POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

PROGETTAZIONE DI UN BANCO INNOVATIVO PER INCREMENTAL SHEET FORMING

Relatrici :
Daniela Maffiodo
Raffaella Sesana

Tutor aziendale:
Roberto Maiorano

Candidato:
Annarosa Antonioli

“Alla macchina, il lavoro della macchina.

All'uomo, lo spirito della creatività”

Sommario

INTRODUZIONE 8

CAPITOLO 1 10

1.1 - PROCESSI DI FORMATURA DELLE LAMIERE METALLICHE 10

1.2 - IL PROCESSO DI DEEP DRAWING 11

CAPITOLO 2 12

2.1- IL PROCESSO DI INCREMENTALSHEETFORMING 12

2.2 - CAMPI DI APPLICAZIONE 14

2.3-LO STATO DELL'ARTE DEL PROCESSO 14

2.4 -STRUMENTAZIONE 16

2.5 -CLASSIFICAZIONE DEL PROCESSO ISF 18

2.6 - PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL PROCESSO 22

2.7 - MECCANICA DELLA DEFORMAZIONE 27

CAPITOLO 3 34

3.1 - LO STATO DELL'ARTE DELLA MACCHINA 34

3.2 LA MACCHINA DI AMINO CORPORATION 34

3.3 - LA MACCHINA DELL'IFUM 35

3.4 - ROBOFORMING 37

3.5 - LA MACCHINA ISF MOVIMENTATA DA CNC 38

CAPITOLO 4 40

4.1 - LA MACCHINA PRELIMINARE 40

4.2 - LA MACCHINA 42

CAPITOLO 5 43

5.1 - ILSISTEMA DI MOVIMENTAZIONE 43

5.2 - PANORAMICA SUGLI ATTUATORI 43

5.3 - L'ATTUATORE ELETTROMECCANICO LINEARE 45

5.4 - PANORAMICA SUI MARTINETTI MECCANICI 48

5.5 - I MARTINETTI MECCANICI A VITE A RICIRCOLO DI SFERE 48

5.6 - I MARTINETTI MECCANICI A VITE TRAPEZIA 50

5.7 - CONFRONTO TRA MARTINETTI AD ASTA TRAPEZIA E A RICIRCOLO DI SFERE 50

5.8 - LA SCELTA DEL SISTEMA DI MOVIMENTAZIONE 53

5.9 - IL DIMENSIONAMENTO DEL MARTINETTO MECCANICO A VITE TRAPEZIA E ASTA ROTANTE 54

5.10 - SCHEMA DI MONTAGGIO 60

5.11 - STUDIO CINEMATICO 61

5.12 - SCHEMA DEL BANCO DI PROVA 64

CAPITOLO 6 66

6.1 - I GIUNTI MECCANICI 66

6.2 - I RINVII ANGOLARI 68

6.3 - IL MOTORE 69

6.4 - L'ENCODER 73

6.5 - IL RIDUTTORE PE II 090-010 / OMRON R88M - 1M75030T 74

6.6 - PIASTRINA DI COLLEGAMENTOTRA PIASTRONE-MARTINETTO..... 75

6.7 - RINVIO ANGOLARE DI PRECISIONE..... 75

CAPITOLO 7 79

7.1 - INSTALLAZIONE MECCANICA 79

7.2 - INSTALLAZIONE ELETTRICA..... 81

7.3 - GESTIONE DEL PANNELLO DI CONTROLLO 82

7.4 - MESSA A PUNTO 83

CAPITOLO 8 84

8.1-LEGA DI ALLUMINIO 6016 84

8.2 -LE PROVE..... 85

CONCLUSIONI 97

SVILUPPI FUTURI..... 98

BIBLIOGRAFIA 99

Introduzione

In questo progetto di tesi viene descritto il lavoro svolto nell'azienda *Rgtech S.r.l.* di Bruino.

RG TECH è un'azienda italiana specializzata nella realizzazione di prototipi e nella produzione low - volume.
Dal 2007 al servizio del settore automotive, opera in qualsiasi settore, dall'aerospaziale al design di interni. Fornisce servizi di costruzione di stampi, porta stampi, sagome e forme per macchine. L'azienda è leader nella lavorazione di vari materiali: dal comune acciaio all'alluminio fino al titanio.

L'attività sperimentale svolta è orientata alla progettazione di un banco innovativo per il processo di Incrementalsheetforming.

Il lavoro è stato organizzato in capitoli al fine di delineare chiaramente i concetti importanti.

Di seguito viene presentata una breve panoramica sullo stato dell'arte relativo ai processi di formatura delle lamiere metalliche, sull'influenza che ha la formabilità del materiale su tali lavorazioni e sulle macchine, già esistenti, dedicate al processo.
In seguito, viene focalizzata l'attenzione sulla tecnologia relativamente recente dell'Incrementalsheetforming, sottolineandone i vantaggi e i punti deboli in confronto con i processi tradizionali di formatura e approfondendo quali sono le caratteristiche principali e i parametri di processo più incidenti.
Segue un'attenta analisi della macchina, già utilizzata dall'azienda nello studio del comportamento dei materiali sottoposti a ISF durante il quale era stata verificata l'applicabilità del processo a diversi materiali ad alta tenacità per i quali non erano presenti esperienze in letteratura.
Nello specifico, l'azienda aveva valutato l'applicabilità del processo a temperatura ambiente alle lamiere di Titanio grado 5 , con particolare attenzione alle leghe della classe Ti6Al4V, in quanto poche le esperienze di applicazione su tale materiale.
Infine, viene presentata la progettazione del banco di prova per il processo di Incrementalsheetforming studiandone il sistema di movimentazione per renderla automatizzata.

Perché Rgtech è interessata all'Incrementalsheetforming?

In quasi tutte le produzioni, Rgtech utilizza la battitura. Si tratta di un processo di modellazione manuale di fogli grezzi di lamiera mediante l'utilizzo di pochi e semplici attrezzi. Consente di ottenere forme particolari e accurate. E' una lavorazione quindi, che necessita di una estrema precisione ed esperienza.

Introducendo una macchina di Incrementalsheetforming si verrebbe incontro al lavoro condotto dai battilastra, riducendo i tempi di battitura manuale. Infatti si potrebbe pensare di deformare la lamiera dapprima mediante ISF per poi definirne i particolari mediante battitura a mano.
Inoltre con questa tecnologia, l'azienda, riuscirebbe a formare forme asimmetriche a basso costo,senza doversi preoccupare di realizzare o acquistare gli stampi.
Pertanto, tale processo è particolarmente favorevole nella produzione di particolari personalizzati, risparmiando sul costo di produzione degli stampi, vantaggio non da poco per la piccola produzione in quanto non si riuscirebbero ad ammortizzare i costi di realizzazione degli stampi dedicati.

Capitolo 1

1.1 - Processi di formatura delle lamiere metalliche

Attualmente i processi di formatura delle lamiere occupano il primo posto nella produzione industriale.

I materiali utilizzati sono l'acciaio, l'alluminio, il titanio e, in particolari applicazioni, il magnesio.

Tra questi, quello più utilizzato è l'acciaio in quanto è caratterizzato da una buona resistenza e da un costo basso.

I processi di formatura più comuni sono i seguenti:

- stretch forming (stiratura)
- hydroforming (idroformatura)
- deep drawing (profondo stampaggio, imbutitura)
- bending (piegatura)
- superplastic forming (formatura superplastica)

Tutte le tecnologie sopra elencate sono caratterizzate da problematiche comuni quali:

- il ritorno elastico del materiale che altera la forma finale del pezzo;
- l'anisotropia del materiale che induce un comportamento differente nelle diverse direzioni;
- i limiti di formabilità che dipendono dal modo in cui avviene la deformazione;
- il fenomeno dello snervamento che riguarda le lamiere in acciaio a basso carbonio. Esso determina striature sul pezzo che causano lo scarto dello stesso.

Nel successivo paragrafo, sono riportati alcuni concetti riguardanti il processo tradizionale di deep drawing e successivamente viene analizzato il processo innovativo di incrementalsheetforming.

1.2 - Il processo di deep drawing

Il deep drawing è un processo di formatura plastica che trasforma una lastra piana metallica in un corpo cavo. Tale processo è applicabile a lamiere metalliche duttili.
A seconda della profondità desiderata, si procede con uno o più passaggi.
L'attrezzatura prevede: uno stampo (die) , un premilamiera (blank holder) e un punzone (punch). La lamiera viene posizionata sullo stampo e bloccata opportunamente dal premilamiera. Quest'ultimo deve assicurare una deformazione regolare del materiale, evitando la formazione di grinze). A questo punto il punzone costringe la lamiera a scorrere all'interno della cavità dello stampo
In figura 1.1 viene mostrato il tipico processo di deep drawing.

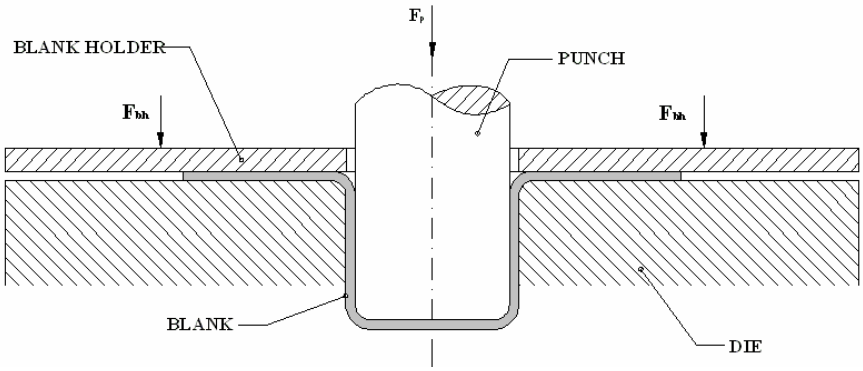


Figura 1.1 :Processo di deep drawing.

Attraverso il processo di deep drawing è possibile raggiungere profondità di imbutitura molto più elevate rispetto agli altri processi. Inoltre, cambiando semplicemente lo stampo è possibile realizzare diverse forme geometriche.

I parametri che influenzano il processo di deep drawing sono:

- il materiale della lamiera;
- la geometria del punzone;
- la forma e lo spessore della lamiera di partenza;
- la velocità di avanzamento del punzone;
- la geometria dello stampo;
- la temperatura dello stampo;
- le condizioni di lubrificazione;

Capitolo 2

2.1- Il processo di incrementalsheetforming

Le tradizionali tecnologie di formatura delle lamiere metalliche non riescono più a soddisfare le nuove esigenze del mercato industriale.
Ad oggi è richiesta una maggiore flessibilità nel settore delle lavorazioni per deformazione plastica.
Poiché, negli ultimi anni, è nata l'esigenza di diversificazione dei pezzi e riduzione del time to market, sono state intraprese nuove tecniche di formatura della lamiera, come i processi di Incremental Sheet Forming (ISF).

In questi processi, un utensile deforma progressivamente la lamiera al fine di ottenere la forma desiderata. L'utensile segue una traiettoria definita da un software CAM .Qualsiasi macchina che sia in grado di descrivere una traiettoria nello spazio può essere utilizzata per comandare l'utensile. Quest'ultimo ha una forma molto semplice e di solito piccoli dimensioni.

La geometria del pezzo finale dipende innanzitutto dalla forma geometrica del punzone, ma dipende anche dal moto dell'utensile rispetto a quello della lamiera.
Esistono infatti diverse modalità per riprodurre il processo di Incremental sheet forming e si contraddistinguono in base al moto relativo utensile-lamiera.
Inoltre, la dimensione del macchina limita solo la dimensione del pezzo.
L'operazione è relativamente silenziosa.
La tecnologia di Incremental sheet forming presenta vantaggi economici, ecologici e meccanici, indicati nella tabella seguente.

	Risparmio energetico	**Risparmio materiali**
No stampo	√	√
Bassa potenza macchina	√	√
Basse forze deformazione	√	√
Macchina più piccola	√	

No strumenti specifici-pressioni esterne di supporto	√	
Reworking -no reprocessing	√	√
Buona deformabilità	√	
Deformazione localizzata	√	

Il vantaggio più evidente è l'elevata flessibilità: non richiede l'utilizzo di una stampo dedicato, contrariamente a quanto avviene nel tradizionale processo di stampaggio.
Pertanto, un eventuale modifica della geometria del componente viene semplicemente effettuata settando il percorso utensile. In tal modo è possibile ridurre tempi di attrezzaggio della macchina e costi per la realizzazione di nuovi stampi.

Inoltre, le forze in gioco sono molto più contenute rispetto alle operazioni tradizionali in quanto l'utensile, deformando localmente la lamiera, è a contatto con quest'ultima solo in una zona limitata.
Per cui, sono sufficienti macchine caratterizzate da bassa potenza e quindi meno costose.
La configurazione della macchina risulta essere piuttosto semplice.

Dall'altro lato, essendo una tecnologia relativamente recente, sono ancora poche le informazioni relative ai parametri di processo . Non è ancora chiaro in che misura influenzano la deformazione.

Nella figura 2.1, riportata di seguito, viene mostrato il principio di funzionamento della tecnologia ISF, mettendo in evidenza come lavora l'utensile formatore.

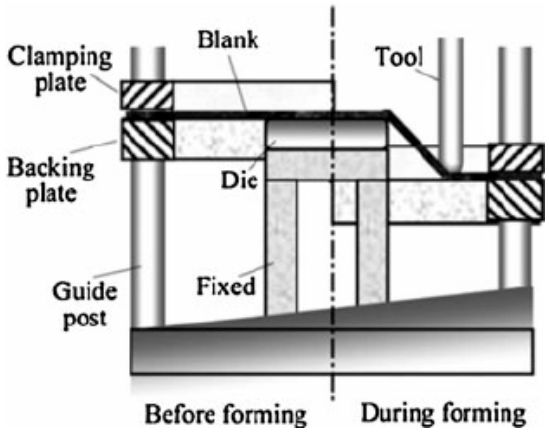


Figura 2.1 :Incrementalsheetforming.

2.2 - Campi di applicazione

Come già accennato, il processo di incremental sheet forming trova applicazione nella produzione di piccoli lotti, quindi prototipale, e diventa interessante laddove sono richieste elevate precisioni dimensionali.
Nel caso di componenti con geometria complessa, l'ISF potrebbe risultare assai vantaggiosa in quanto non sarebbe necessaria la costruzione di attrezzature specifiche.

I campi di interesse sono svariati, dall'industria automobilistica (produzione di fanali prototipali, schermi protettivi per rumore e calore, pannelli strutturali, cofani e parafanghi) all'industria aerospaziale (produzione di pannelli di strumentazione e strutturali, cover dei sedili per i passeggeri). Il processo ISF copre anche l'industria biomedica per la produzione di supporti per le caviglie e calotte craniche e ancora, telefoni cellulari, hard disk sensori, prodotti sanitari, caschi metallici e protesi dentarie.

2.3-Lo stato dell'arte del processo

Il processo di Incremental sheet forming, conosciuto anche come *dieless forming*,fu descritto per la prima volta nel 1967 in un momento in cui il controllo numerico non era ancora tecnicamente fattibile. Sebbene il primo brevetto SPIF sia stato redatto già nel 1967, il processo è stato sviluppato per uso industriale solo a partire dai primi anni '90.
Si tratta di un processo innovativo che combina e ottimizza diverse lavorazioni meccaniche: dalla battitura manuale all'imbutitura e allo stampaggio di lamiera.
L'incremental sheet forming si può immaginare come una combinazione tra i processi di "stretch forming" e di " metal spinning".

Nello stretch forming, figura 2.1, il pezzo di lamiera viene contemporaneamente stirato e piegato su uno stampo al fine di formare pezzi sagomati di grandi dimensioni.

Il metal spinning, figura 2.2, consiste nella rotazione del metallo effettuata mediante tornio CNC o manualmente: un disco o un tubo di metallo viene fatto ruotare ad alta velocità e formato in una parte assialmente simmetrica. Con tale tecnologia si producono parti rotazionali per serie medie o piccole.

