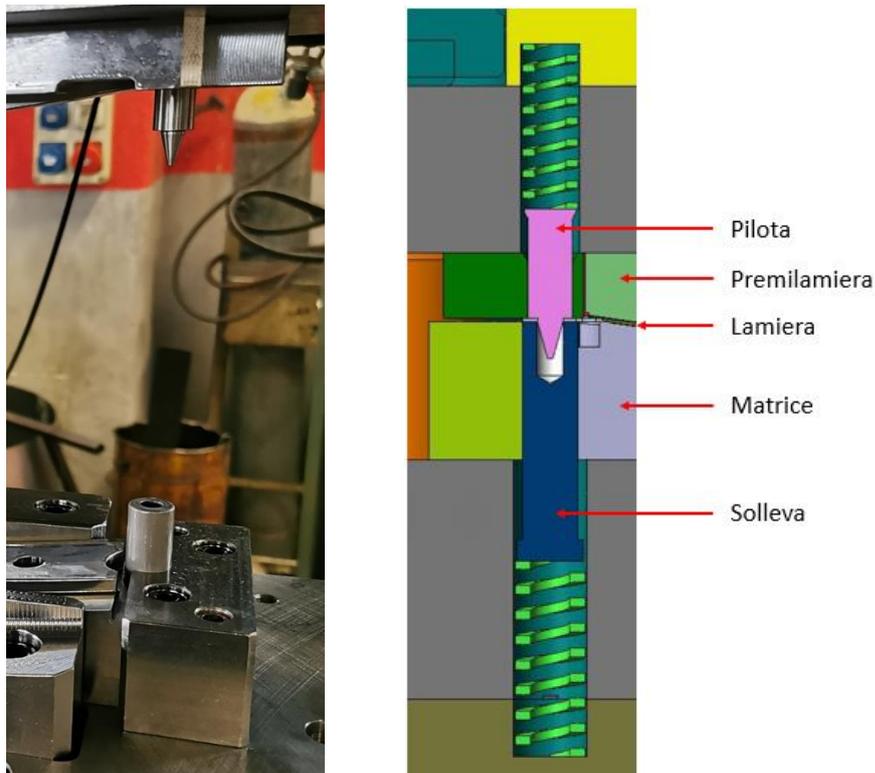


Figura 3.41: Vista in sezione del sistema pilota e solleva (Sacel S.r.l.).

- Rifila: insieme alla prima operazione che viene eseguita all'interno di uno stampo a passo, viene realizzata una trancitura su un bordo o su entrambi i bordi laterali della striscia. Il punzone che esegue tale operazione è detto punzone del rifila. Posto ad una distanza esattamente pari al passo di avanzamento della lamiera vi è il blocchetto del rifila (Figura 3.42). Questo blocchetto funge da riferimento per la striscia e serve ad evitare che, per qualsiasi motivo, il nastro possa avanzare oltre il passo "teorico". In Figura 3.43 sono riportate le fasi che riassumono il funzionamento di questi dispositivi.

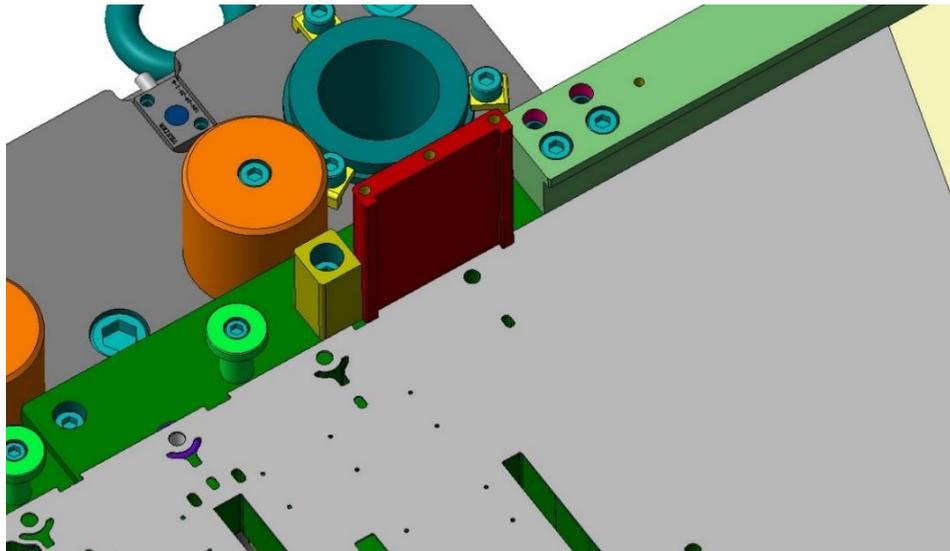


Figura 3.42: Esempio di rifila (punzone rosso) e blocchetto del rifila (blocchetto giallo).

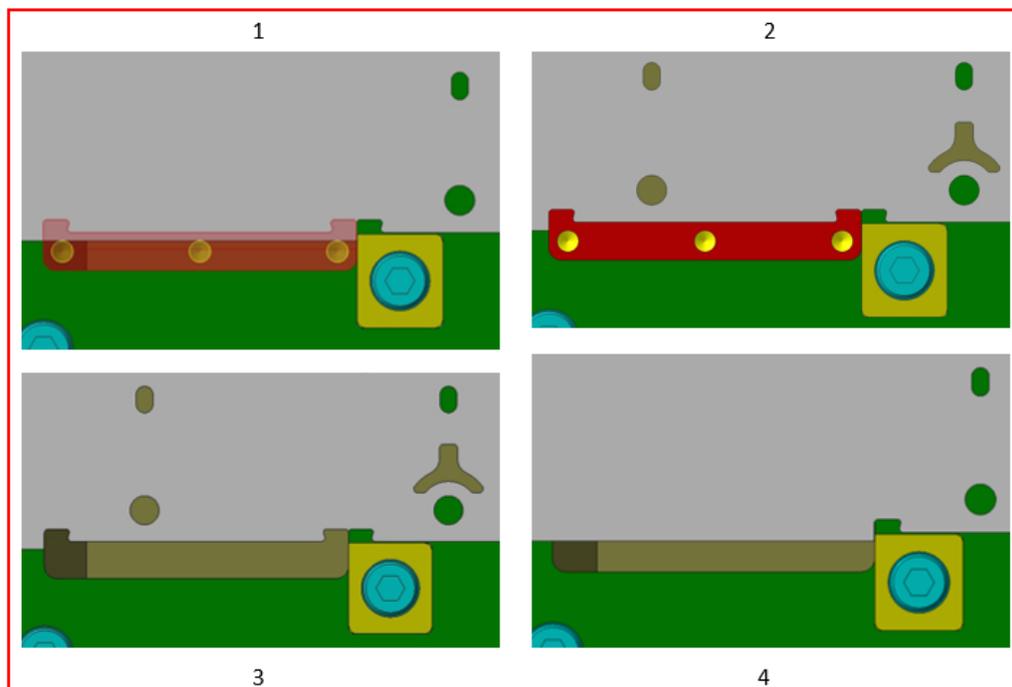


Figura 3.43: [Dettaglio a]. Funzionamento rifila: 1) avanzamento striscia e battuta contro il blocchetto del rifila (stampo aperto); 2) discesa punzone di trancia o rifila; 3) apertura stampo; 4) avanzamento striscia e di nuovo battuta contro rifila.

- Microinterruttore di fine corsa: Questo dispositivo è posizionato a fine stampo e viene azionato dalla lamiera quando questa viene spinta in avanti (Figura 3.44). L'utilizzo del microinterruttore consente di fornire alla pressa ed al sistema di avanzamento striscia un segnale di abilitazione ed è fondamentale in quanto se la lamiera dovesse incepparsi o dovessero esserci problemi nell'avanzamento, il microinterruttore non verrebbe attivato e quindi si eviterebbero danneggiamenti della striscia e degli utensili.

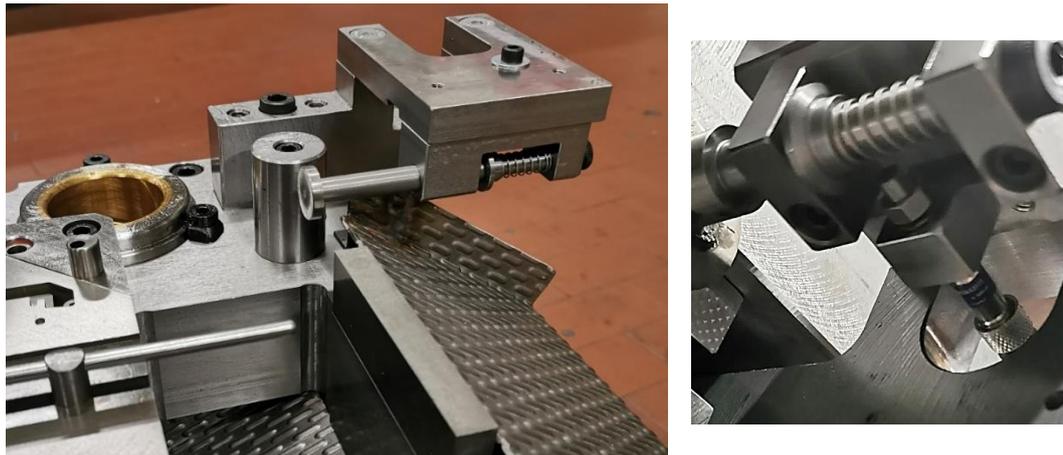


Figura 3.44: Sistema di azionamento del microinterruttore (Sacel S.r.l.).

Quando la lamiera viene spinta in avanti, la sua estremità batte contro la testa del pistoncino, facendolo arretrare. Un piattello permette l'attivazione microinterruttore. Le posizioni reciproche di questi elementi vanno calibrate affinché l'attivazione del microinterruttore si abbia esattamente quando la striscia è nella giusta posizione in X.

- Molle e cilindri ad azoto: questi dispositivi vengono utilizzati sia sui prelamiera che sui dispositivi mobili come piloti ed estrattori. La loro collocazione è molto importante perché, a causa di errori di allineamento fra prelamiera e piastra inferiore o spessore delle piastre non perfettamente costante, la pressione esercitata sulla lamiera potrebbe essere non uniforme. Pertanto, questi dispositivi vengono posti in corrispondenza delle zone dove è necessario esercitare effettivamente il carico. Il vantaggio di utilizzare i cilindri ad azoto piuttosto che le molle in elastomero sta nel fatto che, nel primo caso, il carico al contatto⁵ è già diverso da zero; nel secondo caso invece, le molle vanno precaricate attraverso il serraggio di una vite che, agendo su un piattello, determina un certo schiacciamento come in Figura 3.45, altrimenti il carico al contatto sarebbe nullo.

⁵ Per *carico al contatto* si intende il valore del precarico dei cilindri ad azoto o delle molle in elastomero, cioè il carico che questi dispositivi sono in grado di esercitare con una corsa di compressione nulla.



Figura 3.45: Molle in elastomero (Sacel S.r.l.).

L'utilizzo delle molle in elastomero porta con sé innumerevoli vantaggi: sono economiche, possono essere tagliate a misura dall'operatore, ma soprattutto in caso di problemi, la loro usura e rottura non comporta gravi rischi né per lo stampo né per gli operatori, a differenza dei cilindri ad azoto che possono essere più pericolosi. In caso di esplosione o rottura, infatti, le parti che lo costituiscono potrebbero essere scaraventate ovunque, arrecando gravi danni a chi lavora nelle vicinanze della pressa. Per motivi di sicurezza, è bene collocare i cilindri ad azoto adottando soluzioni del tipo in Figura 3.46. Il cilindro ad azoto è stato posizionato in modo tale che gli altri dispositivi quali piastre e colonne guida abbiano una funzione protettiva nell'eventualità in cui il cilindro dovesse rompersi, così da parare le schegge.



Figura 3.46: Cilindro ad azoto (Sacel S.r.l.).

- Scivoli e sistemi di espulsione: quando viene eseguita un'operazione di tranciatura, parte del materiale viene rimosso dalla striscia. È fondamentale che il tranciato venga

espulso dallo stampo, indipendentemente dalle sue dimensioni. Infatti, se dei residui di materiale (derivanti dall'operazione di trancia) rimanessero all'interno dello stampo danneggerebbero gli altri pezzi. Un esempio di scivolo per l'espulsione dei pezzi finiti è visibile in Figura 3.47.

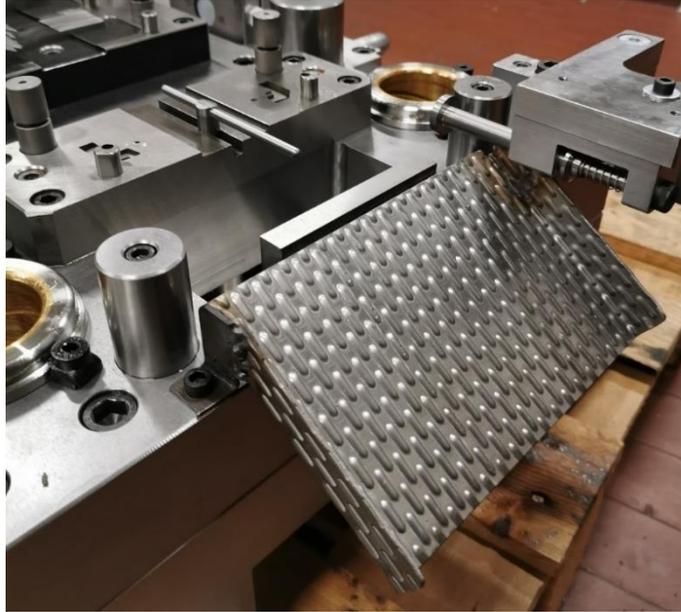


Figura 3.47: Scivolo per espulsione del componente finito (Sacel S.r.l.).

Altri dispositivi che non fanno parte di uno stampo a passo ma che sono fondamentali per il suo funzionamento sono:

- dispositivo di avanzamento o alimentatore: la fase di avanzamento lamiera è affidata ad un dispositivo, detto alimentatore, collocato sullo stesso lato della pressa dove viene posizionato il coil di materia prima. Questo è preceduto da un raddrizzatore, un dispositivo simile ad un laminatoio, costituito da rulli d'acciaio che permettono di mettere in piano la lamiera, riducendone la curvatura dopo che questa è stata srotolata dalla bobina.

I dispositivi di avanzamento più comuni sono:

- Alimentatore pneumatico: è la tipologia più diffusa, grazie ai costi relativamente bassi, ma soprattutto grazie alla sua versatilità con lamiere di differenti spessori. Tale dispositivo è costituito da due pinze, una fissa ed una mobile. La pinza fissa ha il compito di tener fermo il nastro durante la lavorazione. In fase di apertura della pressa, la pinza mobile stringe la lamiera, mentre quella fissa la rilascia ed in tal modo il nastro avanza di una quantità pari al passo. Un esempio di alimentatore pneumatico è visibile in Figura 3.48.



Figura 3.48: Alimentatore pneumatico [25].

La chiusura delle pinze ed il sistema di avanzamento vengono messi in movimento attraverso dei pistoni pneumatici, i quali a loro volta sono azionati da valvole a comando pneumatico o elettrico. La sincronizzazione degli azionamenti si può avere nel primo caso attraverso delle camme collegate all'albero della pressa, mentre nel secondo caso può avvenire tramite PLC.

Gli alimentatori pneumatici non sono molto precisi, soprattutto quando le velocità di stampaggio sono alte. Anche il peso del pezzo può influire sulla precisione dell'avanzamento a causa delle inerzie (essendo l'avanzamento discontinuo). Questo problema può essere in parte risolto aprendo la pinza fissa e quindi svincolando la striscia dall'alimentatore in fase di chiusura stampo. In questo modo, i piloti possono realizzare il centraggio in modo più rapido ed efficace, anche nei casi in cui la striscia potrebbe essere non perfettamente in posizione.

- Alimentatore meccanico: gli alimentatori di tipo meccanico in genere vengono adoperati per produzioni elevate, quando le velocità di stampaggio e quindi di avanzamento cominciano ad essere critiche. L'avanzamento del nastro avviene tramite rulli, il cui moto deriva dall'albero della pressa tramite dei cinematismi. Questi dispositivi, al contrario di quelli pneumatici, consentono di raggiungere velocità di stampaggio e precisione più elevate.

3.6.3 Materiali e trattamenti degli utensili per stampi per lavorazione a freddo

La scelta un materiale per utensili rispetto ad altri, ma soprattutto le tipologie di trattamenti termici e superficiali a cui essi vengono sottoposti, dipende da diversi fattori, tra cui la durata degli utensili in funzione dei volumi produttivi da realizzare e dal compromesso costi-benefici.

I componenti più critici di uno stampo sono in genere le parti che sono in strisciamento come punzoni, matrici, blocchetti.

Le caratteristiche che questi elementi devono avere sono:

- Durezza.
- Resistenza meccanica.
- Resistenza all'usura, alla scheggiatura, urto, taglio.
- Temprabilità.

Questi elementi dello stampo vengono sempre realizzati con acciai per utensili, temprati o bonificati. In funzione degli stati tensionali e delle forze in gioco nelle lavorazioni, punzoni e matrici sono soggetti ad usure che poi si ripercuotono negativamente sulla qualità dei pezzi finiti e sulla produttività. È quindi fondamentale che gli utensili non si danneggino rapidamente o ancora peggio che si rompino in fase di produzione.

In merito ai trattamenti superficiali degli utensili invece, esistono diverse soluzioni che consentono di ottenere delle superfici molto dure e resistenti all'usura. Le differenze sono nella tipologia di rivestimento e nel processo, ognuno dei quali ha i propri pro e contro.

I processi più comuni per ottenere elevata durezza superficiale sono la cementazione e la nitrurazione, i quali fanno parte della categoria dei trattamenti di *modifica superficiale*. Esistono però altri processi più costosi e particolari che consentono di ottenere dei rivestimenti sottilissimi ma allo stesso tempo molto resistenti allo strisciamento e quindi all'usura, allungando la vita utile degli utensili. Uno di questi processi è la deposizione PVD, il quale fa parte della categoria dei trattamenti di *apporto superficiale*.

Di seguito vengono analizzati più nel dettaglio i processi sopra accennati:

- **Cementazione:** è un processo termochimico che consiste nell'arricchire di carbonio solo la *pelle* o superficie esterna del componente fino ad una percentuale dello 0.8%C.

Tale processo si esegue su acciai con tenori di carbonio dell'ordine dello 0.2%C ed avviene mettendo in contatto il pezzo da trattare con un'atmosfera carburante. Lo scopo è quello di ottenere un materiale tenace al cuore, ma molto duro all'esterno. Esistono diverse tipologie di processi di cementazione: solida, liquida e gassosa. Attualmente l'unico processo di cementazione utilizzato, nonché il più diffuso è quello gassoso, in quanto risulta essere più controllabile e meno pericoloso, soprattutto dal punto di vista ambientale.

Quest'ultimo viene eseguito portando i componenti ad una temperatura di circa 900°C. L'atmosfera carburante è costituita da una miscela di gas e l'agente cementante è l'ossido di carbonio CO prodotto in genere dalla combustione di un idrocarburo come il metano, con ridotta presenza di ossigeno. Il motivo per cui viene eseguito il riscaldamento è perché la diffusività del carbonio è molto più elevata in fase austenitica rispetto a quella ferritica (a T più bassa). All'aumentare della

temperatura (oltre quella di completa austenitizzazione) aumenta la diffusività di C, velocizzando il processo. D'altra parte, però, si verifica l'ingrossamento del grano austenitico, determinando un effetto negativo sulle proprietà meccaniche del componente. È da sottolineare infatti che il riscaldamento che si esegue nel processo di cementazione interessa tutto il pezzo e questo va ad influenzare non solo la pelle esterna, ma anche il cuore del materiale.

Per questo motivo, dopo la cementazione, i pezzi vengono sottoposti ad un trattamento termico in due fasi (Figura 3.49 e Figura 3.50):

- 1) Tempra al cuore: essendo già in fase austenitica a fine processo di cementazione ($T > A_{c3, \text{cuore}}$), viene eseguito direttamente un raffreddamento in acqua o olio in modo da ottenere una microstruttura a grani fini. Questo processo porta ad avere un ingrossamento dei grani nello strato cementato e pertanto si esegue un secondo trattamento termico che coinvolge solo la pelle.
- 2) Tempra in superficie: si riscalda nuovamente il pezzo fino ad una temperatura $A_{c3 \text{cuore}} > T > A_{c3 \text{superficie}}$ e per un tempo tale da ottenere austenite nello strato esterno. Viene eseguito nuovamente un raffreddamento in acqua o olio in modo da ottenere martensite grossolana.

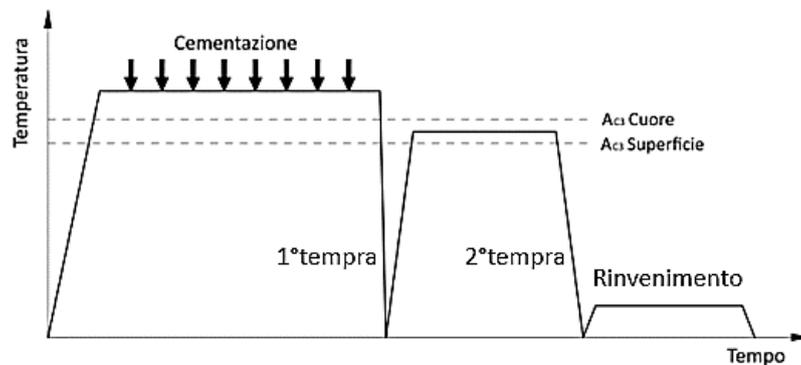


Figura 3.49: Trattamento termico post cementazione [26].

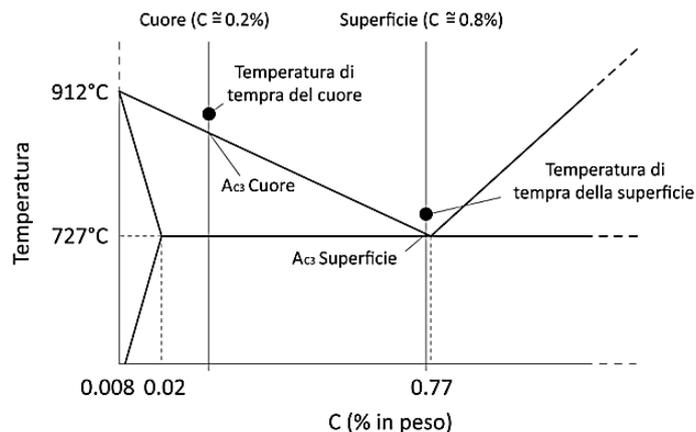


Figura 3.50: Diagramma Fe-C con le trasformazioni relative al cuore ed allo strato cementato [26].

La sequenza delle operazioni di tempra (prima al cuore e poi in superficie) è importante. Se venissero invertite, il riscaldamento ad $A_{C_{3\text{cuore}}}$ eliminerebbe la microstruttura in superficie ottenuta nella prima tempra perché si formerebbe prima l'austenite nello strato cementato e poi al cuore.

Infine, viene eseguito un rinvenimento a circa 200°C. Il fatto di dover eseguire un trattamento termico dopo il processo di cementazione può generare distorsioni nel pezzo. Pertanto, spesso è necessario eseguire lavorazioni di finitura e rettifica.

La profondità dello strato cementato è dell'ordine di 1mm ed i tempi relativi al solo processo di cementazione sono dell'ordine di alcune ore. La durezza superficiale che si ottiene è superiore a quella di un classico processo di tempra ma inferiore ad una nitrurazione.

- Nitrurazione: è un processo termochimico ma, a differenza della cementazione, lo scopo è la formazione di nitruri sulla superficie del pezzo.

Questo processo si esegue su acciai a medio tenore di carbonio (circa 0.4%C), riscaldando i componenti da nitrurare ad una temperatura dell'ordine dei 500°C. L'atmosfera nitrurante è costituita da ammoniaca NH_3 in fase gassosa. La presenza dell'azoto N che va ad arricchire la superficie del manufatto porta alla formazione di nitruri del tipo Fe_xN .

Come è possibile evincere, la nitrurazione avviene in fase ferritica a differenza della cementazione. Questo significa che il pezzo subirà una distorsione praticamente nulla e pertanto, non sono richiesti ulteriori processi di finitura. L'aspetto negativo è che i tempi di processo sono molto lunghi, dell'ordine dei giorni (24-72ore). Lo spessore dello strato nitrurato è molto piccolo (circa 0.1mm) ma durissimo.

- Deposizione PVD [27]: acronimo di *Physical Vapour Deposition* o deposizione fisica da fase vapore e consiste nel creare un rivestimento o film costituito da materiali diversi rispetto a quello del componente da rivestire. Il processo avviene in atmosfera controllata, sottovuoto e consiste nel vaporizzare il materiale di rivestimento affinché possa essere depositato sul pezzo da rivestire. Esistono diverse tecniche per realizzare questo processo, ma le fasi fondamentali del trattamento sono:
 - Generazione: in questa fase, una sorgente esterna provoca l'evaporazione o sublimazione del materiale da depositare sul pezzo.
 - Trasporto: la nube di vapore metallico generata è convogliata sui pezzi da rivestire.
 - Deposizione: il rivestimento si deposita ed attecchisce alla superficie del pezzo grazie alla presenza di un campo elettrico.

Gli spessori dello strato depositato vanno da $<1\mu m$ a $3\mu m$. In funzione delle tipologie di materiali depositati, è possibile avere una vasta gamma di proprietà, come l'elevatissima durezza (dell'ordine delle migliaia di HV), resistenza all'usura, riduzione del grippaggio, quindi rivestimenti ad effetto autolubrificante, resistenza al

calore ed all'attrito causato dalla lavorazione, ma anche resistenza alla corrosione e biocompatibilità.

I materiali sottoponibili al trattamento possono essere di diverso tipo: si passa dai metalli (ferrosi e non ferrosi) ai materiali polimerici, al vetro, alle ceramiche.

Le tipologie di rivestimenti invece, dipendono dalle applicazioni, in quanto i trattamenti PVD non vengono adoperati solo in ambito industriale e lavorazioni meccaniche (stampaggio, utensili da taglio...), ma anche nel settore dell'oreficeria, sanitario, nautico, automotive. Quelli più utilizzati sono:

- Nitruro di titanio TiN
- Carbonitruro di titanio TiCN
- Nitruro di zirconio ZrN
- Nitruro di Cromo CrN

4 Software di simulazione *Stampack Xpress*®

Il seguente capitolo focalizza l'attenzione sul metodo agli elementi finiti, sulle caratteristiche del software di simulazione e soprattutto sul differente approccio alla progettazione rispetto a quello empirico/tradizionale, evidenziando vantaggi e svantaggi.

4.1 Generalità sulle simulazioni agli elementi finiti o *FEM*

Sempre più spesso ormai nelle aziende vengono utilizzati software di simulazione per lo studio dei processi al fine di ridurre i costi, il *time to market*⁶, gli sprechi di materiale ed energia ed aumentare la competitività.

Per metodo *FEM* si intende Finite Element Method, ovvero metodo agli elementi finiti. Il metodo FEM è una tecnica numerica che viene utilizzata per risolvere problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali. Il vantaggio sta nel ricondurre tale problema, complesso da risolvere, in un sistema di equazioni algebriche. Il calcolatore applica la procedura tenendo conto delle variabili e delle condizioni al contorno che l'operatore ha impostato ed esegue i calcoli. Ciò che si ottiene è una soluzione approssimata del problema. L'iter di una procedura FEM è la seguente:

- 1) Discretizzazione del dominio in elementi
- 2) Interpolazione degli spostamenti
- 3) Formulazione dell'equazione agli elementi finiti nel sistema di coordinate locali
- 4) Assemblaggio delle equazioni
- 5) Imposizione dei vincoli
- 6) Risoluzione del problema

In generale, i processi di formatura presentano delle criticità dal punto di vista numerico. Una di queste sono le non linearità e possono essere di diversa natura:

- Geometriche: Si manifestano perché nei problemi di formatura le grandi deformazioni sono volute e pertanto, non vale più l'ipotesi di piccoli spostamenti. La conseguenza è che cambiano i punti di applicazione dei carichi tra un istante di tempo ed il successivo.

⁶ Per *time to market* si intende il periodo di tempo che intercorre fra l'ideazione di un prodotto e la sua effettiva commercializzazione. È quindi costituito dai tempi relativi alle seguenti fasi: lo studio di mercato, lo studio di fattibilità, le fasi di ingegnerizzazione del prodotto e del processo, la creazione di prototipi e la produzione effettiva.

- **Materiale:** La deformazione plastica è voluta perché a fine processo si vuole ottenere una variazione di forma rispetto al grezzo di partenza. Questo implica che in tali processi si lavora sia in campo elastico che in campo plastico. Il comportamento del materiale in campo plastico è di tipo non lineare ed inoltre, è richiesta la conoscenza di altri parametri oltre al modulo elastico per poter studiare il problema e cioè esponente di incrudimento e coefficiente di resistenza.
- **Vincoli e condizioni al contorno:** La condizione di vincolo è un'altra criticità dei problemi di stampaggio (sia massivo che della lamiera) infatti, questi sono vincoli di contatto o vincoli anolonomi, cioè agiscono in una sola direzione; inoltre, possono manifestarsi degli strisciamenti.

Le conseguenze della non linearità sono:

- Non è possibile applicare la sovrapposizione degli effetti.
- È necessario rispettare la sequenza di applicazione dei carichi.
- Le deformazioni non sono proporzionali ai carichi applicati.

I problemi possono essere suddivisi in statici e dinamici. Nel primo caso, il problema (equazioni, materiale...) è indipendente dal tempo; nel secondo caso, si ha anche il contributo temporale, quindi subentrano altri effetti, come le inerzie. I problemi dinamici possono essere risolti per via numerica con diversi metodi. Tali metodi possono essere suddivisi in:

- **Metodi impliciti:** sono incondizionatamente stabili, cioè la convergenza del metodo non è influenzata dal passo di discretizzazione temporale che viene utilizzato.
- **Metodi espliciti:** al contrario dei precedenti, sono condizionatamente stabili. Questo significa che il passo di discretizzazione temporale va scelto con attenzione affinché si abbia la convergenza verso la soluzione.

Il problema maggiore dei metodi espliciti è che il passo temporale non può essere troppo grande (per i problemi di stabilità) ma non deve essere neppure troppo piccolo perché altrimenti i tempi di calcolo possono diventare molto lunghi.

Un metodo esplicito, pertanto, risulta essere più adatto a simulazioni di fenomeni che nella realtà evolvono velocemente perché in questo modo è possibile adottare un intervallo di tempo piccolo (che garantisca la stabilità) e dato che il fenomeno è rapido, si ha un ridotto numero di intervalli di tempo necessari a rappresentare il periodo temporale; quindi, i tempi di simulazione sono contenuti. Paradossalmente però, nel caso dei problemi di stampaggio, i metodi espliciti si prestano meglio rispetto a quelli impliciti perché sono in grado di convergere (entro certi limiti) anche in presenza di instabilità locali derivanti dalla formazione di grinze o dalle condizioni di contatto utensile-pezzo. Per poter sfruttare i metodi espliciti nelle simulazioni dei problemi di stampaggio (che nella realtà sono fenomeni "lenti" o anche detti quasi statici), viene eseguita una sorta di conversione e cioè il processo da simulare viene "velocizzato" rispetto alla realtà.

Nelle simulazioni di stampaggio lamiera, la lavorazione viene simulata al computer attraverso software dedicati. Grazie alla simulazione è possibile analizzare il processo, le sue criticità e lo stato del manufatto in seguito alla formatura, in modo da accorgersi precocemente di eventuali rotture ed imperfezioni superficiali che si possono presentare.

I parametri principali tipicamente richiesti come input dal software di simulazione sono:

- Geometrie degli utensili.
- Geometria iniziale della lamiera o blank.
- Dati sul materiale della lamiera (spessore, caratteristiche meccaniche...).
- Tipologie di operazioni (formatura, tranciatura...).
- Eventuali forze esercitate da premilamiera ed estrattori.

Dal punto di vista del processo, l'iter che viene seguito senza l'uso di software di simulazione è riportato in Figura 4.1. La procedura che invece si segue in seguito all'utilizzo delle simulazioni è riportata in Figura 4.2.

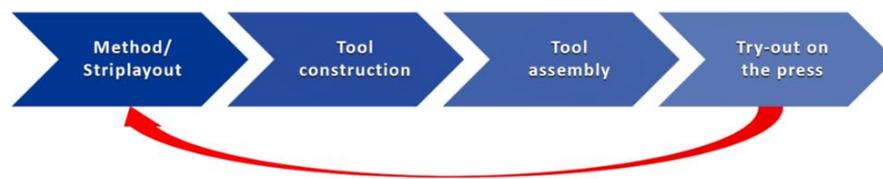


Figura 4.1: Catena di processo senza simulazione: il ciclo di ottimizzazione è lungo e costoso! [28].

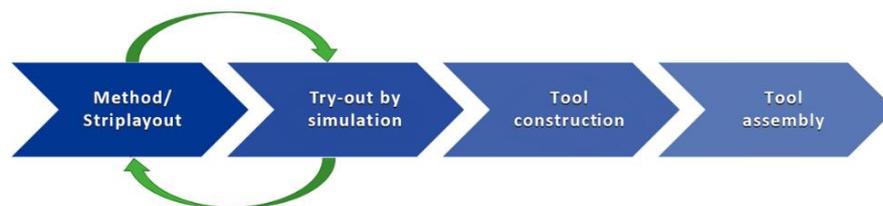


Figura 4.2: Catena di processo con simulazione: il ciclo di ottimizzazione è veloce ed economico [28].

Le simulazioni presentano vantaggi e svantaggi:

- Per quanto riguarda i vantaggi vi è:
 - Possibilità di eseguire un numero elevato di simulazioni, agendo su tutte le variabili che il progettista ha intenzione di modificare ed il tutto praticamente a costo zero se paragonato all'esecuzione di prove pratiche.
 - Possibilità di individuare zone critiche del componente già durante la fase di progettazione ed agire di conseguenza direttamente sul CAD e non sullo stampo già realizzato.
 - Spreco minimo di materiale ed energia per eseguire i test "di tentativo".

- Possibilità di visualizzare le animazioni di formatura ed evidenziare i difetti.
- Valutare la bontà del processo ipotizzato ed ottimizzarlo, senza dover eseguire numerose prove stampo.
- Possibilità di essere meno dipendenti dalla sola esperienza dell'operatore nell'eseguire correzioni del processo ed avere un ulteriore riscontro di tipo numerico.
- Invece, per quanto riguarda gli svantaggi, bisogna ricordare che:
 - La funzione del calcolatore è solo quella di eseguire calcoli elaborando i dati di input forniti dal progettista, sarà poi quest'ultimo a dover interpretare i risultati e ricercare soluzioni.
 - Non sempre i risultati risultano essere corretti ed affidabili. Ciò dipende in parte dalla precisione dei dati che vengono inseriti nel calcolatore, in parte da come viene impostato il processo.
 - I modelli che vengono utilizzati nelle simulazioni sono spesso delle approssimazioni della realtà.
 - I materiali che vengono stampati possono presentare proprietà e caratteristiche differenti sebbene appartengano allo stesso lotto.
 - Altro aspetto negativo consiste nel fatto che i risultati saranno sempre approssimati indipendentemente dalla bontà della simulazione e dalla sua impostazione.

4.2 Caratteristiche del software di simulazione Stampack Xpress®

Stampack Xpress® è un software per la simulazione 3D di processi di formatura della lamiera come l'imbutitura profonda, piegatura e tante altre operazioni. Inoltre, permette il calcolo del ritorno elastico e l'ottimizzazione del contorno del blank iniziale. In Figura 4.3 è visibile il logo e le operazioni che il software è in grado di simulare.

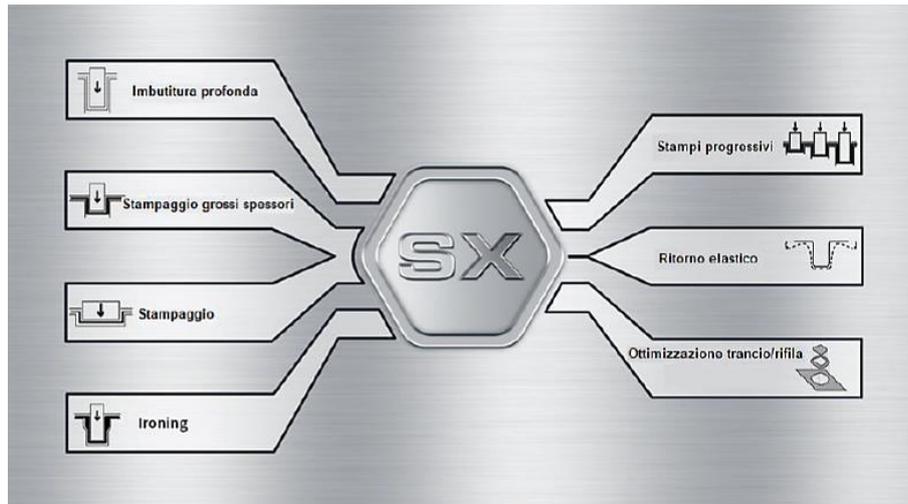


Figura 4.3: Logo e tipologie di processi che il software è in grado di simulare [28].

Uno dei grossi vantaggi di Stampack® è la possibilità di eseguire simulazioni di tipo *shell* o *solida*.

- La tipologia Shell viene utilizzata quando le principali deformazioni sono nel piano del blank. In questi casi la deformazione lungo la direzione dello spessore può essere trascurata ed il metodo di simulazione risulta semplificato e più veloce. Lo svantaggio riguarda il fatto che non è possibile fare un'analisi approfondita in merito a rotture, assottigliamenti e strappi. In genere questa tipologia viene adoperata quando lo spessore della lamiera è molto più piccolo rispetto alle altre dimensioni del blank.
- La tipologia Solida viene utilizzata quando vi è un'azione importante nella direzione dello spessore del blank durante il processo di formatura, come ad esempio la coniatura. In questi casi, le deformazioni nella direzione dello spessore non vengono trascurate e viene tenuto conto anche del contributo del taglio. Questo tipo di simulazione utilizza una mesh tridimensionale ed è più dettagliata di una simulazione shell.

Per poter eseguire una simulazione è necessario preparare il modello CAD. Ciò che va importato in Stampack® è il blank iniziale bidimensionale e le superfici degli utensili che effettivamente eseguono la formatura. Non è infatti necessario importare gli utensili solidi perché allungherebbero inutilmente i tempi di calcolo. Un altro aspetto importante è la posizione degli utensili e del blank. Gli utensili che fanno parte di una stazione di formatura devono essere posizionati tra loro in modo da riprodurre lo stampo quando è chiuso.

Il software è organizzato in sezioni. Le prime tre richiedono l'inserimento dei dati di input. Infine, vi sono quelle di calcolo e di post-processor per la visualizzazione dei risultati della simulazione. L'iter di impostazione della simulazione va da sinistra verso destra come in Figura 4.4.