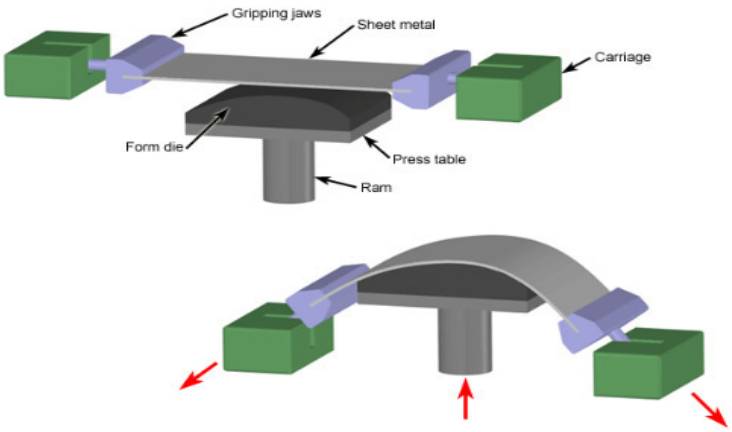


Figura 2.1: Stretch forming.

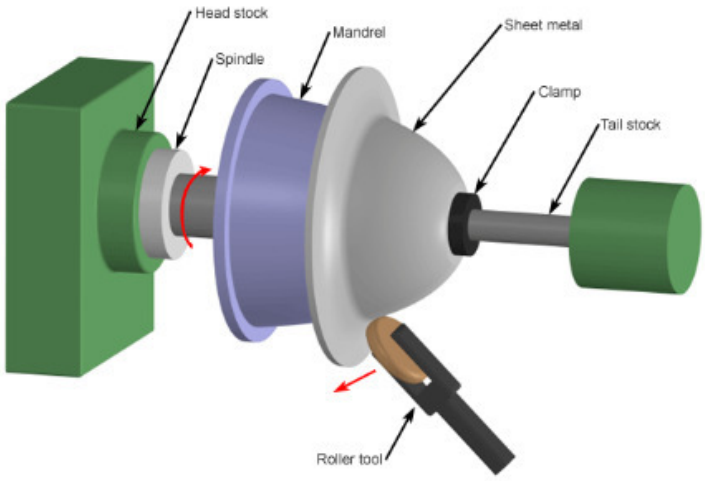


Figura 2.2: Metal spinning.

2.4 -Strumentazione

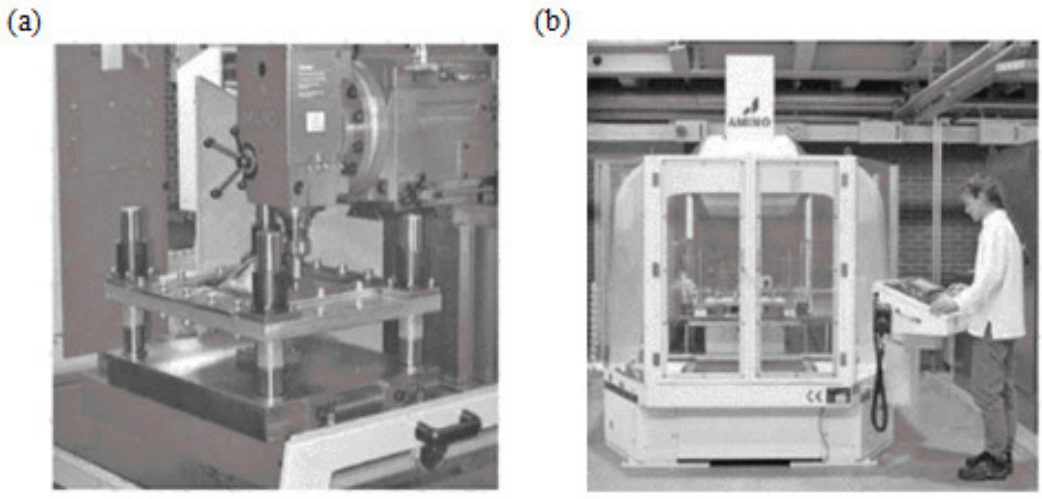
Nel processo di incrementalsheetforming(ISF) l'idea base è quella di ottenere la forma desiderata attraverso il movimento progressivo di un utensile formatore.
In linea di principio, qualsiasi macchina controllata da computer che consente una traiettoria dello strumento di formatura nello spazio può essere utilizzata per eseguire l'ISF.

La selezione di macchine utilizzate nella pratica include quanto segue:

- Fresatrici CNC
- Robot industriali
- Esapodi
- Macchine dedicate

Disponibilità, velocità, volume di lavoro, rigidità e costi sono i fattori chiave nella decisione del tipo di macchina.

La figura 2.3 mostra le configurazioni tipiche della macchina per ISF: fresatrice manuale con portautensile mobile (Fig. 2.3a), una macchina ISF appositamente progettata distribuita dall'azienda giapponese AMINO (Fig. 2.3b), una speciale macchina incrementale per la produzione di fogli costruita all'Università di Cambridge (Fig. 2.3c) e il processo di roboforming che utilizza due robot industriali cooperanti (figura 2.3d).



(c) (d)

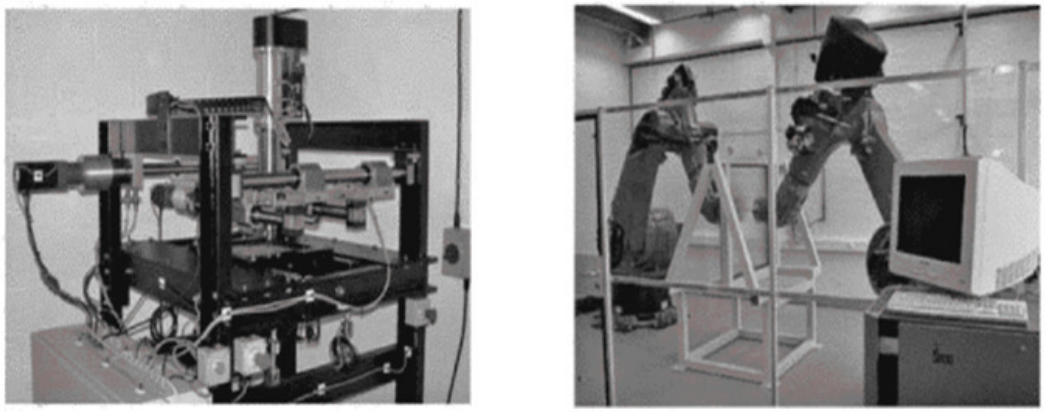


Figura 2.3: Configurazioni tipiche della macchina per ISF: fresatrice manuale con portautensile mobile (a); una macchina ISF appositamente progettata distribuita dall'azienda giapponese AMINO (b); una speciale macchina incrementale per la produzione di fogli costruita all'Università di Cambridge (c) ; due robot industriali cooperanti (d).

Le fresatrici sono spesso utilizzate perché sono disponibili in molte officine e possono essere facilmente adattate alle esigenze dell'ISF. Di contro sono rigide e ciò influenza la precisione dimensionale del pezzo.
I robot industriali sono una buona alternativa a causa dei loro prezzi moderati. A causa della loro bassa rigidità, devono essere compiuti ulteriori sforzi per evitare che lo strumento di formatura si discosti dalla traiettoria prescritta. Tuttavia, grazie alla maggiore flessibilità riescono ad effettuare molte operazioni accessorie come il serraggio e il deserraggio della lamiera, la sua movimentazione ed il suo posizionamento nell'area dei pezzi finiti.

Un processo di formatura alternativo ai robot industriali è il processo di "martellatura" incrementale. Lo strumento di formatura non è rigido ma prevede un movimento oscillante veloce, formando in tal modo il foglio nella forma desiderata.

La strumentazione che utilizza il processo di formatura è la seguente (figura 2.4):

- l'utensile formatore (ball tool) che deforma plasticamente il materiale. Esso presenta una geometria abbastanza semplice ed economica:un gambo cilindrico e una testa semisferica tale da garantire una buona formabilità e accuratezza superficiale.

- il premilamiera(blank holder) è un semplice telaio in acciaio che blocca la lamiera perifericamente. Infatti, durante la deformazione, il sistema di bloccaggio deve

mantenere la lamiera nella giusta posizione permettendo il flusso del materiale evitando però rotture e formazione di grinze. Per questo motivo è necessario scegliere opportunamente il carico da applicare al premilamiera.

- il punzone (die) , ossia uno stampo rigido che riproduce la geometria del pezzo finito (totalmente o parzialmente). Rimane fisso e costante durante l'intera lavorazione.
  Non tutti i processi ISF ne richiedono la presenza.

Inoltre, come già detto, la traiettoria dell'utensile formatore lungo la lamiera è impostata e controllata da un sistema CNC multiassiale oppure da celle robotizzate.
La geometria richiesta è quindi modellata da CAD e il percorso utensile viene generato utilizzando il software CAM convenzionale per la fresatura.

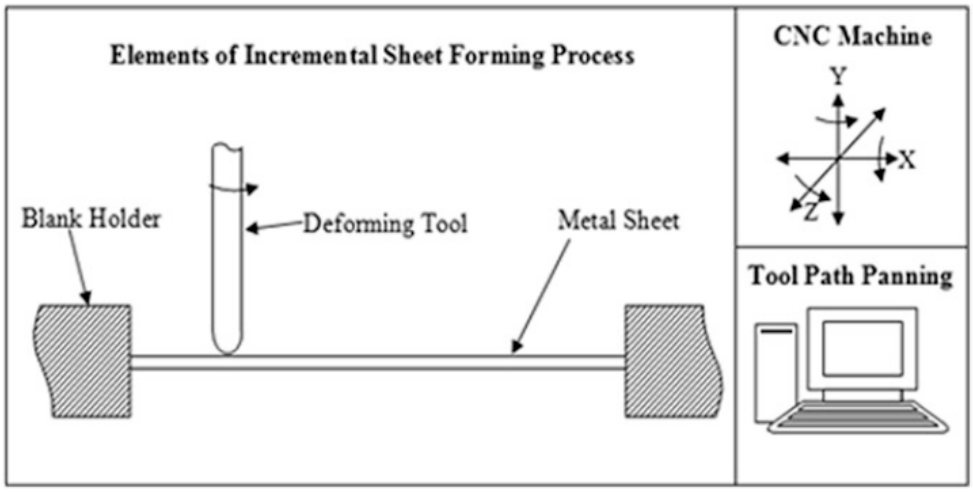


Figura 2.4 :Strumentazione necessaria al processo ISF.

2.5 -Classificazione del processo ISF

Il processo di incrementalsheetforming viene classificato in due macrocategorie in base al numero di punti di contatto tra utensile, foglio di lamiera e punzone.

- **CISF :ConventionalIncrementalSheetForming**

  E' il processo più semplice da realizzare in quanto non prevede l'utilizzo di strumenti specifici o pressioni esterne di supporto alla lavorazione. Generalmente, il foglio di lamiera viene deformato progressivamente attraverso l'utensile deformatore. L'utensile

è controllato da una macchina a controllo numerico CNC ed imprime una deformazione plastica localizzata permettendo così di ottenere la forma finale desiderata.
Il processo CISF viene ulteriormente classificato come segue:

1. *Single Point Incremental Sheet Forming (SPIF) o Negative Dieless Forming.*

   E' il metodo di formatura incrementale più utilizzato. Tale processo prevede l'utilizzo del solo utensile deformatore che agisce sulla superficie superiore deformando il foglio di lamiera,come mostrato in figura 2.5.

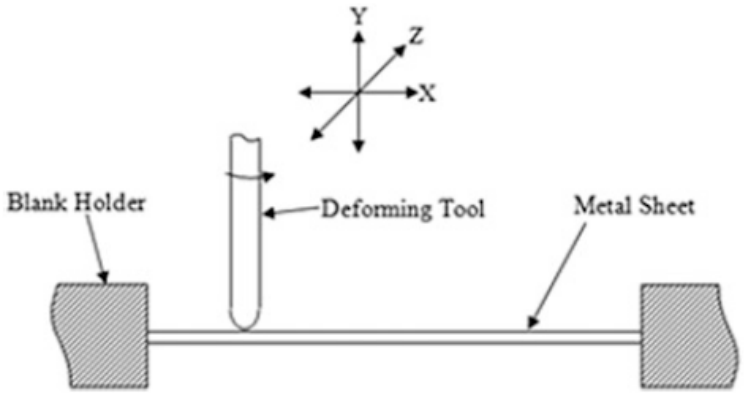


Figura 2.5: SPIF.

2. *Two Point Incremental Forming (TPIF) o Positive Dieless Forming.*

   Tale processo prevede l 'utilizzo di un utensile deformatore e di uno strumento di supporto che offrono maggiore flessibilità al processo lavorando sui lati opposti del foglio. In tal modo si ottiene una migliore deformazione della lamiera ed è possibile ottenere forme più complesse e precise.
   L'utensile deformatore è quello che imprime la maggiore deformazione plastica alla lamiera, mentre lo strumento di supporto ne favorisce la lavorazione ed è usato come supporto per la forza. Il processo è schematizzato in fig.2.6.

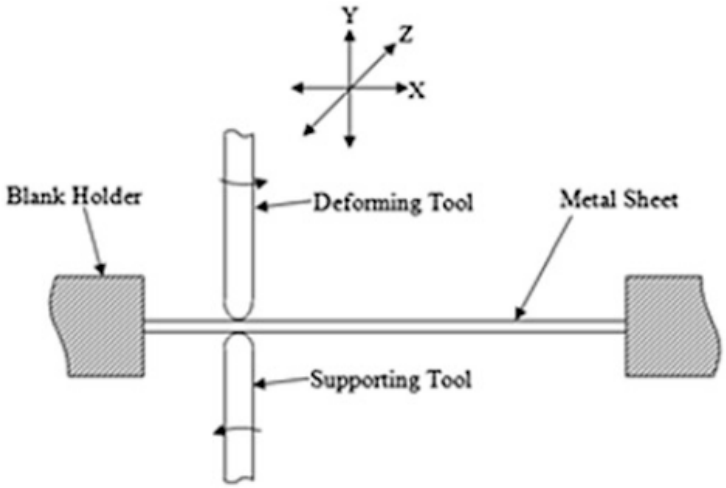


Figura 2.6 :TPIF.

- **HISF: HybridIncrementalSheetForming**

  Questi processi prevedono che la lamiera poggi su un supporto in grado di favorire la lavorazione dell'utensile deformatore.
  A seconda della complessità del pezzo, tale supporto viene realizzato attraverso un sistema idraulico pressurizzato oppure con un punzone totale o parziale.
  Anche i processi HISF sono suddivisi in sottocategorie:

  1. Single Point Incremental Hydro-Forming (SPIHF)

  L'utensile lavora su un lato della lamiera, mentre dal lato opposto quest'ultima è supportata da un liquido idraulico in pressione come mostrato nella figura 2.7.

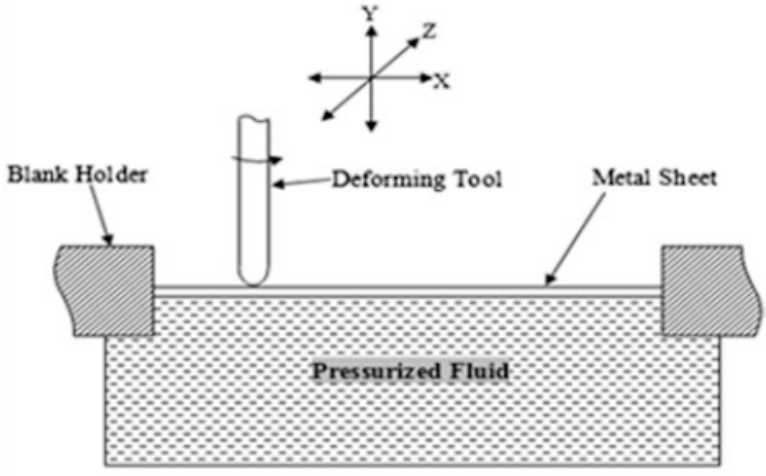


Figura2.7 : SPIHF.

2.TPIF with partial die (TPIFPD)

La lamiera viene lavorata da un lato dall'utensile deformatore mentre dal lato opposto è supportata da un punzone parziale, come mostrato in figura 2.8.
L'utensile si muove attorno al punzone, che è posto al di sotto della lamiera, con un movimento incrementale dall'alto verso il basso.

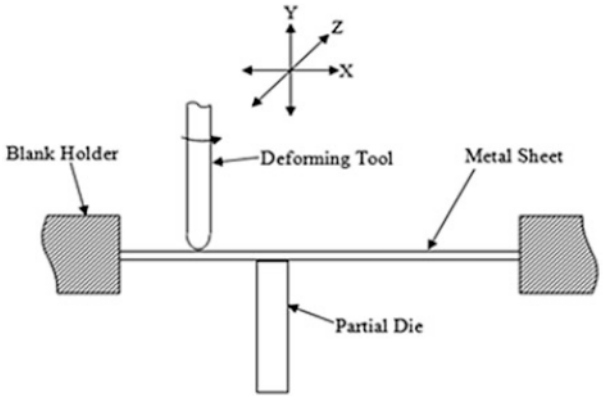


Figura2.8: TPIFPD.