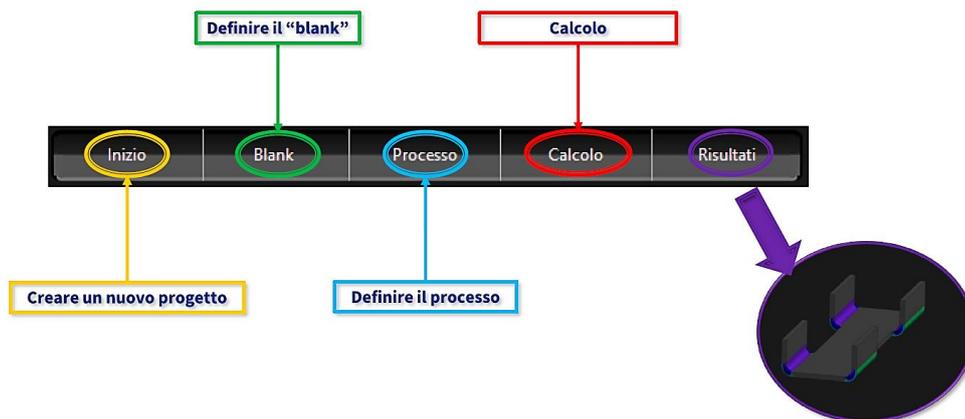


Figura 4.4: Barra di navigazione per accedere alle varie sezioni di impostazione della simulazione.

5 Caratteristiche del componente

Nel seguente capitolo saranno analizzate tutte le caratteristiche del componente oggetto di studio, dando particolare enfasi ai requisiti richiesti, alle criticità ed alle implicazioni che queste determinano sul processo di stampaggio.

5.1 Generalità e requisiti del componente

Il componente oggetto di studio è un'anima o inserto metallico che dovrà essere poi co-stampato, quindi annegato all'interno del materiale polimerico.

In Figura 5.1 è riportata la vista isometrica del componente oggetto di studio. Nella stessa figura sono inoltre visibili i riferimenti.

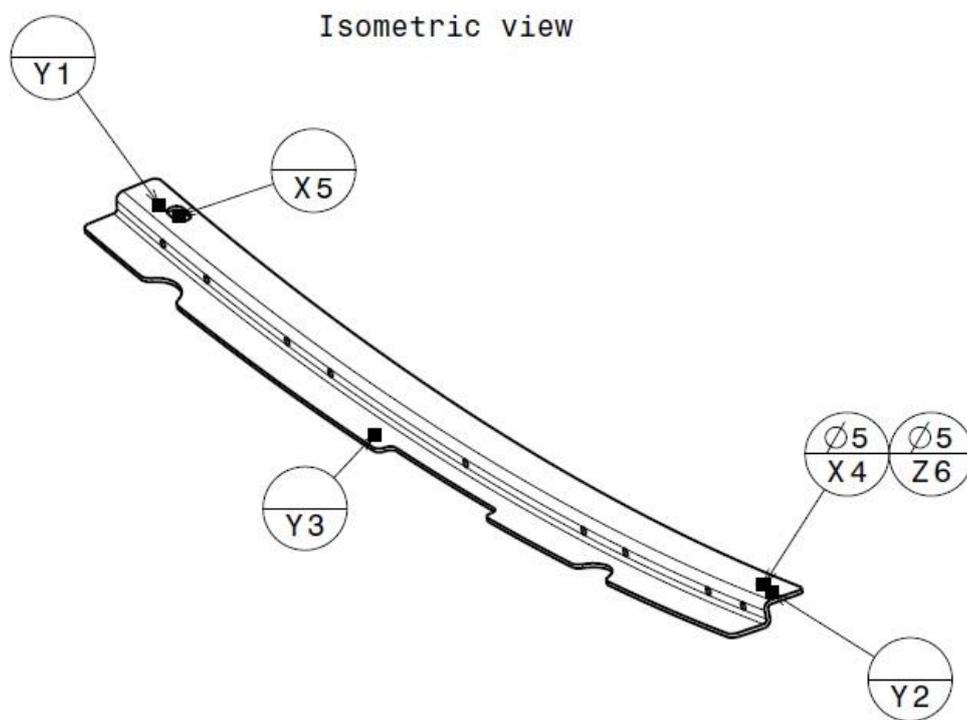


Figura 5.1: Vista isometrica del componente (sinistro) oggetto di studio.

5.1.1 Requisiti geometrici

In Figura 5.2 è riportata la messa in tavola del componente con le varie viste ed i requisiti richiesti.

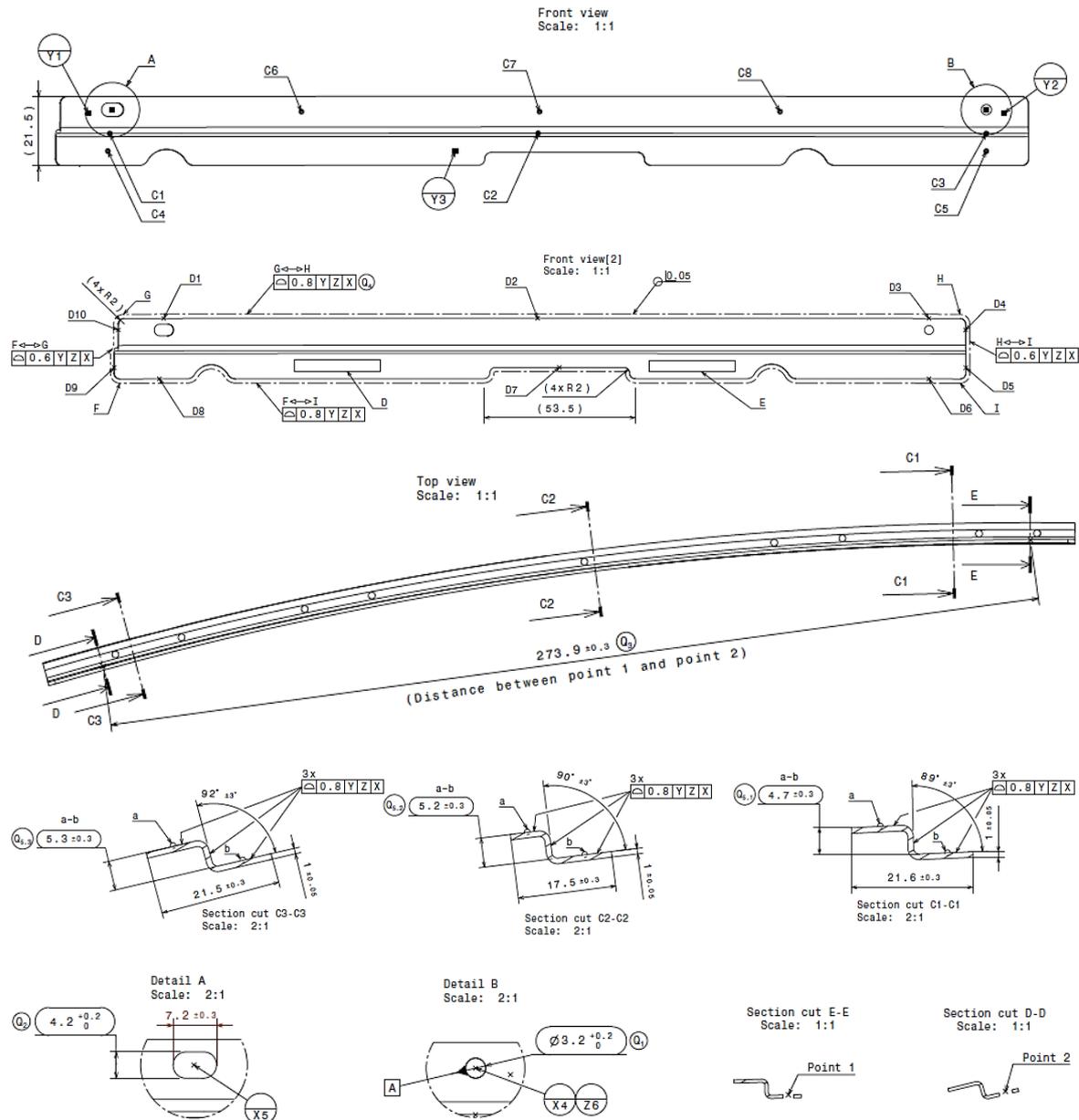


Figura 5.2: Messa in tavola del componente e requisiti richiesti.

5.1.2 Materiale

Il materiale richiesto per la realizzazione dei particolari stampati è l'AISI 430 (altre designazioni: X6Cr17 o 1.4016), acciaio inossidabile ferritico. Le peculiarità di questo acciaio sono essenzialmente due e cioè si tratta di un materiale:

- *Inossidabile*, cioè è in grado di resistere alla corrosione.
- *Ferritico*, quindi è in grado di mantenere le proprietà magnetiche anche a temperatura ambiente. Un acciaio inox di tipo austenitico come l'AISI 304 è infatti amagnetico a

tale temperatura ed è più pregiato dato che contiene nichel. La proprietà magnetica è voluta in quanto servirà a bloccare il pezzo all'interno dello stampo termoplastico in fase di co-stampaggio.

Per l'applicazione oggetto di studio, il materiale è fornito in coil da 1.0 x 348mm, con tolleranza sullo spessore di 0.5mm; stato di fornitura BA o 2R, secondo la EN10088:2, cioè laminato a freddo, ricotto e sottoposto a skin pass.

La direzione di laminazione del materiale è diretta lungo l'asse X dello stampo, cioè lungo la direzione di avanzamento della striscia.

Le proprietà del materiale dichiarate dal fornitore per il lotto impiegato nei test sono:

- Composizione chimica (Tabella 5.1):

Elementi	C	Cr	Si	Mn	S	P
%	0.035	16.202	0.410	0.357	0.002	0.027

Tabella 5.1: Composizione chimica.

- Le caratteristiche meccaniche (Tabella 5.2):

Limite di snervamento Rp _{0.2}	Carico di rottura Rm	Allungamento percentuale A80
MPa	MPa	%
358	491	27

Tabella 5.2: Caratteristiche meccaniche.

5.2 Definizione del processo di stampaggio

Dal momento che vanno ottenuti due componenti speculari, risulta conveniente produrli contemporaneamente durante lo stesso ciclo di stampaggio. Questo servirà a:

- Evitare, dal punto di vista delle forze, problemi di sbilanciamento.
- Garantire la simmetria fra le due parti da stampate.
- Garantire la ripetibilità.

È stato pertanto eseguito lo studio striscia per poter definire il tipo ed il numero di operazioni necessarie per realizzare i particolari destro e sinistro. In Figura 5.3 è visibile la vista in pianta della striscia, su cui sono riportate le informazioni fondamentali e cioè operazioni, passo e larghezza striscia. In questo modo è possibile definire le dimensioni indicative dello stampo.

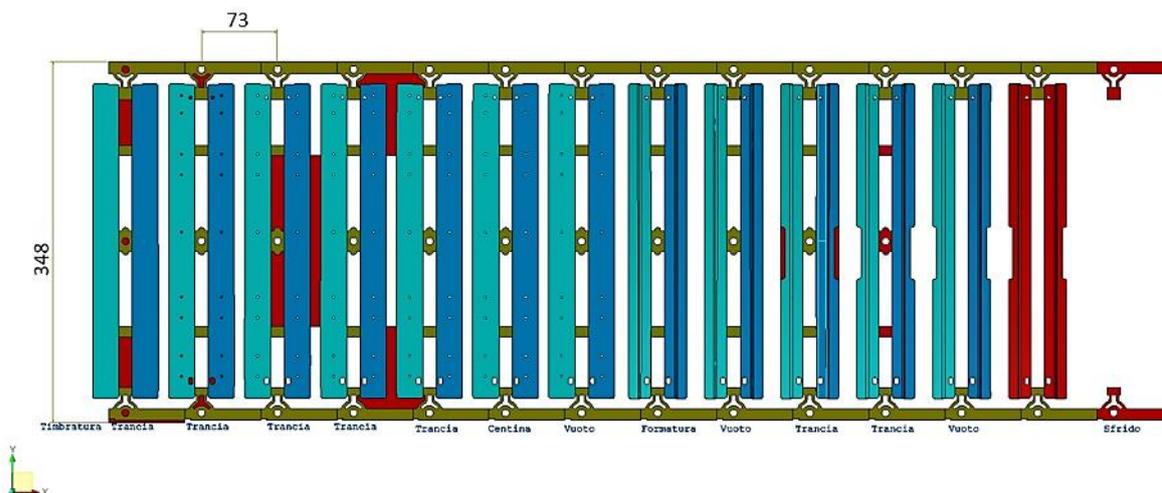


Figura 5.3: Studio striscia.

Le informazioni relative allo studio striscia sono raggruppate nella Tabella 5.3.

Fabbisogno	Spessore lamiera	1 mm
	Passo	73 mm
	Larghezza striscia	348 mm
Operazioni	Tranciatura pre formatura	4 operazioni per liberare le zone da sottoporre a formatura
	Formatura	Centinatura e piega a Z
	Tranciatura post formatura	3 operazioni per eliminare i trattenitori e staccare il pezzo finito dal resto della striscia

Tabella 5.3: Riepilogo studio striscia.

Una delle criticità legate alla formatura del pezzo, è la centinatura, cioè la realizzazione della piega in senso longitudinale. Il problema nasce dal fatto che essendo il raggio di curvatura e la lunghezza di piega molto grandi non si è in grado di plasticizzare in maniera efficace il materiale, determinando di conseguenza un elevato ritorno elastico quando il pezzo viene rilasciato ed estratto dallo stampo. Per ovviare a tale problema, vengono realizzate due operazioni contemporaneamente e cioè la centinatura e la piega trasversale a Z. In questo modo, tale piega funge da nervatura e quindi permette di mantenere la forma voluta.

Un'altra criticità è dovuta al fatto che essendo il componente allungato e stretto, si ha una superficie ridotta su cui il premilamiera potrà esercitare la propria azione. Pertanto, il rischio maggiore sarà quello di avere uno scarso trattenimento della lamiera e ciò causa distorsioni nel pezzo. La variabile su cui si è potuto agire è la forza esercitata dal premilamiera.

6 Prove empiriche

In questo capitolo sarà descritto l'iter di tipo iterativo che è stato seguito per le prove empiriche o test di formatura. Saranno descritte le prove, cosa le differenzia l'una dall'altra e quali sono le osservazioni derivanti da ognuna di esse in base ai parametri modificati di volta in volta.

6.1 Blank

Essendo due i componenti speculari fra loro, lo sviluppo o blank contiene entrambi i pezzi destro e sinistro. Questo al fine di avere un processo più bilanciato sia dal punto di vista delle forze esercitate sullo stampo ma anche per cercare di avere una buona ripetibilità e simmetria fra le parti, in quanto le forme e le dimensioni sono abbastanza complesse da ottenere tenendo conto delle tolleranze richieste.

Uno degli sviluppi tagliati al laser è visibile in Figura 6.1.

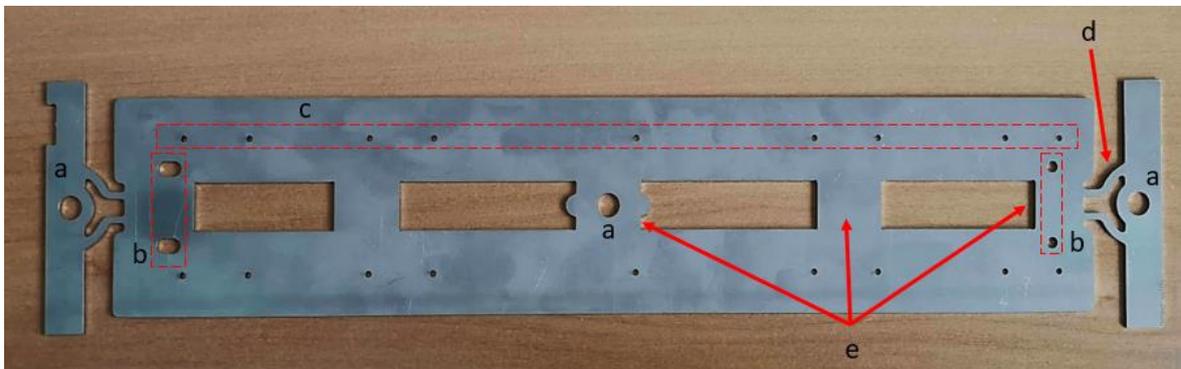


Figura 6.1: Blank.

Le caratteristiche principali del blank visibile sono:

- Tre fori $\varnothing 7$ mm disposti in maniera equidistante fra loro al centro ed agli estremi della striscia.
- Due asole e due fori che rappresentano i datum dei due pezzi destro e sinistro che si ricaveranno dal processo.
- Nove fori per lato, necessari in fase di co-stampaggio, per consentire al materiale polimerico di inglobare e trattenere al meglio l'anima in metallo.
- Quattro trattenitori flessibili agli estremi per consentire al materiale di potersi deformare agevolmente, ma garantendo comunque un collegamento tra pezzi ed il resto della striscia.

- e) Trattenitori rigidi tra le asole ed i fori al fine di limitare le deformazioni in direzione trasversale del pezzo in fase di piega. I trattenitori in mezzeria sono stati aggiunti in un secondo momento a valle dei risultati ottenuti durante le prove di formatura.

Per le prove di formatura, i blank non sono stati ricavati tramite tranciatura, bensì tramite taglio laser.

6.2 Stazione di piega

Per l'esecuzione delle prove di stampaggio è stata realizzata solo la stazione di piegatura, la quale farà poi parte dell'intero stampo progressivo. Ciò ovviamente servirà a cercare di limitare tempi e costi in fase di progettazione.

In Figura 6.2, Figura 6.3 e Figura 6.4, sono visibili rispettivamente la parte inferiore, intermedia e superiore della stazione di piega. In Figura 6.5 è invece visibile una sezione longitudinale, eseguita in mezzeria, della stazione di piega.

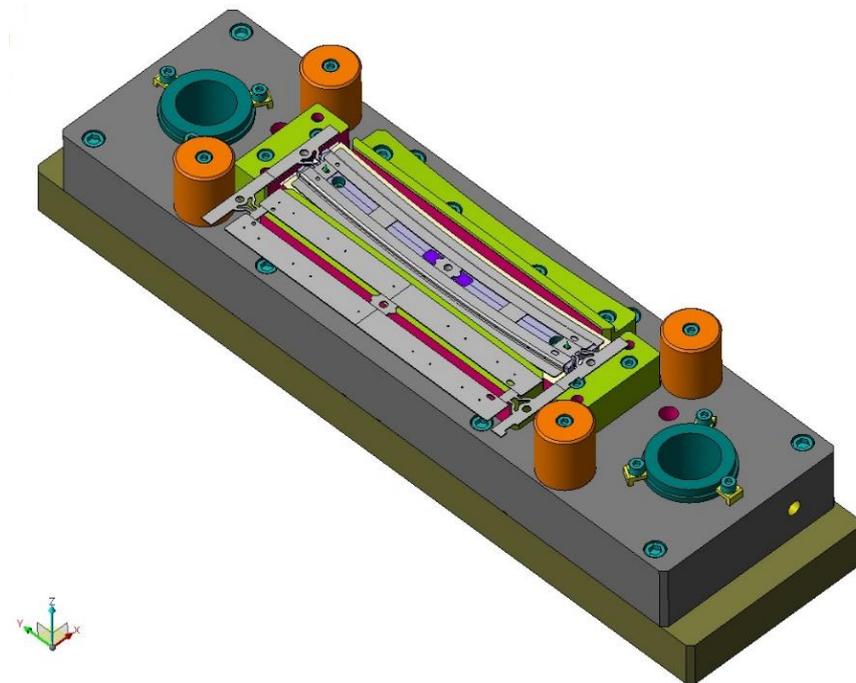


Figura 6.2: Parte inferiore della stazione di piega e posa del blank e del pezzo appena stampato.

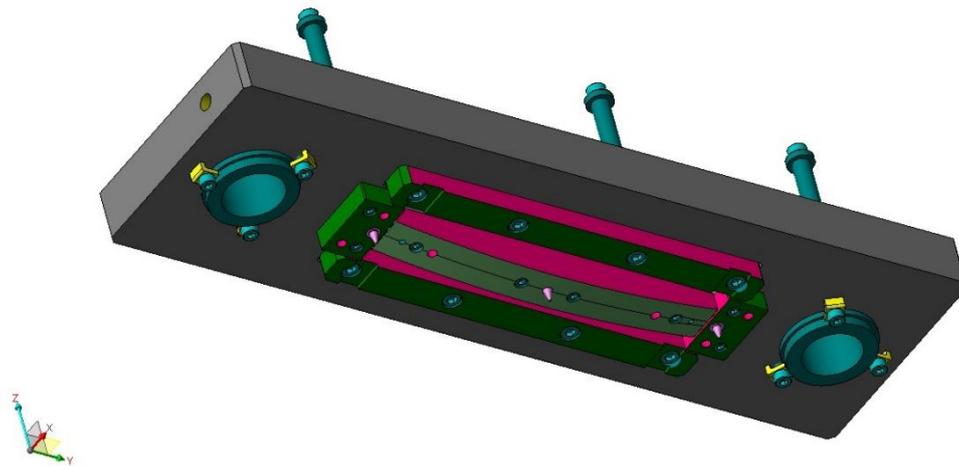


Figura 6.3: Parte intermedia della stazione di piega.

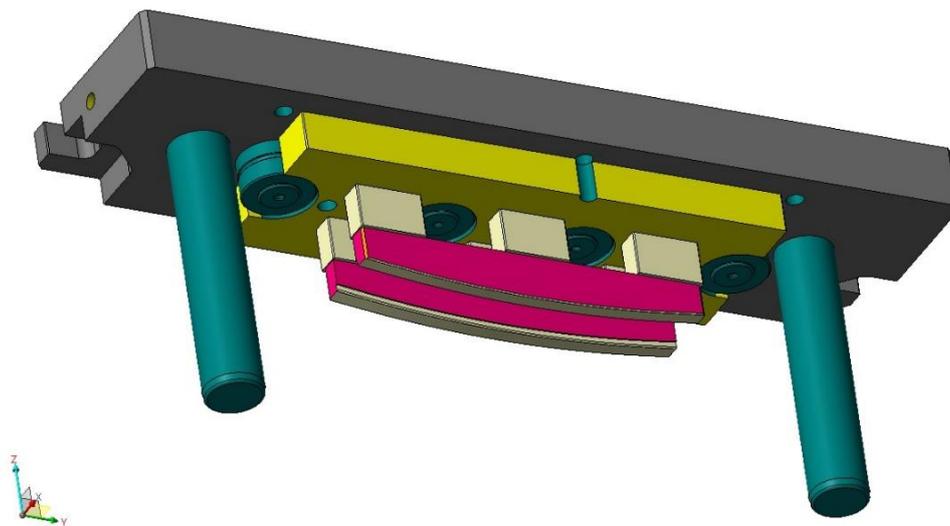


Figura 6.4: Parte superiore della stazione di piega.

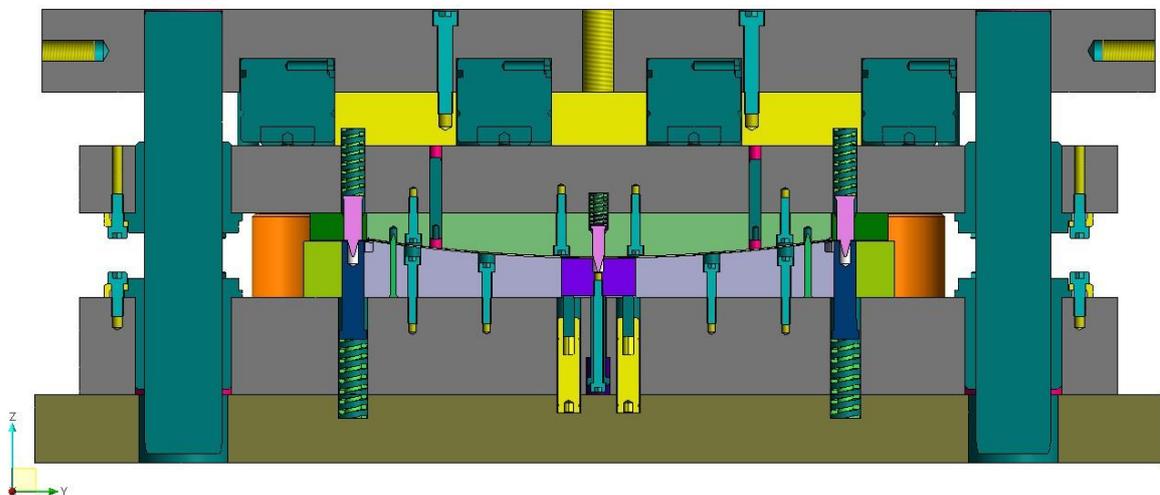


Figura 6.5: Sezione longitudinale della stazione di piega.

In Figura 6.6, è invece riportata la sezione trasversale, eseguita sempre in mezzzeria, dove è possibile osservare i componenti fondamentali.

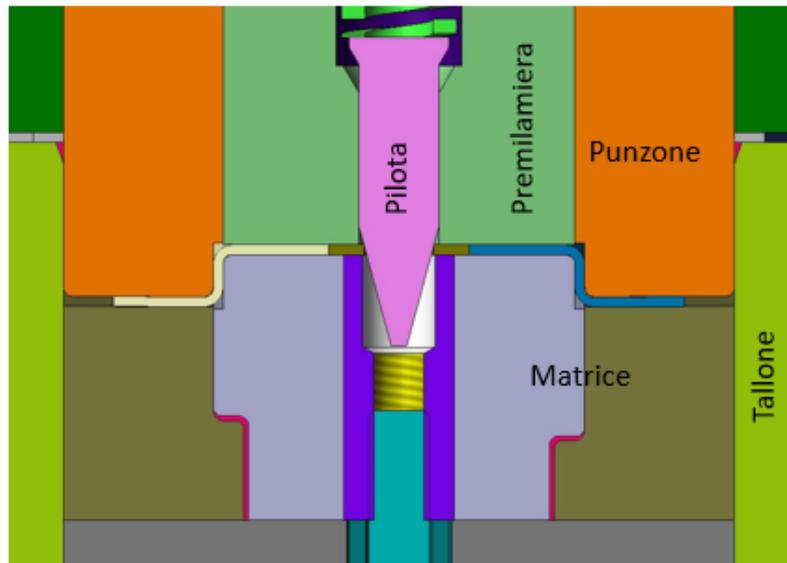


Figura 6.6: Sezione trasversale della stazione di piega.

6.3 Stampo a passo

Lo stampo a passo completo per la realizzazione del componente oggetto di studio è riportato in Figura 6.7. In Figura 6.8 è invece riportata la vista dall'alto della parte inferiore dello stampo.

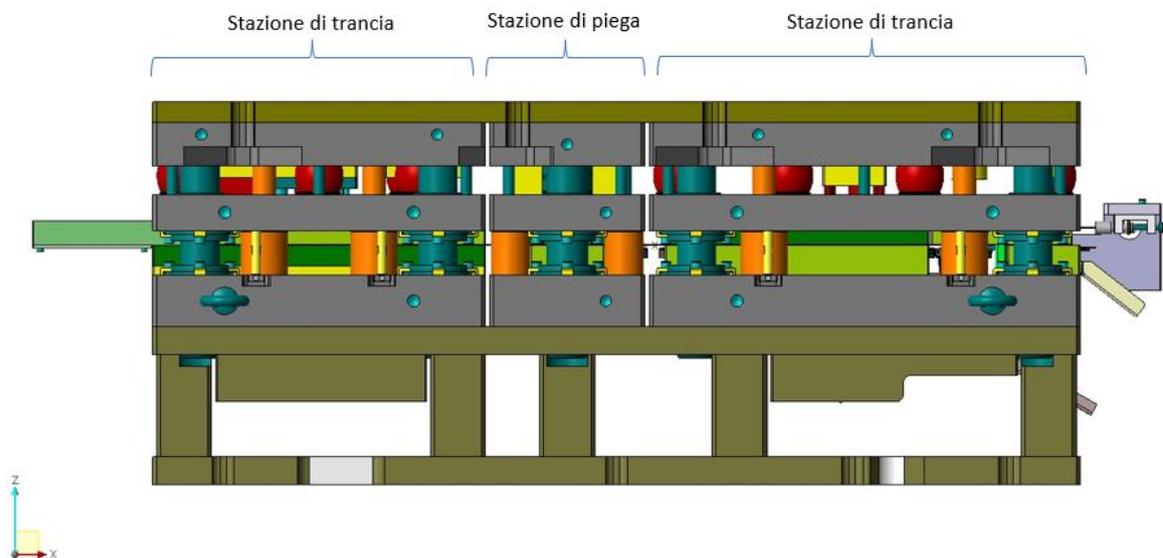


Figura 6.7: Vista laterale dello stampo completo.

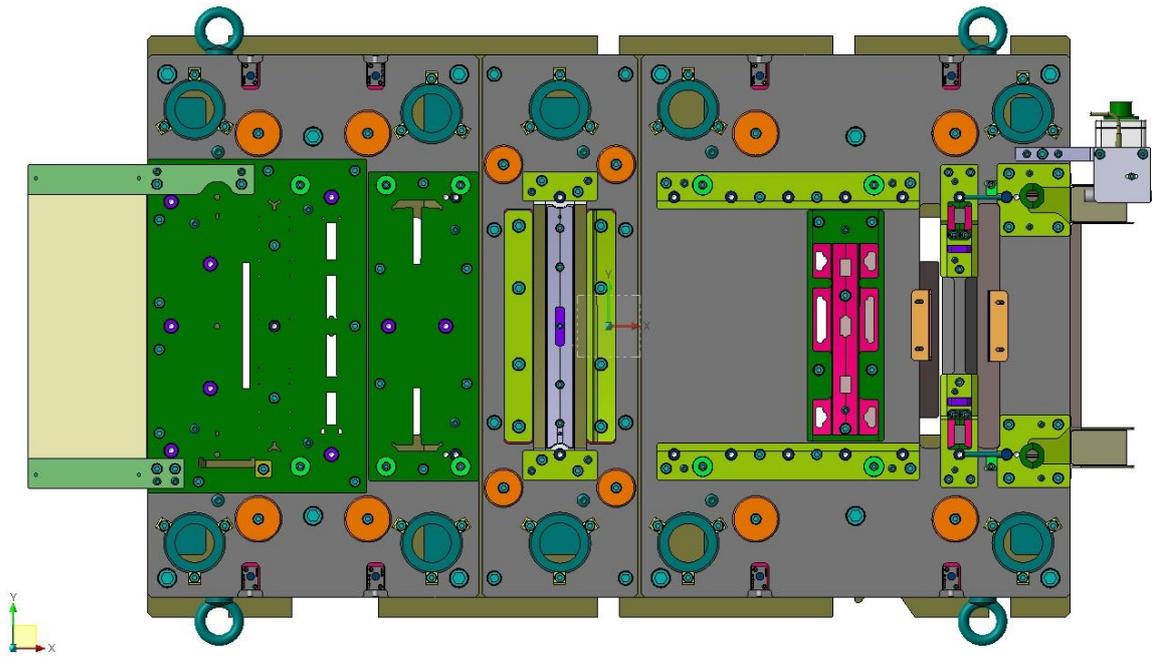


Figura 6.8: Vista dall'alto della parte inferiore dello stampo completo.

La prima stazione di trancia (a sinistra) viene utilizzata per liberare il pezzo in piano e prepararlo alla fase di formatura, che avviene in un'unica operazione. L'ultima stazione a destra invece, esegue la tranciatura dei trattenitori ed infine lo stacco del pezzo dalla striscia.

Lo stampo completo è stato utilizzato soltanto dopo aver messo a punto l'operazione di formatura.

6.4 Prove pratiche iterative

In questo paragrafo vengono descritte le prove pratiche eseguite per la messa a punto degli utensili della stazione di piega. Lo scopo di questi test è ottenere un pezzo che rispetti forme e dimensioni richieste a disegno.

La stazione di piega adoperata è stata staffata su una pressa che in azienda viene utilizzata per le prove preliminari (Figura 6.9). Le prove definitive invece, vengono eseguite sempre sullo stampo completo.



Figura 6.9: Stazione di piega staffata alla pressa per l'esecuzione delle prove stampo (Sacel S.r.l.).

NOTE:

- Le quote di tutti gli schemi riportati di seguito sono in millimetri.
- I risultati numerici ed il successivo confronto sono riportati nel paragrafo 8.1.

6.4.1 1° prova

Le geometrie e le dimensioni degli utensili sono state mantenute, per la prima prova, identiche a quelle nominali, cioè gli utensili rappresentano il negativo del pezzo. Ciò per cercare di capire come si comporta il materiale in tali condizioni ed in base all'esito di tale prova, si decide su cosa agire.

L'unica viziatura eseguita è la modifica del raggio di arrotondamento del punzone portato da 1mm (nominale) a 0.8mm. Gli utensili con la viziatura sono visibili in Figura 6.10.

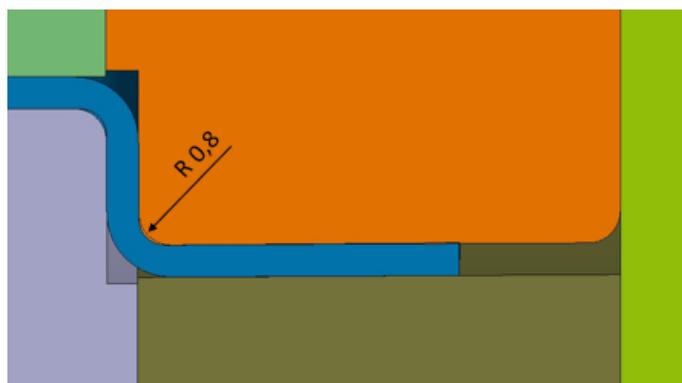


Figura 6.10: Modifiche utensili 1° prova.

Lo sviluppo utilizzato è provvisto di tre trattenitori rigidi. Per quanto concerne il premilamiera invece, la forza è stata ipotizzata pari a circa 34 KN al contatto.

Da questa prima prova è emerso innanzitutto che lo stampo non presenta problemi in merito a pericolose collisioni tra parti mobili e fisse. Dal punto di vista del pezzo stampato, la criticità maggiore consiste nel fatto che essendo la superficie di contatto premilamiera-pezzo molto stretta e allungata, in fase di discesa il punzone di piega tende a trascinare in direzione trasversale il materiale soprattutto nella zona centrale, deformando il componente. Per poter cercare di risolvere tale problema, sono stati sostituiti i cilindri ad azoto, aumentando la forza che il premilamiera può esercitare.

Un difetto riscontrato sul pezzo è la presenza dei segni di strisciamento del punzone sulla parete verticale della piega a Z, come in Figura 6.11. Questo perché la luce o gioco lasciato fra matrice e punzone è praticamente pari allo spessore della lamiera

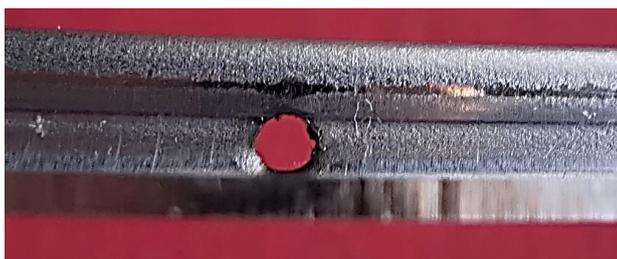


Figura 6.11: Strisciamento del punzone sul pezzo.

La presenza di soli tre trattenitori ha determinato una deformazione eccessiva del componente. In particolare, in Figura 6.12 è visibile, a destra e sinistra, la distorsione dei riferimenti (fori ed asole) ed al centro l'ovalizzazione del foro centrale per il pilotaggio.



Figura 6.12: Distorsione dei fori sul pezzo reale.

6.4.2 2° prova

Questo test è stato eseguito mantenendo le stesse geometrie di punzoni e matrice utilizzati nella prima prova. La luce fra punzone e matrice non è stata modificata ancora in questa prova perché ciò significherebbe modificare punzone e/o matrice alle macchine utensili e questo implica un costo sia dal punto di vista economico che temporale. Quindi si è optato per la modifica del carico del premilamiera per valutare se il problema della deformazione potesse essere risolto già con questa soluzione. Pertanto, sono stati sostituiti i cilindri ad azoto in modo da ottenere una forza del premilamiera di circa 60 KN al contatto.

L'unica modifica apportata al blank è lo spostamento dei forellini della parete verticale verso i riferimenti (foro e asola) di 0.25 mm, come in Figura 6.13.

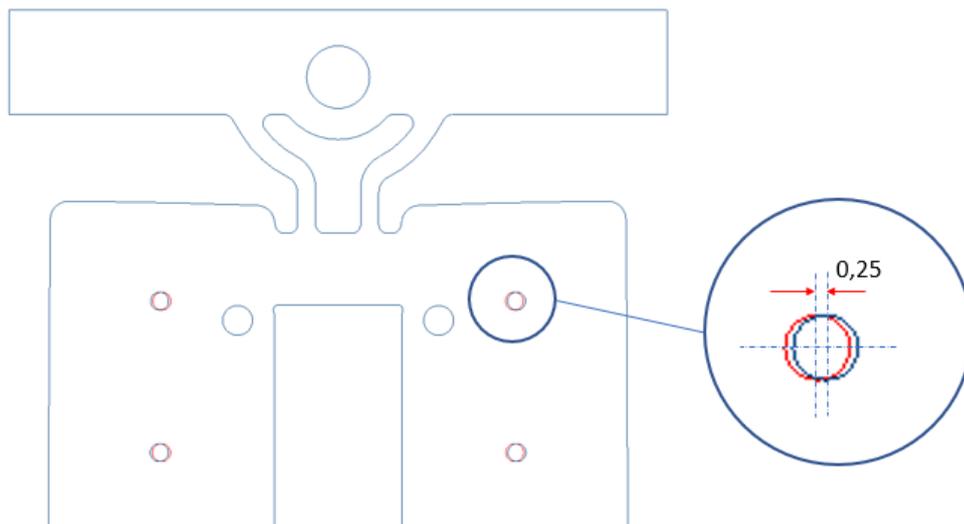


Figura 6.13: Modifica eseguite sul blank per la 2° prova.

In questa prova, le deformazioni risultano essere ancora visibilmente eccessive ma, rispetto al test precedente, si è avuto un leggero miglioramento. I fori e le asole sono meno ovalizzati e deformati, ma il premilamiera non è ancora in grado di trattenere la lamiera e questo lo si intuisce dal fatto che la deformazione trasversale in mezzeria tra due trattenitori è ancora elevata. Per questo motivo, sono state eseguite ulteriori modifiche.

6.4.3 3° prova

In questa prova, la modifica apportata agli utensili consiste nell'aumento della luce fra punzone e matrice, che è stata incrementata arretrando le pareti verticali della matrice di 0.15mm per parte, come riportato in Figura 6.14. Il blank utilizzato è lo stesso della 2° prova.

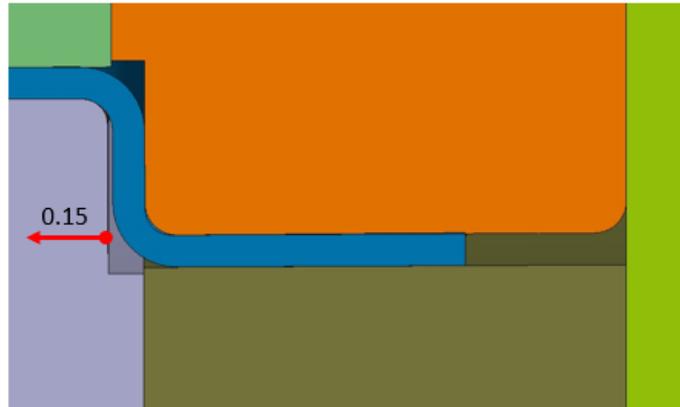


Figura 6.14: Modifiche utensili 3° prova.

Da questa prova è emerso che il segno di strisciamento si è ridotto, ma non del tutto e questo è imputabile sia alla luce disponibile, sia al raggio di arrotondamento del punzone.

Dal punto di vista delle deformazioni, l'aumento della luce fra punzone e matrice non ha determinato un miglioramento effettivo. Il premilamiera non è ancora in grado di trattenere in modo efficace i due pezzi speculari.