3. TPIF with full die (TPIFFD)

E' analogo al *TPIF with partial die* con l'unica differenza che il punzone riproduce l'intera forma del pezzo da realizzare e non solo una parte.
La figura 2.9 ne schematizza il processo.

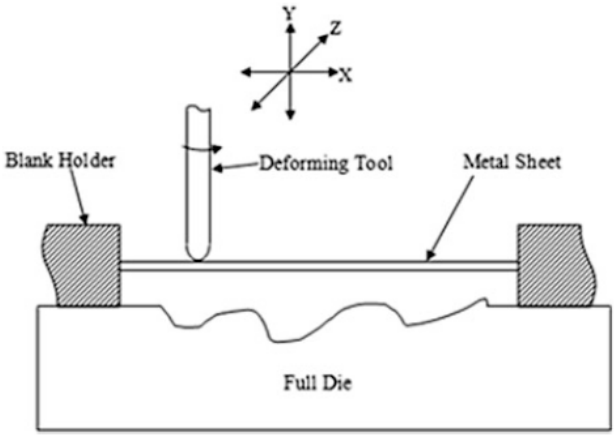


Figura 2.9 : TPIFFD.

Per i processi che prevedono l'utilizzo del supporto con punzone si parla spesso di *formatura positiva* e *formatura negativa* facendo riferimento alla parte della lamiera lavorata dall'utensile.
Nei processi di *formatura negativa* l'utensile lavora sulla parte concava della superficie della lamiera. Il premilamiera è fisso. Il modo di deformazione è biassiale per cui più difficile realizzare angoli e lati oltre certi limiti in quanto si verificano facilmente le rotture.
Nei processi di *formatura positiva* l'utensile lavora sulla parte convessa della superficie della lamiera. E' necessario un sistema di movimentazione del premilamiera lungo l'asse z. Inoltre è possibile realizzare forme con angoli abbastanza severi in quando il meccanismo di deformazione dominante è piano. Infatti se la deformazione è piana la formabilità è più alta.

Esiste un'ulteriore classificazione sulla base del meccanismo di riscaldamento localizzato della zona di deformazione plastica: riscaldamento per conduzione, per radiazione, per attrito ed elettrico assistito.
Il meccanismo di riscaldamento elettrico assistito è quello più flessibile ed anche il più economico ma garantisce una accuratezza geometrica limitata ed una scarsa finitura superficiale.

2.6 - Parametri che influenzano il processo

I fattori che influenzano maggiormente il processo sono i seguenti:

- *la temperatura del processo*
  La temperatura a cui avviene il processo gioca un ruolo chiave nell' influenza della meccanica della deformazione.
  La temperatura a cui avviene il processo gioca un ruolo chiave nell'influenza della meccanica della deformazione.
  In letteratura sono presenti studi condotti sul Titanio, i quali affermano che:

  - è impossibile stampare il Ti64 a temperatura ambiente in quanto le tensioni necessarie per deformarlo plasticamente sarebbero molto elevate. Ciò influenzerebbe la deformazione ottenibile.
    Normalmente il Ti64 viene formato a 790°C ma comunque sotto gli 815°C. In questo modo si migliora la duttilità e la formabilità, e si evita il deterioramento del maeriale che si verifichebbe a temperature eccessivamente alte.

  - si ottengono discreti risultati sul Titanio grado2 formato a tiepido (circa 300°). Rispetto ad uno stampaggio a freddo, la formatura a tiepido richiede una

minore forza di deformazione e un minor serraggio del premilamiera. Ciò permettere di evitare la riduzione eccessiva dello spessore soprattutto in corrispondenza delle zone critiche, e consente una definizione finale del pezzo migliore.

La formatura a tiepido è efficace solo se è richiesta una deformazione piccola: le prove di trazione a caldo, riportate in letteratura, evidenziano che fino ai 550°C non si verifica un aumento della formabilità significativo rispetto alla temperatura ambiente. Qualora si volessero ottenere deformazioni significative, si dovrebbe formare la lamiera al di sopra dei 600°C.

La formatura a caldo permette inoltre di limitare il ritorno elastico (l'effetto Bauschinger).

- *il materiale della lamiera*

  L'anisotropia del materiale influenza il risultato finale della lavorazione.

  In letteratura si trovano alcuni studi sul Ti-CP riguardanti il modo in cui la temperatura e l'anisotropia influenzano l'ISF e come entrambi i fattori interagiscono tra loro.

  Orozco e Caballero hanno dimostrato che all'aumentare della temperatura aumenta anche l'anisotropia e ciò significa che la precisione geometrica del pezzo potrebbe diminuire nel caso in cui la temperatura fosse alta.

  Recentemente sono stati condotti degli studi sul comportamento meccanico e la formabilità di alcuni materiali quali alluminio, magnesio, rame, titanio e polimeri.

  Ciò che risulta da questi studi è che le leghe di alluminio sono quelle con migliore formabilità. Infatti, per questo tipo di processo, le tre leghe di alluminio più utilizzate sono AA1050-O, AA5252-H22, AA3003-O. Solo per la lega 3003-O sono state ricavate le forze necessarie per la lavorazione.

  Per quanto riguarda il magnesio, è noto che quest'ultimo sia un materiale molto fragile. Per cui è necessario prevedere delle operazioni di formatura a caldo al fine di evitarne la rottura.

  I polimeri invece hanno struttura e proprietà termiche tali da garantire una buona formabilità. Ciò li rende il materiale più adatto al processo ISF. Purtroppo sono poche le ricerche pubblicate ed esse riportano che le prove SPIF condotte su PVC sono state portate a termine con successo.

  Sul rame sono state condotte delle prove sperimentali sul rame C101 che presenta una buona duttilità allo stato ricotto.

  Infine,il titanio risulta essere il materiale meno studiato. Le poche prove eseguite fino ad oggi unite alle buone caratteristiche meccaniche, rendono il titanio un materiale particolarmente interessante per un lavoro di ricerca sul processo ISF.

Sono stati eseguiti diversi studi allo scopo di prevedere il grado di formabilità per le lamiere e allo stesso tempo per definire i parametri di lavoro per disegnare il diagramma limite di formatura.

- *lo spessore della lamiera*

  In letteratura sono presenti vari studi circa lo spessore minimo che dovrebbe avere la lamiera e la formabilità del materiale. Si trova che lo spessore non deve essere troppo sottile al fine di garantire un corretto apporto di materiale nella zona della deformazione.

- *Materiale, forma, diametro dell'utensile formatore*

  Il materiale dell'utensile formatore deve essere necessariamente più duro di quello della lamiera da formare. Tuttavia una maggior durezza implica una maggiore fragilità. Per cui, al fine di evitare rotture della testa, è necessario scegliere materiali, come gli acciai bonificati, che associano alla durezza superficiale un buon grado di duttilità. In letteratura si trova che gli utensili formatori sono realizzati in acciaio per utensili, stellite(lega cobalto-cromo) o plastica.

  In genere, gli strumenti rotanti vengono utilizzati con fresatrici, mentre altre macchine utilizzano utensili rigidi che non ruotano.

  Questo uso di strumenti non rotanti hanno effetti considerevoli sulle condizioni di attrito tanto da richiedere un olio lubrificante a freddo, da distribuire sulla superficie del foglio, per ridurre l'attrito.

  L'utensile formatore presenta un gambo cilindro e una testa di solito semisferica. Il raggio della testa ha notevoli effetti sul processo. Influisce sulla formabilità e qualità della superficie, e sul ritorno elastico.

  Per quanto riguarda la formabilità del pezzo: se i raggi sono piccoli allora la superficie di contatto risulta ridotta e quindi risulta minore la zona di deformazione. Per cui è possibile applicare pressioni più elevate favorendo una maggiore formabilità del pezzo. Ovviamente,raggi molto piccoli si ripercuotono sulla rigidezza e stabilità dell'utensile durante la lavorazione.

  Al contrario, se i raggi sono grandi saranno maggiori i punti di contatto e di conseguenza le forze in gioco.

  Alcuni studi, condotti testando diversi diametri dell'utensile formatore, hanno portato ad affermare che all'aumentare della dimensione dell'utensile, la zona di contatto e di deformazione aumenta e lo stato della deformazione diminuisce. Sostanzialmente aumenta la profondità di imbutitura. Se la parte contiene superfici con raggi piccoli, è consigliabile utilizzare uno strumento di formatura con raggio corrispondente.

- *Rotazione del mandrino*

  Maggiore è la velocità di rotazione del mandrino e più aumenta il riscaldamento per attrito localizzato del materiale e meglio si riesce a deformare la lamiera.

- *velocità di avanzamento*

  Gli studi condotti sull'argomento riportano che l'avanzamento verticale lungo l'asse zeta influenza in particolare la finitura superficiale, in particolare la rugosità del pezzo ma non la sua lavorabilità. All'aumentare della velocità di avanzamento c'è una riduzione dell'accuratezza superficiale.

Esistono studi che invece affermano che se aumenta l'incremento in zeta allora diminuisce la formabilità del materiale.
Il ricercatore M. Ham ha dimostrato che l'aumento del passo incrementale zeta non influisce significativamente sulla formabilità del materiale ma anzi, piccoli passi incrementali aumentano soltanto il tempo di lavorazione.

- *Percorso utensile*

  Essendo la tecnologia ISF relativamente recente, non esistono ancora dei software dedicati per l'incrementalsheetforming. Per cui è difficile simulare correttamente il processo.
  Data la natura incrementale del processo, una volta impostato il passo di avanzamento lungo l'asse zeta, si potrebbe scegliere tra un percorso elicoidale e un percorso bidirezionale o unidirezionale come mostrato in figura 2.10.
  La generazione del percorso utensile influenza le forze di formatura ma ha anche un impatto diretto sull'accuratezza dimensionale, la finitura superficiale, la formabilità, la variazione di spessore e il tempo di lavorazione.
  Il percorso utensile elicoidale garantisce una distribuzione delle tensioni più uniforme rispetto al percorso convenzionale bidirezionale e ha anche il vantaggio di non lasciare evidenti segni della lavorazione.

  In letteratura sono riportati studi e modelli analitici su tale argomento.
  Matthieu Raucha, ha proposto nuovo approccio per generare e controllare percorsi utensili programmati (Intelligent CAM). Lo scopo principale di questo concetto innovativo è quello di utilizzare i vincoli di processo per la programmazione e il controllo del percorso utensile, in base alla valutazione dei dati in tempo reale. Ad oggi, studi di validazione e implementazione industriale sono stati presentati per valutare l'efficienza di tale approccio proposto.
  R. Malhotra [09] ha attribuito l'assottigliamento del pezzo ai movimenti rigidi dei corpi durante il processo di formatura ed ha sviluppato delle formulazioni analitiche che tengono conto di suddetti movimenti rigidi durante ogni passaggio. Sulla base di questo modello, è stata successivamente proposta una combinazione di percorsi utensile.
  Rajiv Malhotra ha riportato nel suo libro "*Accumulative Double Sided Incremental Forming (ADSIF)*" una strategia volta a migliorare notevolmente la precisione geometrica, aumentare la formabilità,formare componenti con lo spessore desiderato e creare componenti complessi. La procedura prevedere di iniziare la formatura dalla parte più profonda e poi gradualmente formare il pezzo. In tal modo le forze dominanti si trovano nel piano del foglio di lamiera, con conseguente miglioramento significativo della geometria.

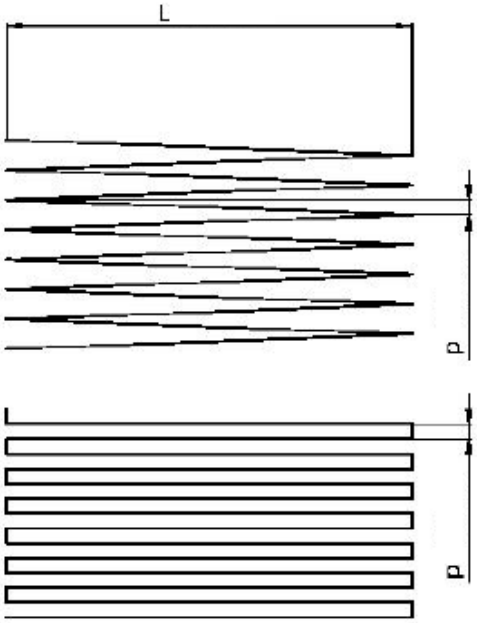


Figura 2.10 : Percorso elicoidale e percorso bidirezionale.

- *Le condizioni di serraggio*

  La formabilità della lamiera risulta essere fortemente influenzata dalle condizioni di serraggio della lamiera. Quindi esiste una forte correlazione tra la lavorabilità e la possibilità di scorrimento della lamiera durante la lavorazione. E' necessario garantire un apporto continuo di materiale affinché sia scongiurata la rottura del pezzo ed è importante scegliere correttamente la coppia di serraggio.

- *Controllo del programma CNC*

- *Forza applicata*

  La scelta dei parametri di formatura è intensamente correlata alla forza applicata.
  Sono pochi gli studi riguardanti le forze necessarie per la formatura della lamiera mediante incrementalsheetforming, per cui sono poche le informazioni al riguardo.
  Ciò rende tale parametro particolarmente interessante per un lavoro di ricerca.

- *Temperatura di lavoro*

  Sulla base di alcuni studi sulla formabilità è possibile affermare che le alte temperature portano ad un aumento della sollecitazione massima, specialmente se la velocità dell'utensile diminuisce.
  Inoltre, si verifica un maggiore sviluppo di calore al crescere della velocità di rotazione del mandrino in quanto aumenta il movimento relativo tra punzone e lamiera.

- *Lubrificante adottato*

  Durante la lavorazione, l'utensile e la lamiera sono a contatto e sull'interfaccia si sviluppa dell'attrito.

  Gli studi condotti sull'argomento riportano che se l'attrito è elevato la lamiera può incorrere più facilmente in rotture, ma un po' di attrito migliora la formabilità. Infatti, l'attrito aumenta con la zona di contatto dell'utensile, di conseguenza si riduce lo stato tensionale della lamiera e l'eventualità di rotture diminuisce.

  E' necessario adottare un corretto lubrificante ed un opportuno metodo di lubrificazione per ottenere il giusto valore del coefficiente di attrito.

  Il lubrificante adottato influenza la finitura della superficie della lamiera e lo stato di tensione durante l'intero processo di formatura. Infatti, a causa della grave deformazione applicata, il processo tende ad indurre elevate tensioni residue nei componenti che combinato potrebbe influire sulla durata dei componenti.

  Oltre ad influenzare l'attrito , il lubrificante deve essere scelto per consentire il corretto raffreddamento dell'utensile. Infatti l'utensile ruotando ad alta velocità raggiunge elevate temperature.

  Un'altra funzione del lubrificante è quella di ritardare l'usura dell'utensile.

  Sono stati condotti degli studi sulle prestazioni che gli oli di girasole e mais, aggiunti con 0,0125, 0,025, 0,05 e 0,1% in peso di nanoparticelle SiO2, hanno quando questi vengono utilizzati come lubrificanti durante il processo SPIF (Single Point Incremental Sheet Forming) di 6061 leghe di alluminio. I risultati sperimentali hanno mostrato una significativa riduzione dell'usura superficiale quando lo 0,025% in peso di nanoparticelle SiO2 è stato aggiunto negli oli vegetali.

2.7 - Meccanica della deformazione

Rispetto ai convenzionali processi di profondo stampaggio, l' Incrementalsheetforming è un processo che permette di ottenere una buona deformabilità al di sopra della curva limite di formabilità.

La meccanica del processo ISF è fortemente influenzata dal fatto che la zona di deformazione plastica è localizzata intorno all'area di contatto tra utensile e pezzo, e varia nel tempo con l'avanzare dell'utensile formatore sul pezzo.

Per questi motivi essa risulta complessa e continua a essere oggetto di studio e ricerca in quanto alcuni argomenti non sono stati ancora ben compresi.

La letteratura riporta prove e analisi sperimentali che mostrano come la formabilità del materiale nel processo ISF sia fortemente influenzata dal diametro dell'utensile, dalla sua velocità di avanzamento e rotazione del mandrino,e dallo spessore della lamiera.