6.4.4 4° prova

Per risolvere definitivamente il difetto legato allo strisciamento, è stato aumentato il raggio di scorrimento del punzone, in modo da avere un contatto più dolce e graduale con la lamiera. È stato inoltre aumentato il gioco arretrando la parete verticale del punzone di 0.1 mm. Le modifiche apportate sono visibili anche in Figura 6.15. Il Blank adoperato è ancora lo stesso utilizzato nelle prove 2 e 3.

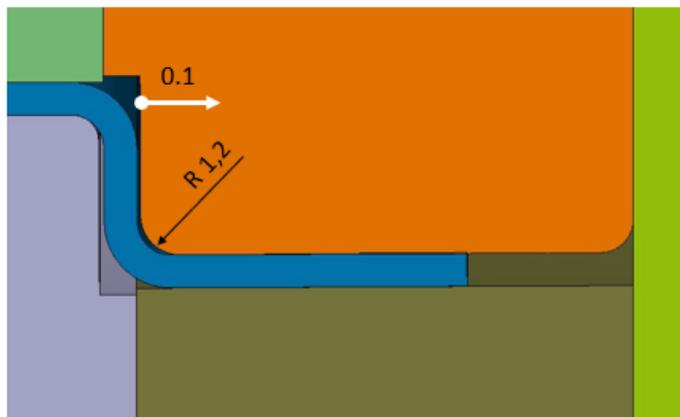


Figura 6.15: Modifiche utensili 4° prova.

Il risultato è quello previsto e cioè non sono più presenti segni sulla parete verticale del pezzo. Inoltre, vi è ancora un ulteriore miglioramento dal punto di vista delle deformazioni.

6.4.5 5° prova

Per cercare di trattenere ancora meglio la lamiera e quindi ridurre le deformazioni del blank sono state eseguite ulteriori modifiche allo sviluppo, cioè sono stati aggiunti altri due trattenitori in mezzeria, mentre quelli già presenti sono stati allargati ed è stato ridotto il diametro dei fori della parete verticale della piega a Z. In Figura 6.16 è stato riportato il blank così modificato (in rosso) sovrapposto al blank della 2° prova (in blu), in modo da poter apprezzare meglio le modifiche effettuate.

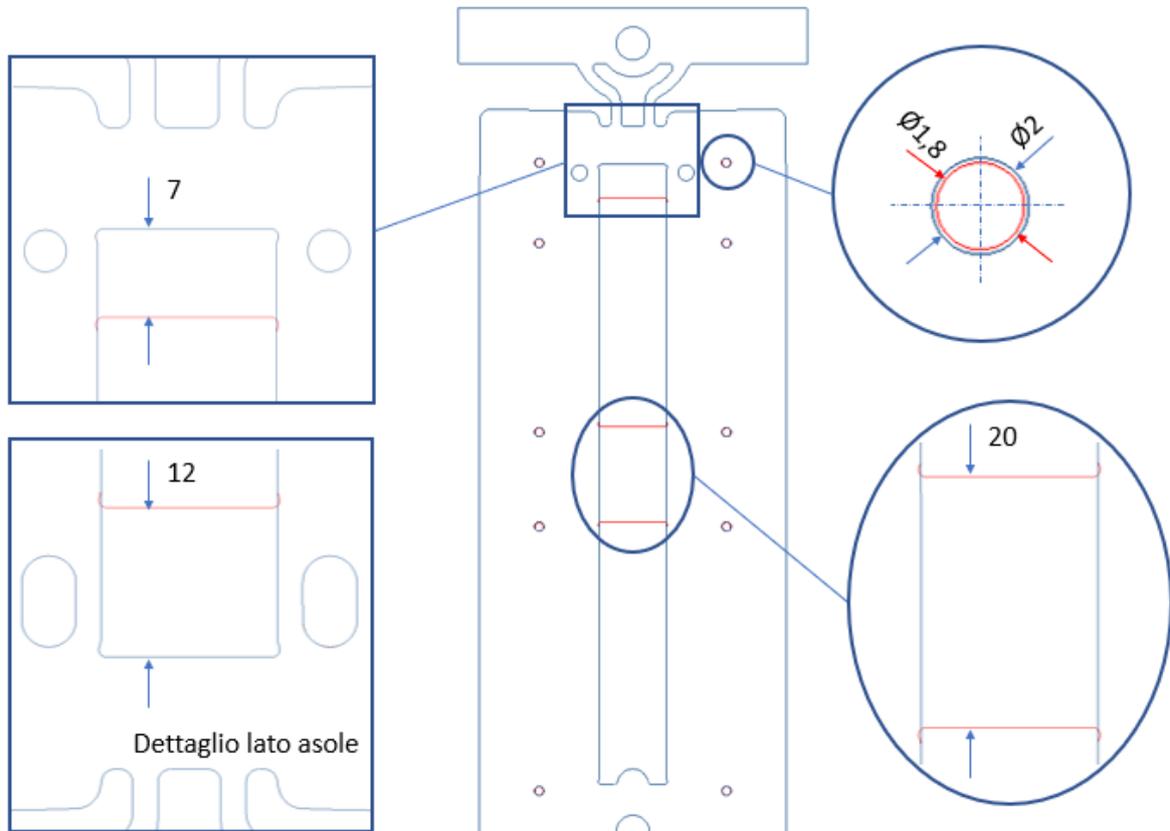


Figura 6.16: Modifica eseguite sul blank per la 5° prova.

Dai pezzi ottenuti in seguito a questa prova, si osserva un netto miglioramento dal punto di vista delle distorsioni del pezzo, in particolare dei riferimenti foro ed asola, come è possibile constatare dal confronto della Figura 6.12 con la Figura 6.17.



Figura 6.17: Componente con trattenitori aggiuntivi.

6.4.6 6° prova

Migliorata la questione delle deformazioni del blank, l'obiettivo si è spostato sul miglioramento della geometria del pezzo da ottenere. Dall'analisi dei pezzi ottenuti nelle prove precedenti, è stato notato che la piega a Z non era geometricamente corretta. Per migliorare l'angolo di piega, è stato abbassato di 0.35 mm lo spigolo in punta sia del punzone che della matrice, come riportato in Figura 6.18.

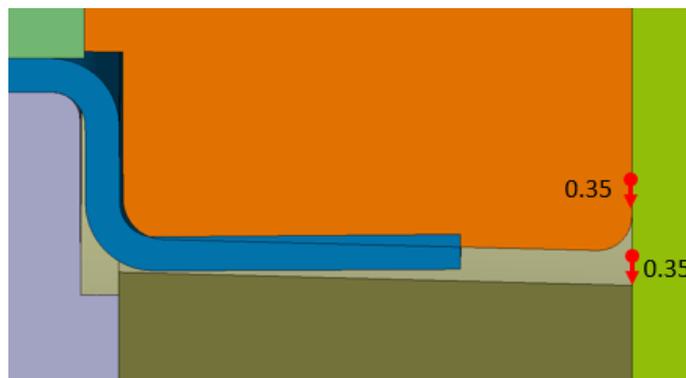


Figura 6.18: Modifiche utensili 6°prova.

Per migliorare il profilo del pezzo finale invece, è stato arretrato verso l'interno il bordo esterno del blank di 0.5 mm per lato. In Figura 6.19 viene riportato il confronto fra il blank con la modifica (in rosso) ed il blank della prova 5.

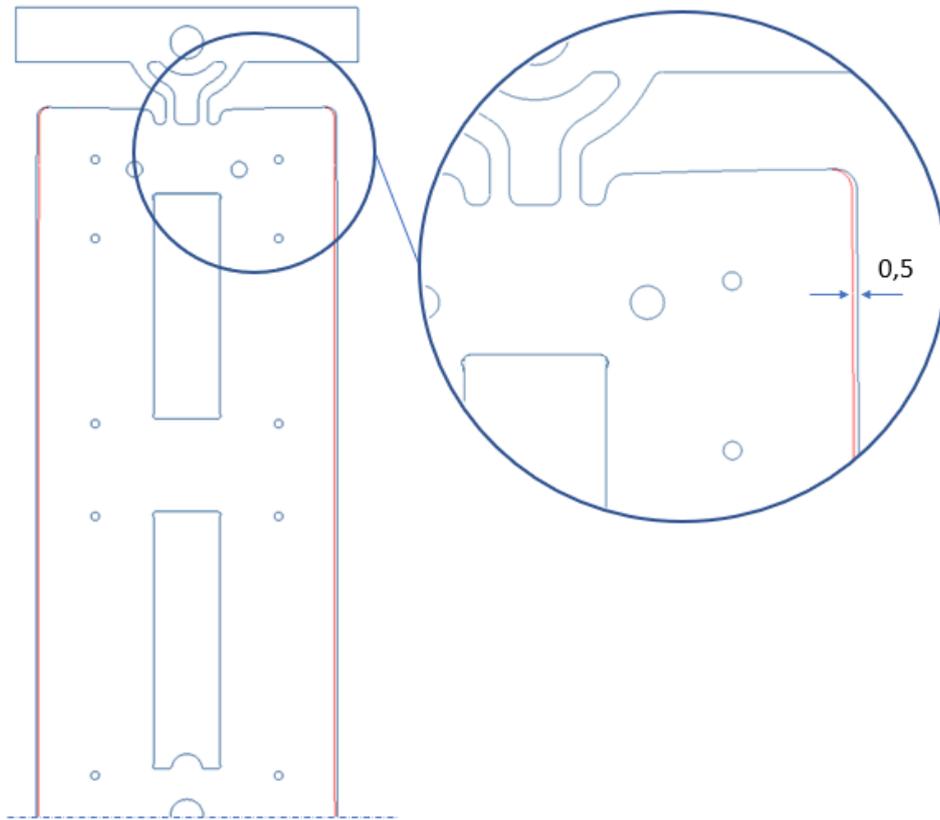


Figura 6.19: Modifica eseguite sul blank per la 6° prova.

Dal punto di vista dei risultati ottenuti, vi è ancora un miglioramento sia per quanto riguarda le deformazioni del pezzo, sia per quanto concerne forma. Un problema riscontrato in questa prova è che l'asola di un pezzo ed il foro del pezzo opposto risultano essere spostati come se il blank all'interno dello stampo avesse subito una rotazione intorno al pilota centrale.

6.4.7 7° prova

Alla luce dei risultati della prova precedente, è stato ritenuto opportuno eseguire ulteriori modifiche sia dello stampo che del blank. Dato che i trattenitori alle estremità sono flessibili, in fase di chiusura dello stampo questi potrebbero deformarsi e quindi il blank potrebbe subire una piccola rotazione intorno al pilota centrale. Pertanto, sul blank sono state aggiunte delle asole ed eseguite altre modifiche per migliorare le dimensioni del pezzo. In Figura 6.20, Figura 6.21 e Figura 6.22, sono riportati in rosso il blank modificato, mentre in blu il blank della prova 6.

Dal punto di vista delle modifiche apportate allo stampo, sono stati aggiunti due piloti che vanno ad accoppiarsi con le asole sopra citate per garantire l'allineamento del blank.

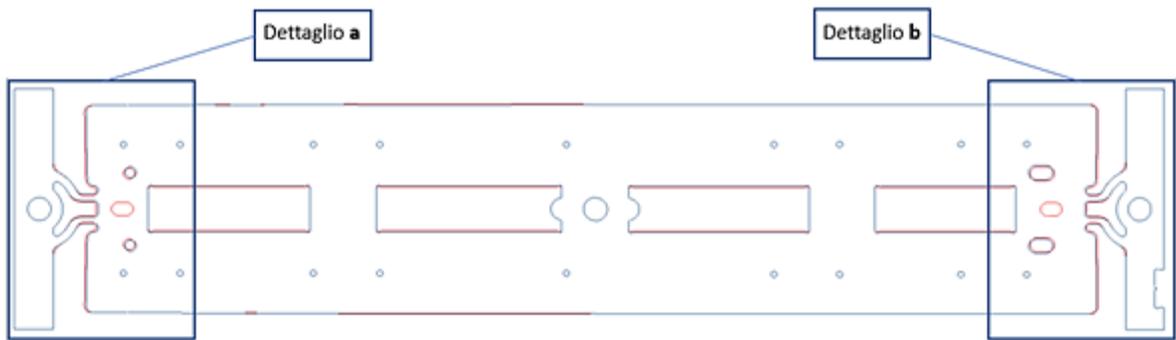


Figura 6.20: Modifica eseguite sul blank per la 7° prova.

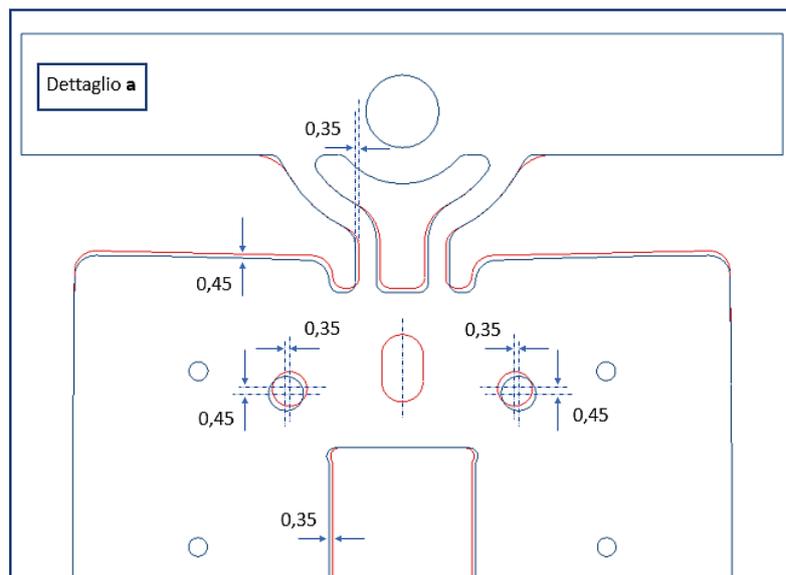


Figura 6.21: Dettaglio a: modifiche lato fori.

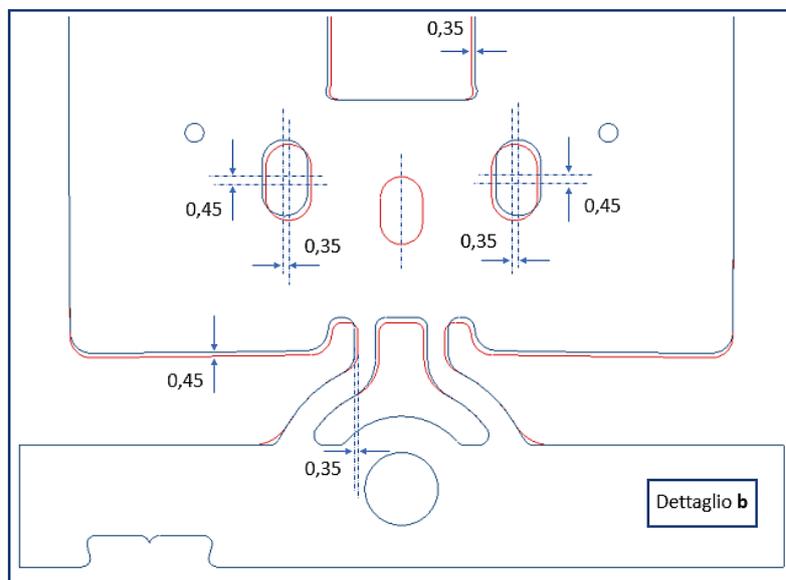


Figura 6.22: Dettaglio b: modifiche lato asole.

6.4.8 8° prova

Il pezzo ottenuto con le modifiche precedenti risulta essere in tolleranza fatta eccezione per alcune zone. Lo scostamento rilevato è risultato tale da pensare di modificare la posizione di foro ed asola (quindi dei riferimenti) in modo da centrare tali regioni non conformi nelle zone di tolleranza e mantenendo il resto invariato. Pertanto, sono stati spostati i riferimenti verso l'esterno (blank in rosso) di 0.15 mm, così come i profili interni del blank. Le modifiche apportate sono visibili in Figura 6.23 ed in Figura 6.24.

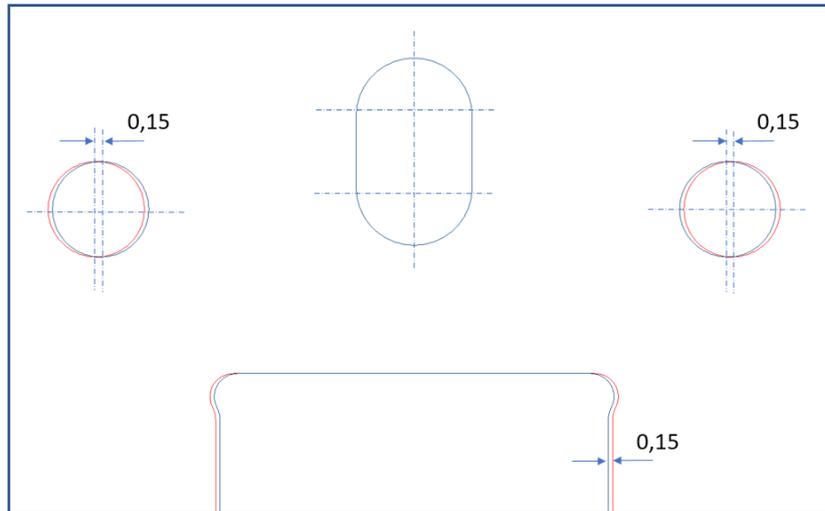


Figura 6.23: Modifiche lato fori.

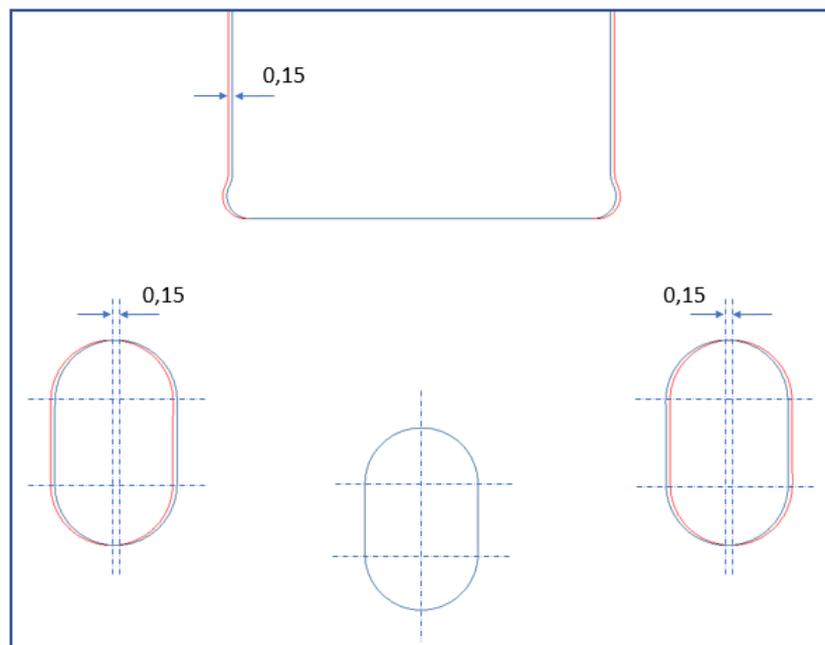


Figura 6.24: Modifiche lato asole.

I pezzi ottenuti sono stati controllati su calibro di controllo, come mostrato in Figura 6.25. Per verificare la curvatura del pezzo è stata utilizzata una sonda passa-non passa, mentre per

il controllo del profilo di trancia sono stati adoperati dei blocchetti di controllo passa-non passa. In questo modo è stato possibile osservare che alcune zone del pezzo non risultano ancora perfettamente in tolleranza, mentre altre sono molto vicine al limite. Per questo motivo, non saranno apportate ulteriori modifiche in questa fase, ma sarà eseguito un controllo più accurato quando il pezzo sarà prodotto con lo stampo completo.



Figura 6.25: Calibro di controllo (Sacel S.r.l.).

6.4.9 9° prova

Questa prova è stata realizzata mantenendo le stesse identiche caratteristiche degli utensili della stazione di piega e del blank della prova numero 8, ma realizzando il componente con lo stampo a passo completo. La differenza è che lo sviluppo non è più tagliato al laser, bensì è ottenuto attraverso le operazioni di tranciatura e la pressa su cui è stata eseguita tale prova è diversa da quella impiegata per le prove di formatura. Per questo motivo, ci si aspetta già a priori che i risultati saranno diversi dalla prova 8, in quanto i tensionamenti indotti da un'operazione di tranciatura sono diversi rispetto a quelli indotti da un taglio laser. Inoltre, anche le operazioni di timbratura e gli errori geometrici dello stampo completo possono influire significativamente sul risultato finale.

I pezzi così ottenuti (Figura 6.26) sono stati misurati in sala metrologica con CMM ed i Dimensional Report o *DR* dei tre pezzi analizzati, che riportano gli scostamenti fra pezzo reale e nominale in corrispondenza dei punti di misura, sono disponibili in Appendice.



Figura 6.26: Pezzi destro e sinistro.

7 Prove in ambiente di simulazione

Saranno trattati nel seguente capitolo la procedura di impostazione del problema in ambiente di simulazione ed i risultati ottenuti da Stampack[®]. Sarà poi dedicato un capitolo specifico al confronto fra i risultati ottenuti dalle prove empiriche e dalle simulazioni.

7.1 Impostazione del processo di stampaggio in ambiente di simulazione

Seguendo gli step della barra di navigazione del software di Figura 4.4, sono stati definiti i diversi parametri necessari per impostare la simulazione.

7.1.1 Blank

Il blank importato in ambiente di simulazione presenta già le zone tranciate che nella realtà vengono eseguite nella prima stazione di tranciatura. Questo perché la prima operazione in Stampack[®] deve essere una formatura. Inoltre, la tranciatura che il software esegue si limita soltanto a liberare il pezzo dalle tensioni già presenti ed a rimuovere graficamente la zona da scartare.

Dal punto di vista delle prove, i blank adoperati per ognuna di esse hanno la stessa geometria di quelli utilizzati per ogni prova reale. Uno dei blank importati in Stampack[®] è visibile in Figura 7.1.

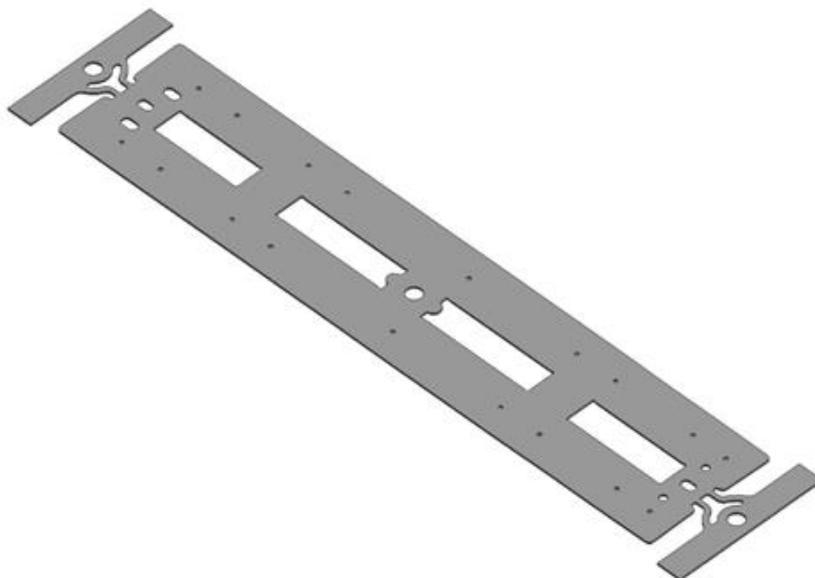


Figura 7.1: Blank importato in Stampack[®].

Analizzando il componente finale, si è optato per una simulazione solida, per diversi motivi:

- Il raggio minimo del componente finale è inferiore a tre volte lo spessore della lamiera:

$$R_{min} \text{ componente finale} = 1\text{mm} < 3\text{mm} = 3 \times \text{spessore lamiera}$$

- Date le dimensioni del pezzo, lo spessore non è una dimensione trascurabile.
- Si vogliono visualizzare eventuali difetti superficiali
- Lo scopo della simulazione è confrontare la nuvola di punti estratta con la CMM dal pezzo reale con il modello (tridimensionale, solido) ottenuto da Stampack®.

Pertanto, il blank è stato meshato con elementi solidi. I parametri relativi alla mesh sono riportati in Figura 7.2:

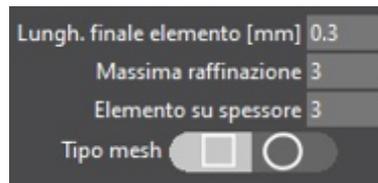


Figura 7.2: Parametri relativi alla mesh del componente oggetto di studio.

La descrizione e la scelta dei valori numerici di questi parametri è riportata di seguito:

- Lunghezza finale dell'elemento: rappresenta la dimensione minima raggiungibile della mesh. Un valore indicativo può essere ricavato come:

$$L_{elemento} = \frac{R_{minimo \text{ sul componente finale}}}{3} = \frac{1 \text{ mm}}{3} \cong 0.33 \text{ mm}$$

- Massima raffinazione: è una funzione per contenere il numero di elementi della mesh (triangoli-esaedri) del blank. Tale parametro può assumere valori che vanno da 0 (nessun raffinamento, quindi tutti gli elementi che costituiscono il blank hanno le stesse dimensioni) a 5 (massima raffinazione impostabile). In Figura 7.3 è visibile un esempio con “massima raffinazione” pari a 5, dove si distinguono chiaramente i diversi livelli di raffinazione della mesh. Dato che però è previsto il calcolo del ritorno elastico, non è idoneo utilizzare valori elevati del parametro di massima raffinazione, in quanto è necessaria una certa omogeneità delle dimensioni degli elementi in tutto il modello. Pertanto, è stato impostato un valore pari a 3, cioè un buon compromesso fra precisione e numero di elementi.

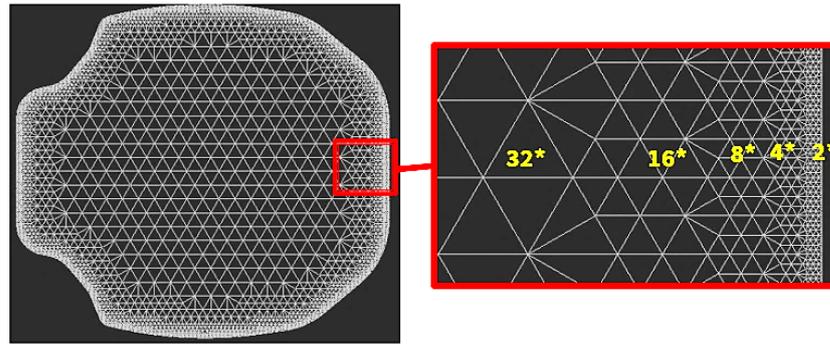


Figura 7.3: Esempio di un blank con “massima raffinazione” pari a 5.

- Numero di elementi sullo spessore: per avere una buona accuratezza, è bene avere almeno 3-4 elementi sullo spessore. Aumentare tale valore comporta però un appesantimento notevole del calcolo. Il numero di elementi sullo spessore è stato impostato pari a 3.
- Essendo il blank un elemento non assialsimmetrico, è stata scelta una mesh di tipo rettangolare. Nel caso della simulazione solida, gli elementi utilizzati sono degli esaedri.

La combinazione dei parametri geometrici della mesh deve essere tale da mantenere le proporzioni degli elementi le più regolari possibili. La mesh così ottenuta è visibile in Figura 7.4. In Figura 7.5 è visibile una zona ingrandita del blank dove è possibile osservare la mesh anche sullo spessore.

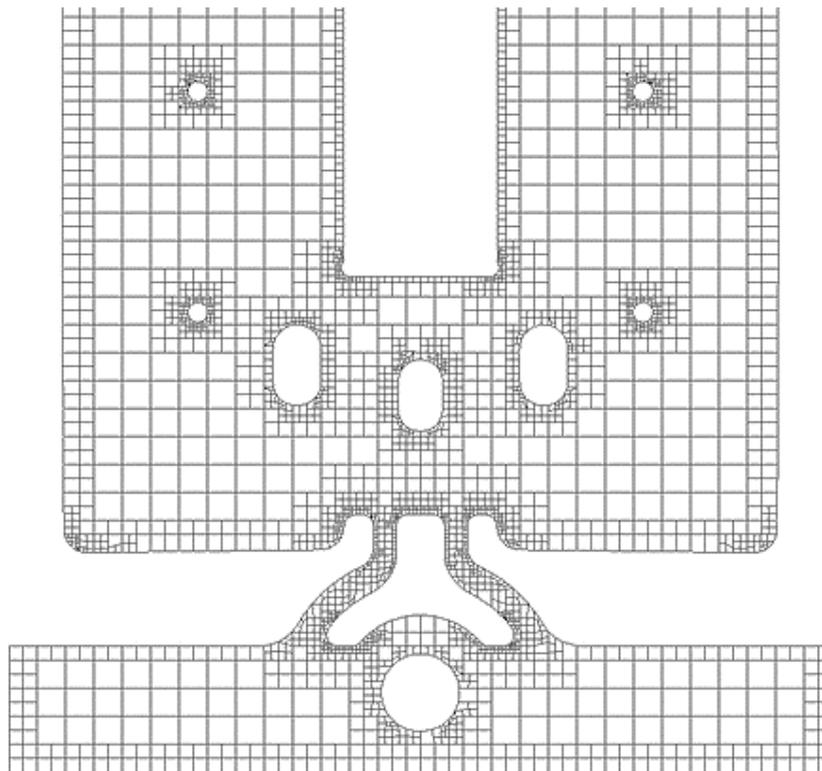


Figura 7.4: Mesh del blank lato asole, vista dall'alto.

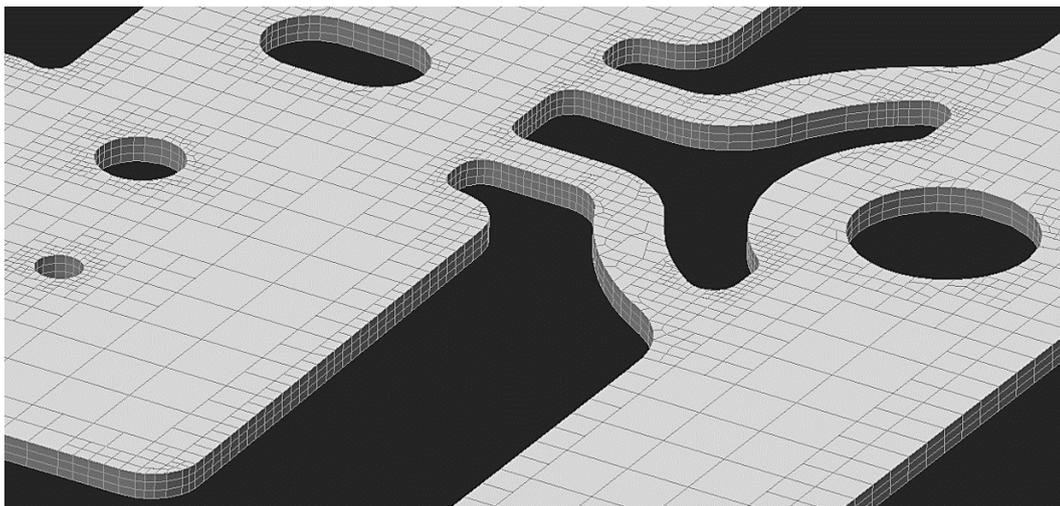


Figura 7.5: Dettaglio della mesh lungo lo spessore del blank.

7.1.2 Materiale

La definizione del materiale è un altro aspetto fondamentale. Stampack[®] richiede semplicemente i dati forniti dalla prova di trazione, ricavabili dai datasheet e cioè:

- Carico di snervamento.
- Carico di rottura.
- Allungamento percentuale.

In Figura 7.6 sono visibili i parametri impostati sul simulatore.

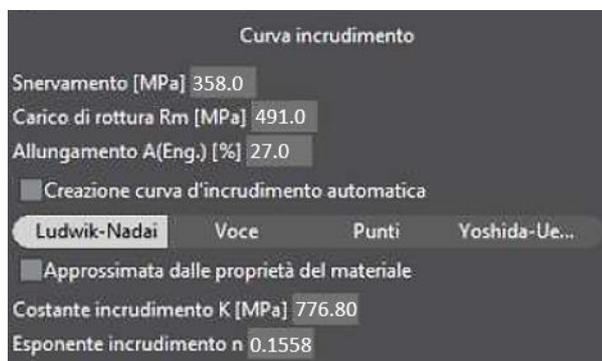


Figura 7.6: Parametri del materiale.

Attraverso dei modelli, il software è in grado di ricavare tutte le grandezze necessarie. I dati del materiale a disposizione per questo studio sono stati ricavati dal datasheet del fornitore per il lotto di materiale adoperato, come già accennato nel sottoparagrafo 5.1.2.

La curva di incrudimento può essere ricavata automaticamente da Stampack[®]. Per gli acciai viene utilizzato il modello di Ludwik-Nadai o legge di Swift [20]:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$$

Dove ε_0 rappresenta la deformazione di offset. In Figura 7.7 è visibile la differenza tra le curve di incrudimento definite secondo la legge di Hollomon e quella di Swift.

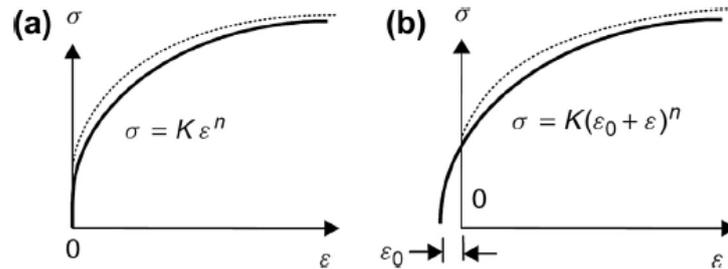


Figura 7.7: Confronto fra: (a) Legge di Hollomon; (b) legge di Swift. La linea tratteggiata rappresenta la curva sperimentale [20].

La curva di incrudimento ottenuta su Stampack[®] per l'AISI430 impiegato è visibile in Figura 7.8.

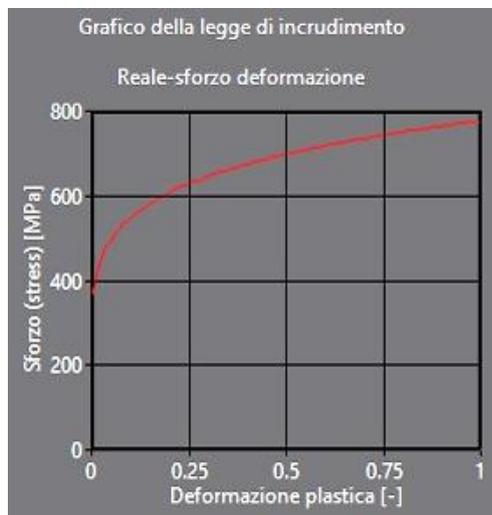


Figura 7.8: Curva di incrudimento dell'acciaio AISI430 adoperato per tale studio.

7.1.3 Condizioni di vincolo

Per riprodurre il bloccaggio del blank nello stampo, sono state adoperate due strategie:

- In corrispondenza dei fori di pilotaggio presenti sulle bandelle laterali del blank sono state imposte delle condizioni di vincolo, cioè sono stati bloccati gli spostamenti in direzione X e Y dei nodi (in rosso) che costituiscono la circonferenza del foro, come è visibile in Figura 7.9. La stessa operazione è stata eseguita per il foro sulla bandella opposta. È stata imposta tale condizione di vincolo in quanto le bandelle in questione non fanno parte del pezzo finale perché saranno tranciate e non sono di grande interesse per le successive misure e valutazioni.

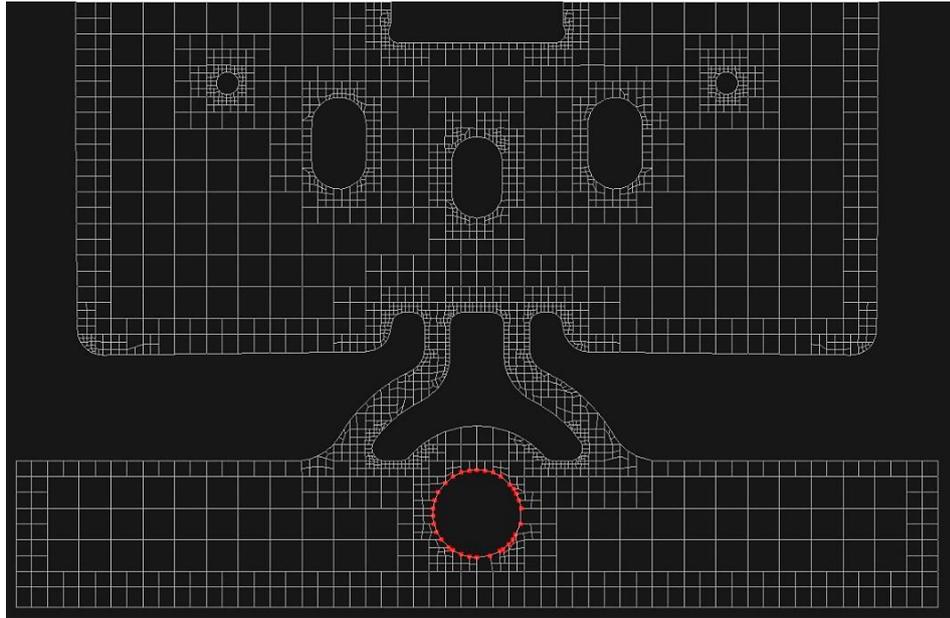


Figura 7.9: Nodi vincolati in direzione X e Y.

- In corrispondenza del foro di pilotaggio presente sul trattenitore centrale, non sono stati vincolati i nodi perché tale condizione avrebbe reso il modello più rigido e perché la deformazione del foro (o meglio l'ovalizzazione) e dei pezzi destro e sinistro nella zona centrale deve essere la più veritiera possibile essendo un aspetto importante da valutare. Per questo motivo, è stata importata la geometria del pilota, che funge da vincolo per il blank, ma consente le deformazioni (Figura 7.10).

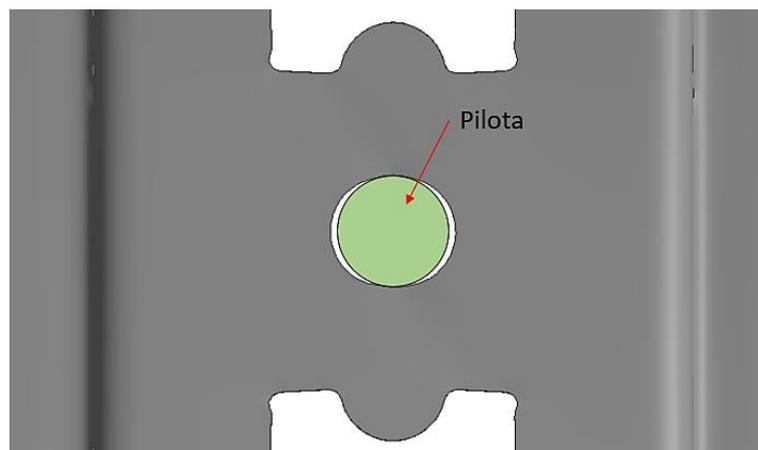


Figura 7.10: Effetto dell'utilizzo del pilota.

7.1.4 Processo

Le operazioni salienti da simulare sono quelle di formatura. Nel caso oggetto di studio, il componente viene sottoposto ad un'unica operazione di formatura, mentre le restanti fasi sono quelle di trancia. Dal punto di vista della simulazione, in prima battuta è stato simulato solo il processo di formatura perché le prove stampo prevedono soltanto tale operazione. Nelle prove finali invece, cioè quelle realizzate con lo stampo completamente assemblato, sono state eseguite anche le simulazioni relative alla parte di trancia dei trattenitori e dello stacco finale. Infine, è stato eseguito il calcolo del ritorno elastico a fine processo.

La simulazione numerica di un'operazione di formatura non richiede tutti i dettagli geometrici degli utensili che sono presenti nel processo reale. Al simulatore occorre fornire il blank in piano e gli utensili. In particolare, per quanto concerne gli utensili, sono state importate soltanto le superfici che contribuiscono alla formatura del pezzo. L'importazione degli utensili solidi appesantirebbe inutilmente i calcoli senza apportare alcun beneficio.

Di tutto lo stampo necessario per ottenere i componenti reali, ciò che è stato isolato così da poter essere importato in ambiente di simulazione è visibile in Figura 7.11.

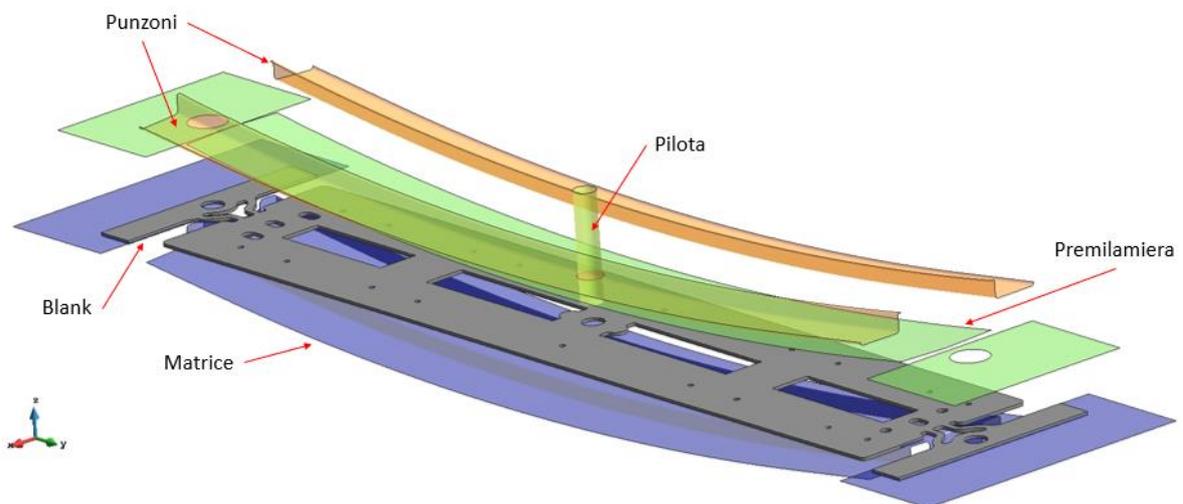


Figura 7.11: Utensili di formatura, pilota e blank importati in Stampack®.

Per quanto concerne il premilamiera, oltre all'importazione della geometria occorre inserire dei parametri che sono visibili in Figura 7.12.



Figura 7.12: Finestra relativa all'operazione di formatura.

Dal momento che lo stampo reale è già definito, i valori di forza iniziale e forza finale sono stati ricavati dai dati relativi ai cilindri ad azoto impiegati nella stazione di piega. Il calcolo ed i valori riportati di seguito si riferiscono alle prove successive alla prima.

I cilindri utilizzati sono 4x U.1600.013. In Figura 7.13 ne è riportata la caratteristica.

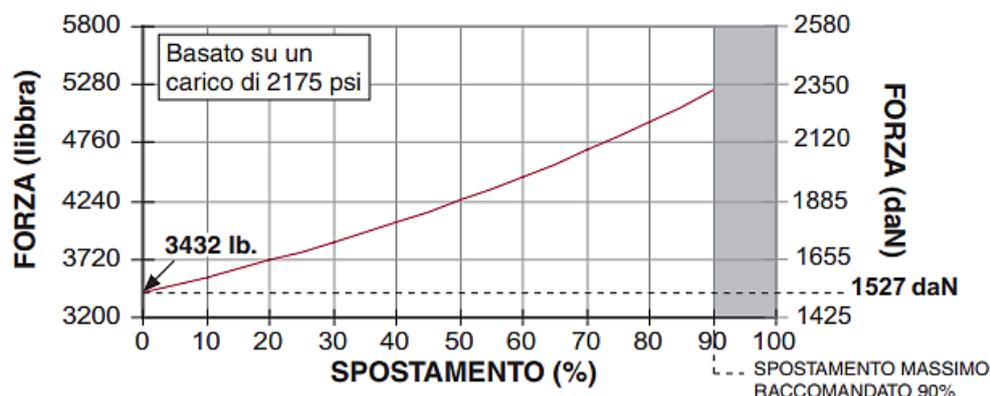


Figura 7.13: Caratteristica del cilindro ad azoto U.1600.013 (catalogo DADCO).

La corsa del premilamiera nello stampo è di 10.5 mm. La forza esercitata da un solo cilindro ad azoto al contatto è di circa 15 KN (corsa o spostamento percentuale pari a zero). Pertanto, i quattro cilindri ad azoto al contatto sono in grado di esercitare una forza iniziale di circa 60 KN. Per poter ottenere il valore della forza finale è stato ricavato lo spostamento percentuale in corrispondenza della corsa massima, calcolabile come:

$$\text{Spostamento (\%)} = \frac{10.5}{12.5} \times 100 = 84 \% \rightarrow F_{finale} \cong 22 \text{ KN}$$

Dove 12.5 mm è la corsa massima ammissibile dal cilindro ad azoto. La forza finale esercitata dai quattro cilindri è quindi circa 88 KN.

Per quanto concerne invece le operazioni di trancia post formatura, sono state eseguite semplicemente importando i profili di trancia (visibili in Figura 7.14). Il simulatore esegue l'operazione di tranciatura solamente dal punto di vista numerico, nel senso che non viene simulato il processo di nucleazione e propagazione della frattura come accade nella realtà. La tranciatura viene eseguita proiettando tale profilo di trancia sul pezzo e rieseguendo la mesh del blank nell'intorno della zona tranciata. Ciò che si ottiene effettivamente è la variazione delle tensioni interne del pezzo.

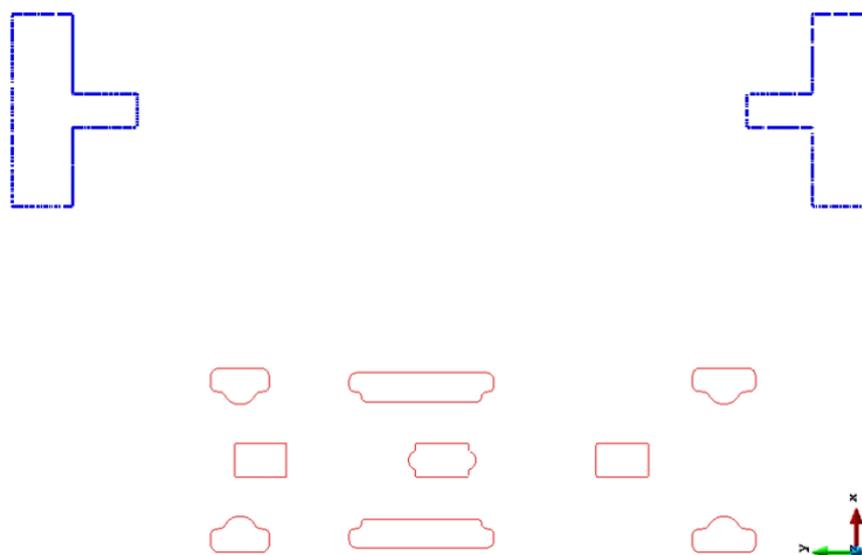


Figura 7.14: Profili di trancia.

Va sottolineato che i parametri relativi alla mesh, al materiale, alle condizioni di vincolo ed alla velocità del processo sono gli stessi adoperati per tutte le simulazioni, in modo da avere un'impostazione simile del problema per tutte le prove. Le uniche modifiche effettuate di volta in volta sono quelle relative al processo reale.

7.1.5 Simulazione

La prima simulazione eseguita su Stampack® ha manifestato nei risultati una serie di problemi di natura dinamica. Dato che l'operazione di formatura viene eseguita con il blank praticamente libero, già durante la fase di discesa del premilamiera il blank si comporta come se venisse deformato per urto. Questo effetto è legato alla velocità con cui viene simulato il processo. Se la velocità è elevata, i carichi esercitati dagli utensili quando questi entrano in contatto con il pezzo assumono la forma di un urto.

In Figura 7.15 è visibile una sequenza di fotogrammi catturati durante il processo di formatura. Come è possibile osservare, lo spostamento impartito dal premilamiera tende ad

essere localizzato in una piccola zona. Nelle fasi successive poi, la deformazione si propaga in tutto il blank, causando l'oscillazione della lamiera.



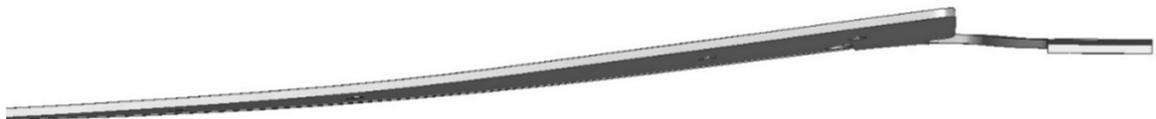
OP10-PDForming - Corsa rimanente: 40.0 [mm]



OP10-PDForming - Corsa rimanente: 23.97 [mm]



OP10-PDForming - Corsa rimanente: 21.31 [mm]



OP10-PDForming - Corsa rimanente: 18.64 [mm]

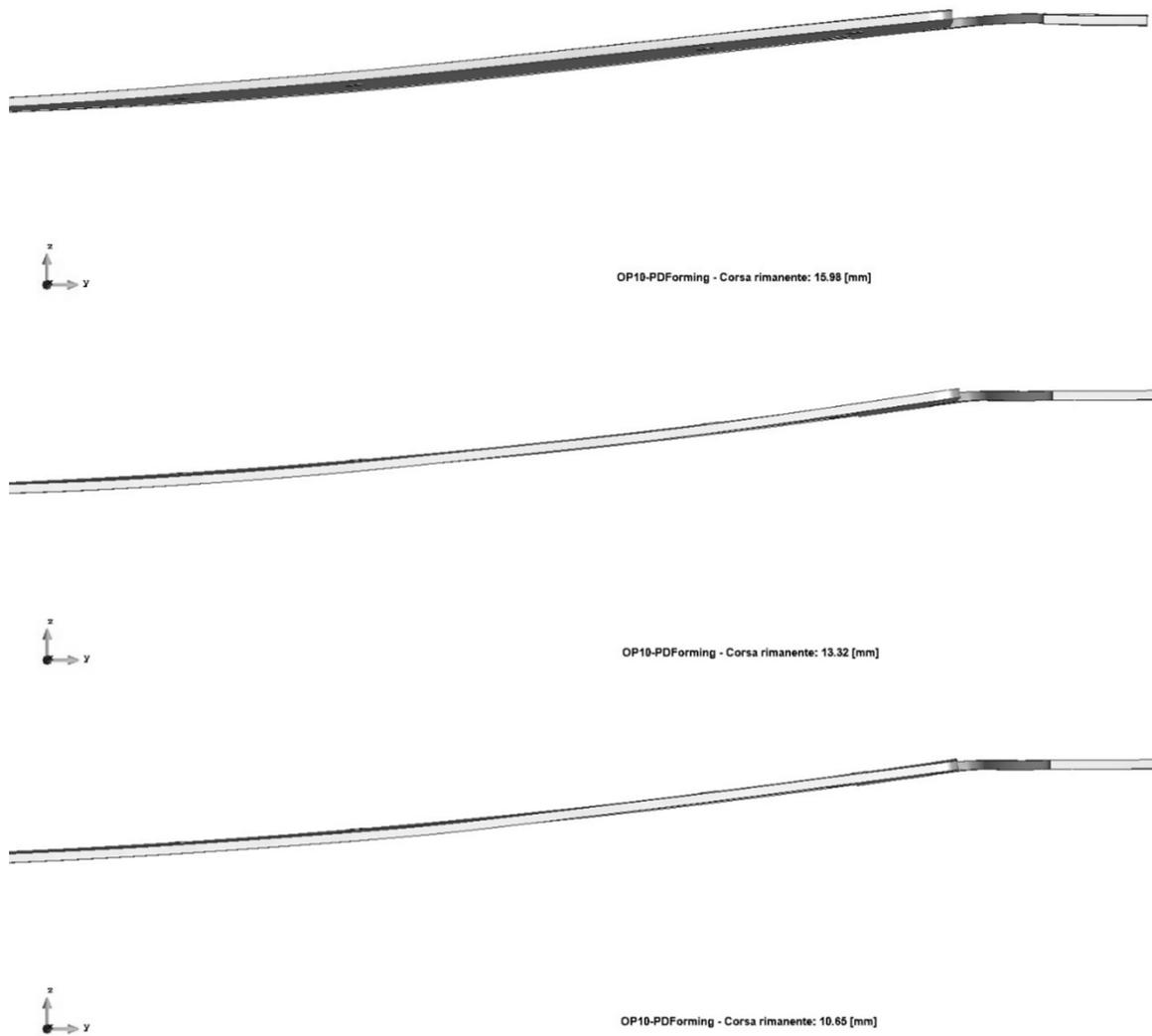
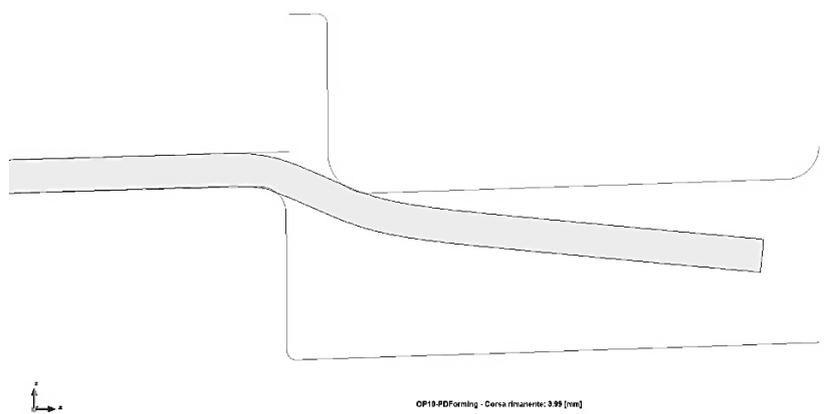
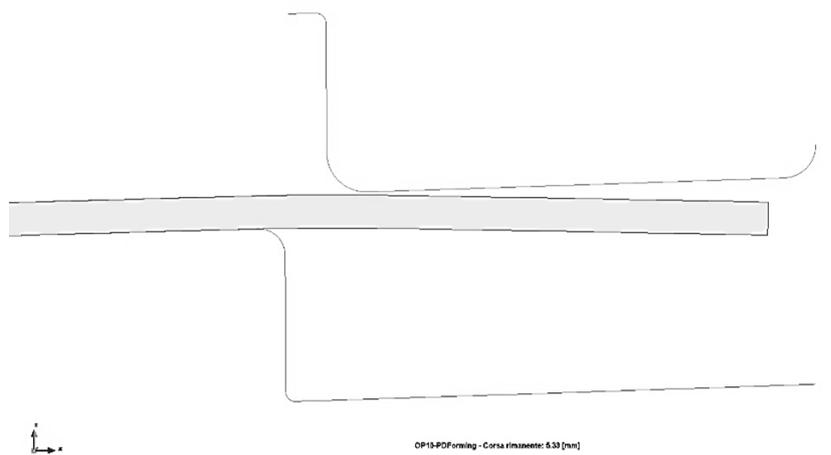
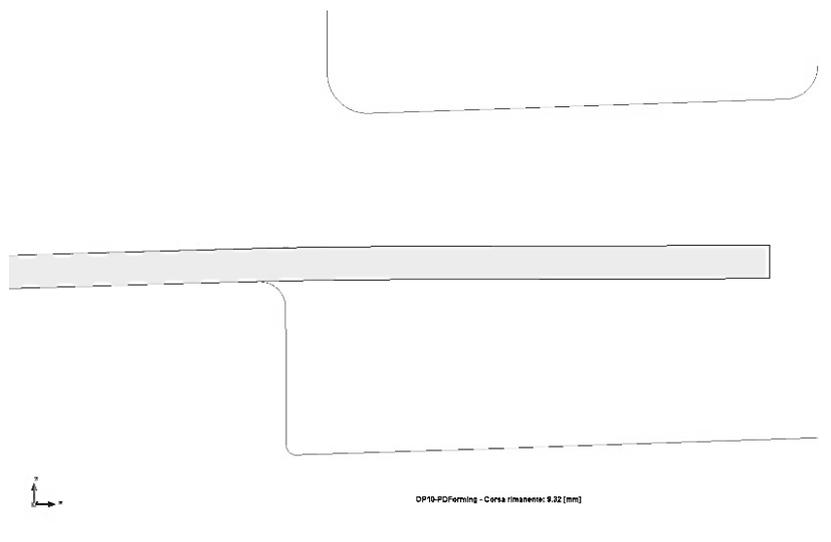


Figura 7.15: Fasi di formatura.

Dalla sequenza di fotogrammi in Figura 7.16, dove si analizza invece la piegatura a Z, si osserva chiaramente che il lembo della lamiera libero non si piega inizialmente in un punto, bensì tende ad inflettersi in corrispondenza del raggio di raccordo sia della matrice che del punzone. Inoltre, osservando lo spigolo inferiore, si può constatare che questo urta contro la matrice deformandosi permanentemente.



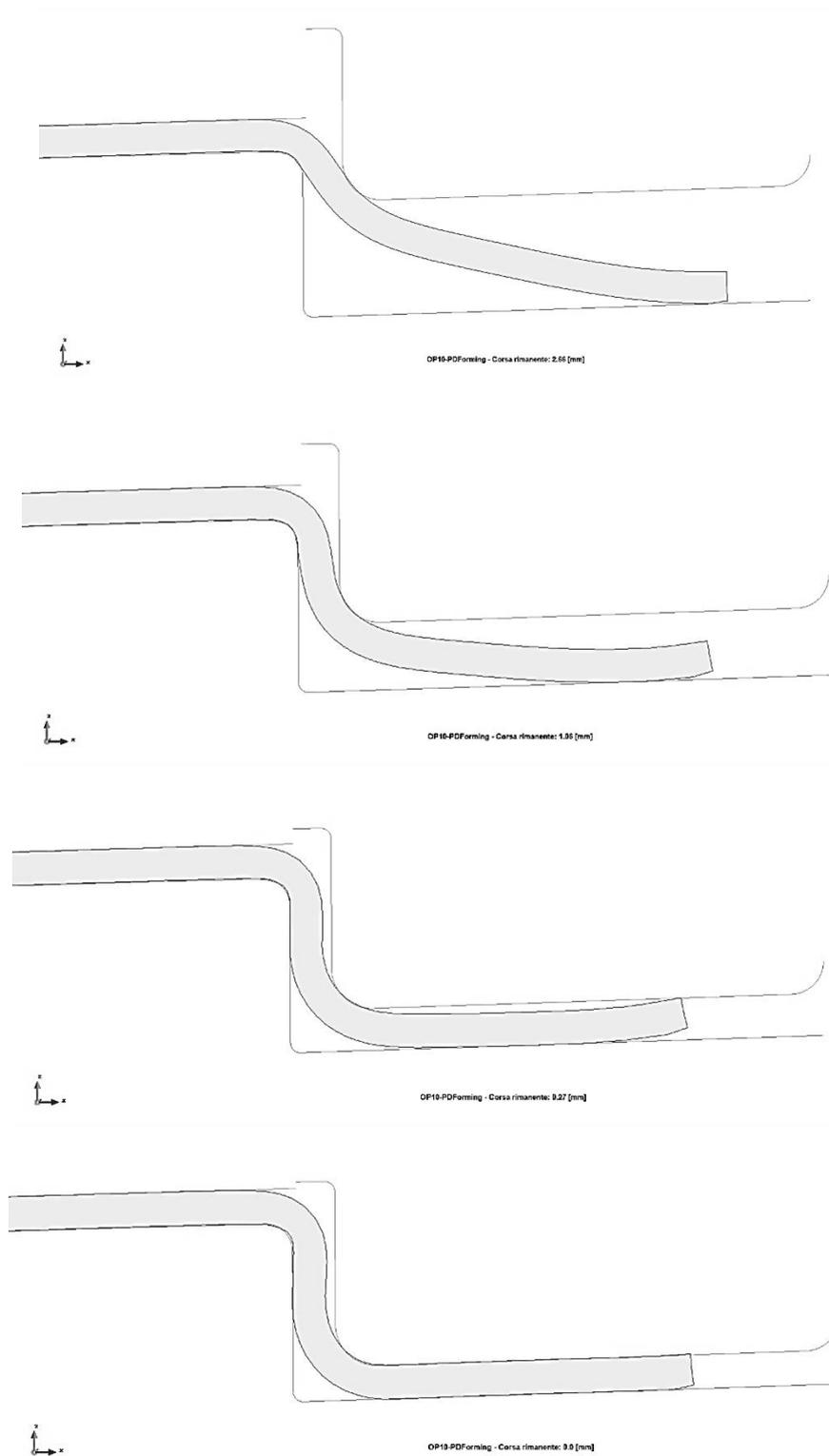


Figura 7.16: Formatura della piega a Z.

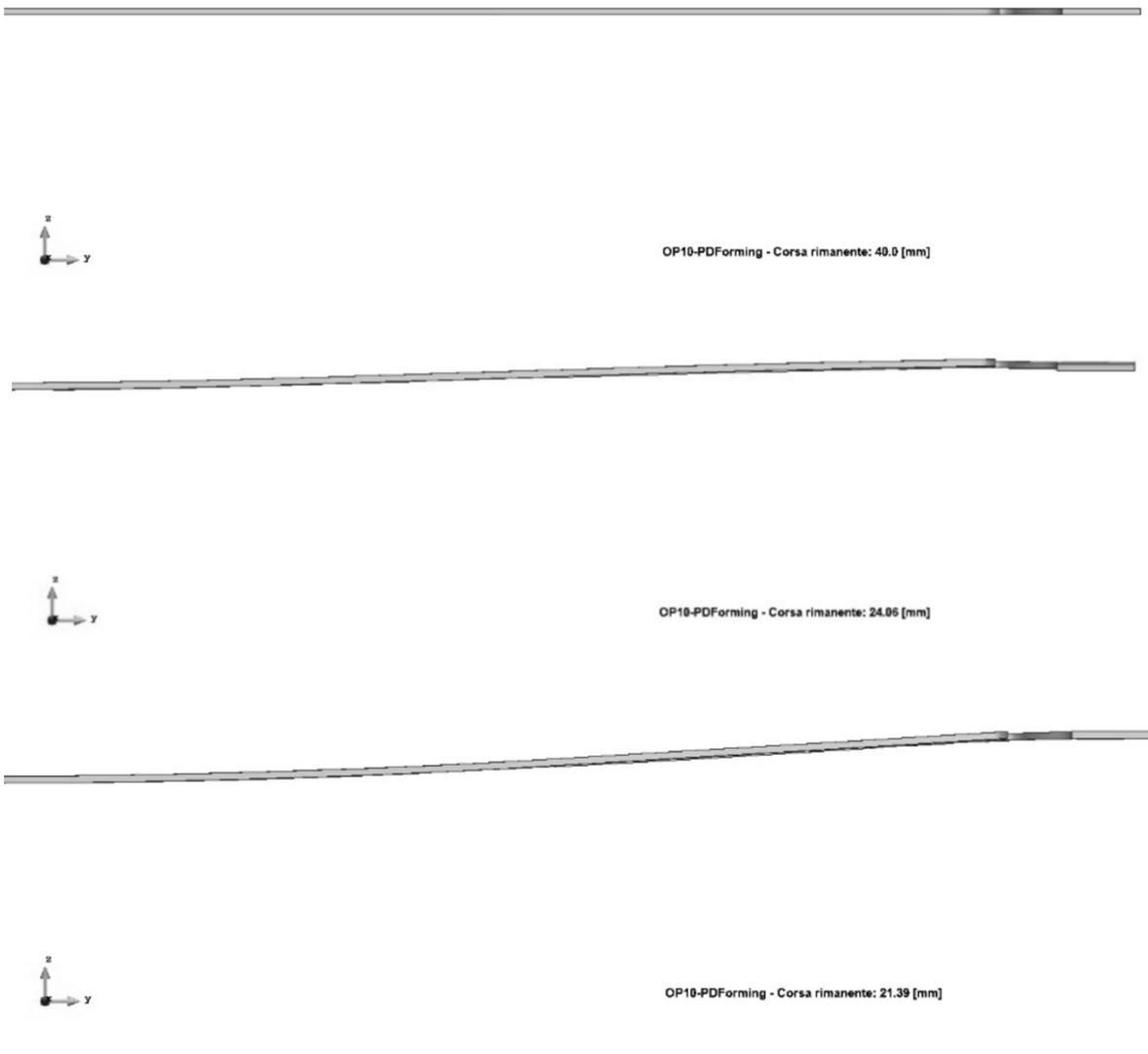
Per ovviare a questo problema, è stata eseguita una messa a punto agendo sui parametri avanzati del simulatore. Essendo Stampack® un solutore di tipo dinamico esplicito viene adottata di default una velocità di stampaggio o velocità di discesa della mazza battente per il processo simulato pari ad 1m/s, che può essere eventualmente modificata in base alla

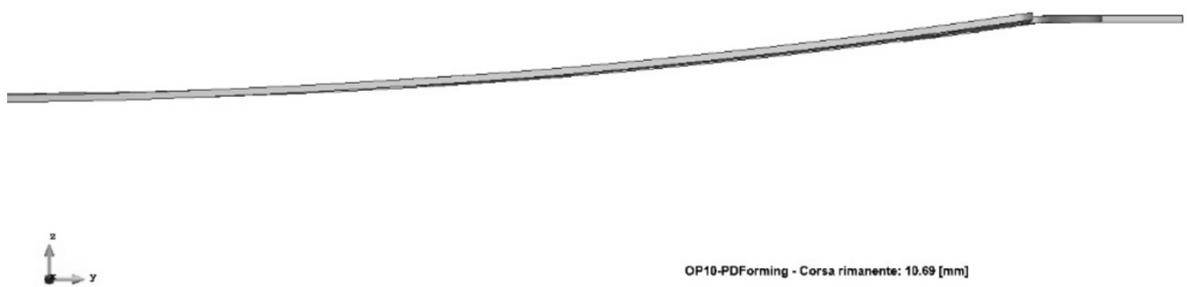
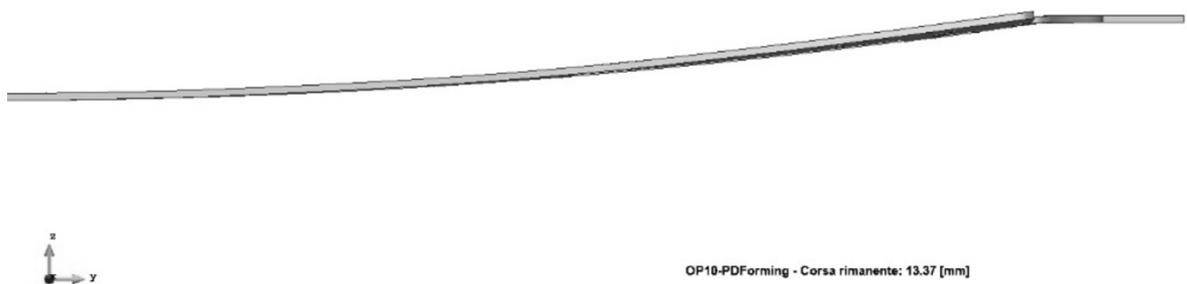
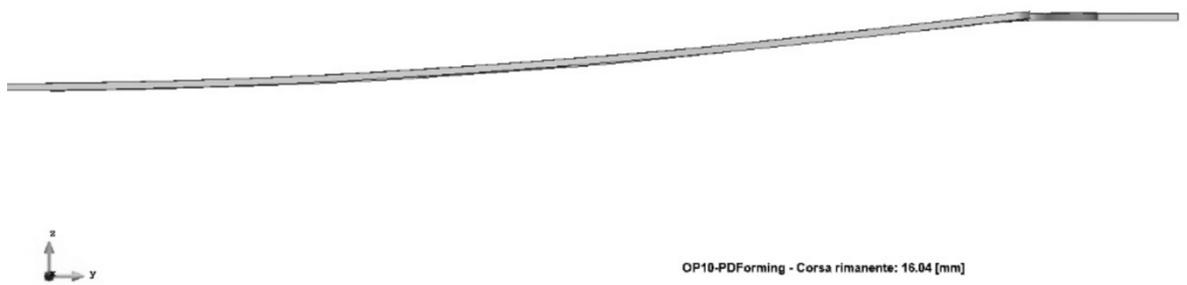
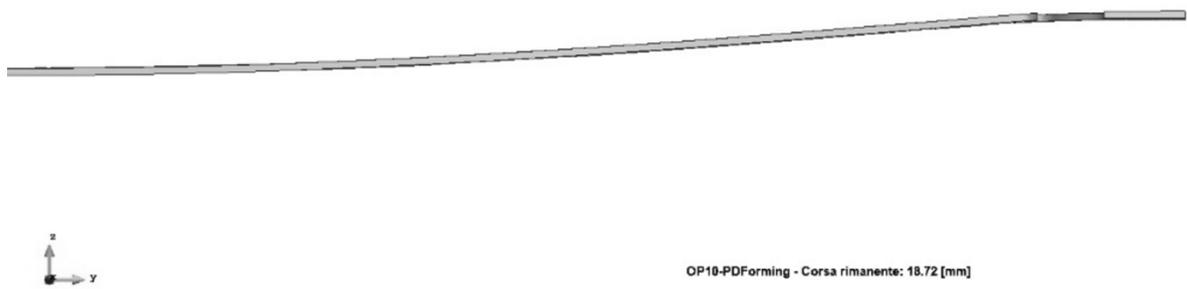
simulazione ed ai risultati che si ottengono. In questo caso, constatato che il blank tende a deformarsi in modo anomalo, come in Figura 7.15, tale velocità è stata ridotta a 0.3m/s (Figura 7.17).

Velocità pressa [m/s] 0.3

Figura 7.17: Modifica velocità teorica della pressa.

I risultati ottenuti in seguito a questa modifica sono visibili in Figura 7.18 ed in Figura 7.19 e possono essere confrontati con la sequenza di immagini di Figura 7.15 e Figura 7.16. Come è possibile constatare, a fronte di questa modifica, la deformazione risulta essere distribuita rispetto al caso precedente, assumendo un comportamento più simile al processo reale.





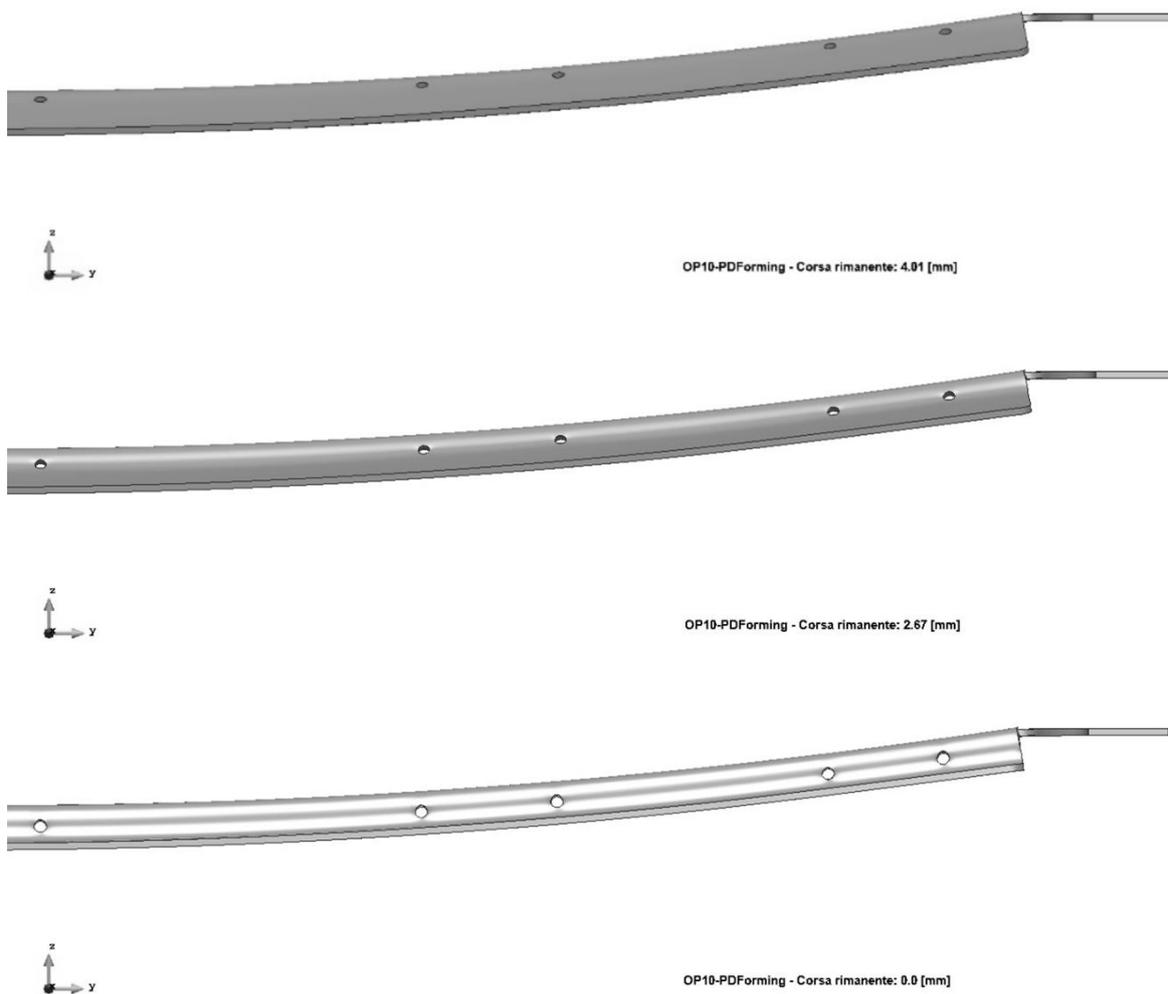
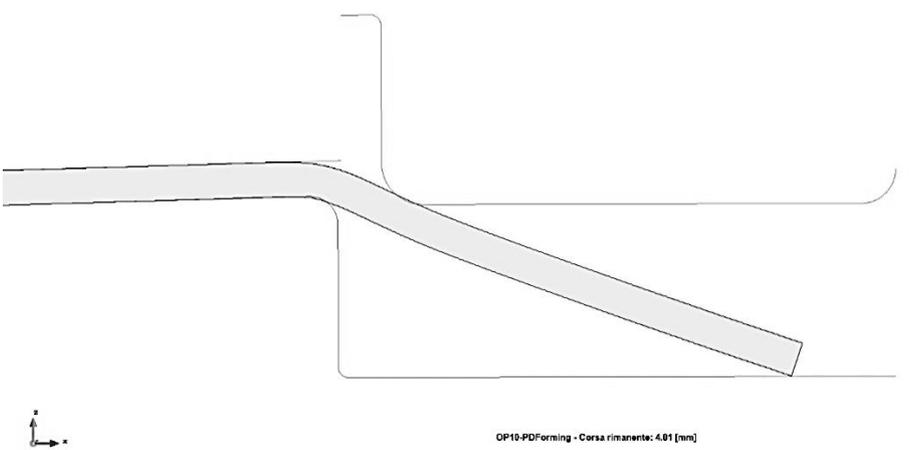
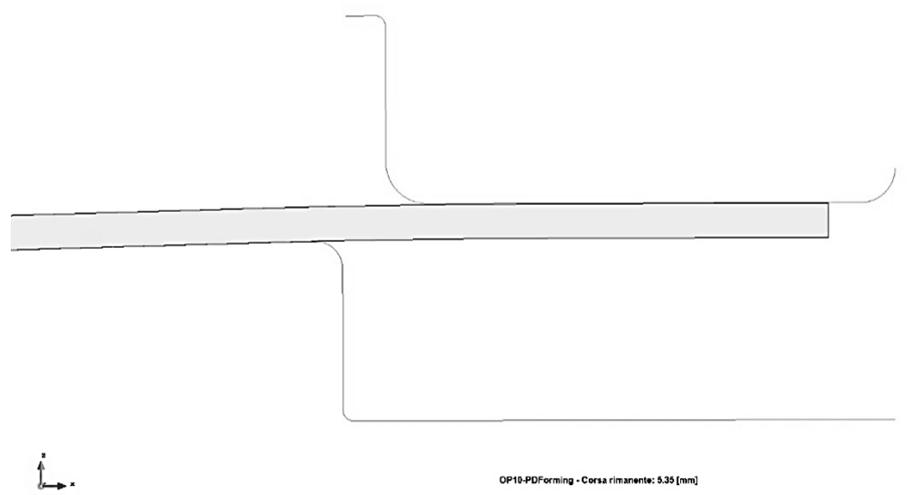
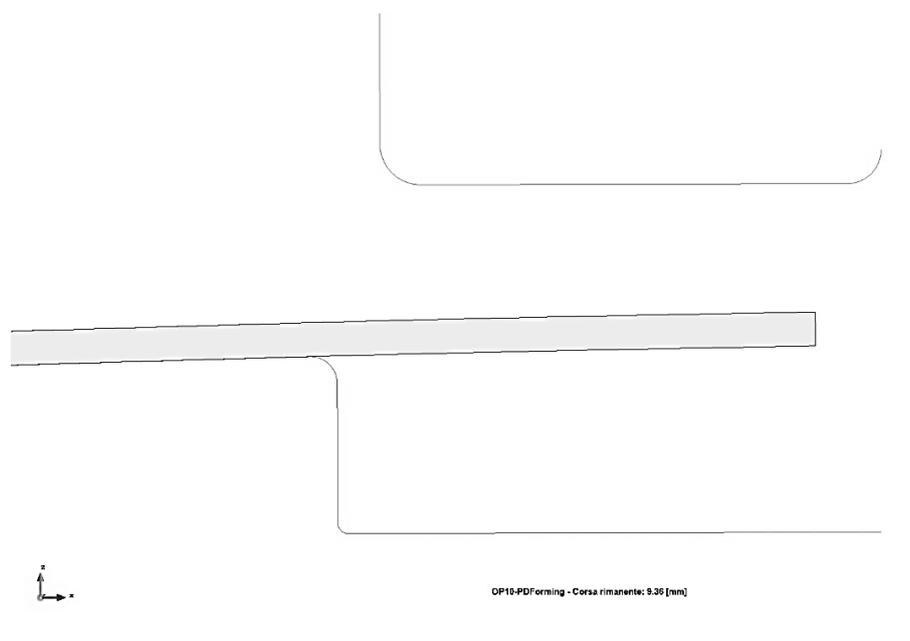


Figura 7.18: Formatura corretta.