La velocità influisce sulla formabilità a causa dell'attrito che si genera tra utensile e superficie del foglio.
Il diametro della testa influenza la deformazione in relazione all'area di contattato in cui si concentra lo sforzo: se i raggi sono piccoli la superficie di contatto risulta ridotta e quindi risulta minore la zona di deformazione. Per cui è possibile applicare pressioni più elevate favorendo una maggiore deformazione del pezzo. Ovviamente,raggi molto piccoli si ripercuotono sulla rigidezza e stabilità dell'utensile durante la lavorazione.
Al contrario, se i raggi sono grandi saranno maggiori i punti di contatto e di conseguenza le forze in gioco.
Alcuni studi, condotti testando diversi diametri dell'utensile formatore, hanno portato ad affermare che all'aumentare della dimensione dell'utensile, la zona di contatto aumenta e aumenta la profondità di imbutitura. Se il pezzo contiene superfici con raggi piccoli, è consigliabile utilizzare uno strumento di formatura con raggio corrispondente.

In letteratura è riportata l'analisi membranale relativa al processo SPIF.
M.B.Silva e P.A.F. Martins hanno presentato in "*Single point incremental forming of metal sheets"* un modello teorico di analisi delle sollecitazioni e la sua verifica sperimentale, che verrà descritto di seguito.
Il documento presenta un nuovo modello teorico per i diversi modi di deformazione comunemente presenti in SPIF. Il modello è basato sull'analisi della membrana e sulla rottura duttile e si basa sulle osservazioni sperimentali che la frattura non è preceduta da necking localizzato e la fessura si propaga sotto sollecitazioni tensionali meridionali .
Nei tradizionali processi di formatura il pezzo è formato in un'unica operazione attraverso uno stampo opportunamente sagomato e un punzone. Nel processo SPIF , invece, il pezzo è formato in modo incrementale attraverso passaggi multipli .
La figura 2.11mostra i parametri di processo che intervengono nella deformazione: raggio dell'utensile, spessore della lamiera, angolo del disegno ψ e dimensione del gradino verso il basso per giro. Nelle operazioni a più stadi, anche la direzione di formatura nelle fasi successive di formatura (verso l'interno o verso l'esterno o verso il basso) gioca un ruolo importante

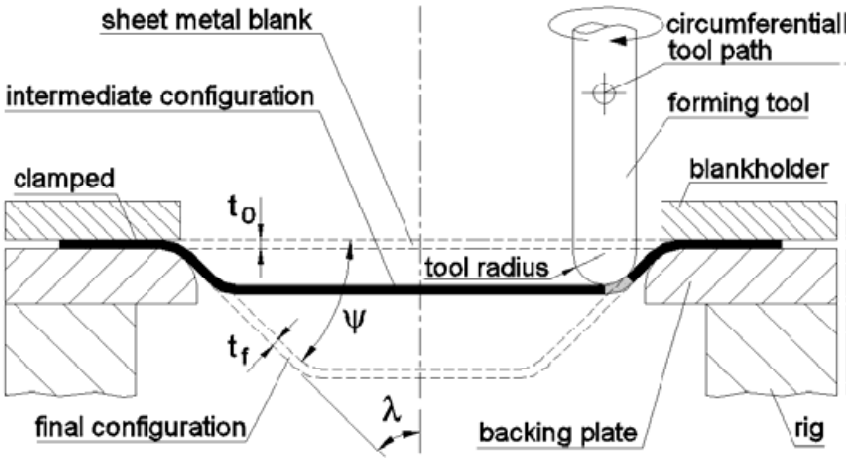


Figura 2.11 :Rappresentazione schematica in SPIF.

La figura 2.12 mostra il diagramma di formatura limite per acciaio al carbonio dolce da 1 mm. M.B.Silva e P.A.F. Martins hanno dimostrato che la deformazione in SPIF è molto maggiore rispetto alla formatura tradizionale di fogli e aumenta con la diminuzione del raggio dell'utensile. I limiti di formatura ottenuti in SPIF con utensili di diametro variabile tra i 6 e i 30 mm sono riportati nello stesso diagramma di figura 2.12.

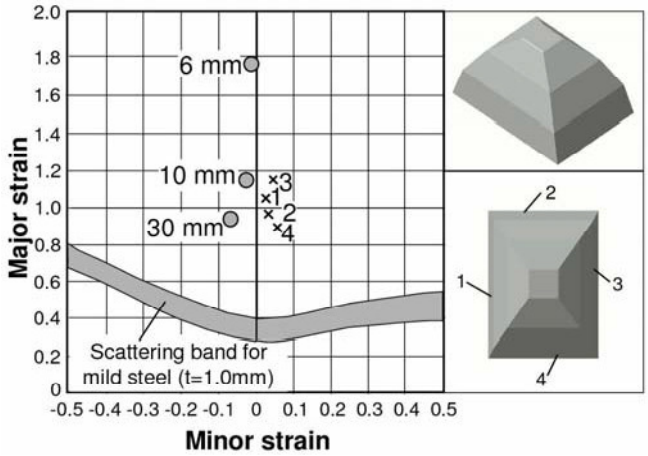


Figura 2.12: Diagramma di formatura limite per acciaio al carbonio dolce da 1 mm.

La figura 2.13 mostra un'immagine schematica dell'utensile di formatura che agisce sul foglio metallico durante SPIF. Il modello proposto ne studia la distribuzione delle tensioni nelle piccole zone plastiche localizzate (A, B e C), che sono le tre zone di deformazione tipiche in SPIF.

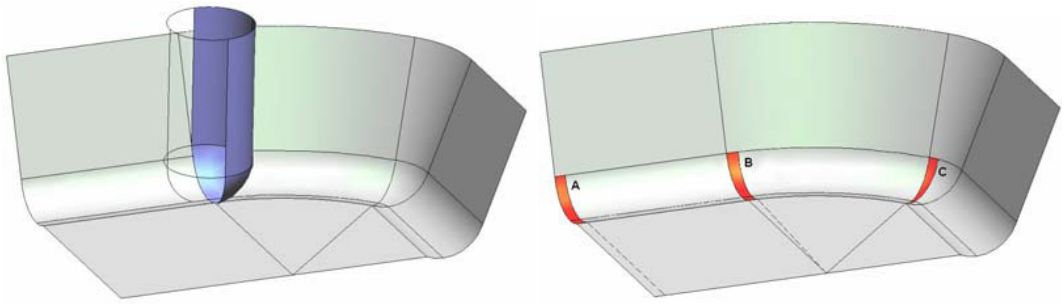


Figura 2.13: Rappresentazione schematica della deformazione istantanea.

Il metallo è sottoposto a forze membranali, in modo conforme alla forma semisferica della testa dell'utensile.
In figura 2.14 è illustrato la deformazione del pezzo limitatamente al guscio.

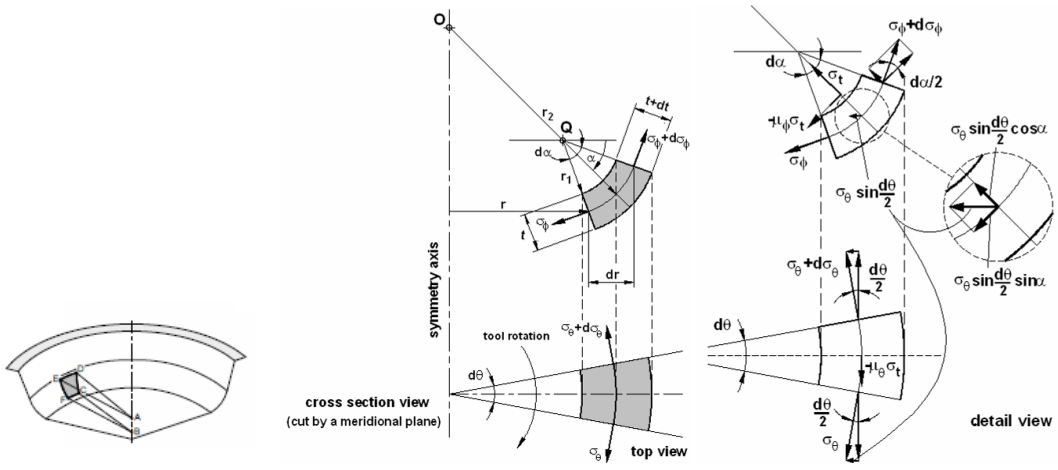


Figura 2.14 : Rappresentazione schematica dell'elemento guscio e dettagli che mostrano le sollecitazioni agenti nelle direzioni meridionali, circonferenziali e nello spessore.

Lo stato di deformazione può essere derivato dalle condizioni di equilibrio della membrana facendo le ipotesi che i momenti flettenti vengono trascurati e gli sforzi circonferenziali, meridionali e di spessore sono considerati stress principali. Ulteriori ipotesi semplificative sono: il materiale è considerato perfettamente rigido perfettamente plastico; il materiale è assunto isotropico, cioè non vengono presi in considerazione effetti anisotropici, per cui si assume che la lamiera venga stirata uniformemente sotto l'azione dell'utensile.; si assume che la forza di attrito risultante esercitata sull'interfaccia di contatto della lamiera dell'utensile abbia due componenti nel piano, una in direzione meridionale $\mu_\varphi\sigma_t$ dovuta alla discesa dell'utensile, e una componente circonferenziale $\mu_\theta\sigma_t$ dovuta alla velocità circonferenziale e alla rotazione dell'utensile. Quest'ultima ipotesi che è un modo non tradizionale di modellare l'attrito implica un coefficiente di attrito risultante :

$$\mu = \sqrt{\left(\mu_\theta{}^2\right) + \left(\mu_\varphi{}^2\right)}$$

risolvendo le equazioni di equilibrio lungo lo spessore, le direzioni circonferenziali e meridionali:

$$\sigma_t\, r\, d\theta\, r_1\, d\alpha + \sigma_\phi\, r\, d\theta\, t \sin\frac{d\alpha}{2} + (\sigma_\phi + d\sigma_\phi)(r + dr)\, d\theta\, (t + dt) \sin\frac{d\alpha}{2} +$$
$$\sigma_\theta\, r_1\, d\alpha\, t \sin\frac{d\theta}{2}\cos\alpha + (\sigma_\theta + d\sigma_\theta) r_1\, d\alpha\, t \sin\frac{d\theta}{2}\cos\alpha = 0$$

$$\sigma_\theta\, r_1 d\alpha \left(t + \frac{dt}{2}\right) - \mu_\theta \sigma_t\, r_1 d\alpha \left(r + \frac{dr}{2}\right) d\theta - (\sigma_\theta + d\sigma_\theta) r_1 d\alpha \left(t + \frac{dt}{2}\right) = 0$$

$$(\sigma_\phi + d\sigma_\phi)(r + dr)\, d\theta\, (t + dt) - \sigma_\phi\, r\, d\theta\, t + \mu_\phi\, \sigma_t\, r\, d\theta\, r_1\, d\alpha - \sigma_\theta \frac{d\theta}{2} r_1\, d\alpha\, t \sin\alpha -$$
$$(\sigma_\theta + d\sigma_\theta)\frac{d\theta}{2} r_1\, d\alpha\, t \sin\alpha = 0$$

trascurando i termini di ordine superiore, prendendo in considerazione le semplificazioni geometriche, considerando il criterio di Tresca e assumendo che lo SPIF di superfici piane e simmetriche avvenga sotto secondo condizioni di deformazione piana $d\varepsilon_\theta = 0$.

La tabella 2.15 riassume gli sforzi e le deformazioni lungo le direzioni principali .

	State of strain	**State of stress**	**Hydrostatic stress**
SPIF (plane strain conditions) (A), (B)	$d\varepsilon_\phi = -d\varepsilon_t > 0$ $d\varepsilon_\theta = 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\phi = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y}{(1 + t/r_{tool})} > 0$ $\sigma_\theta = \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ $\sigma_t = \sigma_3 = -\sigma_Y \frac{t}{(r_{tool} + t)} < 0$	$\sigma_m = \frac{\sigma_Y}{2}\left[\frac{r_{tool} - t}{r_{tool} + t}\right]$
SPIF (equal bi-axial stretching) (C)	$d\varepsilon_\phi = d\varepsilon_\theta > 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y}{(1 + 2t/r_{tool})} > 0$ $\sigma_t = \sigma_3 = -2\sigma_Y \frac{t}{(r_{tool} + 2t)} < 0$	$\sigma_m = \frac{2\sigma_Y}{3}\left[\frac{r_{tool} - t}{r_{tool} + 2t}\right]$
Conventional Stamping (equal bi-axial stretching)	$d\varepsilon_\phi = d\varepsilon_\theta > 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y}{(1 + t/r_{punch})} > 0$ $\sigma_t = \sigma_3 = -\sigma_Y \frac{t}{(r_{punch} + t)} < 0$	$\sigma_m = \frac{2\sigma_Y}{3}\left[\frac{r_{punch} - t/2}{r_{punch} + t}\right]$

Tabella 2.15: Sollecitazioni in SPIF e stampaggio convenzionale.

Sebbene l'attrito abbia influenza sugli sforzi, questo non appare nel tabella, poiché si può dimostrare che l'effetto è minore se è garantita una buona lubrificazione (μ <0,1).

K. Jackson e Allwood , in " The mechanics of incrementalsheetforming" hanno esaminato sperimentalmente il meccanismo di ISF applicato a fogli di rame appositamente preparati e successivamente hanno misurato le distribuzioni delle sforzo per due configurazioni di ISF: formatura incrementale a due punti (TPIF) e formatura incrementale a punto singolo (SPIF).
Le prove mostrano che i meccanismi di deformazione di entrambi SPIF e TPIF sono l'allungamento e il taglio nel piano perpendicolare alla direzione dell'utensile e il taglio nel piano parallelo alla direzione dell'utensile. La componente significativa della deformazione è la componente di taglio parallela alla direzione dell'utensile.

Una problematica che si riscontra quando il pezzo è finito è la variazione di spessore rispetto a quello iniziale. La letteratura spiega l'influenza dello spessore del foglio e la profondità di lavorazione attraverso la legge del seno. Tale legge si basa sul presupposto che la deformazione è una proiezione del foglio non deformato sulla superficie della parte finale.
Le leggi sinusoidali consentono di esprimere lo spessore effettivo del foglio t_1 in funzione dello spessore iniziale del foglio t_0 e in funzione dell'angolo della parete α:

$$t_1 = t_0 \ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$$

Per superfici non piane, risulta più facile calcolare la variazione di spessore in funzione del rapporto tra l' area dello stato indeformato e deformato. Questo porta alla semplice equazione:

$$t_1 = t_0 \ \frac{A_0}{A}$$

per un elemento di superficie (figura 2.16).
La legge sinusoidale indica che l'assottigliamento del foglio aumenta rapidamente quando l'inclinazione della superficie aumenta (figura 2.16) : se l'angolo di inclinazione è di 60 °, lo spessore della lamiera dopo la formatura sarà la metà del valore iniziale; se l'angolo di inclinazione aumenta, si verifica una strizione e addirittura se l'angolo va oltre i 60-65 ° il foglio si romperà.
Pertanto, la riduzione dello spessore dei fogli limita la gamma di possibili angoli di inclinazione a circa 60 - 65 ° e ciò vincola il potenziale ambito di forme e applicazioni.

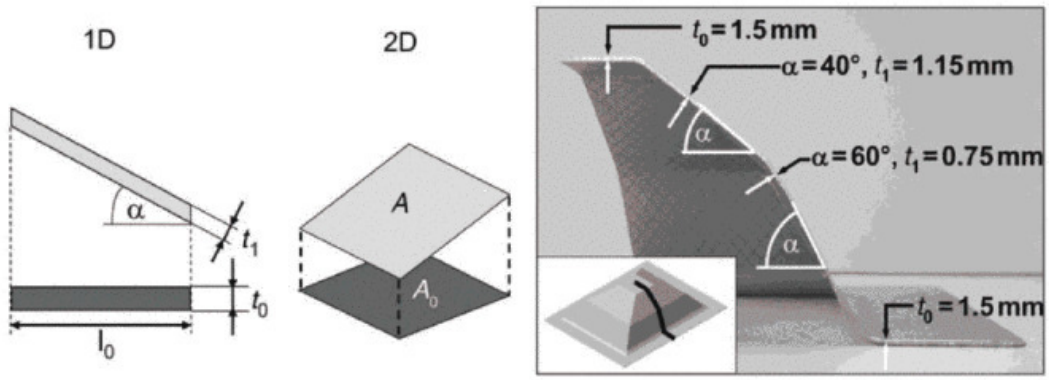


Figura 2.16: Assottigliamento del foglio di lamiera nell'ISF con l'aumentare dell'inclinazione della superficie.