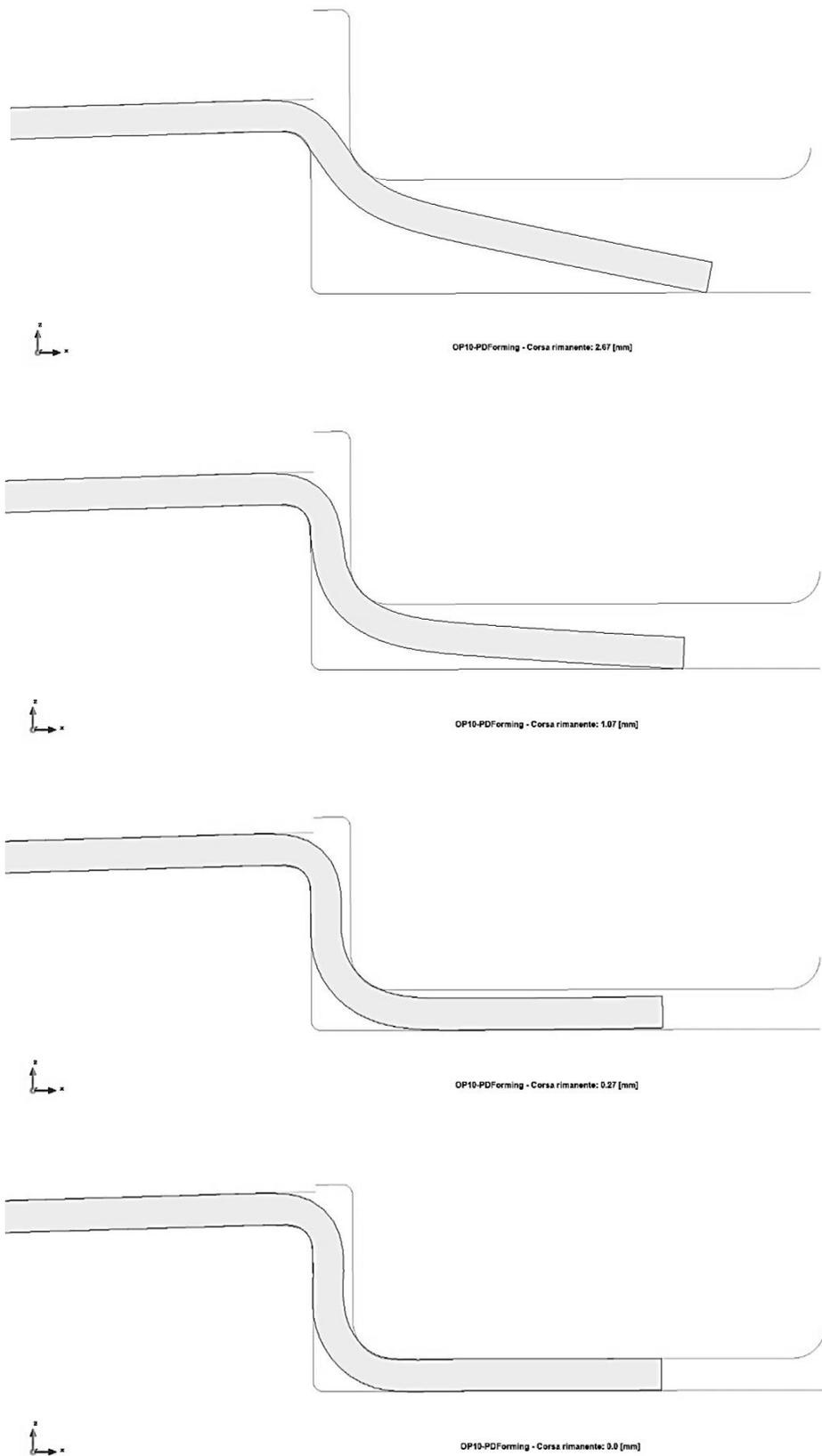


Figura 7.19: Formatura della piega a Z corretta.

7.2 Risultati della simulazione

7.2.1 Pezzi ottenuti

In Figura 7.20, Figura 7.21 e Figura 7.22 sono visibili rispettivamente il pezzo a valle dell'operazione di formatura, di trancia e di stacco relativi all'ultima prova empirica.

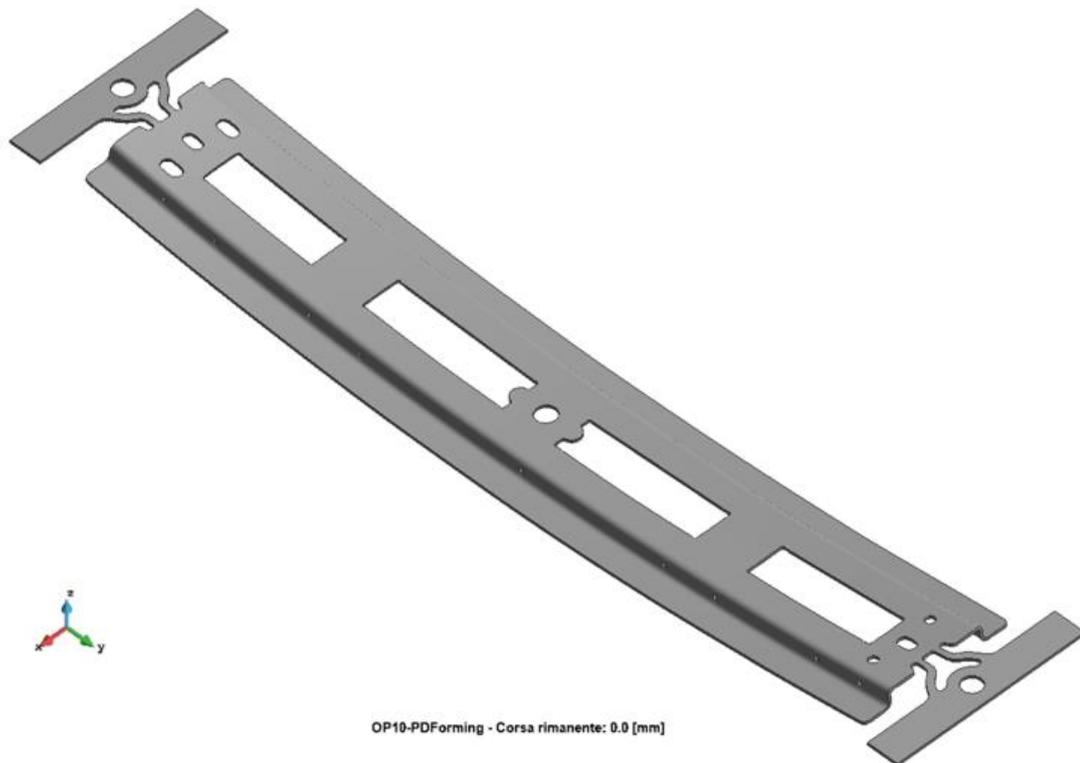


Figura 7.20: Blank dopo l'operazione di formatura.

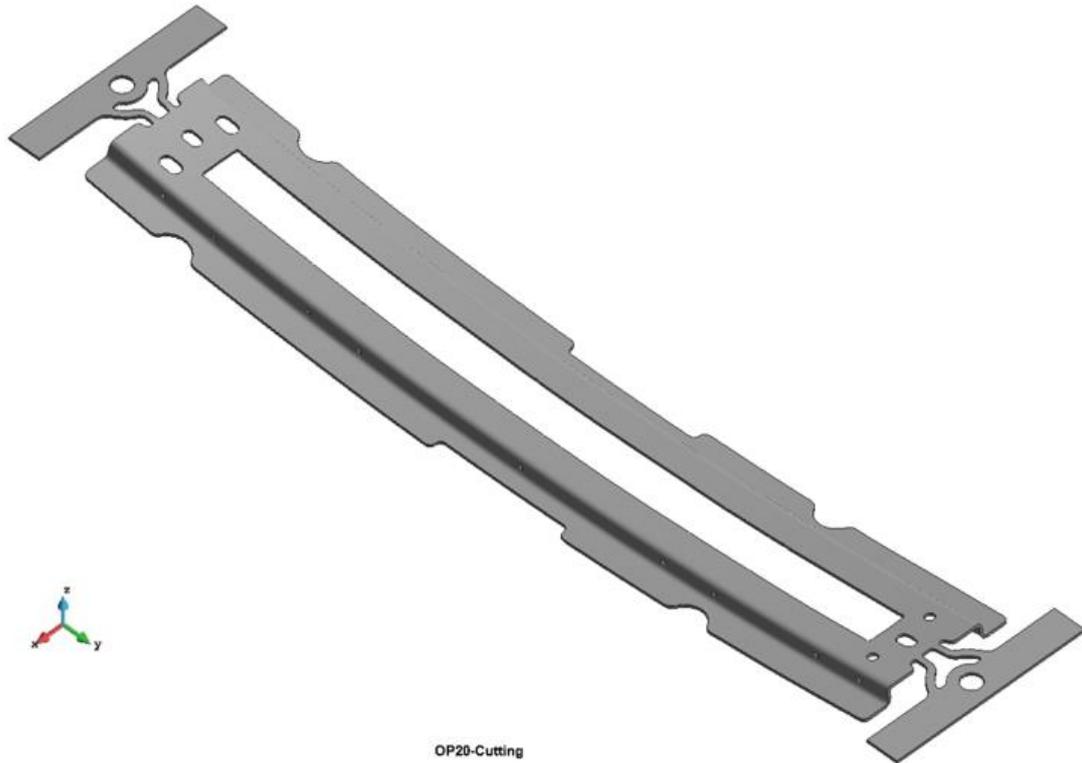


Figura 7.21: Blank dopo la prima operazione di tranciatura.

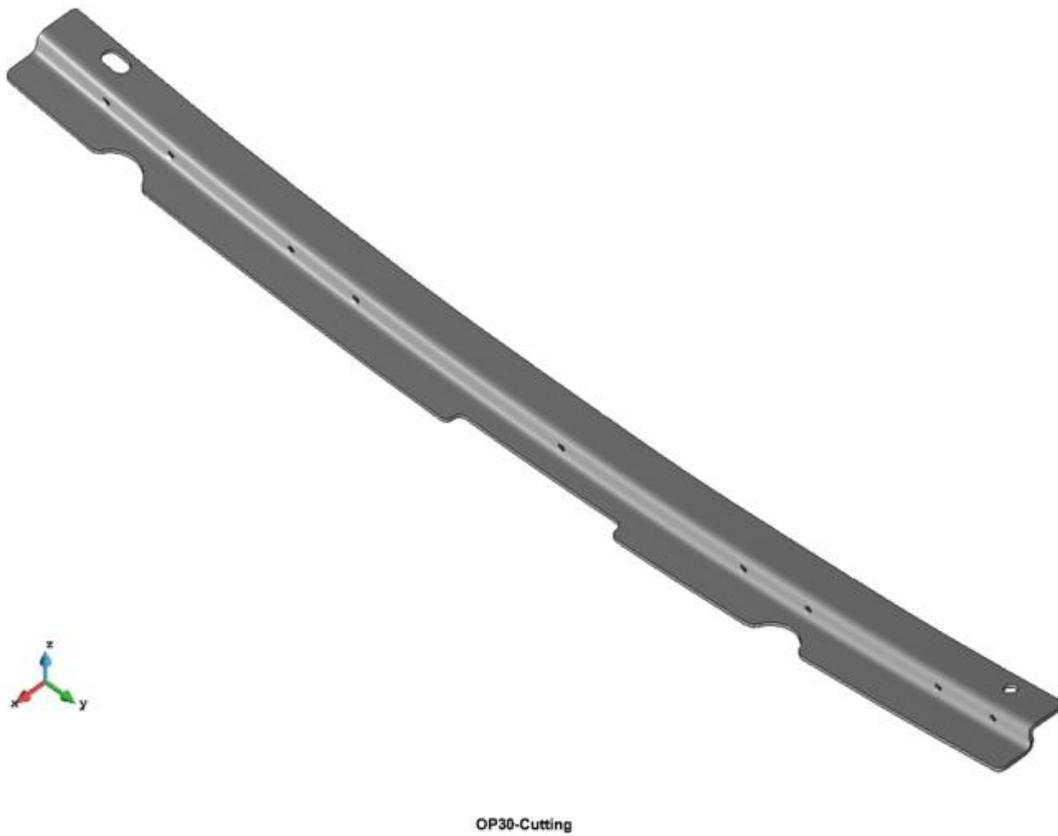


Figura 7.22: Pezzo sinistro ricavato dall'ultima operazione di tranciatura (stacco).

Dal punto di vista della mesh a valle dell'operazione di formatura, si osserva che questa è molto fitta nelle zone maggiormente deformate (si confronti la mesh di Figura 7.4 con quella di Figura 7.23). Questo perché il software riduce la dimensione degli elementi in tali zone in base proprio all'entità della deformazione. Le zone che per tutto il processo restano indeformate avranno infatti una mesh con elementi di dimensioni maggiori.

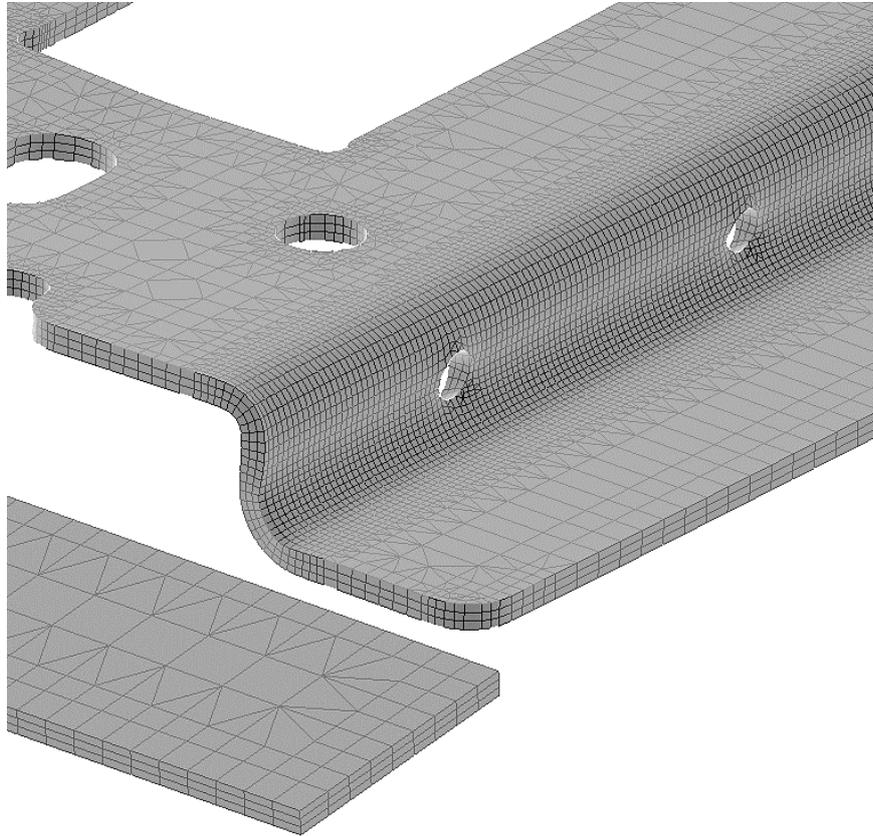


Figura 7.23: Mesh componente post formatura.

A valle del processo di formatura e tranciatura è stato eseguito il calcolo del ritorno elastico. Tale calcolo è fondamentale per poter confrontare dimensioni e deformazioni del pezzo simulato con quelle del pezzo reale in quanto nella realtà il componente all'apertura dello stampo recupera immediatamente le deformazioni elastiche.

In Figura 7.24 è riportato in celeste il componente prima del recupero elastico (cioè come se il pezzo fosse ancora all'interno dello stampo chiuso) ed in grigio lo stesso componente in seguito al ritorno elastico. Come è possibile osservare anche in Figura 7.25, la differenza in alcune zone è particolarmente accentuata se si considera come termine di paragone lo spessore materiale (che è pari ad 1 mm).

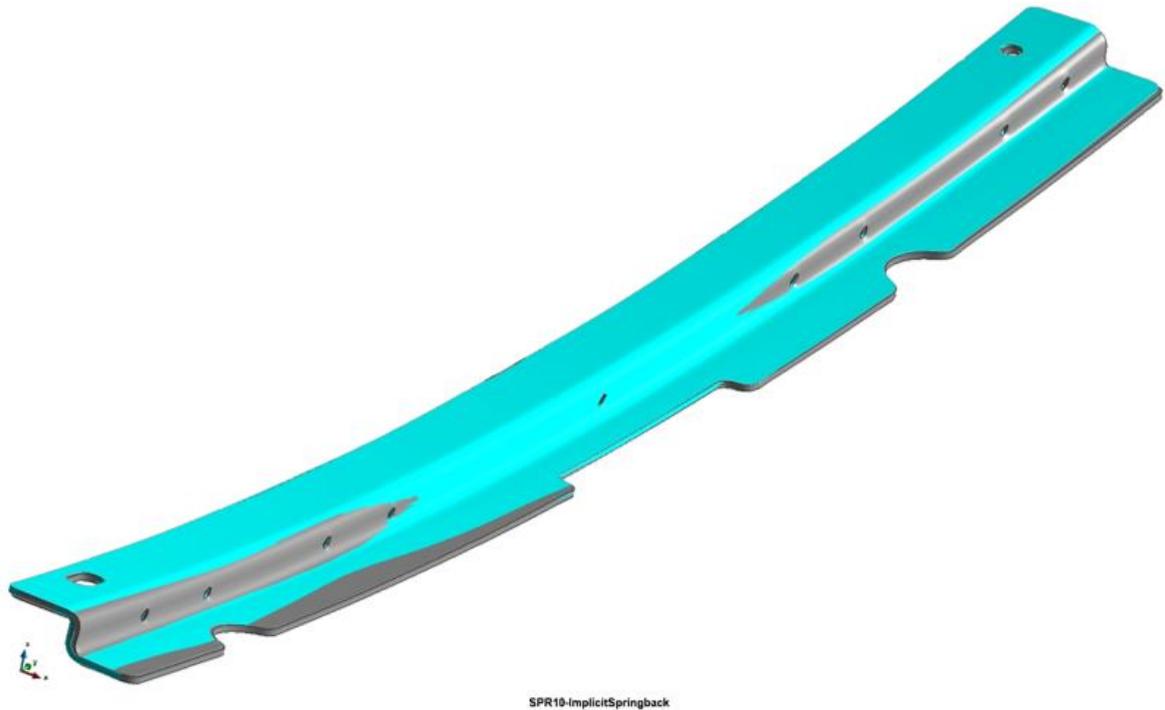


Figura 7.24: Ritorno elastico del componente.

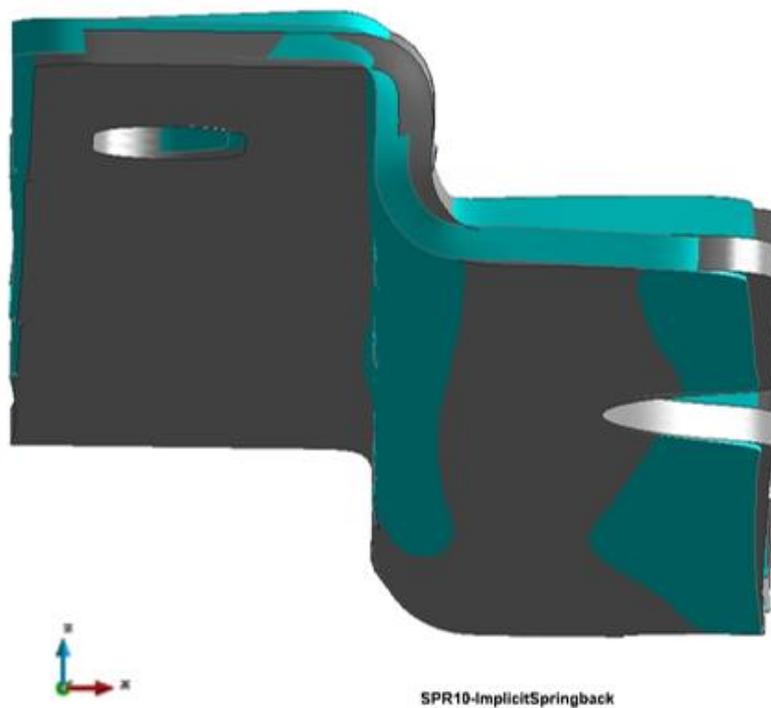


Figura 7.25: Confronto fra pezzo prima e dopo il ritorno elastico (vista XZ).

In Figura 7.26 è riportato l'effetto del ritorno elastico nella vista YZ. Come si può notare osservando i due fori sulla parete verticale del pezzo, all'estremità il componente in grigio (con ritorno elastico) tende ad avere una curvatura meno marcata rispetto al componente celeste senza ritorno elastico, in accordo con ciò che avviene nella realtà.

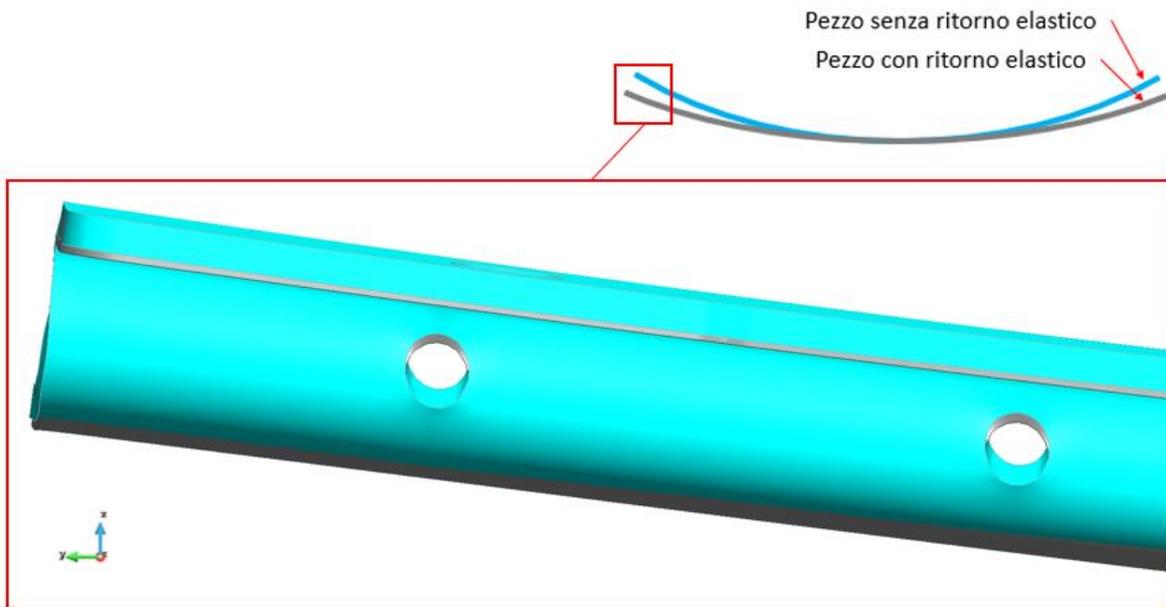


Figura 7.26: Confronto fra pezzo prima e dopo il calcolo del ritorno elastico (vista YZ).

7.2.2 Deformazioni e difetti

Il componente finale ottenuto dal processo di simulazione appare visivamente abbastanza simile al componente reale. In Figura 7.27 è visibile un ingrandimento del pezzo sinistro ottenuto dalla simulazione.

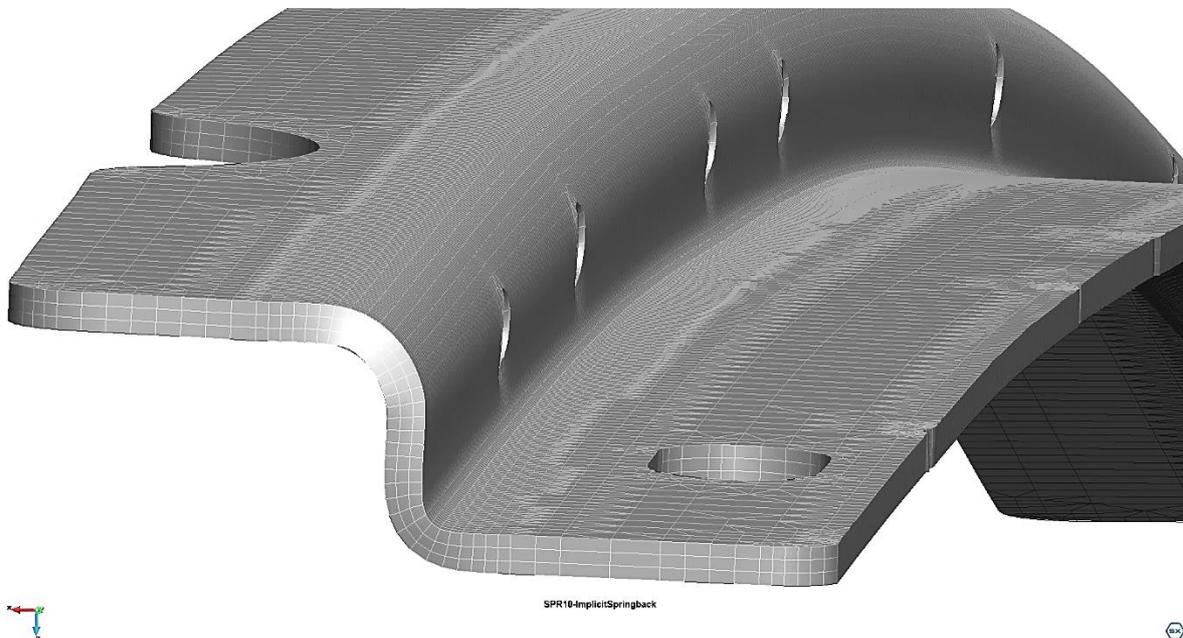


Figura 7.27: Ingrandimento pezzo sinistro ottenuto dalla simulazione.

Sono stati analizzati sia i pezzi ottenuti realmente sia quello ottenuto al simulatore ed è stato eseguito un confronto visivo per verificare che eventuali distorsioni e difetti fossero presenti in entrambi i casi. Dal confronto è emerso che i forellini presenti sulla parete verticale del pezzo sono effettivamente deformati. A causa dell'operazione di piega, le pareti cilindriche dei fori vengono distorte nella direzione di avanzamento dei punzoni. Inoltre, alla base del raccordo del pezzo si generano delle punte che, anche dalla simulazione, sono visibili in maniera evidente. In Figura 7.28 vengono confrontate le due immagini del pezzo simulato a sinistra e reale a destra per evidenziare questo effetto. Dall'ingrandimento del foro è chiaramente visibile anche la distorsione della mesh.

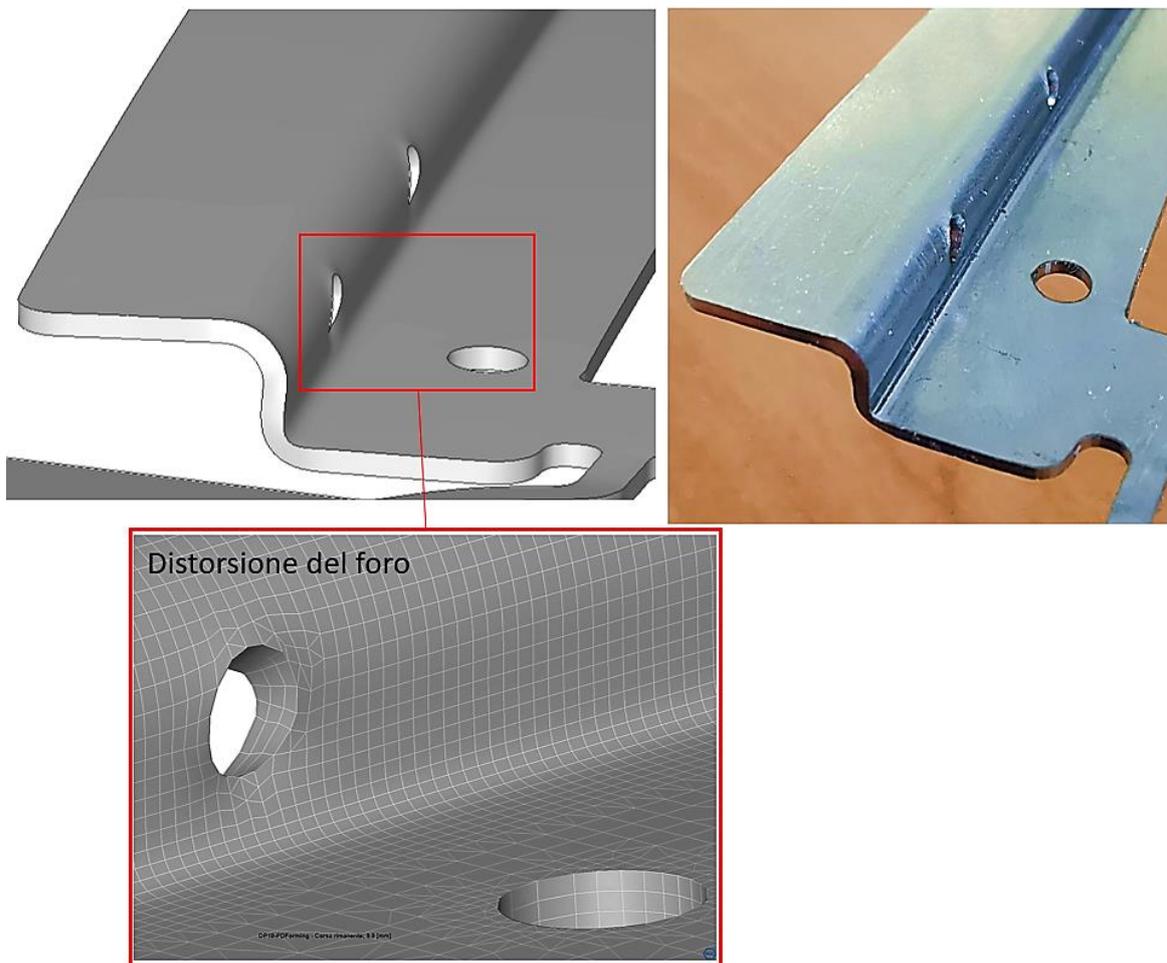


Figura 7.28: Confronto tra pezzo reale e simulato prova 4: distorsione fori.

Dal punto di vista delle deformazioni di fori ed asole, in Figura 7.29 è riportato il confronto fra il blank post formatura simulato e quello reale, con i dati geometrici della prova 1. In Figura 7.30 è visibile invece il blank con i trattenitori aggiuntivi in mezzeria. Si può osservare come le deformazioni sono molto simili fra loro e dalle misure, riportate nel capitolo successivo, si osserva che la differenza fra pezzi reali e quelli ottenuti tramite simulazione è dell'ordine del decimo di millimetro.

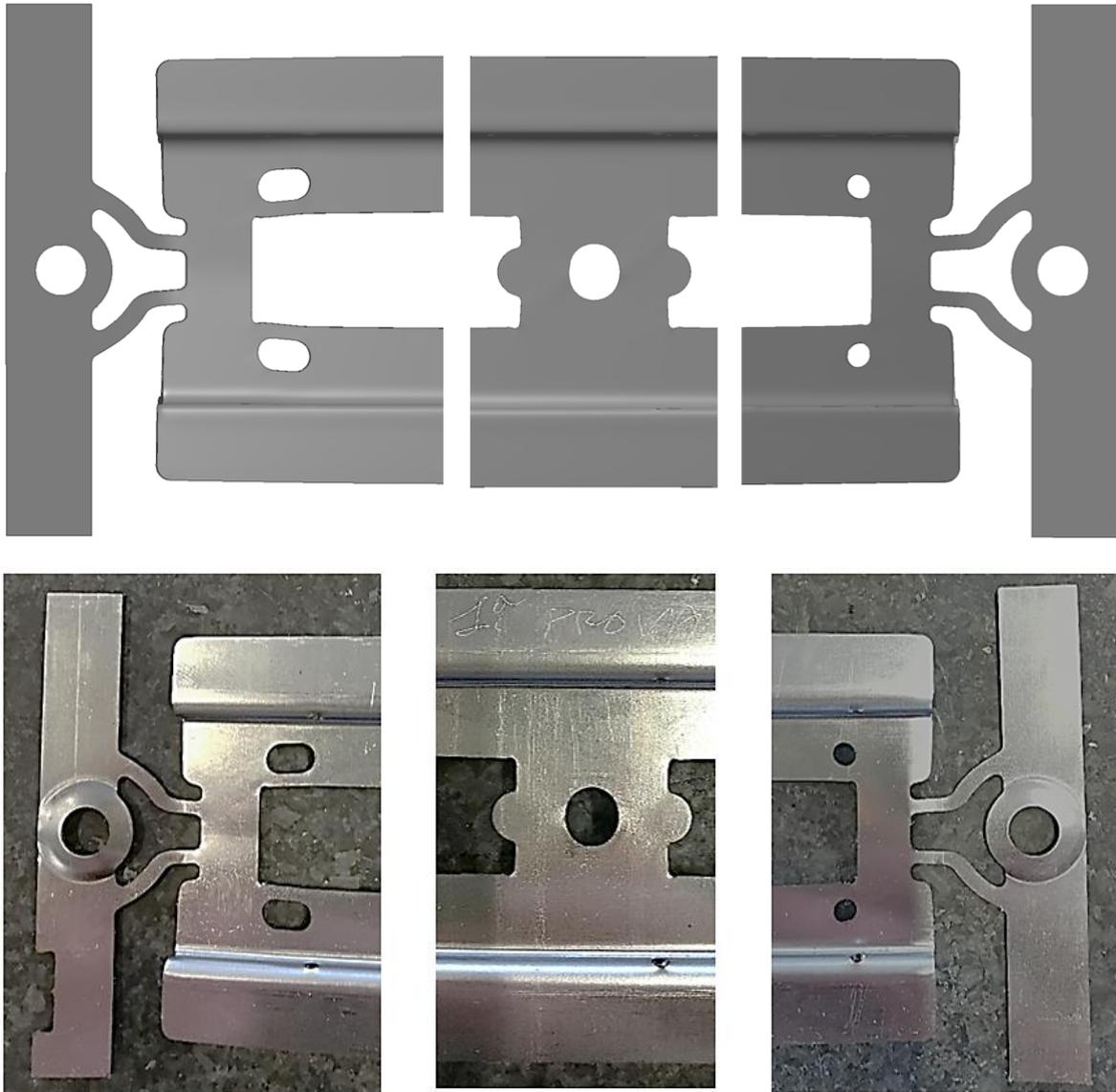


Figura 7.29: Distorsioni fori ed asole prova 1: confronto fra simulazione e pezzo reale.

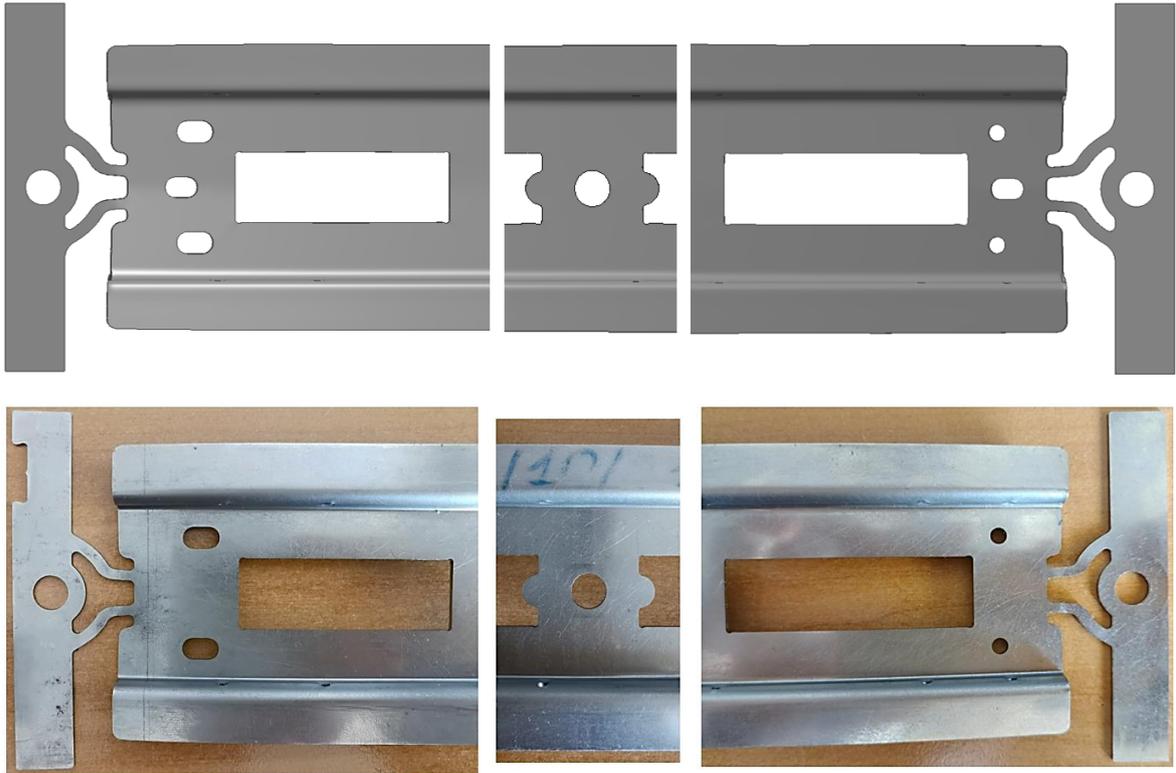


Figura 7.30: Distorsioni fori ed asole prova 5 (con trattenitori aggiuntivi): confronto fra simulazione e pezzo reale.

Un difetto che è stato evidenziato sia nel pezzo reale che in quello simulato è la presenza di una piccola punta, dalle dimensioni di qualche decimo di millimetro, dovuta ad un difetto di trancia, chiaramente visibile in Figura 7.31.

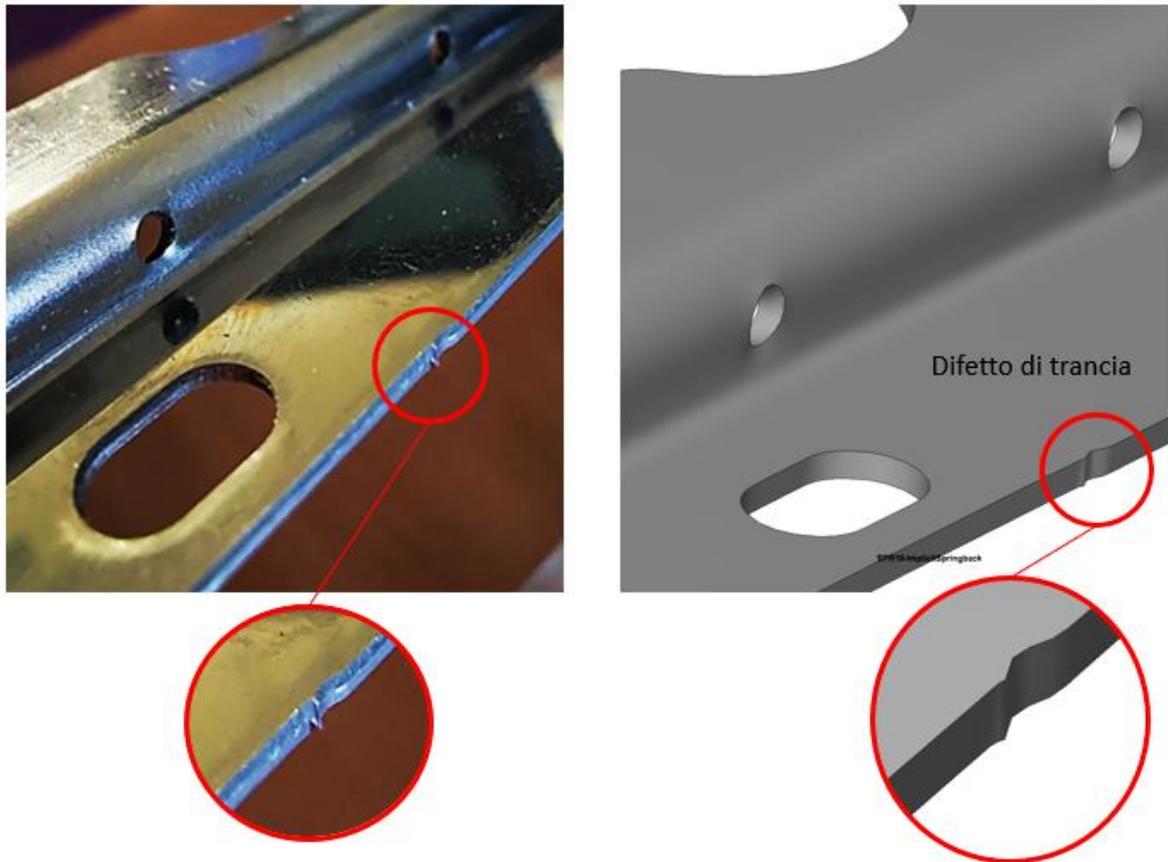


Figura 7.31: Confronto tra pezzo reale e simulato: punta dovuta ad un difetto di trancia.

7.2.3 Assottigliamenti

Dal punto di vista degli assottigliamenti, non sono stati rilevati valori critici in nessuna prova. In genere, l'assottigliamento è sempre un aspetto cruciale nelle imbutiture profonde. La leggera riduzione di spessore sul raggio di piegatura visibile in verde in Figura 7.32 è legata al fenomeno descritto nel paragrafo 3.2.2.

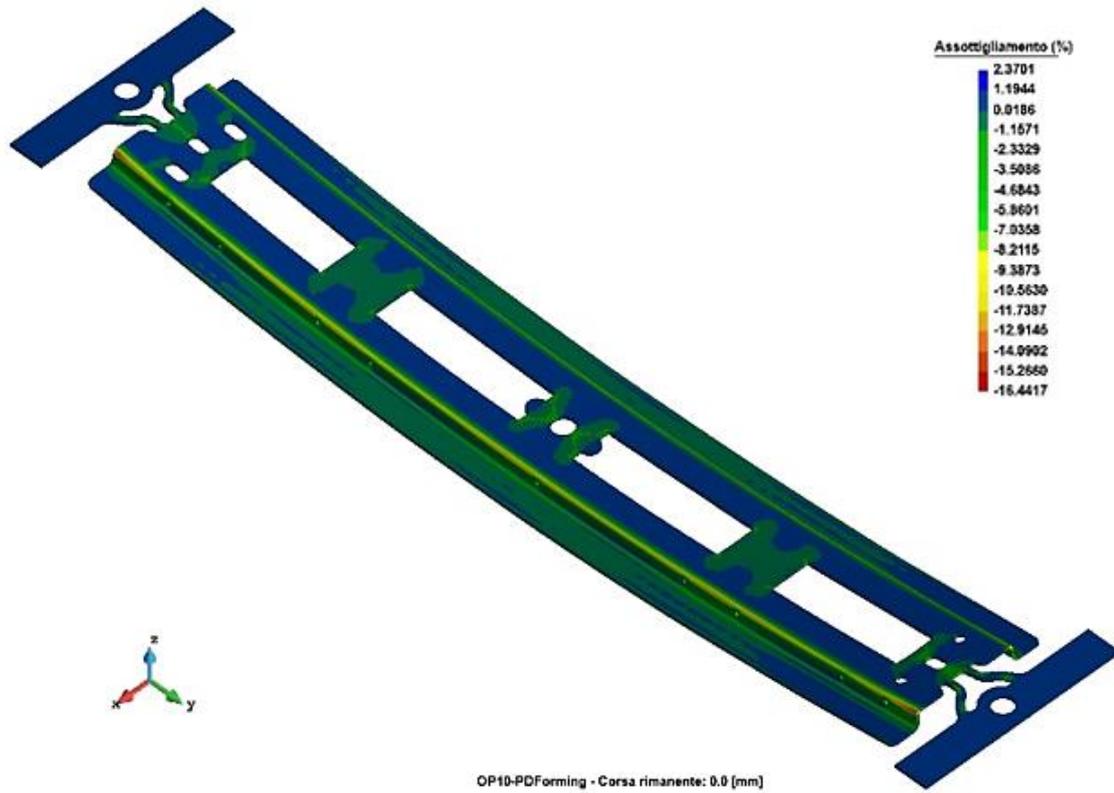


Figura 7.32: Mappa assottigliamento.

7.2.4 TFD

In Figura 7.33 è riportato il Triaxial Failure Diagram (TFD) relativo alla simulazione dell'ultima prova empirica contenente i punti che identificano la condizione di ciascun nodo della mesh e la curva limite di formabilità che, nel caso di simulazione solida, è detta Triaxiality Failure Curve (TFC) o curva di fallimento triassiale.

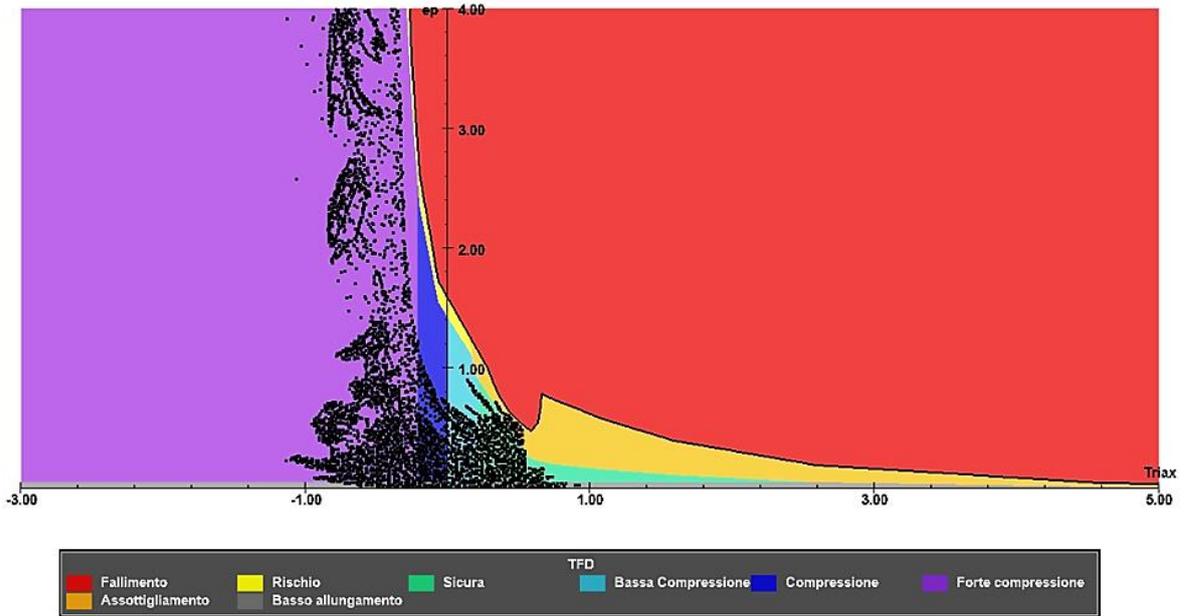


Figura 7.33: TFD relativo al componente oggetto di studio.

In Figura 7.34 è riportata la mappa cromatica TFD, sempre relativa all'ultima prova, che identifica lo scostamento dalla curva limite sul componente. Un valore pari a "100" in una specifica zona del pezzo è indicativo del fatto che i punti sul diagramma TFD, rappresentativi della medesima zona, si trovano esattamente sulla curva limite. Un valore inferiore a "100" indica invece che si è al di sotto della curva limite, quindi in sicurezza.

In Figura 7.35 invece, è riportata la mappa cromatica delle zone di sicurezza sul componente.

Osservando i risultati è possibile evincere che il componente, a seguito del processo di formatura, non manifesta rotture o forti assottigliamenti, in accordo con i risultati reali.

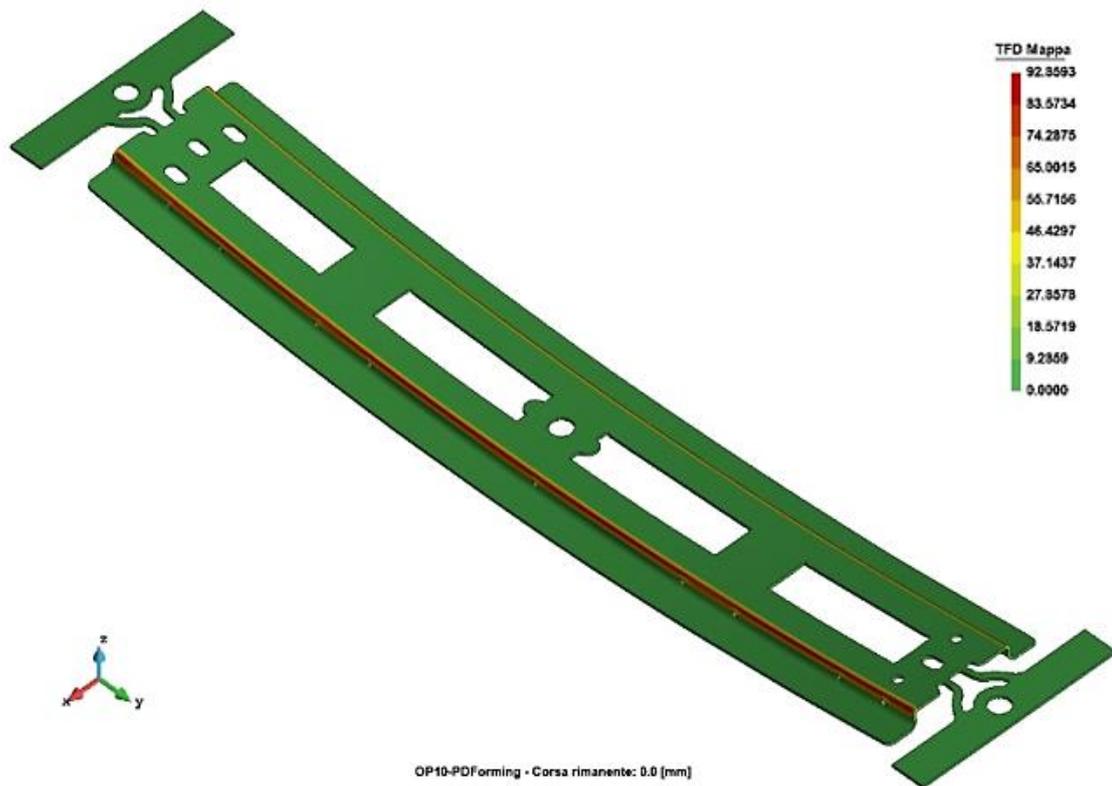


Figura 7.34: Mappa TFD.

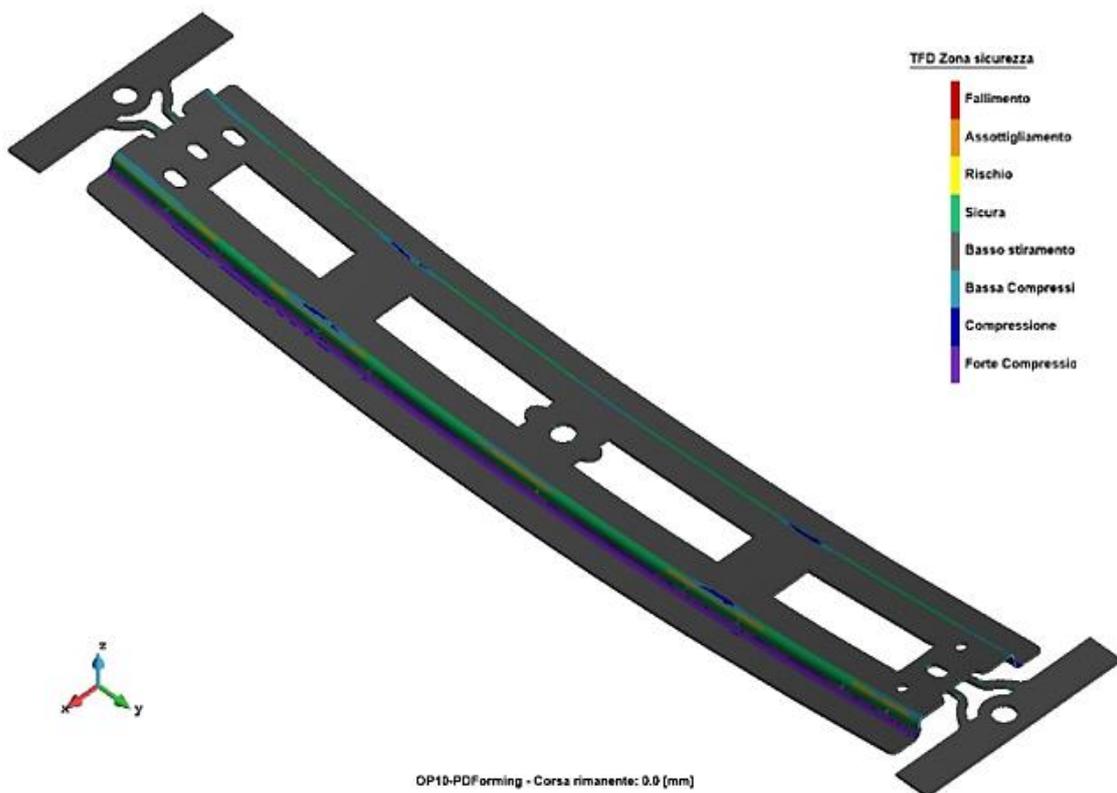


Figura 7.35: Mappa delle zone di sicurezza.

In Figura 7.36 è riportata una sezione del pezzo in cui sono visibili la mappa TFD e le zone di sicurezza, ma in questo caso lungo lo spessore del pezzo. Questo tipo di risultato è disponibile e può essere visualizzato solamente per simulazioni solide.

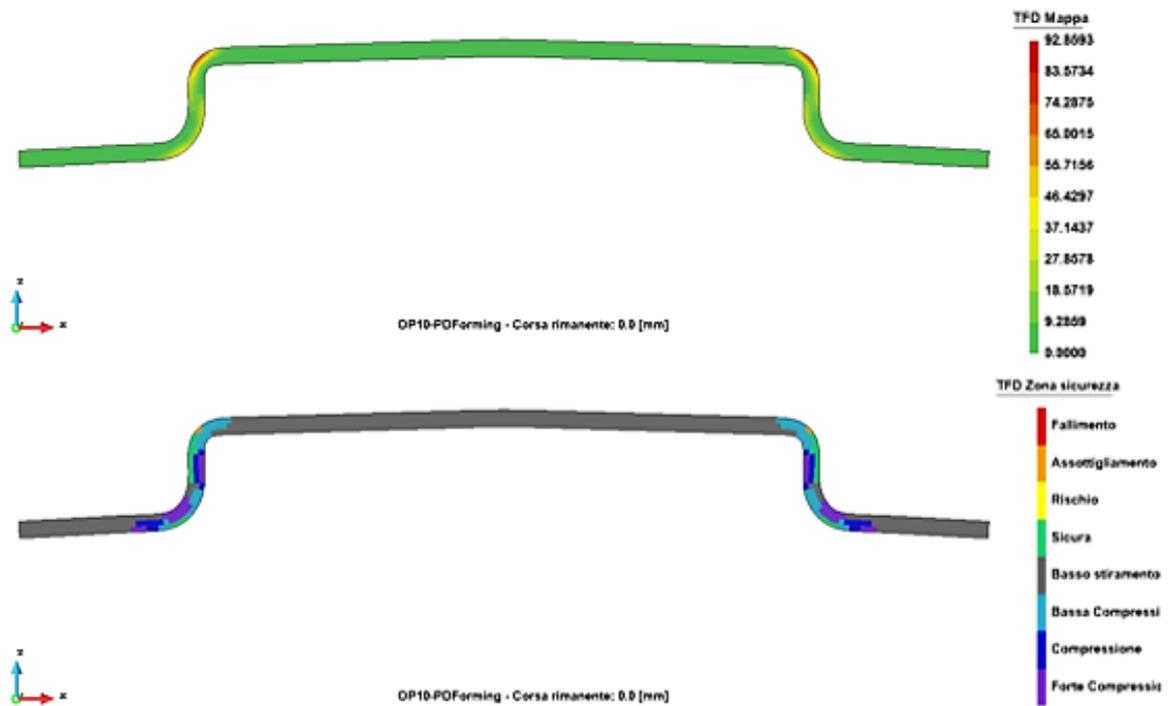


Figura 7.36: Mappa TFD e zone di sicurezza in una generica sezione.

8 Confronto fra componente reale e simulato

Nel seguente capitolo sarà descritta la procedura adoperata per il confronto fra i componenti reali ottenuti dalle diverse prove di stampaggio ed il modello simulato; infine, saranno mostrati i risultati ottenuti. Per le prove preliminari (da 1 a 8) è stato eseguito un semplice confronto fra misure rilevate manualmente con un calibro e quelle ottenute col simulatore. Per la prova 9 è stato eseguito un confronto più accurato in quanto sono state ricavate le nuvole di punti di 3 campioni diversi con una CMM.

8.1 Confronto preliminare

La verifica dimensionale delle prove intermedie è stata eseguita in maniera “grossolana”, cioè confrontando le misure eseguite sui pezzi reali tramite l’utilizzo di un calibro con quelle eseguite in ambiente di simulazione.

In Figura 8.1 è visibile la posizione dei punti in cui sono state eseguite le misurazioni sia manualmente che al simulatore.

Il motivo di quest’analisi dimensionale “meno precisa” è legato al fatto che le misurazioni alla CMM richiedono tempo e sono sicuramente più costose di una semplice misurazione con calibro. In ogni caso, lo scostamento fra pezzo reale e simulato ottenuto in tali prove sarà poi confrontato e verificato con quello rilevato dal confronto fra STL e nuvola di punti ottenuta con la macchina di misura.

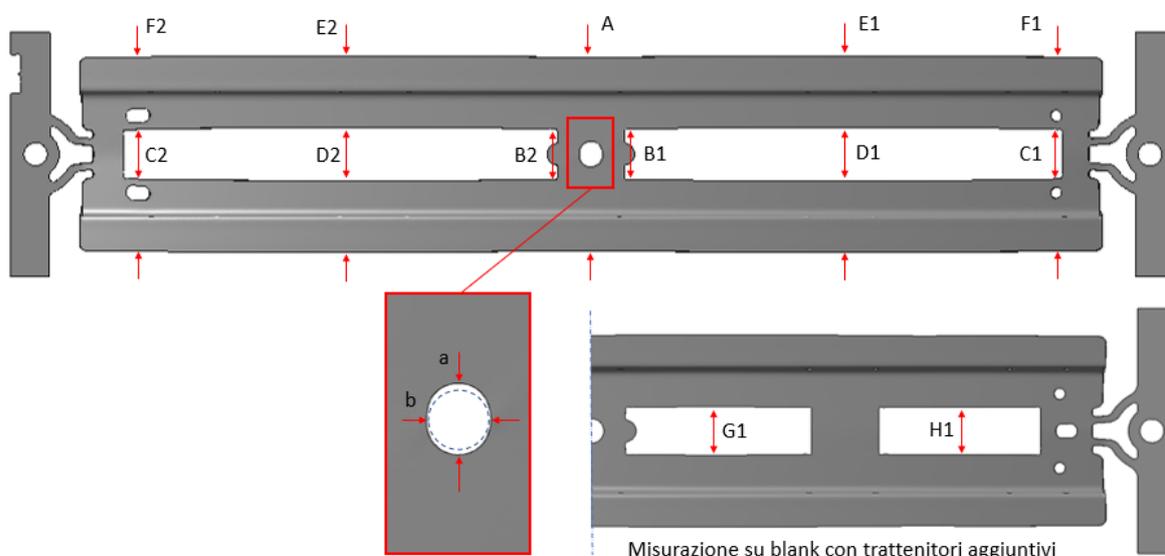


Figura 8.1: Punti di misurazione sul pezzo.

Nelle seguenti tabelle (da Tabella 8.1 a Tabella 8.8) sono riportati per ogni prova i valori misurati sul pezzo reale con il calibro, quelli misurati direttamente in ambiente di

Confronto fra componente reale e simulato

simulazione attraverso gli strumenti di misura ed infine la differenza o scostamento fra le misure ricavate.

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
1° Prova	A	58,60		A	58,28		A	0,32			
	B	15,05	15,04	B	14,95	14,95	B	0,10	0,09		
	C	15,00	14,60	C	14,73	14,48	C	0,27	0,12		
	D	15,85	15,66	D	15,64	15,55	D	0,21	0,11		
	E	59,05	58,96	E	58,7	58,67	E	0,35	0,29		
	F	58,42	58,50	F	58,12	58,28	F	0,30	0,22		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,65		a	7,71		a	0,06			
	b	6,88		b	6,94		b	0,06			

Tabella 8.1: Risultati prova 1.

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
2° Prova	A	58,46		A	58,20		A	0,26			
	B	14,75	14,78	B	14,86	14,90	B	0,11	0,12		
	C	14,63	14,32	C	14,67	14,46	C	0,04	0,14		
	D	15,58	15,42	D	15,56	15,47	D	0,02	0,05		
	E	58,93	58,87	E	58,65	58,61	E	0,28	0,26		
	F	58,21	58,27	F	58,05	58,21	F	0,16	0,06		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,45		a	7,64		a	0,19			
	b	6,92		b	6,89		b	0,03			

Tabella 8.2: Risultati prova 2.

Confronto fra componente reale e simulato

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
3° Prova	A	58,34		A	58,22		A	0,12			
	B	14,73	14,72	B	14,75	14,76	B	0,02	0,04		
	C	14,64	14,36	C	14,7	14,42	C	0,06	0,06		
	D	15,92	15,80	D	15,9	15,81	D	0,02	0,01		
	E	58,97	58,92	E	58,7	58,70	E	0,27	0,22		
	F	58,13	58,20	F	58	58,17	F	0,13	0,03		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,42		a	7,41		a	0,01			
	b	6,93		b	6,95		b	0,02			

Tabella 8.3: Risultati prova 3.

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
4° Prova	A	58,23		A	58,14		A	0,09			
	B	14,42	14,25	B	14,47	14,45	B	0,05	0,20		
	C	14,37	14,26	C	14,44	14,32	C	0,07	0,06		
	D	15,10	14,98	D	15,18	15,12	D	0,08	0,14		
	E	58,71	58,66	E	58,63	58,61	E	0,08	0,05		
	F	58,08	58,22	F	58,14	58,27	F	0,06	0,05		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,22		a	7,31		a	0,09			
	b	6,95		b	6,93		b	0,02			

Tabella 8.4: Risultati prova 4.

Confronto fra componente reale e simulato

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
5° Prova	A	57,96		A	57,86		A	0,10			
	B	14,20	14,19	B	14,30	14,30	B	0,10	0,11		
	C	14,15	14,12	C	14,34	14,22	C	0,19	0,10		
	H	14,35	14,23	H	14,57	14,57	H	0,22	0,34		
	G	14,45	14,39	G	14,55	14,54	G	0,10	0,15		
	E	57,98	57,98	E	57,87	57,91	E	0,11	0,07		
	F	57,88	56,97	F	57,95	58,07	F	0,07	1,10		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,03		a	7,21		a	0,18			
	b	6,96		b	6,96		b	0,00			

Tabella 8.5: Risultati prova 5.

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
6° Prova	A	57,81		A	57,73		A	0,08			
	B	14,24	14,24	B	14,31	14,31	B	0,07	0,07		
	C	14,25	14,18	C	14,26	14,27	C	0,01	0,09		
	H	14,35	14,22	H	14,43	14,37	H	0,08	0,15		
	G	14,42	14,40	G	14,56	14,53	G	0,14	0,13		
	E	56,80	56,81	E	56,71	56,73	E	0,09	0,08		
	F	56,63	56,65	F	56,56	56,68	F	0,07	0,03		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,10		a	7,17		a	0,07			
	b	6,95		b	6,97		b	0,02			

Tabella 8.6: Risultati prova 6.

Confronto fra componente reale e simulato

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
7° Prova	A	57,15		A	57,10		A	0,05			
	B	13,55	13,55	B	13,60	13,61	B	0,05	0,06		
	C	13,59	13,46	C	13,62	13,57	C	0,03	0,11		
	H	13,69	13,52	H	13,74	13,67	H	0,05	0,15		
	G	13,72	13,70	G	13,83	13,83	G	0,11	0,13		
	E	57,29	56,77	E	57,18	56,71	E	0,11	0,06		
	F	56,64	56,61	F	56,69	56,63	F	0,05	0,02		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,10		a	7,22		a	0,12			
	b	6,95		b	6,97		b	0,02			

Tabella 8.7: Risultati prova 7.

PROVA	MISURE CON CALIBRO			MISURE AL SIMULATORE			DIFFERENZA MISURE				
	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)	Diff. Misure	Lato fori (X1)	Lato asole (X2)		
8° Prova	A	57,09		A	57,10		A	0,01			
	B	13,20	13,20	B	13,50	13,50	B	0,30	0,30		
	C	13,24	13,18	C	13,52	13,46	C	0,28	0,28		
	H	13,95	13,83	H	13,96	14,04	H	0,01	0,21		
	G	14,00	13,99	G	14,13	14,12	G	0,13	0,13		
	E	57,24	56,71	E	57,19	56,71	E	0,05	0,00		
	F	56,57	56,57	F	56,68	56,64	F	0,11	0,07		
		Foro pilota				Foro pilota				Foro pilota	
	a	7,10		a	7,21		a	0,11			
	b	6,95		b	6,97		b	0,02			

Tabella 8.8: Risultati prova 8.

Dai risultati riportati nelle tabelle precedenti, è stato osservato che la differenza fra le misurazioni si aggira in media intorno al decimo di millimetro. Un altro aspetto interessante è che fra una prova e la successiva si osserva un miglioramento dal punto di vista dimensionale sia per il pezzo reale sia per quello simulato, dovuto alle modifiche al blank ed agli utensili. Questo sta ad indicare che le simulazioni tendono a fornire un risultato che è in accordo con quello ottenuto nella realtà, tenendo comunque conto di una minima incertezza.

8.2 Confronto su CAD con nuvola di punti

L'obiettivo di tale confronto è valutare lo scostamento tra il modello ottenuto attraverso la simulazione ed i campioni reali misurati. In questo modo, si cerca di valutare se il simulatore sia in grado di fornire risultati che rispecchino la realtà ed il loro livello di precisione.

Il confronto effettivo e l'analisi degli scostamenti fra pezzo simulato e pezzo reale sono stati eseguiti per l'ultimo test, cioè la prova 9. Tramite macchina di misura (Figura 8.2) sono state eseguite le misurazioni su tre componenti diversi ottenuti durante la stessa stampata. I punti in cui sono state eseguite le misure sono stati acquisiti per ottenere una nuvola di punti. Le nuvole di punti dei tre campioni sono state poi importate in VISI CAD ed allineate al modello STL esportato dal simulatore ed al modello nominale.



Figura 8.2: Misurazione dei pezzi con CMM (Sacel S.r.l.).

È necessario sottolineare che l'allineamento in ambiente CAD è stato eseguito manualmente per tentativi, in quanto il terzo riferimento (Y3) è semplicemente un punto sulla superficie del pezzo e non un'entità come foro e asola, su cui è stato possibile identificare in maniera semplice il centro. Inoltre, l'STL è costituito da elementi triangolari, quindi le uniche entità selezionabili su tale geometria sono i nodi in cui convergono i vertici dei triangoli.

L'identificazione dei riferimenti sul solido STL è stata eseguita definendo all'interno del foro e dell'asola una circonferenza (in celeste) passante per tre nodi, come in Figura 8.3 ed

in Figura 8.4. Rispetto ai centri di tali entità, è stata eseguita la sovrapposizione sul solido nominale. Per le nuvole di punti invece, i centri di foro ed asola sono stati già creati dalla macchina di misura, quindi già forniti come punti “extra” rispetto a quelli di misura.

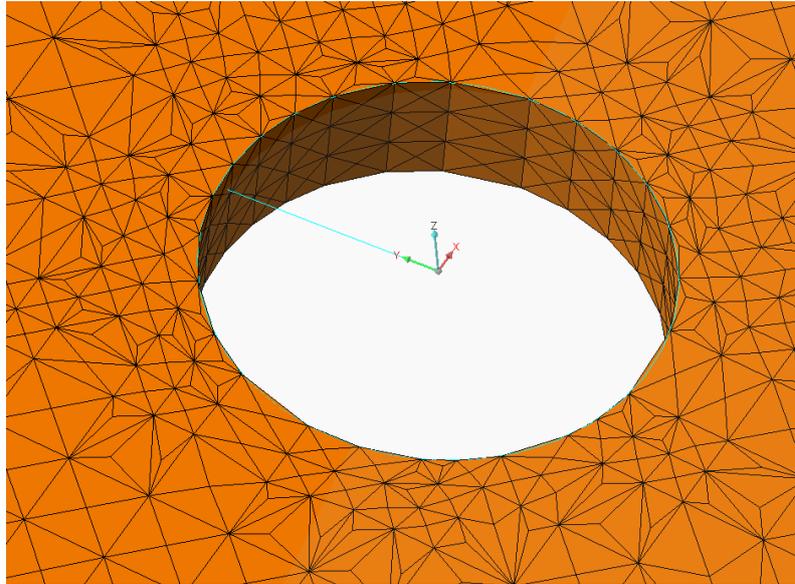


Figura 8.3: Identificazione del centro del foro sull'STL.

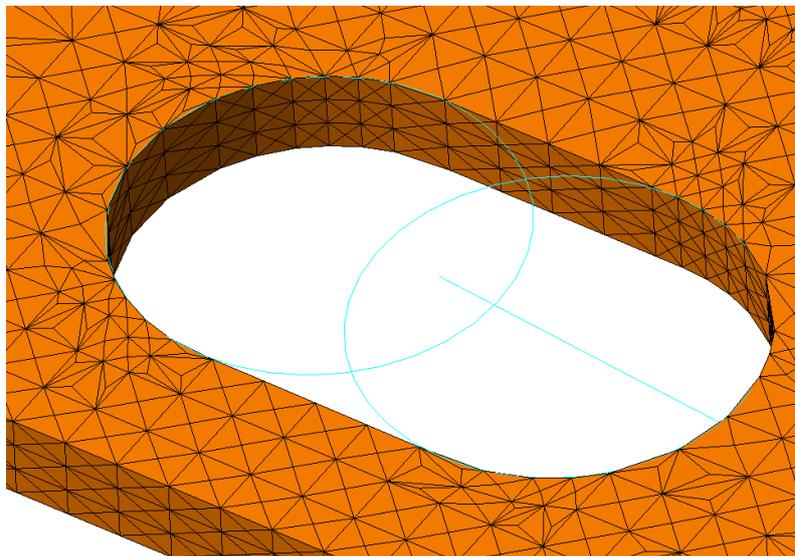


Figura 8.4: Identificazione del centro dell'asola sull'STL.

In questo modo, è stato possibile eseguire la sovrapposizione fra nuvola di punti ed STL, come in Figura 8.5.

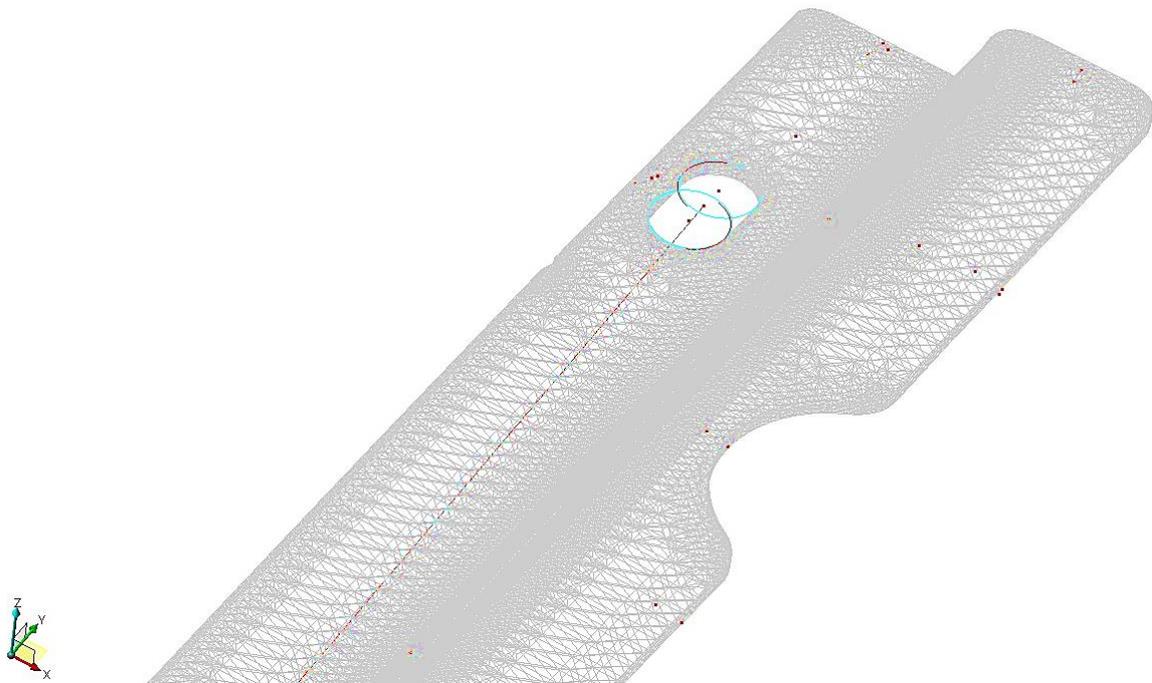


Figura 8.5: Sovrapposizione ed allineamento fra la nuvola di punti estratta con la CMM (punti in rosso) ed il modello STL esportato da Stampack® (in trasparenza).

Dopo l'allineamento, sono state eseguite le misurazioni su VISI CAD per ogni punto di misura, prendendo come riferimento "0" la superficie del modello STL. Sono stati assunti positivi i valori dello scostamento quando i punti che costituiscono la nuvola di punti si trovano esternamente all'STL, come indicato in Figura 8.6. Se lo scostamento risulta nullo, il punto della nuvola di punti giace sulla superficie dell'STL. Al contrario, gli scostamenti negativi si hanno quando il punto in rosso di Figura 8.6 cade all'interno del volume del modello STL.

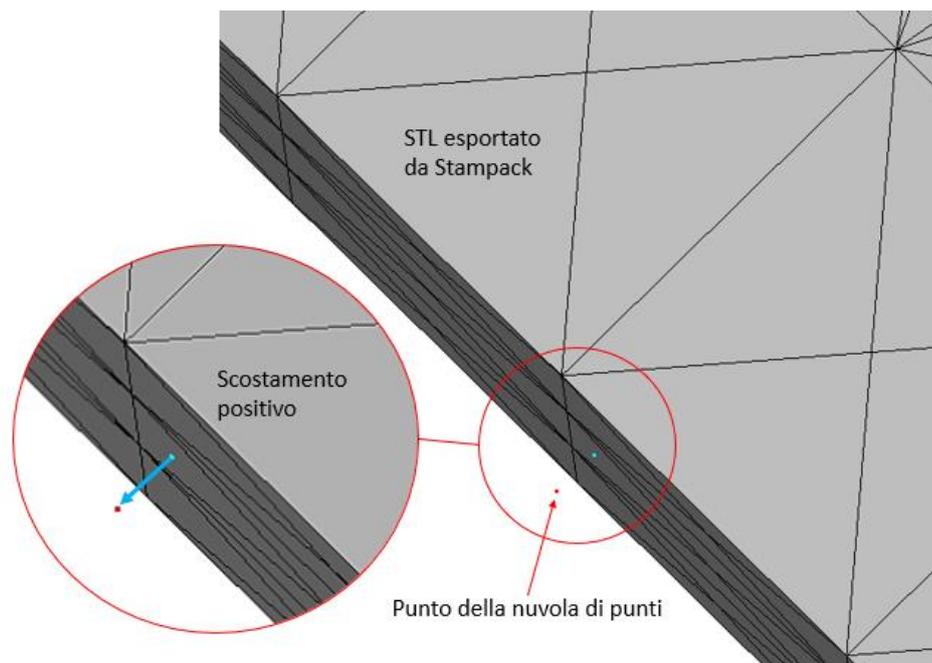


Figura 8.6: Esempio di scostamento positivo tra punto della nuvola di punti ed STL.

La posizione di tali punti è visibile in Figura 8.7 per quanto riguarda i punti volume ed in Figura 8.8 per quanto riguarda invece i punti trancia.

I valori degli scostamenti misurati per tutti e tre i campioni sono riportati in Tabella 8.9 per ogni punto volume ed in Tabella 8.10 per ogni punto trancia.

Osservando i dati ottenuti si è potuto evincere che lo scostamento medio fra l'STL e tutti e tre i campioni analizzati è di 0.068 mm per i punti volume e di 0.072 mm per quanto concerne invece i punti trancia; quindi, i due valori medi sono tra di loro confrontabili.

In generale, la percentuale di punti che manifestano uno scostamento superiore a 0.1mm rilevata in media per tutti e tre i campioni è rispettivamente pari circa al 23% ed al 26% per i punti volume e per i punti trancia. Anche in questo caso, i valori ottenuti sono fra di loro simili.

Confrontando le differenze fra le misure eseguite manualmente per le prove da 1 a 8 con gli scostamenti rilevati nella prova 9, è possibile verificare che le differenze fra pezzo reale e modello simulato sono anch'esse confrontabili, nonostante la minor affidabilità delle misure eseguite manualmente rispetto a quelle eseguite con la CMM.

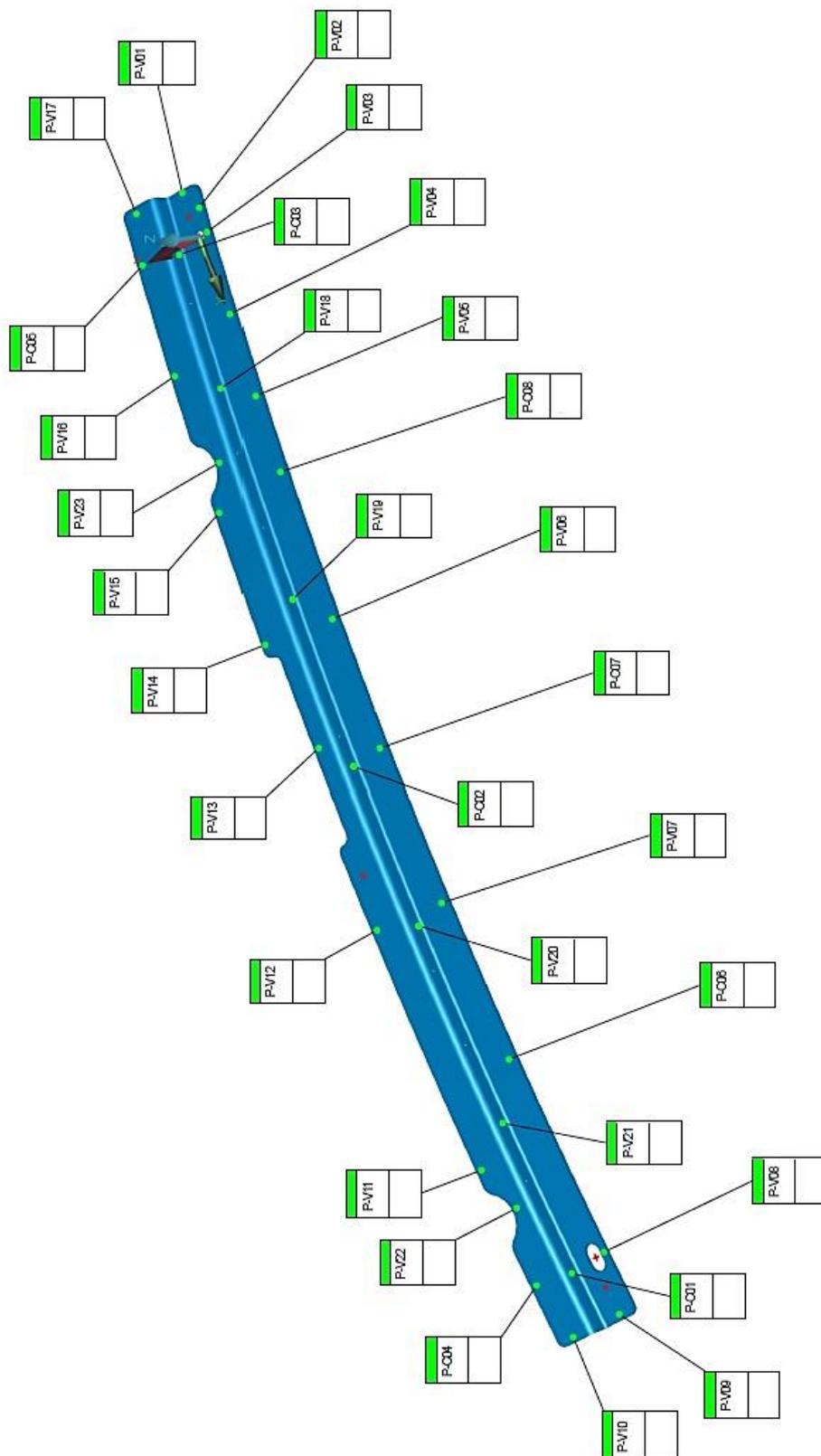


Figura 8.7: Identificazione punti volume sul pezzo.