Si potrebbe intervenire sul parametro geometrico "passo incrementale", cercando di identificarne uno adeguato all'inclinazione della parete del pezzo da formare al fine di garantire una distanza dalla superficie metallica costante. Questo risulta più difficile quando le geometrie contengono inclinazioni diverse e in posizioni diverse.

Queste problematiche hanno motivato le strategie di formazione verso un processo multistadio e ibrido.

Capitolo 3

3.1 - Lo stato dell'arte della macchina

A livello mondiale sono ancora pochissimi i costruttori di macchine per la formatura incrementale. Attualmente sono soltanto due quelle maggiormente sviluppate e usate.
Una è quella costruita e commercializzata dalla società giapponese "AMINO CORPORATION" e l'altra sviluppata nel centro IFUM (Institute for metal forming and metal forming machine tools) all'Università di Hannover in Germania.

3.2 La macchina di Amino Corporation

Technology to make imagination tangible
Amino Corporation

Nella macchina di Amino Corporation, il foglio di lamiera viene fissato sul tavolo di lavoro (work holder) e bloccato dal premilamiera (clampplate). La base del tavolo viene movimentata nelle direzioni degli assi X e Y. La parte da realizzare viene spinta verso l'alto, nella direzione Z, attraverso cilindri idraulici e un sistema di guide.
Il sistema di guida che , oltre ad accompagnare il movimento, fa anche da supporto per la struttura viene progettato più o meno in modo complesso in relazione alla complessità della forma da realizzare. Ciò significa che l'utensile non è dotato di un movimento verticale ma può muoversi solo nel piano. L'utensile formatore (forming tool) è dotato di movimenti piccoli e precisi.
Una schematizzazione del funzionamento della macchina è riportato in figura 3.1.

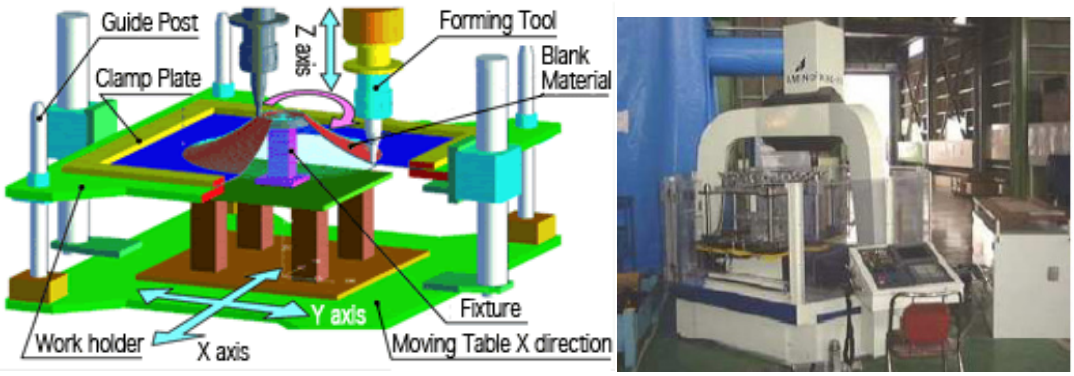


Figura 3.1 :La macchina di Amino Corporation.

In figura 3.2 viene evidenziato il principio di funzionamento della macchina“AMINO”: si nota che la parte da realizzare viene praticamente spinta verso l’alto da un pistone posto al di sotto della lamiera.
Con questa macchina si realizzano formature positive ed è come se la geometria realizzata subisse un'estrusione verso l’alto.

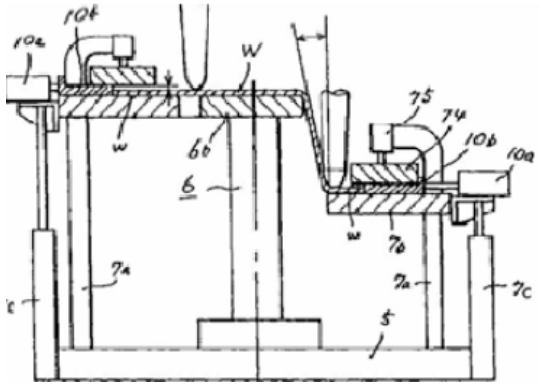


Figura 3.2: Principio di funzionamento della macchina di Amino Corporation.

3.3 - La macchina dell'IFUM

L'Institute for metal forming and metal forming machine tools (Università di Hannover) in Germania punta allo sviluppo di metodi di formatura della lamiera innovativi e flessibili.

La lavorazione della lamiera avviene in modo differente.
L'utensile formatore ha soltanto il movimento verticale lungo l'asse Z, mentre è tutto il sistema formato da lamiera, premilamiera e stampo ad avere una movimentazione orizzontale nel piano X-Y.
La macchina utilizza dei sistemi meccatronici, come mostrato in figura 3.3.

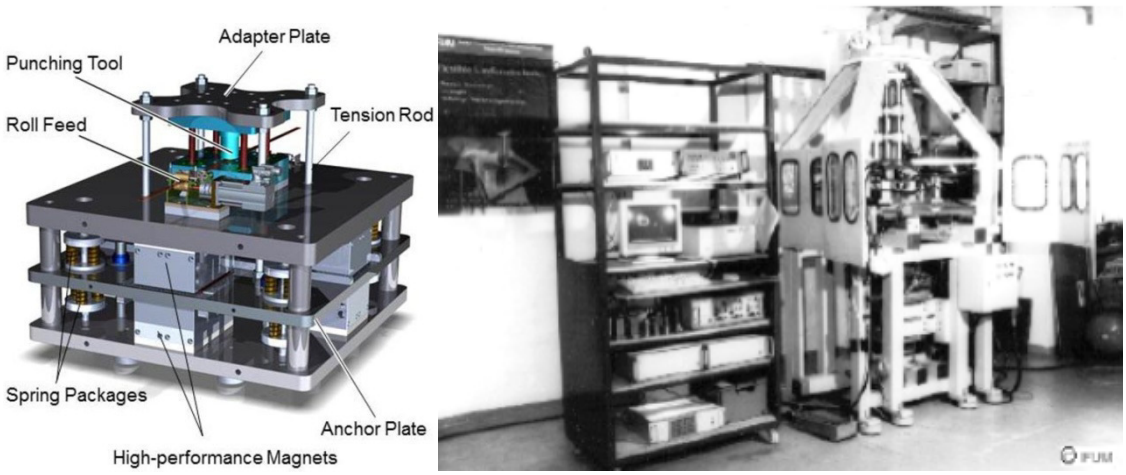


Figura 3.3 :La macchina dell'Ifum.

La macchina dell'Ifum realizza formature negative. Nella figura 3.4 è schematizzato il principio di funzionamento della macchina dell'IFUM.

.

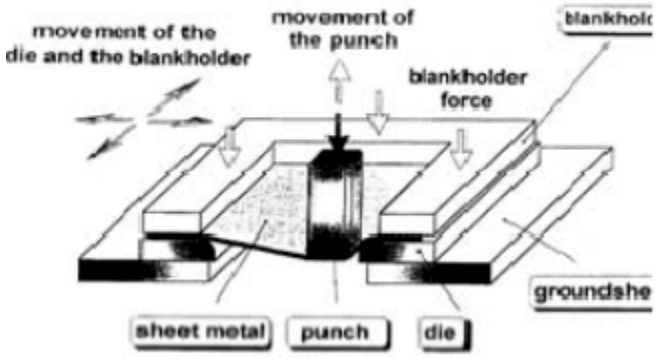


Figura 3.4 : Principio di funzionamento della macchina dell'IFUM.

Le due macchine utilizzano quindi due metodi differenti di formatura che comportano stati deformativi molto diversi tra loro. In particolare, la formabilità del metallo in questione è alta quando la deformazione è piana.
Con il metodo della formatura negativa, a causa di un modo di deformazione biassiale, è più difficile realizzare angoli e lati oltre certi limiti, in quanto facilmente si verificano delle rotture.
Con il metodo della formatura positiva, invece, è possibile realizzare forme con angoli abbastanza severi, in quanto il meccanismo di deformazione dominante è quello piano.
Nel metodo della formatura positiva, la colonna di supporto, appositamente

progettata, dipende dalla complessità della forma da realizzare.

Esiste una versione più complessa di tale macchina (figura 3.5) in cui lo stampo non è statico ma è mobile cioè è capace di muoversi su traiettorie parallele e ortogonali alla lamiera e di ruotare per permettere la formatura di parti dotate di una certa angolatura, risolvendo almeno in parte la problematica relativa all'assottigliamento del foglio di lamiera con l'aumentare dell'inclinazione.

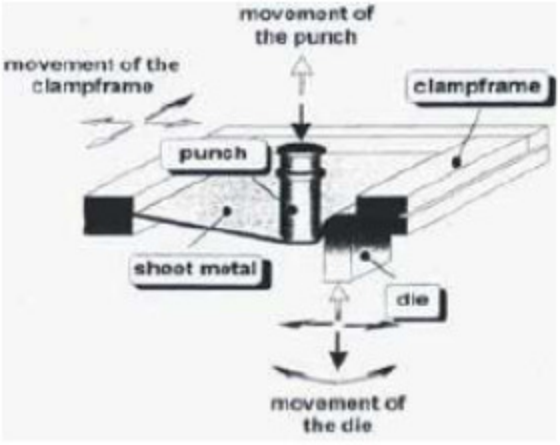


Figura 3.5:Versione più complessa della macchina in cui lo stampo non è statico ma è mobile.

3.4 - Roboforming

Il Roboforming fornisce un metodo abbastanza interessante per la prototipazione industriale e la produzione di piccole quantità di lotti.
Il principio del Roboforming si basa su una"formatura flessibile" mediante movimenti sincroni, liberamente programmabili,di due robot industriali a 6 assi.
La figura 3.6 mostra la configurazione della macchina, che consiste in due robot KUKA KR360 e un telaio con un supporto per il bianco.

Figura 3.6: Robot KUKA KR360 e telaio con un supporto.

La forma finale del pezzo è realizzata attraverso un movimento incrementale verso l'interno in direzione di profondità effettuato dall' utensile montato su uno dei due robot , ed un movimento lungo il contorno in direzione laterale effettuato da uno strumento di supporto montato sull'altro robot.
Il percorso può essere bidirezionale per strati paralleli o elicoidale.
Lo strumento di supporto ha una geometria semplice in quanto ha il solo obiettivo di tenere il foglio sul retro muovendosi lungo il contorno esterno, in modo sincrono al movimento dell'utensile.
E' possibile realizzare non solo superfici aventi forma libera, ma è anche possibile realizzare sottosquadri e ciò grazie alla movimentazione a 6 assi dei Robot utilizzati.
Tuttavia, fino ad ora le geometrie risultanti mostrano deviazioni significative rispetto alle geometrie pianificate a cause del ritorno elastico del materiale deformato.
Anche per il Roboforming, i parametri del processo influenzano il risultato finale. A seconda del materiale e della geometria che si vuole realizzare, i parametri come l'avanzamento, la velocità di formatura o il percorso dell'utensile incidono in modo particolare sulla precisione del pezzo.
Alcuni problematiche principali sono l'angolo di inclinazione massimo limitato, una qualità superficiale comunemente ridotta delle aree deformate e la bassa precisione geometrica nelle superfici concave.
H. Meier ha verificato che i problemi indicati possono essere migliorati in base alla forza applicata e alla posizione relativa tra lo strumento di supporto e l'utensile.

3.5 - La macchina ISF movimentata da CNC

Negli anni più recenti sono state presentate alcune applicazioni di formatura incrementale condotte su macchine fresatrici a controllo numerico. Queste applicazioni, inizialmente proposte in Giappone, hanno trovato rapido riscontro in Europa e negli Stati Uniti, e lasciano intravedere promettenti sviluppi soprattutto nel settore della prototipazione rapida.
Il foglio di lamiera è posizionato sulla tavola porta-pezzo della fresatrice ed incastrato lungo tutto il perimetro; in luogo della fresa, sul mandrino viene fissato un utensile a testa semisferica di piccolo diametro. La traiettoria del punzone è comandata tramite controllo numerico e permette di imprimere sulla lamiera la deformazione necessaria per ottenere il desiderato prodotto finale.
E’ evidente che il moto relativo nasce dalla composizione degli spostamenti,ed eventualmente delle rotazioni, del punzone lungo gli assi controllati della macchina utensile.
La figura 3.7riporta una caratteristica applicazione di incremetal sheet forming su una fresatrice dotata di tre assi controllati.

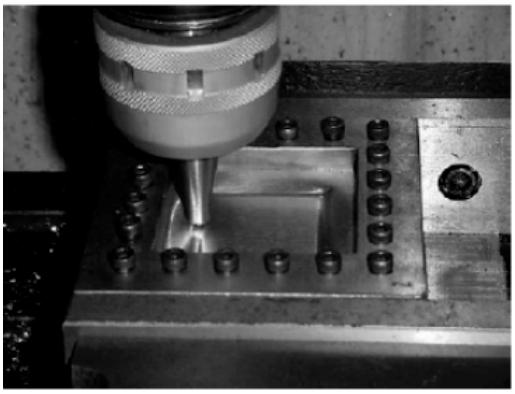


Figura 3.7: Incremental sheet forming su una fresatrice dotata di tre assi controllati.

In questo caso il moto relativo utensile-lamiera deriva dalla composizione delle traslazioni lungo i tre assi controllati (X ed Y sul piano della lamiera, Z in direzione perpendicolare ad esso) e dovrà essere tale da provocare la deformazione necessaria per ottenere la geometria voluta sul pezzo.

Capitolo 4

4.1 - La macchina preliminare

Come accennato, *Rgtech* aveva cercato di riprodurre una macchina in grado di formare i fogli di lamiera al fine di studiare il comportamento dei materiali ad alta tenacità.
Per cui, per ottenere buoni risultati deformativi, l'azienda aveva riprodotto una formatura positiva del tipo TPIFFD (two point incremental forming with full die) in cui l'utensile formatore lavorava sulla parte convessa della superficie della lamiera.
Infatti, la formatura positiva produce uno stato deformativo piano e quindi una maggiore deformazione del foglio di lamiera con la possibilità di realizzare angoli e lati severi.

La strumentazione era rudimentale e il funzionamento della macchina era semplice ed economico.

La figura 4.1 raffigura un'immagine della macchina preliminare.

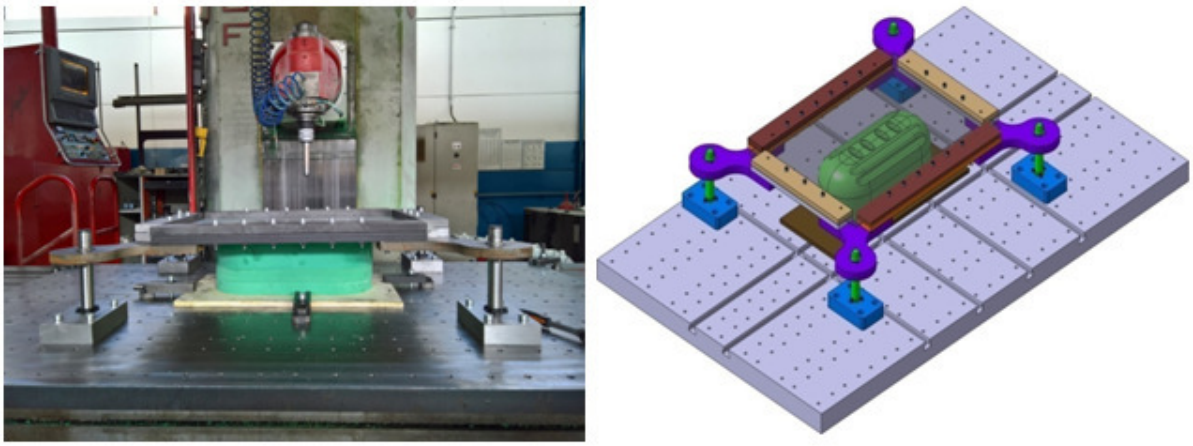


Figura 4.1: La macchina preliminare.

Gli elementi principali del macchinario sono i seguenti:

- *la base*: avente dimensioni maggiori rispetto a quelle del punzone. Inoltre sulla base sono stati ricavati dei fori equidistanziati a due a due attraverso cui è possibile modificare la posizione dei montanti di base e di conseguenza determinare la posizione del premilamiera e la sua dimensione.

- *il premilamiera*: è parte fondamentale del macchinario perché oltre a trattenere la lamiera al proprio interno, deve garantirne il corretto tensionamento in quanto deve consentire e guidare la discesa durante la lavorazione.
  E' costituito da otto barre, di cui quattro superiori e quattro inferiori, tenute insieme attraverso un sistema di viti, dadi e molle a tazza. Tra le quattro barre superiori e le quattro inferiori viene inserita la lamiera metallica. Il premilamiera è stato progettato in modo tale da poter essere modulato. In tal modo è possibile formare anche pezzi di dimensioni più piccole sostituendo le otto barre con altrettante barre di dimensioni minori, aventi geometria a coda di rondine.

- *la lamiera metallica* : presenta un sistema ad asole al fine di garantire un buon serraggio del premilamiera e un miglior controllo sul comportamento della lastra metallica durante la lavorazione.

- *il punzone in resina*: che rappresentava l'intera geometria del pezzo da formare. Ha la funzione di fare da supporto durante l'intera lavorazione.
  La forma è ellittica e presenta quattro bugne laterali e quattro bugne sulla faccia superiore. Le pareti laterali sono verticali.

- *la macchina a controllo numerico CNC*: che movimenta l'utensile definendone la traiettoria.

- *l'utensile formatore*: presenta un gambo cilindrico e una testa semisferica avente diametro 20mm. La verticalità delle pareti e i raccordi delle bugne del pezzo da realizzare hanno influenzato la scelta dell'utensile formatore, esiste infatti l'esigenza di ridurre al gli attriti nel contatto utensile-lamiera e quindi occorre lavorare con una zona di contatto che presenta a sua volta dei raccordi.

A questi elementi si devono aggiungere quattro montanti inferiori e altrettanti superiori che fanno da supporto alla struttura.

Per quanto riguarda il funzionamento,la lamiera era bloccata nel premilamiera; l'utensile era movimentato attraverso una fresa a controllo numerico , pertanto era dotato dei tre movimenti lungo gli assi controllati : scendeva verticalmente lungo l'asse Z ma era anche movimento lungo gli assi X e Y nel piano.
La lamiera e il premilamiera venivano movimentati in Z manualmente,nello stesso verso dell'utensile, in quanto l'azienda non aveva ancora previsto la tecnologia di movimentazione.
La movimentazione manuale era stata agevolata dal sistema di boccole e colonne e dal fatto che sia la forza imposta dall'utensile formatore e sia il peso del premilamiera erano diretti nel verso di discesa della struttura.

Movimentare la struttura in questo modo rudimentale non garantiva una buona precisione, in quanto era difficile assicurare un identico passo di discesa su tutti e quattro i lati del telaio,e inoltre innescava tensionamenti inopportuni sulla lamiera.
Per questi motivi, l'azienda si è posta come obiettivo successivo la progettazione di un innovativo banco di prova e la sua automatizzazione.

4.2 - La macchina

Al fine di realizzare un banco di prova innovativo si è tenuto conto, per ragioni economiche, della struttura originaria, di cosa potesse ancora essere mantenuto per il corretto funzionamento e di cosa invece dovesse essere aggiunto per renderla automatizzata.

Come ampiamente descritto nel paragrafo precedente, poiché la macchina preliminare non era dotata di un sistema automatico, la movimentazione del premilamiera veniva effettuata manualmente. Il sistema di boccole e colonne ne facilitava la discesa. Tale sistema basato sull'accoppiamento di boccole - colonne non riusciva a garantire una discesa costante e perfettamente sincronizzata con l'utensile.
L'obiettivo della tesi è stato quello di individuare il sistema di movimentazione idoneo e continuo.
L'utensile deforma la lamiera muovendosi nel piano X-Y e scendendo lungo Z.
Nel contempo il premilamiera, grazie al sistema di movimentazione scelto, scende lungo Z dello stesso passo.
Poiché il movimento è continuo migliora la finitura superficiale e si riducono i tensionamenti del materiale.

Il lavoro è stato organizzato in quattro fasi: progettazione, realizzazione e montaggio, gestione e installazione dei sistemi di controllo, prove sui materiali.

In fase di progettazione, è stato concepito il banco nella sua architettura ed è stato studiato in che modo automatizzarla, scegliendo il sistema di controllo più adeguato e gli eventuali componenti ausiliari.

In fase di realizzazione e montaggio è stato concretizzato e assemblato il banco di prova precedentemente progettato.

Nella fase successiva sono stati scelti ed installati i sistemi di controllo, gestendo opportunamente il coordinamento tra le varie componenti del sistema.

Infine, sono state eseguite le prove di formatura sui materiali di interesse.

Capitolo 5

In questo capitolo verrà delineata la progettazione del banco di prova. Verranno presentati e descritti la scelta del sistema di movimentazione della struttura e il suo schema di montaggio, gli elementi ausiliari necessari per il corretto funzionamento ed infine la movimentazione elettrica.

5.1 - Ilsistema di movimentazione

La necessità di dover movimentare automaticamente la struttura, sia nella fase di discesa che in quella di salita, ha determinato l'esigenza di inserire un sistema di movimentazione.
Esistono vari sistemi di movimentazione di strutture e la scelta incide, a seconda della particolare esigenza, sulla produttività.

I mezzi di movimentazione che più si adattano alla necessità dell' applicazione in esame sono gli attuatori e i martinetti meccanici.

Per garantire una simmetria strutturale ed evitare sollecitazioni e impuntamenti eccessivi durante la lavorazione, sono stati previsti 4 dispositivi meccanici disposti simmetricamente alla struttura.

Nel seguito, verrà presentata una breve panoramica delle soluzioni commercialmente disponibili sul mercato industriale.

.

5.2 - Panoramica sugli attuatori

L'*attuatore* è un dispositivo che converte una forma di energia in un'altra agendo sul sistema a seconda delle esigenze del caso.
Esistono varie tipologie di attuatori e possono essere raggruppati in tre grandi macrocategorie: attuatori (elettro)meccanici , attuatori ad energia fluidica e attuatori non convenzionali.
La scelta dell'attuatore va determinata in base alle funzioni che assolvono tali dispositivi.

Gli *attuatori a energia fluidica* comprendono gli attuatori idraulici e gli attuatori pneumatici.
Gli attuatori idraulici sono costituiti da un cilindro cavo al cui interno è inserito un pistone. Fornendo una certa pressione al pistone, esso eserciterà una forza tale da riuscire a spostare un oggetto esterno.
Gli attuatori pneumatici hanno lo stesso principio di funzionamento dei precedenti, ma lavorano con aria compressa e non con liquido in pressione.

La scelta non è ricaduta su questa categoria in quanto avrebbero richiesto un'attenta gestione della pressione nel raggiungimento della quota stabilita, essendo la movimentazione da gestire in modo incrementale e per piccoli passi.
Essi infatti, per poter funzionare necessitano di una pompa che gestisca sia la forza che la precisione dell'attuatore. Tale pompa, azionata da un motore primo (elettrico o endotermico), trasporta il fluido secondo leggi volumetriche generando un flusso di portata e di pressione.
Nelle figure 5.1 e 5.2 viene rappresentato rispettivamente uno schema generale di funzionamento e gli aspetti energetici coinvolti. Questo dimostra quanto siano poco compatti e quanto sia complicato controllare i fenomeni di attrito che si sviluppano.

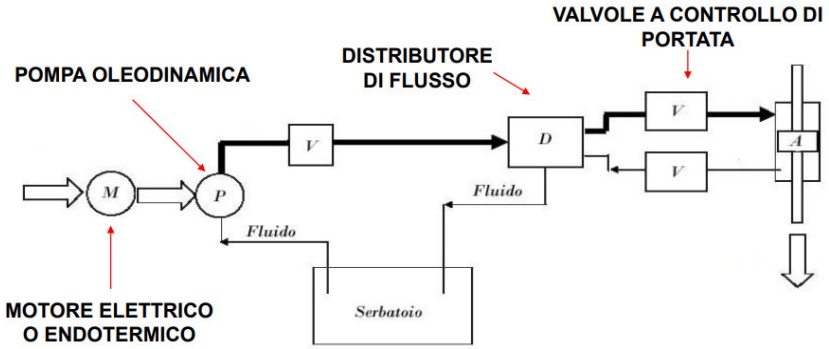


Figura 5.1: Schema generale di funzionamento degli attuatori a energia fluidica.

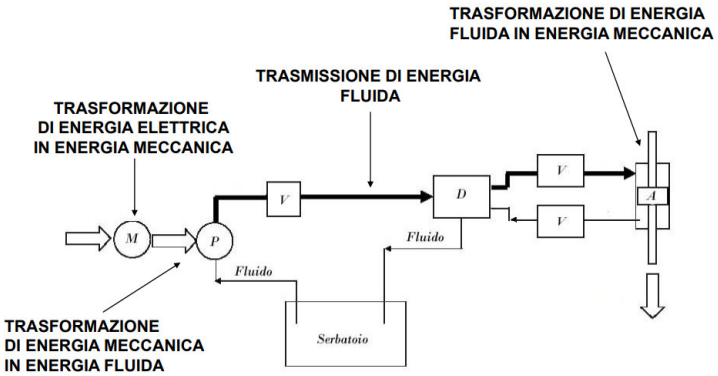


Figura 5.2: Aspetti energetici degli attuatori a energia fluidica.

Gli *attuatori non convenzionali* sono quelli piezoelettrici, magnetostrittivi, elettrochimici, metalli a memoria di forma. Anche questa categoria non è stata presa in considerazione in quanto richiederebbe costi elevati e un funzionamento complesso e poco adatto alla specifica applicazione.

Gli *attuatori meccanici* sono dei dispositivi in grado di tradurre un moto rotativo in lineare. Questo è possibile grazie all'accoppiamento chiocciola-vite: quando la vite ruota, la chiocciola si muove linearmente. Esistono attuatori che presentano, anziché l'accoppiamento chiocciola-vite, un accoppiamento ruota dentata-asse lineare: il principio di funzionamento è lo stesso, quando la ruota gira, l'asse lineare esegue un movimento lineare.

Gli attuatori elettromeccanici sono attuatori meccanici con l'aggiunta di un motore elettrico.
Il motore è collegato alla madrevite su cui scorre una chiocciola.
Si possono utilizzare di motori: motori CC con o senza spazzole, brushless, motori ad induzione o motore passo - passo. La scelta dipende del tipo di applicazione richiesta e dai carichi in gioco. Inoltre, per il controllo dello spostamento e della precisione del movimento si utilizzano in abbinamento gli encoder.
All'attuatore lineare sono associate delle caratteristiche meccaniche (corsa, velocità, forza, precisione e ciclo di vita) che devono essere chiare prima del suo dimensionamento.

La discesa in Z del telaio premilamiera, con passi piccoli e forze in gioco elevate e, la necessità di una movimentazione precisa e sincrona con quella dell'utensile formatore, fanno dell'attuatore elettromeccanico lineare una valida alternativa.

5.3 - L'attuatore elettromeccanico lineare

L'attuatore lineare elettrico è un cilindro elettromeccanico motorizzato che serve a trasformare il moto rotatorio di un motore elettrico in un moto lineare.
Il principio di funzionamento è il seguente: il motore elettrico ruota e trasmette il moto al riduttore (che può essere a vite senza fine o ad ingranaggi) , il quale a sua volta fa ruotare la madrevite, lo stelo o la chiocciola essendo accoppiati sulla madrevite e producono un movimento lineare in quanto essendo vincolate non ruotano ma si "svitano o avvitano".
In figura 5.3 evidenziati i principali componenti di un generico attuatore elettrico.

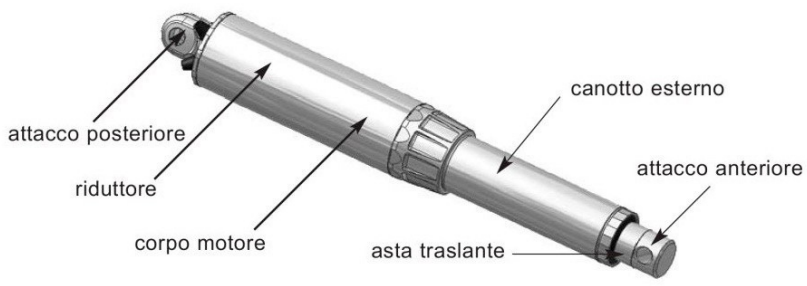


Figura 5.3 : Elementi principali dell'attuatore elettrico lineare.

Approfondendo lo studio sella dinamica dei cilindri lineari sono emersi diversi aspetti vincolanti.
Gli attuatori elettrici hanno vari vantaggi tra i quali : un buon comportamento dinamico; caratteristiche statiche lineari e flessibili; una trasmissione pulita, semplice ed ad alta efficienza energetica; una manutenzione limitata senza parti di ricambio o lubrificazione necessaria tranne in condizioni estreme. Di contro sono caratterizzati da un limitato rapporto potenza/peso e un costo elevato. Essi infatti costano cinque volte di più rispetto ai martinetti meccanici. Inoltre richiedono un motore brushless che, rispetto ai motori asincroni, presenta i seguenti vantaggi: dimensioni più piccole a parità di potenza; più elevate prestazioni dinamiche; non necessitano di ulteriori dispositivi di avviamento ma sono dotati di inverter, possono essere quindi collegati direttamente al cilindro.
Il problema è che sarebbe necessario un motore brushless per ogni cilindro e ciò inciderebbe decisamente sul costo di realizzazione della struttura. Inoltre, è necessario gestire bene l'elettronica affinché i motori movimentino i cilindri contemporaneamente come richiesto dall'applicazione.

Inoltre, scegliendo di movimentare la struttura attraverso cilindri elettromeccanici si dovrebbe modificare il banco aggiungendo delle aste di rinvio in ferro per il collegamento degli attuatori alla struttura.
La figura 5.4 mostra il banco di prova movimentato attraverso quattro cilindri elettromeccanici disposti simmetricamente onde evitare sollecitazioni e impuntamenti eccessivi durante la lavorazione. In figura sono anche rappresentate le aste di rinvio per il collegamento meccanico dei cilindri alla struttura.

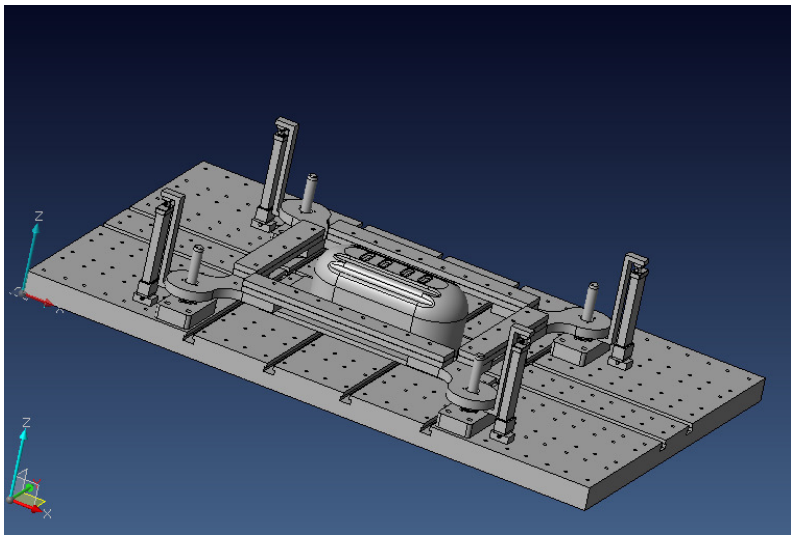


Figura 5.4 : Banco di prova movimentato attraverso quattro cilindri elettromeccanici.

Ciascuna asta di rinvio dovrebbe essere dimensionata tenendo conto sia degli ingombri della struttura e del cilindro e sia di eventuali flessioni a cui esse andrebbero incontro se le corse fossero elevate. Si potrebbe ovviare a quest'ultima problematica progettando delle aste di rinforzo da agganciare a ciascun cilindro e fissare con viti sul piastrone di base.

In figura 5.5è rappresentato un ingrandimento della struttura in corrispondenza del cilindro elettromeccanico. Si nota l'asta di rinvio avvitata mediante viti alla barra a coda di rondine e collegata alla testa dell'attuatore mediante un tassello opportunamente progettato. E' anche rappresentata l'asta di rinforzo, fissata sul piastrone di base, che sostiene il cilindro in corrispondenza della sua asta.