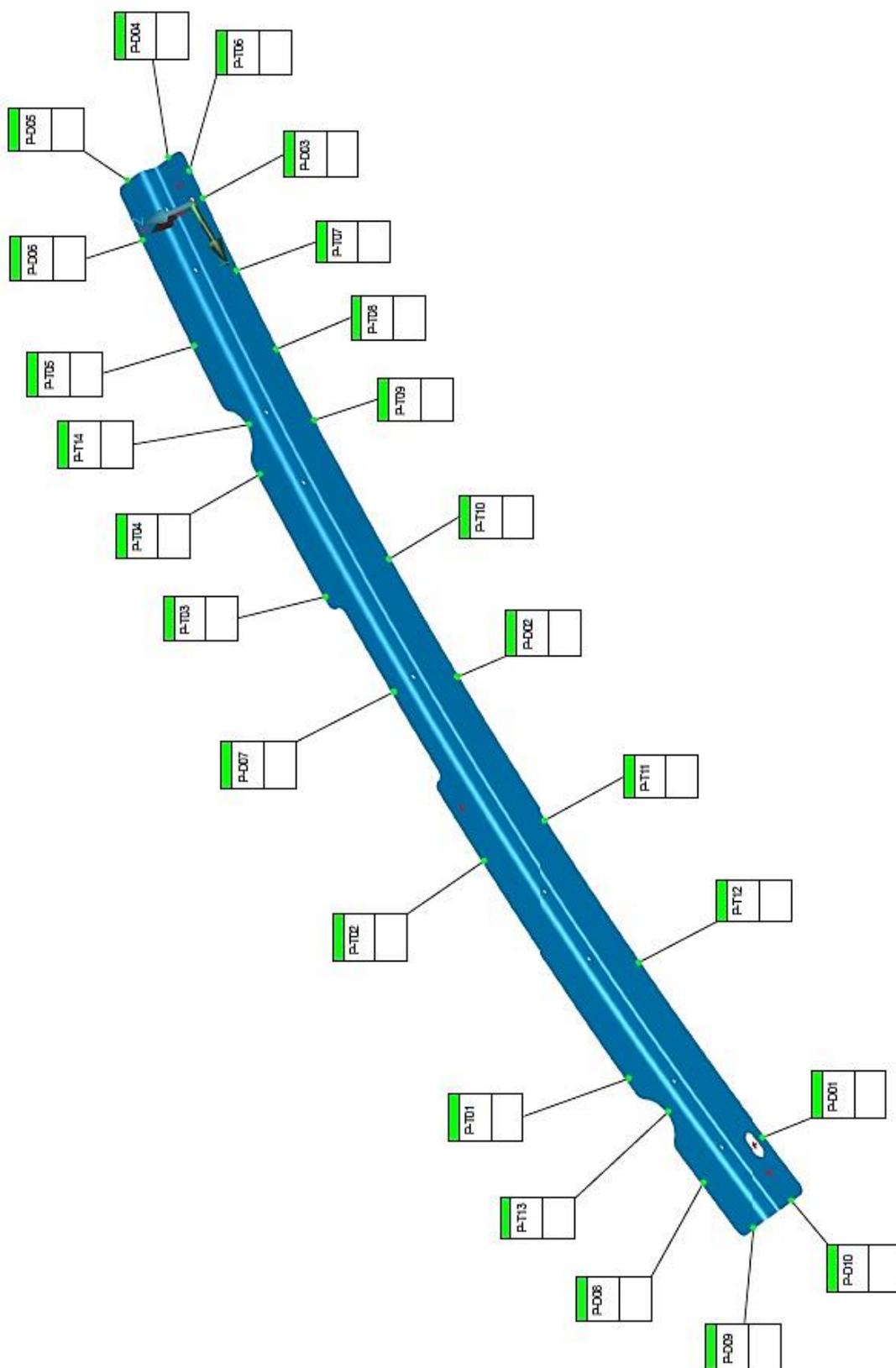


Figura 8.8: Identificazione punti trancia sul pezzo.

Confronto fra componente reale e simulato

Punti volume	Scostamenti nuvola di punti-STL						Medie
	Pezzo 1		Pezzo 2		Pezzo 3		
P-V17	-0,038	0,038	-0,107	0,107	0,045	0,045	-0,033
P-V01	-0,067	0,067	-0,078	0,078	-0,025	0,025	-0,057
P-V02	-0,052	0,052	-0,042	0,042	-0,043	0,043	-0,046
P-V03	-0,006	0,006	0,007	0,007	-0,015	0,015	-0,005
P-V04	0,057	0,057	0,075	0,075	0,026	0,026	0,053
P-V05	0,093	0,093	0,117	0,117	0,039	0,039	0,083
P-C08	0,107	0,107	0,133	0,133	0,038	0,038	0,093
P-V06	0,195	0,195	0,222	0,222	0,106	0,106	0,174
P-C07	0,167	0,167	0,191	0,191	0,083	0,083	0,147
P-V07	0,154	0,154	0,171	0,171	0,085	0,085	0,137
P-C06	0,053	0,053	0,061	0,061	0,004	0,004	0,039
P-V08	0,017	0,017	0,01	0,01	0,001	0,001	0,009
P-V09	-0,049	0,049	-0,054	0,054	-0,035	0,035	-0,046
P-V10	-0,143	0,143	-0,132	0,132	-0,073	0,073	-0,116
P-C04	-0,212	0,212	-0,195	0,195	-0,135	0,135	-0,181
P-V22	-0,073	0,073	-0,063	0,063	-0,031	0,031	-0,056
P-V11	-0,153	0,153	-0,141	0,141	-0,095	0,095	-0,130
P-V12	-0,046	0,046	-0,044	0,044	-0,025	0,025	-0,038
P-V13	0,001	0,001	-0,001	0,001	-0,008	0,008	-0,003
P-V14	-0,062	0,062	-0,087	0,087	-0,05	0,05	-0,066
P-V15	-0,032	0,032	-0,075	0,075	-0,012	0,012	-0,040
P-V23	0,044	0,044	0,015	0,015	0,048	0,048	0,036
P-V16	-0,036	0,036	-0,098	0,098	0,01	0,01	-0,041
P-C05	-0,048	0,048	-0,126	0,126	0,025	0,025	-0,050
P-C03	-0,078	0,078	-0,111	0,111	-0,067	0,067	-0,085
P-V18	0,003	0,003	-0,036	0,036	0,024	0,024	-0,003
P-V19	0,06	0,06	0,019	0,019	0,09	0,09	0,056
P-C02	0,069	0,069	0,036	0,036	0,104	0,104	0,070
P-V20	0,065	0,065	0,04	0,04	0,095	0,095	0,067
P-V21	-0,005	0,005	-0,016	0,016	0,012	0,012	-0,003
P-C01	-0,065	0,065	-0,065	0,065	-0,067	0,067	-0,066
MIN	-0,212	0,001	-0,195	0,001	-0,135	0,001	
MAX	0,195	0,212	0,222	0,222	0,106	0,135	
RANGE	0,407	0,211	0,417	0,221	0,241	0,134	Su tutti i campioni
MEDIA		0,073		0,083		0,049	0,068
Percentuale punti con scostamento >0,1mm							Su tutti i campioni
		23%		35%		10%	23%

Tabella 8.9: Scostamento punti volume tra nuvola di punti ed STL ottenuto con Stampack®.

Confronto fra componente reale e simulato

Punti trancia	Scostamenti nuvola di punti-STL						Medie
	Pezzo 1		Pezzo 2		Pezzo 3		
P-D05	-0,066	0,066	-0,064	0,064	-0,044	0,044	-0,058
P-D04	-0,058	0,058	-0,055	0,055	-0,011	0,011	-0,041
P-T06	-0,1	0,1	-0,118	0,118	-0,124	0,124	-0,114
P-D03	-0,07	0,07	-0,088	0,088	-0,095	0,095	-0,084
P-T07	0,037	0,037	0,018	0,018	0,062	0,062	0,039
P-T08	0,083	0,083	0,061	0,061	0,11	0,11	0,085
P-T09	0,067	0,067	0,034	0,034	0,084	0,084	0,062
P-T10	0,112	0,112	0,086	0,086	0,167	0,167	0,122
P-D02	0,142	0,142	0,107	0,107	0,152	0,152	0,134
P-T11	0,128	0,128	0,108	0,108	0,161	0,161	0,132
P-T12	0,058	0,058	0,043	0,043	0,066	0,066	0,056
P-D01	0,014	0,014	0,008	0,008	0,001	0,001	0,008
P-D10	-0,047	0,047	-0,054	0,054	-0,065	0,065	-0,055
P-D09	-0,08	0,08	-0,079	0,079	-0,108	0,108	-0,089
P-D08	0,042	0,042	0,046	0,046	0,022	0,022	0,037
P-T13	-0,022	0,022	-0,023	0,023	-0,053	0,053	-0,033
P-T01	-0,059	0,059	-0,045	0,045	-0,083	0,083	-0,062
P-T02	-0,038	0,038	-0,006	0,006	-0,086	0,086	-0,043
P-D07	-0,154	0,154	-0,107	0,107	-0,205	0,205	-0,155
P-T03	-0,049	0,049	-0,003	0,003	-0,112	0,112	-0,055
P-T04	-0,058	0,058	-0,004	0,004	-0,103	0,103	-0,055
P-T14	-0,141	0,141	-0,095	0,095	-0,184	0,184	-0,140
P-T05	-0,027	0,027	0,021	0,021	-0,064	0,064	-0,023
P-D06	0,03	0,03	0,075	0,075	-0,014	0,014	0,030
MIN	-0,154	0,014	-0,118	0,003	-0,205	0,001	
MAX	0,142	0,154	0,108	0,118	0,167	0,205	
RANGE	0,296	0,14	0,226	0,115	0,372	0,204	Su tutti i campioni
MEDIA		0,070		0,056		0,091	0,072
Percentuale punti con scostamento >0,1mm							Su tutti i campioni
		21%		17%		42%	26%

Tabella 8.10: Scostamento punti trancia tra nuvola di punti ed STL ottenuto con Stampack.

I valori ottenuti dalle misurazioni sono stati anche inseriti in due grafici a barre, uno per gli scostamenti relativi ai punti volume, l'altro per i punti trancia.

La sequenza dei punti volume e dei punti trancia con cui sono stati definiti gli assi delle ascisse dei grafici è riportata in Figura 8.9.

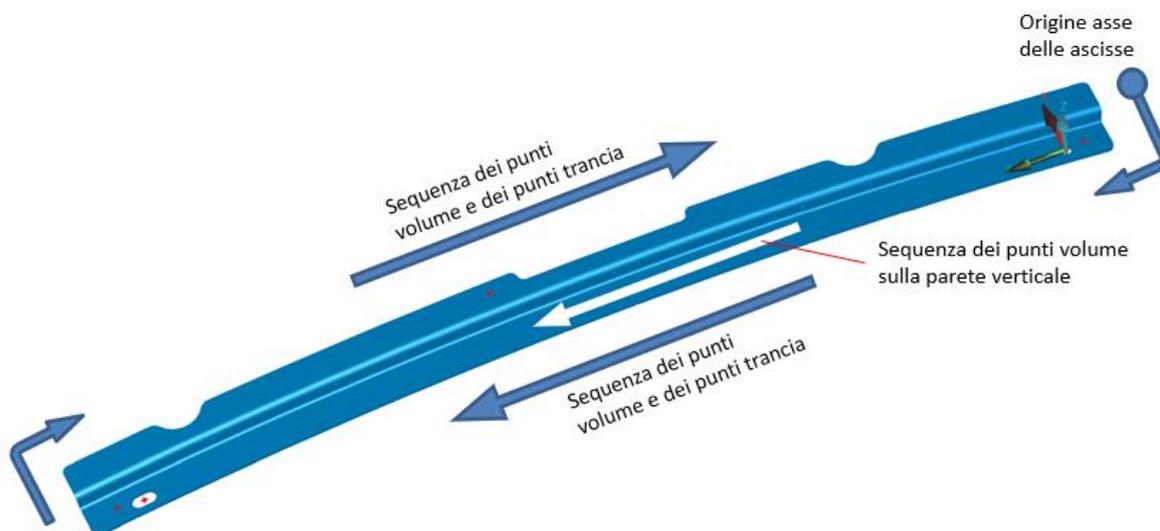


Figura 8.9: Sequenza dei punti di misura che definisce l'asse delle ascisse.

Dai grafici di Figura 8.10 e Figura 8.11 è possibile apprezzare visivamente il trend e l'entità di tali scostamenti fra STL ed i pezzi 1, 2, 3. La curva in rosso rappresenta invece il trend relativo allo scostamento medio per tutti e tre i campioni in ogni punto di misura.

È necessario sottolineare che gli scostamenti misurati in punti di misura che si trovano nei pressi dei riferimenti (foro ed asola) presentano valori più piccoli rispetto, per esempio, ai punti presenti nella mezzeria del pezzo.

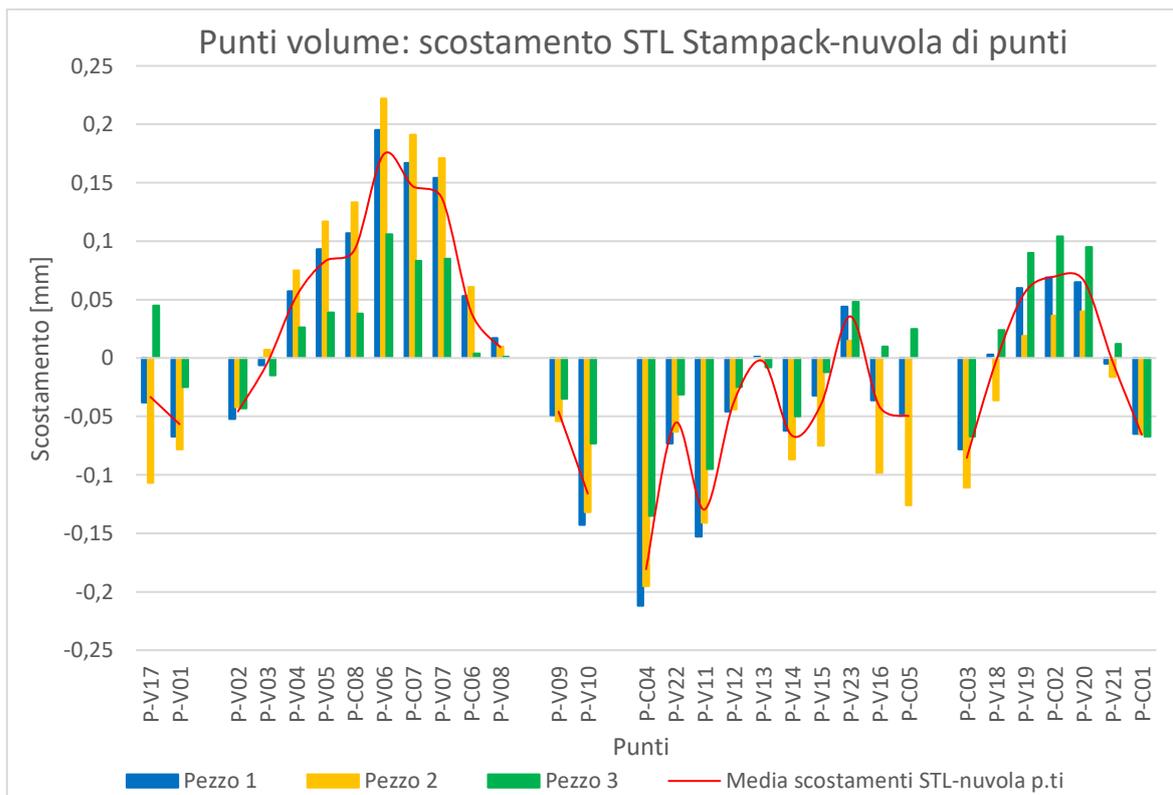


Figura 8.10: Grafico degli scostamenti dei punti volume fra STL-nuvola di punti.

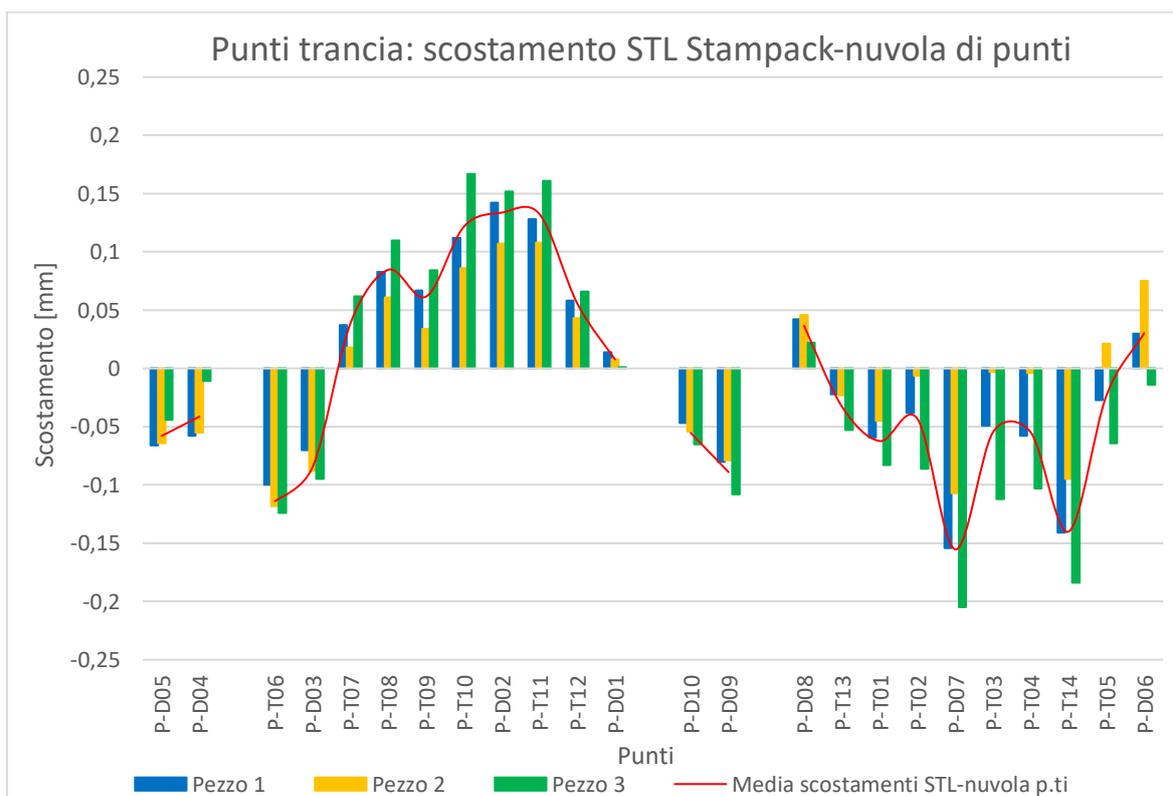


Figura 8.11: Grafico degli scostamenti dei punti trancia fra STL-nuvola di punti.

Successivamente, è stato valutato lo scostamento dalla geometria nominale dei pezzi reali e del modello STL ottenuto dal simulatore. In questo caso, è stato preso come riferimento “0” la superficie del solido nominale. Lo scopo di tale analisi è capire se il componente simulato, ottenuto con un determinato processo e geometria del blank, permetta di prevedere se il pezzo che si vuole ottenere realmente sarà in tolleranza e quindi rispecchi i requisiti richiesti oppure no.

In Tabella 8.11 ed in Tabella 8.12 sono stati riportati i valori dello scostamento relativi rispettivamente ai punti volume ed ai punti trancia. Gli scostamenti presenti nella prima colonna di tali tabelle si riferiscono a quelli fra STL-nominale e la misurazione è stata eseguita su VISI. Nella seconda macro-colonna sono stati riportati gli scostamenti fra pezzo reale-nominale, i cui valori sono quelli presenti nel DR. Nell’ultima macro-colonna invece, sono presenti gli scostamenti fra nuvola di punti-nominale misurati su VISI ed utilizzando la stessa procedura adoperata per ricavare gli scostamenti STL-nominale. In teoria, gli scostamenti nuvola di punti-nominale misurati a CAD dovrebbero coincidere con quelli del DR se non ci fossero errori di allineamento e di misura.

Per questo motivo, sono state riportate in Tabella 8.13 ed in Tabella 8.14 le differenze in valore assoluto fra gli scostamenti del DR (misurati con CMM) e nuvola di punti-nominale (misurati a CAD), rispettivamente per i punti volume e punti trancia. Tale procedura è stata eseguita per verificare che sia la metodologia di misurazione su CAD (adoperata per ricavare gli scostamenti fra STL-nominale) che l’allineamento fra STL, nuvole di punti e solido nominale fossero corretti e determinassero errori trascurabili.

Come si evince dai risultati, è presente un piccolo errore di allineamento. Considerando la media su tutti e tre i campioni, tale valore è pari a 0.01mm per i punti volume, mentre è 0.015mm per i punti trancia. In ogni caso, un tale errore era prevedibile ed esula dalla precisione della simulazione perché causato dall’impossibilità di eseguire un allineamento manuale a CAD in modo preciso, come invece avviene con la macchina di misura.

Punti volume	Scostamento STL-nominale	Scostamento pezzo reale-nominale (DR)				Scostamento nuvola p.ti-nominale (misurato su VISI)			
		Pz 1	Pz 2	Pz 3	Media	Pz 1	Pz 2	Pz 3	Media
P-V17	0,41	0,365	0,299	0,441	0,368	0,376	0,307	0,458	0,380
P-V01	0,062	0,002	-0,003	0,023	0,007	0,004	-0,015	0,038	0,009
P-V02	-0,006	-0,047	-0,028	-0,063	-0,046	-0,058	-0,048	-0,049	-0,052
P-V03	-0,026	-0,019	0,002	-0,054	-0,024	-0,031	-0,018	-0,041	-0,030
P-V04	-0,015	0,055	0,080	-0,002	0,044	0,043	0,061	0,011	0,038
P-V05	-0,093	0,013	0,044	-0,065	-0,003	0,001	0,024	-0,054	-0,010
P-C08	-0,194	-0,074	-0,042	-0,167	-0,094	-0,087	-0,062	-0,156	-0,102
P-V06	-0,143	0,069	0,102	-0,043	0,043	0,055	0,082	-0,035	0,034
P-C07	-0,275	-0,091	-0,061	-0,195	-0,116	-0,104	-0,080	-0,189	-0,124
P-V07	-0,105	0,064	0,086	-0,024	0,042	0,050	0,067	-0,019	0,033
P-C06	-0,11	-0,044	-0,032	-0,109	-0,062	-0,058	-0,050	-0,106	-0,071
P-V08	0,022	0,055	0,053	0,023	0,044	0,039	0,032	0,023	0,031
P-V09	0,06	0,021	0,019	0,025	0,022	0,010	-0,005	0,025	0,010
P-V10	0,316	0,167	0,176	0,241	0,195	0,173	0,184	0,243	0,200
P-C04	0,053	-0,169	-0,156	-0,085	-0,137	-0,158	-0,142	-0,081	-0,127
P-V22	-0,009	-0,087	-0,077	-0,044	-0,069	-0,082	-0,072	-0,040	-0,065
P-V11	-0,013	-0,178	-0,168	-0,114	-0,153	-0,167	-0,154	-0,109	-0,143
P-V12	0,001	-0,060	-0,059	-0,036	-0,052	-0,048	-0,045	-0,027	-0,040
P-V13	0,006	0,001	-0,001	-0,011	-0,004	0,008	-0,005	0,001	0,001
P-V14	0,068	-0,008	-0,033	0,005	-0,012	-0,006	-0,019	0,018	-0,002
P-V15	0,075	0,029	-0,014	0,049	0,021	0,043	-0,001	0,063	0,035
P-V23	0,037	0,075	0,048	0,072	0,065	0,082	0,052	0,086	0,073
P-V16	0,115	0,065	0,003	0,109	0,059	0,079	0,016	0,125	0,073
P-C05	0,221	0,159	0,083	0,228	0,157	0,173	0,096	0,246	0,172
P-C03	0,112	0,039	0,006	0,053	0,033	0,034	0,001	0,046	0,027
P-V18	0,388	0,391	0,349	0,418	0,386	0,390	0,351	0,411	0,384
P-V19	0,676	0,730	0,687	0,772	0,730	0,735	0,694	0,765	0,731
P-C02	0,671	0,734	0,697	0,781	0,737	0,739	0,705	0,773	0,739
P-V20	0,636	0,697	0,668	0,739	0,701	0,699	0,675	0,730	0,701
P-V21	0,335	0,334	0,321	0,358	0,338	0,331	0,319	0,347	0,332
P-C01	0,028	-0,025	-0,026	-0,026	-0,026	-0,036	-0,036	-0,039	-0,037

Tabella 8.11: Scostamenti punti volume tra STL-nominale, pezzo reale-nominale (DR) e nuvola di punti-nominale (misurati su VISI).

Confronto fra componente reale e simulato

Punti trancia	Scostamento STL-nominale	Scostamento pezzo reale-nominale (DR)				Scostamento nuvola p.ti-nominale (misurato su VISI)			
		Pz 1	Pz 2	Pz 3	Media	Pz 1	Pz 2	Pz 3	Media
P-D05	-0,1	-0,135	-0,133	-0,115	-0,128	-0,142	-0,15	-0,111	-0,134
P-D04	-0,052	-0,07	-0,068	-0,021	-0,053	-0,092	-0,06	-0,051	-0,068
P-T06	-0,107	-0,191	-0,208	-0,218	-0,206	-0,207	-0,225	-0,23	-0,221
P-D03	-0,051	-0,094	-0,111	-0,122	-0,109	-0,121	-0,139	-0,146	-0,135
P-T07	0,074	0,126	0,107	0,152	0,128	0,112	0,093	0,137	0,114
P-T08	0,233	0,321	0,299	0,352	0,324	0,316	0,295	0,343	0,318
P-T09	0,296	0,367	0,333	0,388	0,363	0,365	0,333	0,38	0,359
P-T10	0,38	0,496	0,468	0,559	0,508	0,493	0,468	0,547	0,503
P-D02	0,479	0,617	0,587	0,65	0,618	0,609	0,581	0,631	0,607
P-T11	0,339	0,471	0,449	0,512	0,477	0,468	0,448	0,5	0,472
P-T12	0,214	0,278	0,262	0,293	0,278	0,271	0,256	0,28	0,269
P-D01	-0,12	-0,094	-0,099	-0,107	-0,100	-0,107	-0,112	-0,119	-0,113
P-D10	0,017	0,009	0,002	-0,007	0,001	-0,016	-0,013	-0,007	-0,012
P-D09	-0,036	-0,083	-0,08	-0,114	-0,092	-0,112	-0,11	-0,143	-0,122
P-D08	-0,063	-0,022	-0,025	-0,045	-0,031	-0,023	-0,028	-0,041	-0,031
P-T13	0,031	0,016	0,018	-0,022	0,004	0,008	0,007	-0,022	-0,002
P-T01	-0,175	-0,223	-0,207	-0,256	-0,229	-0,234	-0,221	-0,258	-0,238
P-T02	-0,464	-0,488	-0,452	-0,552	-0,497	-0,502	-0,471	-0,55	-0,508
P-D07	-0,491	-0,622	-0,57	-0,689	-0,627	-0,645	-0,598	-0,696	-0,646
P-T03	-0,316	-0,337	-0,287	-0,414	-0,346	-0,365	-0,32	-0,427	-0,371
P-T04	-0,227	-0,261	-0,203	-0,319	-0,261	-0,285	-0,231	-0,33	-0,282
P-T14	-0,247	-0,366	-0,317	-0,421	-0,368	-0,389	-0,343	-0,432	-0,388
P-T05	-0,267	-0,265	-0,215	-0,311	-0,264	-0,293	-0,246	-0,331	-0,290
P-D06	-0,133	-0,07	-0,024	-0,12	-0,071	-0,103	-0,058	-0,148	-0,103

Tabella 8.12: Scostamenti punti trancia tra STL-nominale, pezzo reale-nominale (DR) e nuvola di punti-nominale (misurati su VISI).

Confronto fra componente reale e simulato

Punti volume	DR Pz 1	Misura Pz 1	Diff.	DR Pz 2	Misura Pz 2	Diff.	DR Pz 3	Misura Pz 3	Diff.
P-V17	0,365	0,376	0,011	0,299	0,307	0,008	0,441	0,458	0,017
P-V01	0,002	0,004	0,002	-0,003	-0,015	0,012	0,023	0,038	0,015
P-V02	-0,047	-0,058	0,011	-0,028	-0,048	0,020	-0,063	-0,049	0,014
P-V03	-0,019	-0,031	0,012	0,002	-0,018	0,016	-0,054	-0,041	0,013
P-V04	0,055	0,043	0,012	0,080	0,061	0,019	-0,002	0,011	0,009
P-V05	0,013	0,001	0,012	0,044	0,024	0,020	-0,065	-0,054	0,011
P-C08	-0,074	-0,087	0,013	-0,042	-0,062	0,020	-0,167	-0,156	0,011
P-V06	0,069	0,055	0,014	0,102	0,082	0,020	-0,043	-0,035	0,008
P-C07	-0,091	-0,104	0,013	-0,061	-0,080	0,019	-0,195	-0,189	0,006
P-V07	0,064	0,050	0,014	0,086	0,067	0,019	-0,024	-0,019	0,005
P-C06	-0,044	-0,058	0,014	-0,032	-0,050	0,018	-0,109	-0,106	0,003
P-V08	0,055	0,039	0,016	0,053	0,032	0,021	0,023	0,023	0,000
P-V09	0,021	0,010	0,011	0,019	-0,005	0,014	0,025	0,025	0,000
P-V10	0,167	0,173	0,006	0,176	0,184	0,008	0,241	0,243	0,002
P-C04	-0,169	-0,158	0,011	-0,156	-0,142	0,014	-0,085	-0,081	0,004
P-V22	-0,087	-0,082	0,005	-0,077	-0,072	0,005	-0,044	-0,040	0,004
P-V11	-0,178	-0,167	0,011	-0,168	-0,154	0,014	-0,114	-0,109	0,005
P-V12	-0,060	-0,048	0,012	-0,059	-0,045	0,014	-0,036	-0,027	0,009
P-V13	0,001	0,008	0,007	-0,001	-0,005	0,004	-0,011	0,001	0,010
P-V14	-0,008	-0,006	0,002	-0,033	-0,019	0,014	0,005	0,018	0,013
P-V15	0,029	0,043	0,014	-0,014	-0,001	0,013	0,049	0,063	0,014
P-V23	0,075	0,082	0,007	0,048	0,052	0,004	0,072	0,086	0,014
P-V16	0,065	0,079	0,014	0,003	0,016	0,013	0,109	0,125	0,016
P-C05	0,159	0,173	0,014	0,083	0,096	0,013	0,228	0,246	0,018
P-C03	0,039	0,034	0,005	0,006	0,001	0,005	0,053	0,046	0,007
P-V18	0,391	0,390	0,001	0,349	0,351	0,002	0,418	0,411	0,007
P-V19	0,730	0,735	0,005	0,687	0,694	0,007	0,772	0,765	0,007
P-C02	0,734	0,739	0,005	0,697	0,705	0,008	0,781	0,773	0,008
P-V20	0,697	0,699	0,002	0,668	0,675	0,007	0,739	0,730	0,009
P-V21	0,334	0,331	0,003	0,321	0,319	0,002	0,358	0,347	0,011
P-C01	-0,025	-0,036	0,011	-0,026	-0,036	0,010	-0,026	-0,039	0,013
MIN			0,001			0,002			0,000
MAX			0,016			0,021			0,018
MEDIA			0,009			0,012			0,009

Tabella 8.13: Differenze fra scostamenti DR e scostamenti nuvola di punti-nominale per i punti volume.

Confronto fra componente reale e simulato

Punti trancia	DR Pz 1	Misura Pz 1	Diff.	DR Pz 2	Misura Pz 2	Diff.	DR Pz 3	Misura Pz 3	Diff.
P-D05	-0,135	-0,142	0,007	-0,133	-0,150	0,017	-0,115	-0,111	0,004
P-D04	-0,070	-0,092	0,022	-0,068	-0,060	0,008	-0,021	-0,051	0,030
P-T06	-0,191	-0,207	0,016	-0,208	-0,225	0,017	-0,218	-0,230	0,012
P-D03	-0,094	-0,121	0,027	-0,111	-0,139	0,028	-0,122	-0,146	0,024
P-T07	0,126	0,112	0,014	0,107	0,093	0,014	0,152	0,137	0,015
P-T08	0,321	0,316	0,005	0,299	0,295	0,004	0,352	0,343	0,009
P-T09	0,367	0,365	0,002	0,333	0,333	0,000	0,388	0,380	0,008
P-T10	0,496	0,493	0,003	0,468	0,468	0,000	0,559	0,547	0,012
P-D02	0,617	0,609	0,008	0,587	0,581	0,006	0,650	0,631	0,019
P-T11	0,471	0,468	0,003	0,449	0,448	0,001	0,512	0,500	0,012
P-T12	0,278	0,271	0,007	0,262	0,256	0,006	0,293	0,280	0,013
P-D01	-0,094	-0,107	0,013	-0,099	-0,112	0,013	-0,107	-0,119	0,012
P-D10	0,009	-0,016	0,007	0,002	-0,013	0,011	-0,007	-0,007	0,000
P-D09	-0,083	-0,112	0,029	-0,080	-0,110	0,030	-0,114	-0,143	0,029
P-D08	-0,022	-0,023	0,001	-0,025	-0,028	0,003	-0,045	-0,041	0,004
P-T13	0,016	0,008	0,008	0,018	0,007	0,011	-0,022	-0,022	0,000
P-T01	-0,223	-0,234	0,011	-0,207	-0,221	0,014	-0,256	-0,258	0,002
P-T02	-0,488	-0,502	0,014	-0,452	-0,471	0,019	-0,552	-0,550	0,002
P-D07	-0,622	-0,645	0,023	-0,570	-0,598	0,028	-0,689	-0,696	0,007
P-T03	-0,337	-0,365	0,028	-0,287	-0,320	0,033	-0,414	-0,427	0,013
P-T04	-0,261	-0,285	0,024	-0,203	-0,231	0,028	-0,319	-0,330	0,011
P-T14	-0,366	-0,389	0,023	-0,317	-0,343	0,026	-0,421	-0,432	0,011
P-T05	-0,265	-0,293	0,028	-0,215	-0,246	0,031	-0,311	-0,331	0,020
P-D06	-0,070	-0,103	0,033	-0,024	-0,058	0,034	-0,120	-0,148	0,028
MIN			0,001			0,000			0,000
MAX			0,033			0,034			0,030
MEDIA			0,015			0,016			0,012

Tabella 8.14: Differenze fra scostamenti DR e scostamenti nuvola di punti-nominale per i punti trancia.

I grafici in Figura 8.12 e Figura 8.13, relativi rispettivamente ai punti volume ed ai punti trancia, riportano in blu lo scostamento fra STL-nominale, in giallo i valori di scostamento ricavati dal DR ed in verde la media degli scostamenti misurati a CAD tra nuvola di punti-nominale. L'obiettivo di tale grafico è fornire un confronto visivo tra i risultati contenuti nel DR (che sono i più precisi ed affidabili) con quelli ottenuti dalle misurazioni a CAD.

Dal confronto fra il diagramma a barre in giallo e quello in verde è possibile verificare che, per uno stesso punto, vi è una minima differenza fra DR e misurazioni eseguite a CAD che è legata all'errore di allineamento ed eventuali errori di misura.

Dal confronto invece fra il diagramma a barre in blu con quelli in giallo ed in verde, è possibile verificare che i risultati in termini di scostamento tra l'STL rispetto al solido nominale sono simili a quelli fra pezzo reale e nominale e seguono praticamente lo stesso andamento.

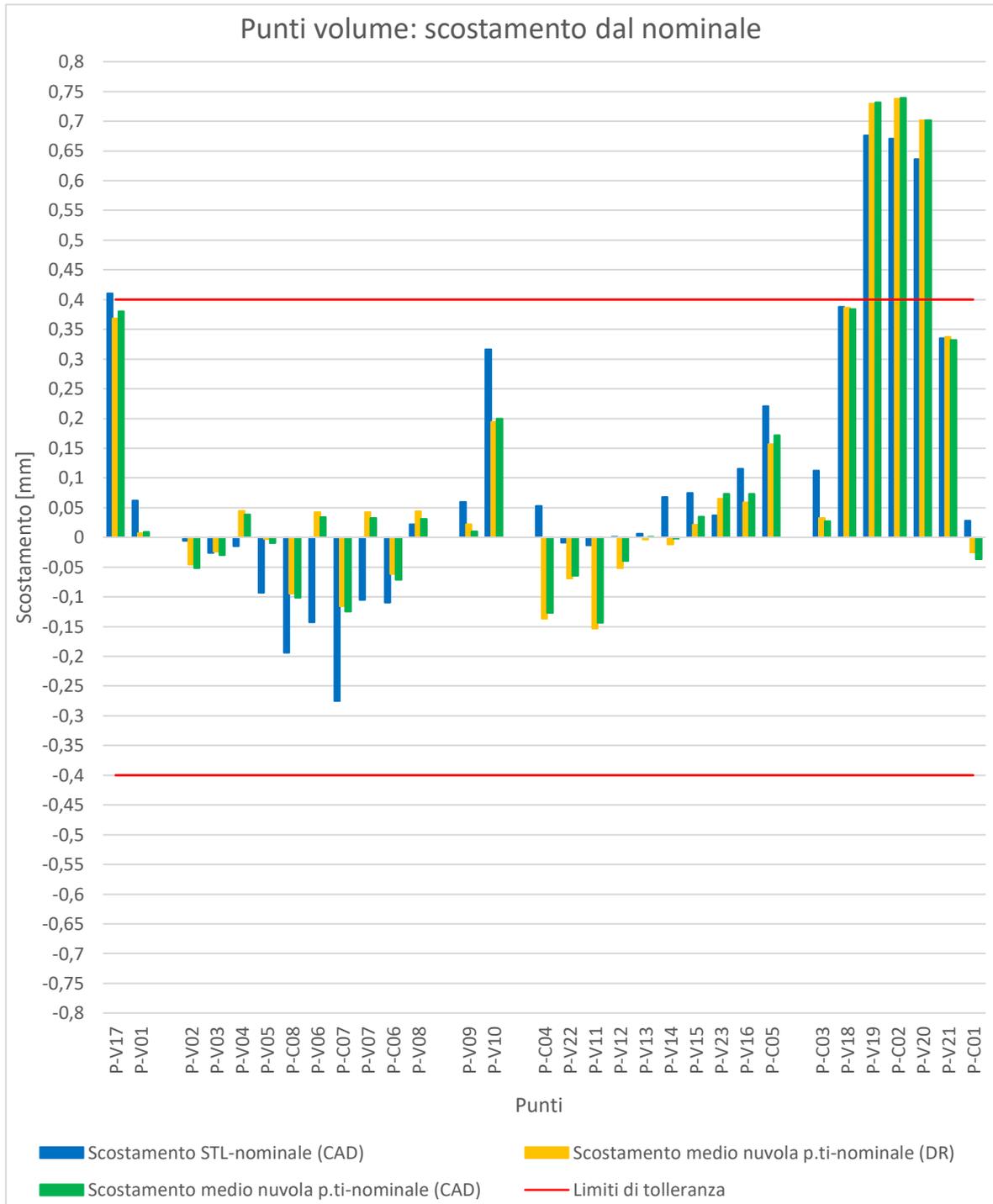


Figura 8.12: Grafico degli scostamenti dei punti volume fra STL e nuvola di punti rispetto al pezzo nominale.