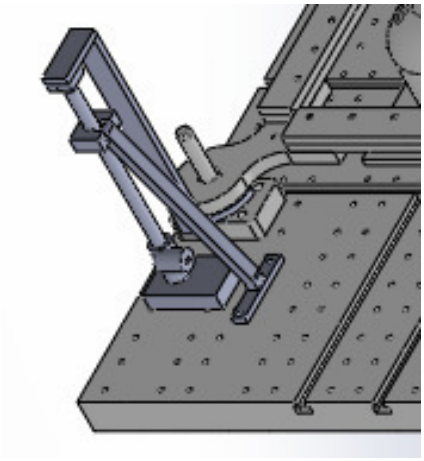


Figura 5.5: Ingrandimento della struttura in corrispondenza del cilindro elettromeccanico.

In figura 5.6 sono raffigurate l'asta di rinvio (a) che dovrà essere avvitata alla barra a coda di rondine mediante viti e al cilindro e l' asta di rinforzo (b) per il sostegno dell'attuatore; (c) il tassello che avrà una sede per ospitare la testa del cilindro e quattro fori sulla parte superiore per il collegamento mediante viti all'asta di rinvio.

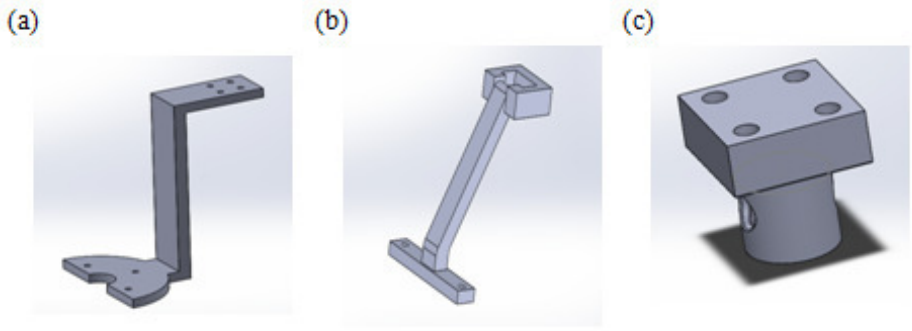


Figura: 5.6: (a) asta di rinvio , (b) asta di rinforzo e (c) tassello per collegamento tra attuatore lineare ed asta di rinvio.

5.4 - Panoramica sui martinetti meccanici

Un'altra soluzione per la movimentazione del banco di prova è il martinetto meccanico.

I *martinetti meccanici* sono dei dispositivi in grado di trasformare il moto rotativo fornito da un motore (elettrico, idraulico o pneumatico) in un moto lineare.

La trasmissione del moto avviene mediante l'accoppiamento di un riduttore a vite senza fine - ruota elicoidale di precisione, oppure mediante l'accoppiamento di vite – madrevite trapezoidale (ad 1 o più principi / a ricircolo di sfere).

Il loro utilizzo può avvenire sia singolarmente che per varie configurazioni composte da più martinetti, tramite l'accoppiamento con giunti ed alberi di collegamento e rinvii angolari.

I martinetti consentono di realizzare sistemi di sollevamento ed azionamenti, con perfetto sincronismo anche se il carico non è perfettamente distribuito. I martinetti meccanici sono idonei ad essere impiegati per applicazioni sia in tiro che in spinta con montaggi sia verticali verso l'alto o verso il basso, che orizzontali.

Sul mercato la gamma dei martinetti meccanici può essere fornita in due diversi modelli: a vite trapezia e a vite a ricircolo di sfere.

5.5 - I martinetti meccanici a vite a ricircolo di sfere

I martinetti meccanici con vite a ricircolo di sfere abbinano al gruppo riduttore un azionamento lineare con vite a sfere, che permette di ottenere rispetto alla soluzione tradizionale con vite trapezoidale i seguenti vantaggi:

- maggiore efficienza globale
- maggiore durata del sistema di azionamento lineare

Sono disponibili in due soluzioni costruttive:

- a vite traslante
- a vite rotante

In figura 5.7 si mostra un tipico martinetto a sfere traslante.

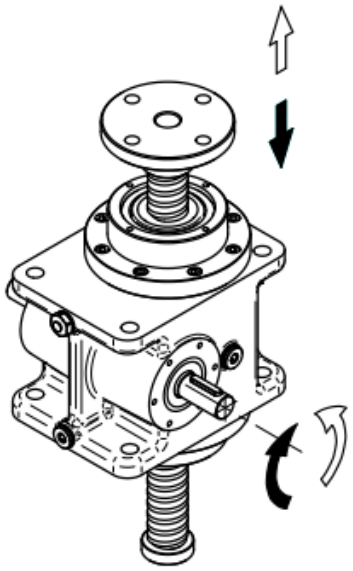


Figura 5.7 : Martinetto a sfere traslante.

La madrevite a sfere è integrale con la corona del riduttore a vite. Il movimento lineare viene eseguito dalla vite a sfere, la quale, azionata dalla madrevite, trasla attraverso il corpo del martinetto. Pertanto è necessario la disponibilità di spazio libero da entrambi i lati del martinetto stesso. La vite a sfere deve essere controreazionata per consentire la traslazione.
Gli accessori di cui deve essere dotato sono i seguenti: tubo di protezione rigida, protezione elastica a soffietto, madrevite di sicurezza, diversi attacchi della vite a sfere, finecorsa, antirotazione, arresto meccanico, supporto cardanico a perni, boccole di guida in bronzo.

In figura 5.8 si mostra un tipico martinetto a sfere rotante.

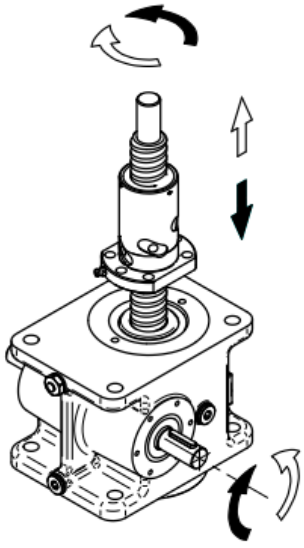


Figura 5.8 : Martinetto a sfere rotante.

La vite a sfere è solidale con la corona riduttore e pertanto ruota con la stessa velocità. Il movimento lineare viene eseguito dalla madrevite traslante sulla vite a sfere. Il movimento lineare della madrevite avviene solo se la stessa è contro reazionata impedendone la rotazione solidale con la vite a sfere.
Gli accessori di cui deve essere equipaggiato sono i seguenti: protezione elastica a soffietto, madrevite di sicurezza, supporto madrevite con perni basculanti, madrevite a disegno cliente, supporto cardanico con perni.

A parità di diametro e passo della vite a sfere, le prestazioni del martinetto a sfere traslante sono superiori a quelle del martinetto a sfere rotante. Ciò è dovuto al fatto che la versione a vite traslante presenta una struttura integrata tra le parti del riduttore e vite a sfere, che garantisce prestazioni superiori in termini di efficienza, capacità di carico, durata e rigidità.

5.6 - I martinetti meccanici a vite trapezia

I martinetti ad asta trapezia hanno un funzionamento analogo a quelli a sfere ma non richiedono l'impiego di freni o altri sistemi di bloccaggio.

Si possono applicare singolarmente oppure a gruppi opportunamente collegati tramite alberi, giunti e/o rinvii angolari.

Possono essere movimentati tramite differenti motorizzazioni: elettriche in corrente continua e alternata, idrauliche o pneumatiche. Sono inoltre possibili movimentazioni manuali o con qualsiasi altro tipo di trasmissione.

I martinetti meccanici a vite trapezia sono costituiti da una trasmissione di comando composta da un riduttore a vite senza fine - ruota elicoidale di precisione e da un gruppo di azionamento lineare: a vite – madrevite trapezoidale ad 1 o più principi.

Anche i martinetti ad asta trapezia sono disponibili in due soluzioni costruttive:

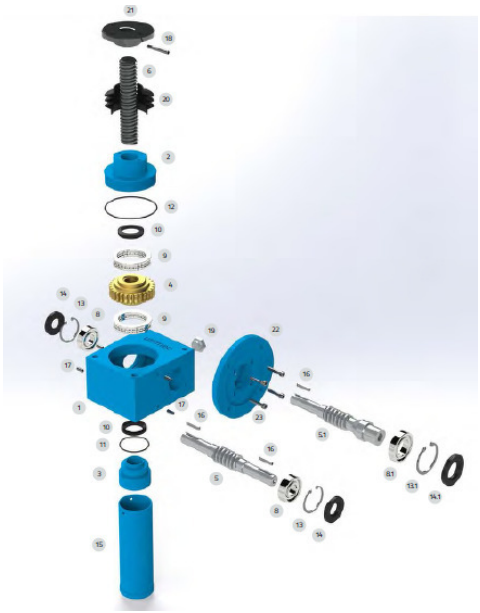
- a vite traslante
- a vite rotante

5.7 - Confronto tra martinetti ad asta trapezia e a ricircolo di sfere

Tra gli svantaggi della vite a ricircolo di sfere c'è sicuramente il costo più elevato rispetto alla vite trapezia. In generale una vite a ricircolo di sfere costa il 40% in più rispetto a una vite trapezia.
Oltre a differenze di costo, ci sono delle sostanziali differenze tecnologiche.
Il martinetto a vite a ricircolo di sfere è molto più rumoroso e richiede un motore performante con freno motore perché altrimenti, a motore spento, le sfere scorrerebbero.
Un altro aspetto da tenere in considerazione è quello relativo alla velocità di rotazione della vite a sfere. Quest'ultima è limitata da fattori esterni al sistema e cioè dalla lunghezza della vite e dal tipo di supporto alle estremità. Altri fattori che limitano la velocità di rotazione della vite a sfere sono il materiale delle sfere e il materiale e la geometria degli elementi di ricircolo.
Inoltre, nella fase di individuazione del martinetto a ricircolo di sfere, è necessario considerare il diametro e il numero delle sfere perché questi parametri influenzano la corsa ammissibile.
Per corse piccole, le sfere della chiocciola non riescono a completare la rivoluzione con il rischio che la chiocciola si consumi solo da una parte. Ciò provocherebbe un funzionamento non fluido del martinetto a causa dell'eccessivo gioco che si creerebbe e quindi una maggiore rumorosità. Tutto questo ridurrebbe drasticamente la durata della vite a sfere intesa come il numero di rivoluzioni che essa può compiere rispetto alla madrevite prima che compaiano fenomeni di fatica nel materiale della vite, della madrevite e nei corpi volventi.

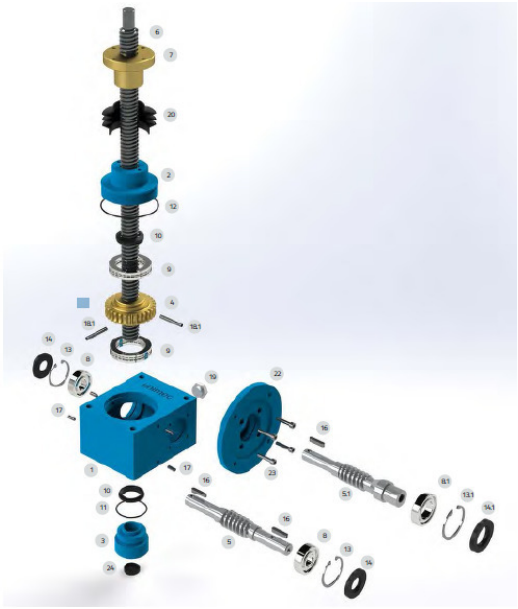
Per queste ragioni la scelta più adatta risulta il martinetto a vite trapezia.

Nelle figure 5.9 e 5.10 sono rappresentati gli elementi costitutivi delle due soluzioni, a vite traslante e a vite rotante, del martinetto ad asta trapezia.



1 Carter	8 Cuscinetto della vite senza fine	13 Seeger	18 Spina elastica terminale
2 Coperchio	8.1 Cuscinetto della vite senza fine motorizzata	13.1 Seeger per motorizzazione	19 Tappo
3 Bussola di guida	9 Cuscinetto della ruota elicoidale	14 Anello di tenuta	20 Protezione elastica
4 Ruota elicoidale	10 Anello di tenuta	14.1 Anello di tenuta per motorizzazione	21 Terminale
5 Vite senza fine	11 Anello di tenuta	15 Protezione rigida	22 Flangia motore
5.1 Vite senza fine dx motorizzata	12 Anello di tenuta	16 Chiavetta	23 Viti
6 Asta filettata		17 Grano	

Figura 5.9 : Martinetto meccanico a vite traslante.



1 Carter	8 Chiocciola	13 Anello di tenuta	18 Spina elastica ruota
2 Coperchio	8.1 Cuscinetto della vite senza fine	13.1 Seeger	19 Tappo
3 Bussola di guida	9 Cuscinetto della vite senza fine motorizzata	14 Seeger per motorizzazione	20 Protezione elastica
4 Ruota elicoidale	10 Cuscinetto della ruota elicoidale	14.1 Anello di tenuta	22 Flangia motore
5 Vite senza fine	11 Anello di tenuta	15 Anello di tenuta per motorizzazione	23 Viti
5.1 Vite senza fine dx motorizzata	12 Anello di tenuta	16 Chiavetta	24 Tappo
6 Asta filettata		17 Grano	

Figura 5.10 : Martinetto meccanico a vite rotante.

La scelta dell'una o dell'altra soluzione più idonea risulta quella con vite rotante in quanto la vite traslante richiederebbe una modifica del piastrone di base per permettere lo scorrimento dell'asta filettata.

5.8 - La scelta del sistema di movimentazione

Dalla panoramica sui possibili sistemi di movimentazione esistenti sul mercato è emerso che quelli più adatti alla specifica applicazione sono gli attuatori elettromeccanici lineari ed i martinetti ad asta trapezia e vite rotante.

Confrontando le due soluzioni si riscontrano dei vantaggi che una offre rispetto all'altra.

Come descritto nel paragrafo 5.3, scegliendo di movimentare la struttura attraverso cilindri elettromeccanici si dovrebbe modificare il banco progettando degli elementi necessari all'adattamento degli attuatori alla struttura.
Quindi si dovrebbero aggiungere quattro aste di rinvio in ferro e i relativi tasselli per il collegamento tra di esse e i cilindri elettrici, e quattro aste di rinforzo, da fissare sul piastrone di base, per sostenere l'asta dell'attuatore ed evitare flessioni durante il funzionamento.
Scegliendo invece di movimentare la struttura con dei martinetti meccanici, sarebbe sufficiente realizzare pochi elementi di accoppiamento e fissaggio, evitando problemi di tolleranze ed errori di montaggio.
Basterebbe, infatti, realizzare dei fori sulle piastre a coda di rondine al fine di collegare la boccola del martinetto. Infatti, quest'ultima durante il funzionamento si avviterà sulla vite senza fine e movimenterà il premilamiera. Inoltre, oltre ai fori basterebbe realizzare una piastrina forata molto semplice per fissare il martinetto al piastrone di base.

Altro fattore da tenere in considerazione è che si dovrebbe utilizzare un motore brushless per ogni cilindro elettrico e ciò inciderebbe decisamente sul costo della struttura.
Inoltre, bisognerebbe porre particolare attenzione alla gestione dell'elettronica affinché i motori movimentino i cilindri contemporaneamente.
Invece, scegliendo di movimentare la struttura attraverso i martinetti questo problema non esisterebbe, in quanto sarebbe sufficiente un solo motore che collegato con degli alberi di trasmissione ai martinetti ne trasferisce il moto.

Per queste ragioni, si è scelto di movimentare la struttura attraverso dei martinetti ad asta trapezia e vite rotante.

5.9 - Il dimensionamento del martinetto meccanico a vite trapezia e asta rotante

Una volta individuato il sistema di movimentazione adatto, ne è stato fatto il dimensionamento.

Per individuare il martinetto è stato utilizzato il catalogo MECVEL.

MECVEL è un'azienda bolognese nel settore dell'automazione lineare che sviluppa e produce una gamma costantemente aggiornata di attuatori lineari elettrici e martinetti meccanici disponibili a catalogo e in pronta consegna in base al modello selezionato.

Il catalogo propone un criterio di dimensionamento che tiene conto dei carichi in gioco (dinamici e statici).