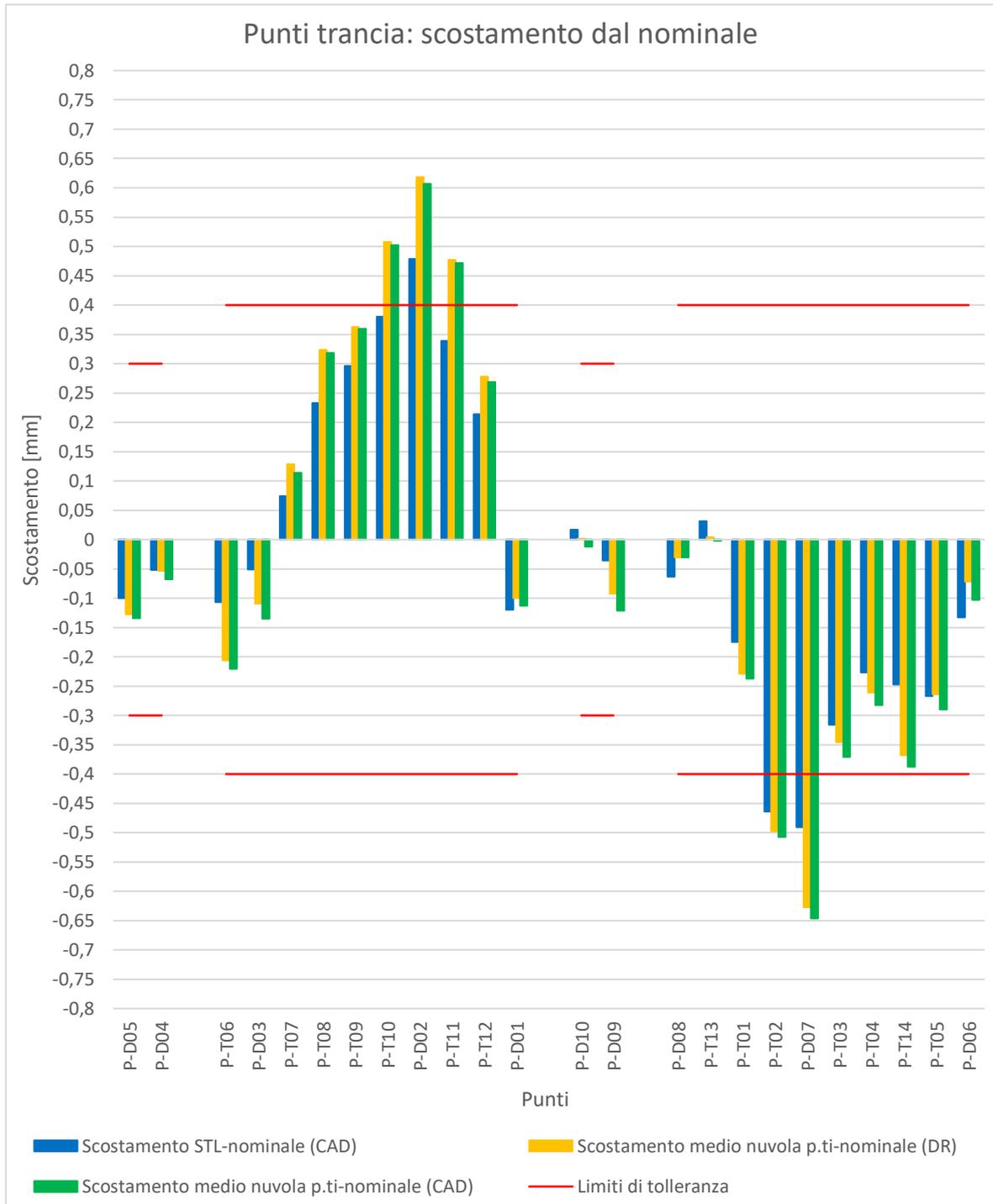


Figura 8.13: Grafico degli scostamenti dei punti trancia fra STL e nuvola di punti rispetto al pezzo nominale.

9 Conclusioni e sviluppi futuri

La precisione e l'affidabilità di una simulazione dipende da quella dei dati a disposizione e dalla capacità di chi utilizza il simulatore nell'impostare correttamente il processo, in quanto il simulatore non fornisce come output il processo già ottimizzato. Dato che nei processi di formatura subentra il ritorno elastico, per poter valutare le deformazioni del modello simulato e confrontarle con quelle di un componente reale è fondamentale che anche questo calcolo venga impostato correttamente per ottenere dei risultati accurati. Un aspetto chiave è sicuramente il numero di elementi da adoperare per la discretizzazione del modello. Eseguire una discretizzazione grossolana certamente riduce la precisione del calcolo, ma permette di poter eseguire la simulazione rapidamente. Al contrario, utilizzare un numero elevato di elementi *non* significa necessariamente che il modello che si otterrà sarà identico a quello reale ed i tempi di calcolo possono diventare molto lunghi anche per componenti semplici. In ambito industriale i tempi di simulazione devono essere compatibili con il risultato che si vuole ottenere, nel senso che se si tratta di uno studio di preventivazione non è utile e non ha molto senso eseguire una simulazione molto precisa che richiederebbe tempi dell'ordine delle ore. Al contrario, se si tratta di uno studio definitivo, dove i risultati ottenuti servono come punto di partenza per il processo e la realizzazione delle attrezzature, sarà necessario eseguire una simulazione più accurata. L'utilizzo dei risultati della simulazione per la realizzazione delle attrezzature finali però è un aspetto particolarmente delicato e va valutato accuratamente in quanto il processo reale è molto influenzato dalle disomogeneità del materiale e dalla precisione delle attrezzature stesse. Non di rado, infatti, capita che montando lo stesso stampo su due presse diverse si ottengono pezzi non identici. Inoltre, vanno tenuti sempre in considerazione i valori di tolleranza richiesti. Un campo di tolleranza piuttosto stretto, in genere, implica un numero di prove e messe a punto maggiori.

Per il caso oggetto di studio, la dimensione degli elementi è stata scelta sulla base della geometria finale del pezzo, in modo da avere un numero di elementi sufficienti per rappresentare correttamente le diverse entità quali fori e pieghe ma anche per ottenere un modello sufficientemente discretizzato che potesse essere confrontato con il modello nominale e la nuvola di punti.

Alla luce dei risultati ottenuti, compatibilmente con i valori di tolleranza richiesti, un'analisi del processo eseguita direttamente al simulatore avrebbe potuto certamente ridurre il numero di prove pratiche "di tentativo", specialmente le prime necessarie per l'individuazione del gioco corretto e del carico del premilamiera. Inoltre, dato che l'errore o scostamento medio rilevato è circa pari a 0.1mm fra modello reale e simulato, poteva essere eseguita, in via preventiva, una verifica dimensionale e geometrica direttamente a CAD fra modello simulato e nominale, così come è stato fatto nel paragrafo 8.2, in modo da ottimizzare anche il blank e ridurre tempi e costi. Va comunque sottolineato che Sacel aveva già esperienza su componenti con geometrie simili e realizzati con lo stesso materiale e questo sicuramente ha avvantaggiato la metodologia di tipo empirico. Se fosse stato necessario realizzare un processo per componenti con geometrie nuove o semplicemente modificando tipologia di

materiale, allora il software di simulazione sarebbe stato un supporto importantissimo e strategico per minimizzare il numero di prove pratiche “di tentativo”.

Pertanto, il simulatore adoperato è in grado di restituire dei risultati sicuramente attendibili e grazie alla simulazione solida possono essere visualizzate informazioni aggiuntive rispetto ad una di tipo shell, quali la distorsione di fori e difetti superficiali, tanto per citarne alcune viste in questo elaborato, ma anche assottigliamenti, deformazioni in direzione dello spessore eccetera.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si potrebbe estendere tale studio su componenti di diverso tipo, che prevedano cioè forme e processi differenti, confrontando gli scostamenti ottenuti nei diversi casi ed effettuando la verifica su un numero di campioni maggiore, in modo da avere dei valori statisticamente più precisi ed affidabili, valutando anche se i risultati sono confrontabili o meno fra di loro ed in linea con quelli ottenuti in questo lavoro di tesi.

Un altro aspetto che sarebbe interessante sviluppare è quello economico, così da valutare costi e benefici sia della metodologia di tipo empirico che della simulazione. In questo modo, si potrebbe capire fino a che punto ha senso economicamente eseguire le prove pratiche ed in quali situazioni è invece conveniente la simulazione, tenendo presente i requisiti richiesti e l'aleatorietà dei risultati dovuta al materiale ed al processo, in modo da individuare un'eventuale condizione di costo minimo.

Appendice

Dimensional Report (*DR*) dei tre particolari misurati ed analizzati:

Pezzo 1

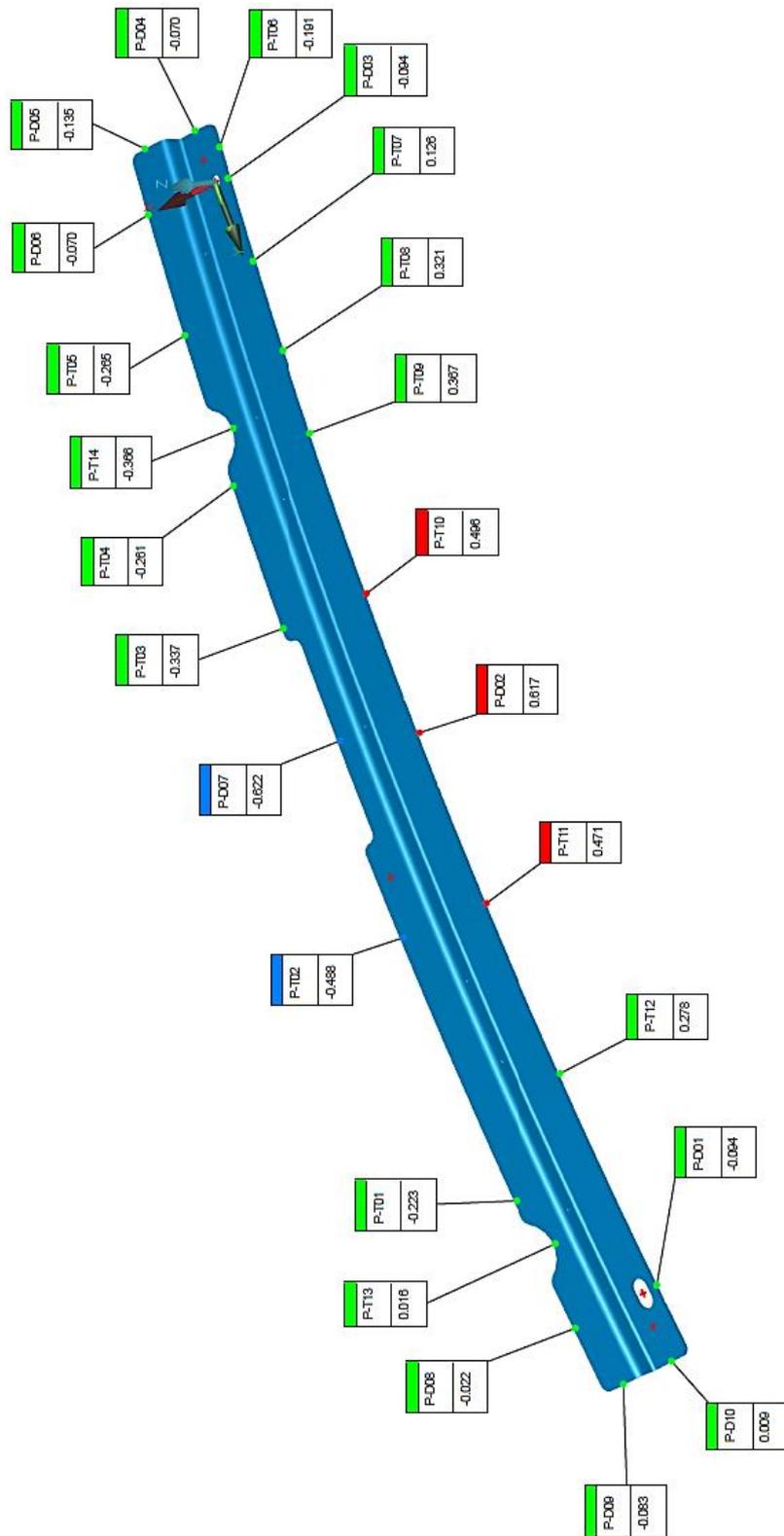


Figura 0.1: DR pezzo 1, punti trancia.

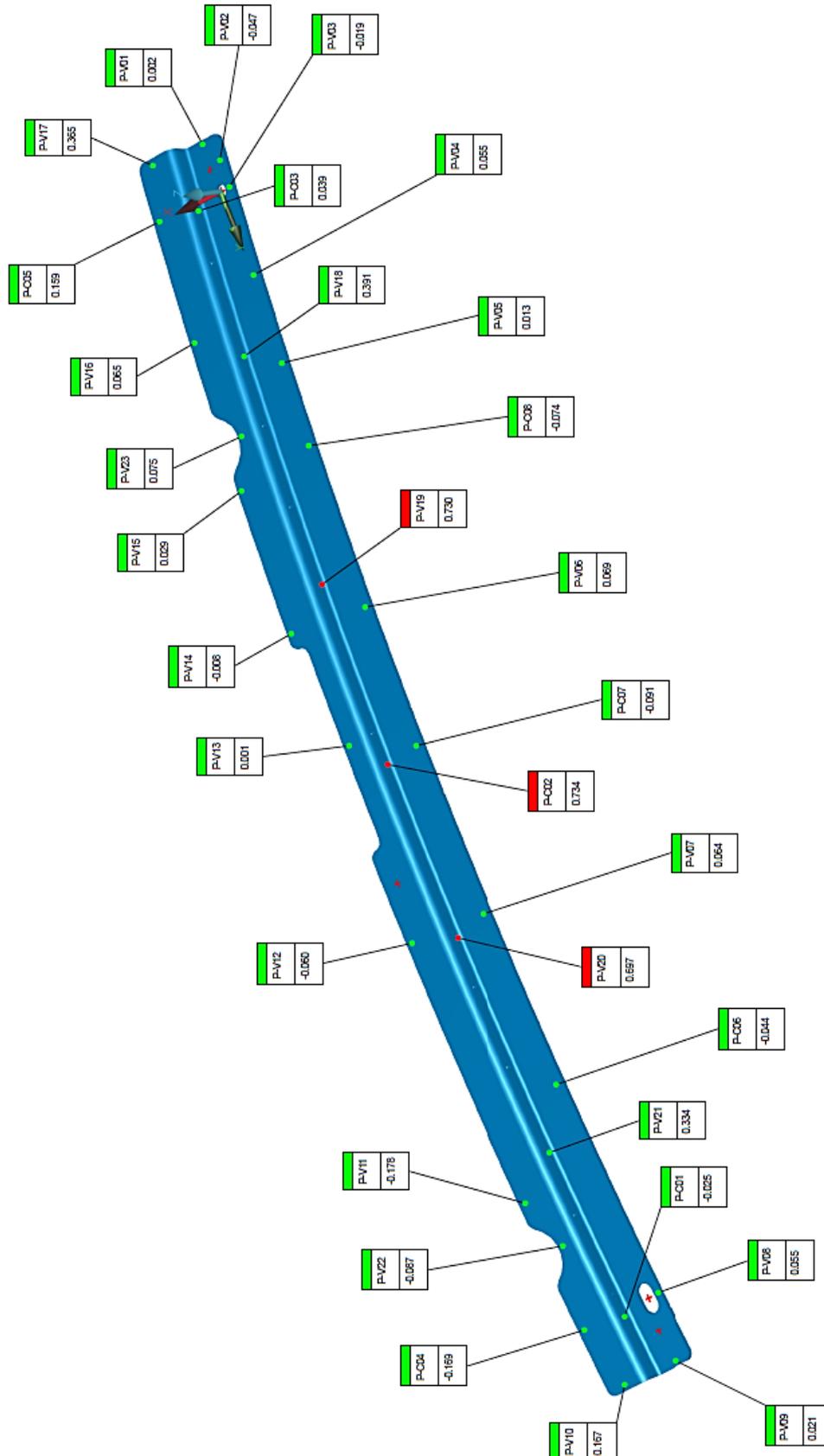


Figura 0.2: DR pezzo 1, punti volume.

Pezzo 2

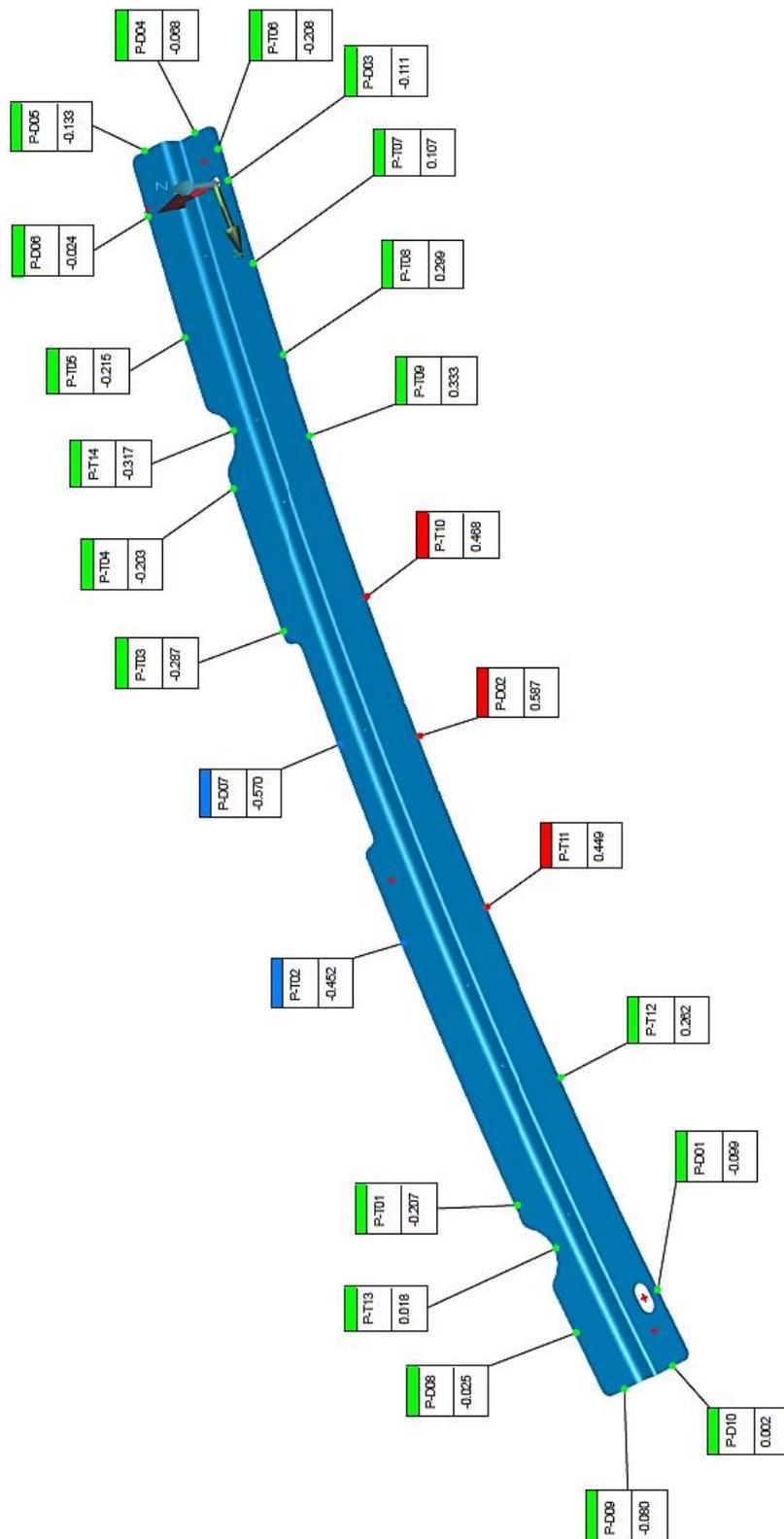


Figura 0.3: DR pezzo 2, punti trancia.

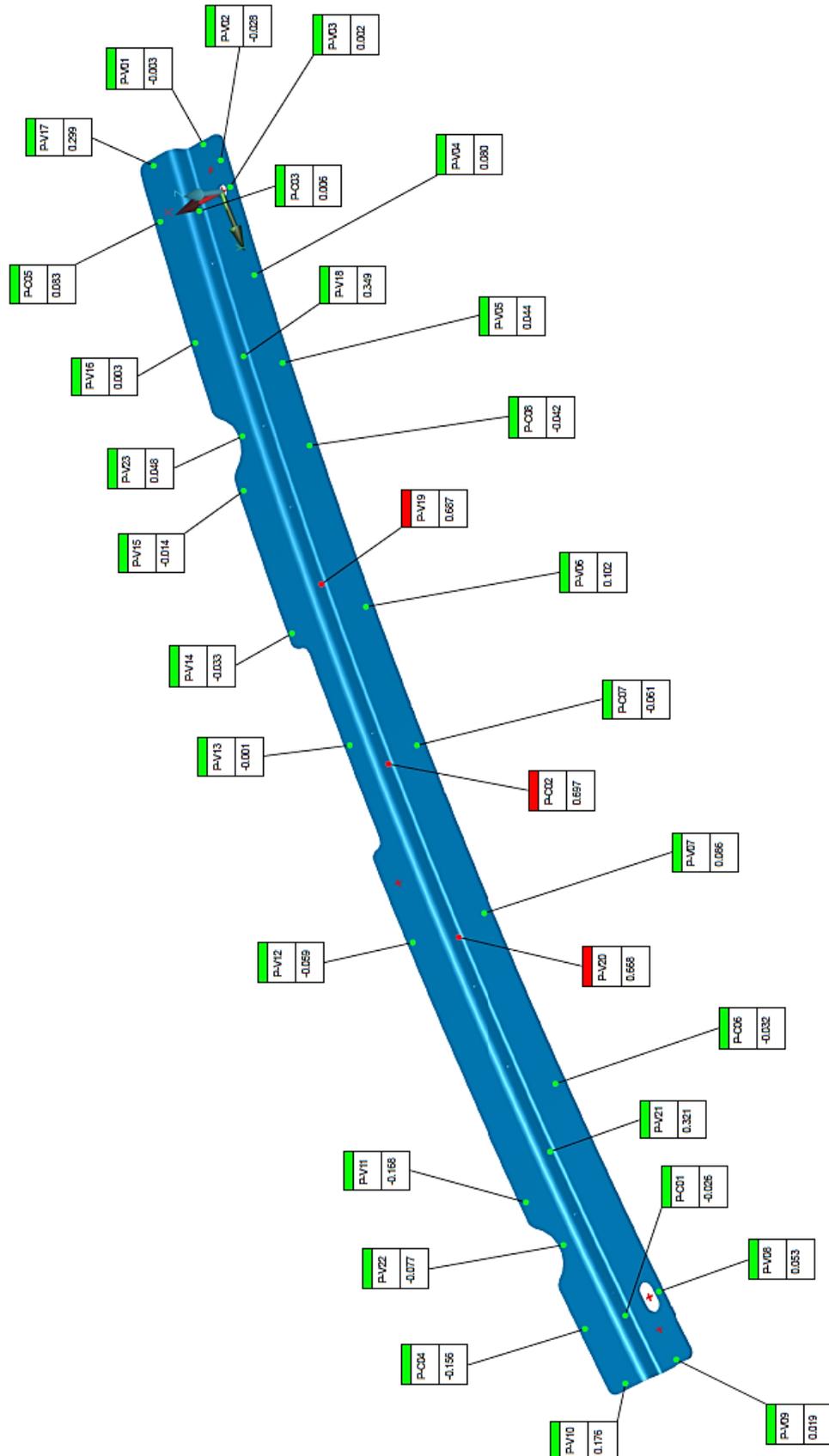


Figura 0.4: DR pezzo 2, punti volume.

Pezzo 3

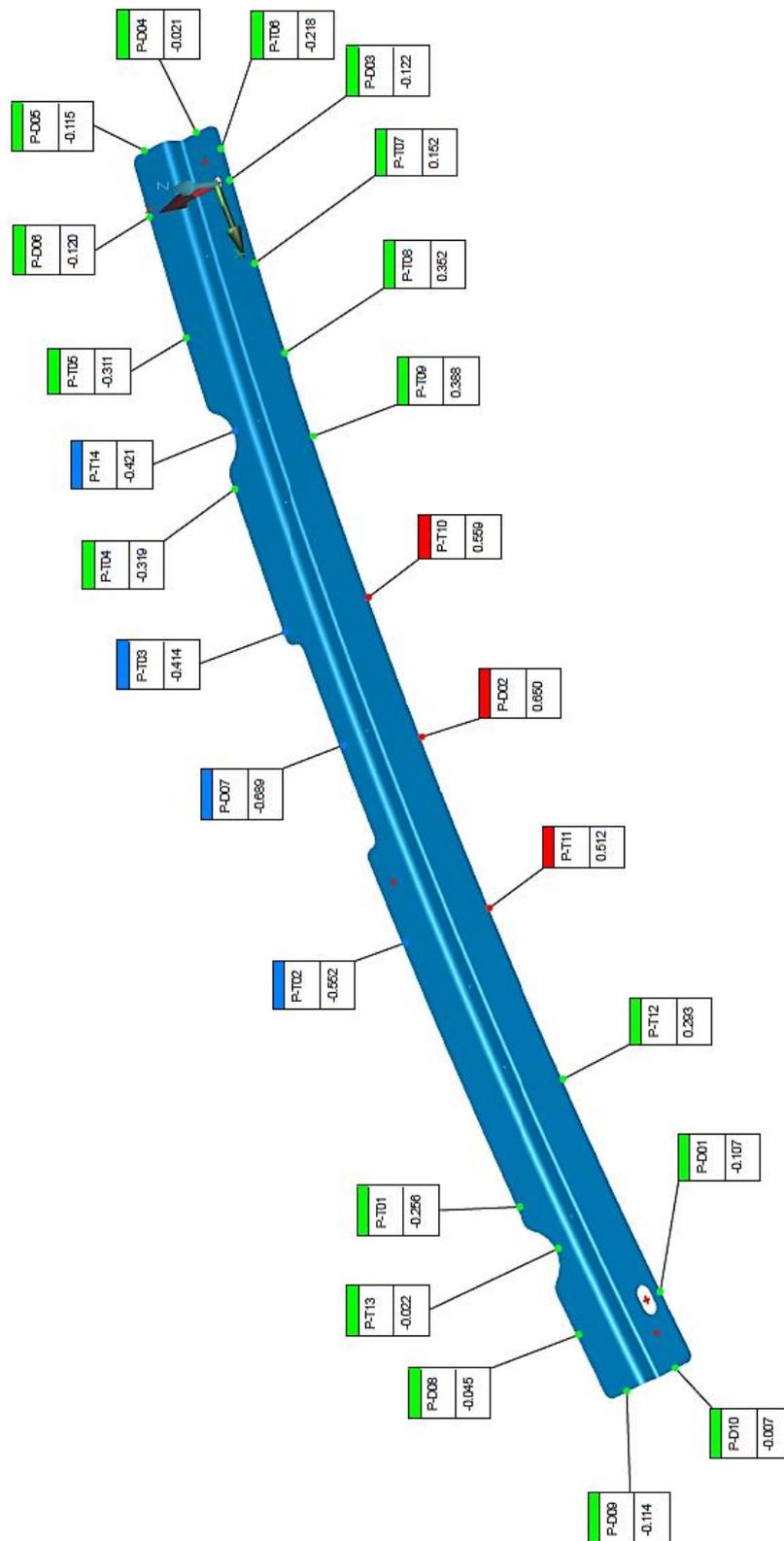


Figura 0.5: DR pezzo 3, punti trancia.

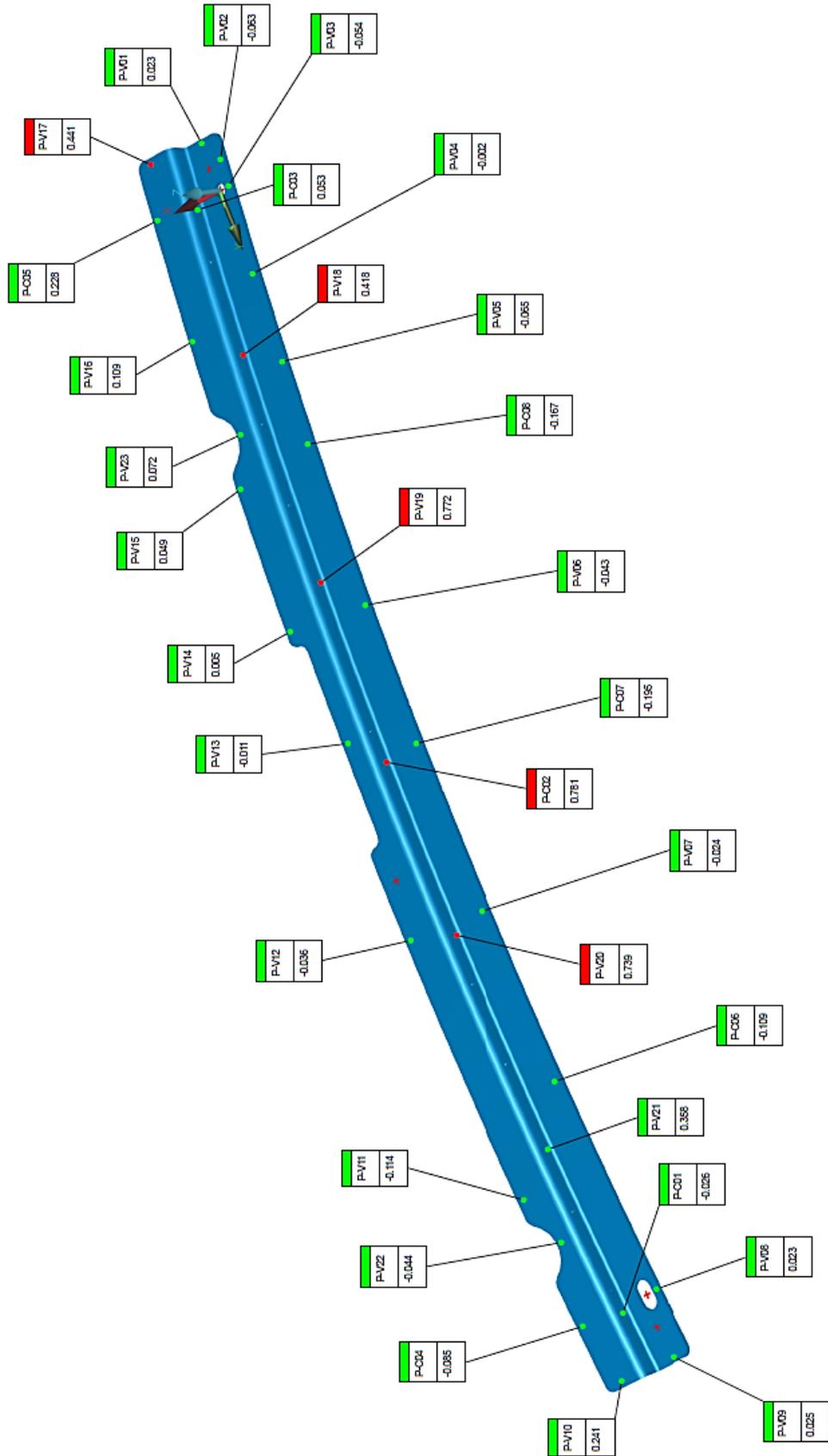


Figura 0.6: DR pezzo 3, punti volume.

Bibliografia

- [1] F. Giusti e M. Santochi, *Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione*, Casa editrice Ambrosiana, 2000.
- [2] «Forgiature Vitali,» [Online]. Available: <http://www.forgiaturevitali.it/it/contenuti/documenti/brochure-forgiature-vitali-ita>.
- [3] «OMFA INOX,» [Online]. Available: <https://omfa.eu/azienda>.
- [4] «Industrie meccaniche Pasotti,» [Online]. Available: <https://www.imp-pasotti.it/cold-forging.php>.
- [5] «AutoForm,» [Online]. Available: <https://www.autoform.com/it/glossario/stampaggio-della-lamiera/>.
- [6] «I.I.S. Majorana Avezzano,» [Online]. Available: <https://iisazmeccanica.wordpress.com/2018/09/22/prova-di-trazione/>.
- [7] B. Leban, «Università degli studi di Cagliari,» [Online]. Available: https://people.unica.it/brunoleban/files/2020/10/Leban-FdP2020_L04_Materiali_Prova-di-trazione_Azione-normale.pdf.
- [8] A. Bhaduri, *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*, Springer, 2018.
- [9] E. Hsu, J. E. Carsley e R. Verma, «Springer,» 2008. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-007-9196-y>.
- [10] S. K. Paul, M. Ganapathy e R. K. Verma, «ResearchGate,» 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-forming-limit-diagram-FLD_fig1_255965627.
- [11] J. Slota, M. Jurčišin, E. Spišák e M. Šiser, «ResearchGate,» 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Blank-geometry-for-Nakajima-test-with-blank-width-a-45mm-b-60-mm-c-75-mm-d-90_fig3_291141018.
- [12] C. Bell, J. Corney, N. Zuelli e D. Savings, «Springer,» 2019. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12289-019-01507-1#Fig19>.
- [13] «Tecnologia Meccanica,» [Online]. Available: https://sites.google.com/view/tecnologiameccanica/lavorazione-lamiera/ll_anisotropia.

- [14] S. Gaiani, E. Colombini, P. Veronesi, G. Poli e I. Pribošič, «Anisotropia ed orientamento cristallografico preferenziale di leghe di titanio alfa per impieghi a caldo,» *La Metallurgia Italiana*, n. 5, p. 39, 2013.
- [15] «Chiminello,» [Online]. Available: <http://chiminello.it/materiali/uni-en-10149/>.
- [16] «Metalsider,» [Online]. Available: https://www.metalsider.it/catalogo/acciai-laminati-a-freddo/acciai-per-imbutitura-e-piegatura-a-freddo_accimbufreddo.htm.
- [17] M. Boniardi e A. Casaroli, *Gli acciai inossidabili*, 2014.
- [18] «Appunti Università degli Studi di Bergamo,» [Online]. Available: http://www00.unibg.it/dati/corsi/228509/31962-08_piegatura.pdf.
- [19] R. Suzzani, *Manuale di lavorazione della lamiera, Tecniche Nuove*, 2009.
- [20] K.-H. Chang, *e-Design: Computer-Aided Engineering Design*, Academic Press, 2016.
- [21] «ME MECHANICAL,» 2017. [Online]. Available: <https://mechanicalengineering.blog/defects-sheet-metal-drawing/>.
- [22] «AMG tools service,» [Online]. Available: <https://www.amgtools.it/news/la-piegatura-della-lamiera/>.
- [23] «Appunti Università degli studi di Bergamo,» [Online]. Available: http://www00.unibg.it/dati/corsi/228509/31963-09_imbutitura.pdf.
- [24] «Industrial Metallurgists, LLC,» [Online]. Available: https://www.imetllc.com/wp-content/uploads/2016/09/OrangePeel_article.pdf.
- [25] «SIDICOM,» [Online]. Available: <https://www.sidicom.it/prodotti/alimentatore-gpa-300-x-300-mm>.
- [26] M. Boniardi e A. Casaroli, «Gli acciai da cementazione e il loro trattamento termico,» 2013. [Online]. Available: http://www.fafe.com/files/pdf/libri_articoli/it/8-Gli_acciai_da_cementazione.pdf.
- [27] «CM Group, trattamenti PVD e galvanici,» [Online]. Available: <https://www.cmgroupsrl.eu/it/come-funziona-il-trattamento-pvd-rivestimenti-a-film-sottile>.
- [28] «Stampack GmbH,» [Online]. Available: <https://www.stampack.com/>.

Ringraziamenti

Questo traguardo lo dedico a mio nonno Giovanni, la persona che più di tutti mi ha trasmesso il senso del sacrificio e della perseveranza.

A conclusione del mio percorso universitario, ritengo doveroso ringraziare tutti coloro che hanno contribuito alla mia crescita personale e professionale.

Voglio ringraziare innanzitutto il professor Luca Iuliano per la sua disponibilità e per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro di tesi.

Un doveroso grazie va alla famiglia Caretto per avermi dato l'opportunità di fare questa esperienza e svolgere questo lavoro di tesi in azienda ed a Luca Calcio, per avermi seguito costantemente durante tutte le fasi di questo lavoro, sempre disponibilissimo a dare chiarimenti e spiegazioni, come tutto il gruppo dell'ufficio tecnico. Voglio ringraziare infatti per la loro disponibilità, collaborazione, supporto e simpatia: Andrea M., Andrea R., Beppe M., Davide, Enrico R., Francesco B., Francesco F., Giorgio M., Igor G., Luca S., Marco A., Massimo A., Massimo F., Massimiliano L., Paolo C. e tutta la Sacel.

Ringrazio Marco Cafasso di Vision Forming Solution per la sua disponibilità e supporto tecnico.

Ringrazio Alessia, Antonio, Francesca, Gaetano, Gennaro, Luca, Marco C., Marco V., Michelangelo, Natale, Pasquale, Raffaele, Roberto, Trenta, Vincenzo per tutti i momenti passati insieme a Torino e tutti i miei amici e colleghi universitari che hanno reso le mie giornate trascorse con loro indimenticabili e speciali.

Ringrazio la mia famiglia per avermi dato la possibilità di studiare, per i loro sacrifici ed il loro supporto, i miei nonni e tutti i parenti, zii e cugini.

Infine, un grazie non meno importante va a Virginia per aver sempre creduto in me, per aver sempre supportato le mie scelte e per avermi dato sempre un supporto morale.