Per una corretta scelta del martinetto, e di conseguenza per il suo buon funzionamento, è molto importante individuare la reale natura dei carichi agenti.
I carichi possono essere divisi in due grandi famiglie: carichi statici e carichi dinamici.
Un carico si dice *statico* quando gli organi di trasmissione del martinetto sono fermi.
Un carico si dice *dinamico* quando gli organi di trasmissione del martinetto sono in moto.
Al loro interno possono essere individuati carichi in trazione, in compressione, laterali, eccentrici, da urti, da vibrazioni.
Un carico sidice in *trazione* quando è applicato sull'asse dell'asta filettata con verso in direzione opposta al carter.
Un carico si dice in *compressione* quando è applicato sull'asse dell'asta filettata con verso in direzione del carter.
Un carico si dice *laterale* quando la sua direzione è ortogonale all'asse dell'asta filettata.
Un carico si dice *eccentrico* quando il suo punto di applicazione,sebbene orientato come l'asse dell'asta filettata, non appartiene all'asse stesso.
Un carico si dice *da urti* quando trae origine da forze impulsive da impatto non quantificabili.
Infine un carico si dice *da vibrazioni* quando un carico da urti aumenta la frequenza di impulso.
A seconda del tipo di carico è necessario adottare alcuni accorgimenti in fase di progettazione:

- *carico a trazione statico* :il massimo carico applicabile, per tutti i modelli e grandezze, è quello previsto nelle tabelle descrittive del catalogo. Eventuali urti e/o carichi laterali ne limitano l'impiego.
- *carico a trazione dinamico* :il massimo carico dinamico a trazione applicabile ad un martinetto non è determinato solo dalla sua taglia: la temperatura ambiente, i fattori di servizio ed eventuali carichi laterali e/o urti possono essere elementi limitativi. È quindi indispensabile verificare tutti questi parametri.
- *carico a compressione statico* :il massimo carico applicabile, è condizionato dalla snellezza dell'asta filettata e dai vincoli cui è sottoposta. Il carico limite è ricavabile

secondo i diagrammi di Eulero. Eventuali urti e/o carichi laterali ne limitano l'impiego.

- *carico a compressione dinamico:*il massimo carico a compressione applicabile è determinato da più fattori: snellezza dell'asta filettata, temperatura ambiente, fattori di servizio ed eventuali carichi laterali e/o urti. Oltre alle verifiche previste nel caso di carico a trazione vanno aggiunte quelle relative ai diagrammi di Eulero.
- *carico laterale statico:*questo tipo di carico causa uno spostamento laterale dell'asta filettata provocandone una flessione dannosa limitando la capacità del martinetto. Opportuni diagrammi riportano i valori massimi dei carichi laterali in funzione della lunghezza dell'asta filettata e della taglia.
- *carico laterale dinamico*:in applicazioni dinamiche un carico laterale non è ammesso.
- *carico eccentrico statico*: un carico eccentrico, nelle applicazioni statiche, causa gli stessi problemi dei carichi laterali.
- *carico eccentrico dinamico:*nel caso di movimentazione di un carico eccentrico, per evitare i problemi connessi al carico laterale, è necessaria la realizzazione di una struttura meccanica guidata e dimensionata in modo opportuno, tale da assorbire tutte le componenti trasversali del carico. Particolare attenzione va posta nella realizzazione della guida: giochi troppo stretti potrebbero causare grippaggio e impuntamenti, mentre giochi grossolani renderebbero vana la costruzione della guida stessa.
- *carico da vibrazioni o da urti statico:*un carico da vibrazioni o urti, qualora non sia di forte entità,può essere l'unica causa di reversibilità della trasmissione movimentata dal martinetto.
- *carico da vibrazioni o da urti dinamico:*un carico da vibrazioni o urti dinamico può essere dannoso ai fini ella vita del martinetto: fenomeni di stick-slip e conseguenti sovraccarichi locali possono aumentare notevolmente i fenomeni di usura. È necessario che l'entità degli urti e l'ampiezza delle vibrazioni siano ridotte al minimo.

Nella specifica applicazione i carichi statici in gioco sono quelli relativi al peso della struttura da movimentare.
Nel caso dinamico, oltre al peso della struttura bisogna anche tenere conto della forza che l'utensile formatore imprime sulla lamiera per deformarla. Tale forza ha una componente verticale e una componente nel piano della lamiera in quanto l'utensile si muove su quest'ultimo per deformarla.
Pertanto, nel caso statico il carico a cui è soggetto il martinetto è un carico a compressione mentre nel caso dinamico il carico è a compressione e laterale. Poiché la zona in cui lavora l'utensile formatore è sufficientemente lontana dai martinetti, è corretto assumere che il carico dinamico sia solo di compressione.

Il carico che ogni martinetto deve gestire ha un valore pari a circa 800 N.
Nel dimensionamento del martinetto è necessario considerare anche il diametro dell'asta filettata. Infatti quando il martinetto lavora, se non fosse ben dimensionato, potrebbe incorrere in due tipi di crisi strutturale. E' come se fosse un'asta vincolata e caricata a compressione come mostrato in figura 5.11.

Figura 5.11: Asta vincolata e caricata a compressione.

I due tipi di crisi strutturale sono lo snervamento e l'instabilità di equilibrio delle sezioni. Il prevalere di uno o dell'altro dipende dalla snellezza della trave λ.
Quando λ è piuttosto esiguo è necessario effettuare una verifica a compressione, quando invece il valore di λ è elevato si effettua la verifica secondo la teoria del carico di punta.
La snellezza della trave è definita come il rapporto tra la lunghezza di minima inflessione l_0 e il raggio di inerzia minimo della sezione ρ_{min} :

$$\lambda = \frac{l_0}{\rho_{min}}$$

La lunghezza di minima inflessione dipende dal tipo di vincolo dell'asta. Per un'asta incastrata a un estremo e libera all'altro, come accade per il martinetto, risulta:

$$l_0 = 2 \text{ x } l_{asta}$$

Il raggio di inerzia minimo della sezione è definito nel seguente modo:

$$\rho = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

dove

$$I = \frac{\pi r^4}{4}$$

I = momento di inerzia della sezione circolare e rotazione attorno all'asse baricentro
r = raggio della sezione resistente

A = area della sezione resistente circolare

La formula di Eulero si presta sia al calcolo di verifica che a quello di progetto, anche se è più idonea al primo calcolo in quanto la sua validità è legata al rapporto di snellezza, il cui valore può essere calcolato solo se si conoscono lunghezza, sezione e vincoli dell'asta.

Nel caso di carico di punta senza eccentricità (azioni e reazioni dirette lungo uno stesso asse), la teoria di Eulero permette di individuare la sollecitazione critica $\sigma_{cr,}$ al di sopra della quale l'asta entra in crisi per instabilità dell'equilibro della sezione resistente.
La teoria di Eulero fornisce il valore della sollecitazione critica:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

Se l'asta è caricata di punta l'insorgenza della crisi può avvenire per schiacciamento (snervamento) o per instabilità della sezione resistente.
La modalità di crisi dipenderà dalla minore delle due sollecitazioni critiche in quanto all'applicazione del carico esterno, sarà la prima ad essere raggiunta: si avrà crisi per schiacciamento della sezione se risulterà :

$$\sigma_{sn} < \sigma_{cr}$$

nel caso contrario, la crisi sarà dovuta ad instabilità se:

$$\sigma_{sn} > \sigma_{cr}$$

La formula di Eulero mostra che al crescere della snellezza il valore della sollecitazione critica diminuisce. Vi sarà un valore, definito snellezza minima (o critica)λ_{min} al di sopra del quale varrà la condizione $\sigma_{sn}>\sigma_{cr}$e ci sarà prima l'innesco dell'instabilità e poi la rottura per schiacciamento del materiale; al di sotto di esso vale la condizione inversa e quindi si raggiungerà per prima la resistenza a schiacciamento del materiale, innescandone la rottura.
Il λ_{min} ,da considerare valore minimo della snellezza perché sia applicabile la teoria di Eulero, divide i campi in cui le modalità di crisi sono differenti; pertanto, il suo valore sarà relativo alla condizione in cui la σ_{sn}elaσ_{cr} si equivalgono.
La formula di Eulero è rigorosamente valida solo se risulta $\lambda>\lambda_{min}$,

dove

$$\lambda_{min} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{sn}}}.$$

Nel caso specifico, poiché l'asta è da progettare, nel calcolo della sezione dell'asta occorre adottare una procedura differente in quanto, per sistema caricato a compressione, non sarà possibile calcolare direttamente la σ_{cr} che dipende dal raggio, non ancor definito, dell'asta.
Va considerato che quando c'è carico di punta il modello fisico di riferimento è meno stabile di quello riferito al solo caricamento per trazione; ciò, in buona sostanza, dipende dal fatto che può insorgere disassamento tra le forze agenti, in contrasto con l'ipotesi di applicabilità della teoria di Eulero e conseguente esigenza di applicazione di un coefficiente di sicurezza più elevato.
Per il proporzionamento dell'asta si può procedere facendo l'ipotesi di lavoro che la crisi sia dovuta a uno dei due meccanismi, dimensionare il raggio dell'asta e verificare se la snellezza risultante è tale da giustificare l'ipotesi fatta. In caso di verifica affermativa il raggio calcolato può essere confermato; in caso contrario, la crisi era dovuta all'altro meccanismo ed il valore del raggio dell'asta deve essere calcolato con le relative espressioni.

Si è supposto, dunque, che l'asta sollecitata a compressione fosse destinata alla crisi per instabilità a carico di punta, ipotesi questa assai veritiera perché generalmente la lunghezza dell'asta del martinetto è notevole considerandola in relazione alla sua sezione trasversale.
A causa dell'incertezza insita in questo modello fisico, la valutazione della massima sollecitazione ammissibile σ_{amm} deve necessariamente contemplare un coefficiente di sicurezza all'instabilità *CS* più alto di quello definibile per il caso dello snervamento. In genere si adotta un valore compreso tra 4 e 5.

$$\sigma_{amm} = \frac{\sigma_{cr}}{CS}$$

dove

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

$$\sigma_{amm} = \frac{F}{A}$$

ed essendo

$$\lambda = \frac{4\, l_{asta}}{r}$$

si ottiene:

$$r = \sqrt[4]{\frac{4\,CSF l_{asta}^2}{\pi^3 E}}$$

Per validare il risultato, con il valore di r ottenuto occorre ricalcolare il valore della snellezza risultante per l'asta e confrontarlo con $\lambda_{min.}$
Se $\lambda > \lambda_{min}$ allora il risultato in termini di r può essere confermato.

Nel caso specifico:

$$r = \sqrt[4]{\frac{4\,CSF l_{asta}^2}{\pi^3 E}} = r = \sqrt[4]{\frac{4\,4\,800\,(600*10^{-3})^2}{\pi^3(2.1\ \ 10^{11})}} = 0.0068\ [m] = 6.8\ [mm]$$

$$\lambda = \frac{4\,l_{asta}}{r} = 352.94$$

$$\lambda_{min} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{sn}}} = 81.07$$

Per cui risulta verificata la condizione $\lambda > \lambda_{min}$, vale quindi $\sigma_{sn} > \sigma_{cr}$.

Una volta dimensionata l'asta del martinetto, dal catalogo MECVEL è stato identificato il martinetto a vite rotante HR05.

Nei modelli HR lo stelo e la ruota elicoidale sono solidali tra loro. La precisione nelle lavorazioni e l'accurato accoppiamento tra i due componenti permettono di ridurre al minimo le oscillazioni dovute ad errori di concentricità.

In figura 5.12 sono riportare le dimensioni del martinetto, compatibili con gli ingombri della struttura.

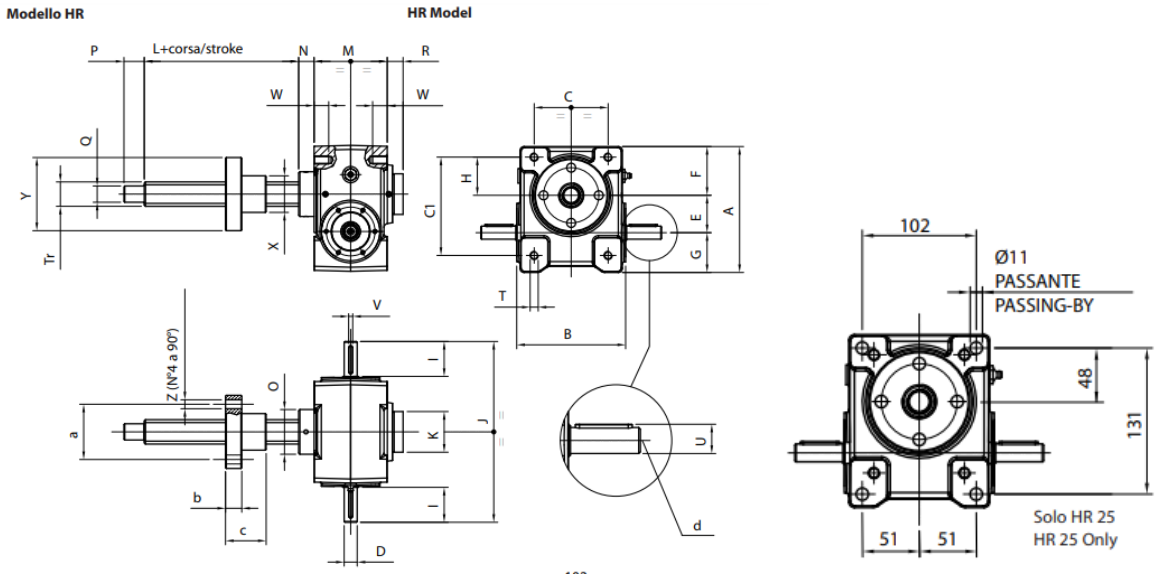


TABELLA DIMENSIONI

GR.SIZE	A	B	C	C1	D	E	F	G	H	I	J
5	96	79	52	60	10	25	36	35	21	26	132
K	**L**	**M**	**N**	**O**	**P**	**Q**	**R**	**T**	**U**	**V**	**W**
36	36	70	11	35	16	12	20	M8	11,2	3	15
X	**Y**	**Z**	**a**	**b**	**C**	**d**	**TR**				
30	55	7	43	12	35	M3	18X4				

Figura 5.12: Dimensioni del martinettoHR05.

Un altro parametro da tenere in considerazione è il rapporto di riduzione tra la ruota elicoidale e la vite senza fine del martinetto.
Il catalogo fornisce i seguenti rapporti di riduzione: 1:4 , 1:10 , 1:16 e 1:30.
Il rapporto di riduzione è stato scelto dopo aver identificato lo schema di montaggio.

5.10 - Schema di montaggio

Sono stati inseriti quattro martinetti ai lati del premilamiera in corrispondenza delle piastre a coda di rondine. Queste ultime sono state opportunamente forate per garantirne l'accoppiamento con la boccola. La scelta di disporre simmetricamente i martinetti è stata dettata dal voler garantire la simmetria strutturale iniziale e ripartire il carico senza sollecitarli eccessivamente.
Con quattro martinetti, il catalogo propone diversi schemi di montaggio.
Quello più adatto all'applicazione è mostrato in figura 5.13.

PIASTRONE DI BASE

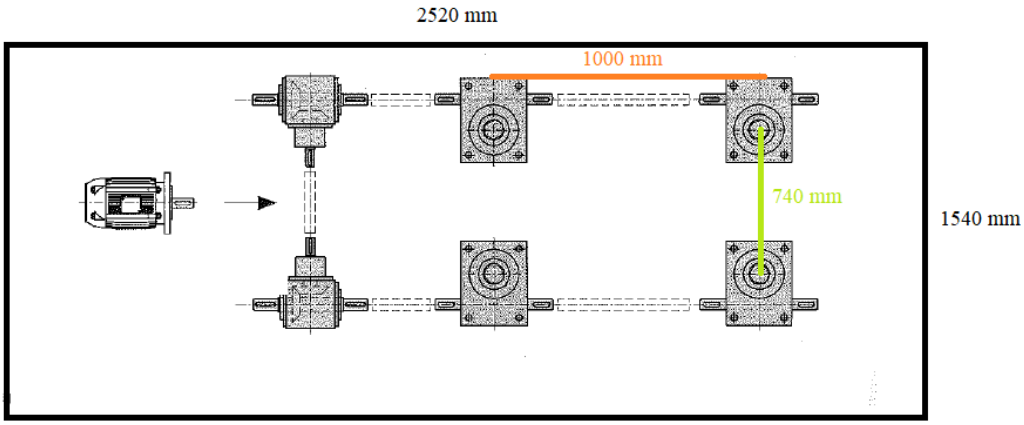


Figura 5.13: Schema di massima del montaggio dei martinetti.

La scelta di motorizzare i due rinvii angolari risulta essere la più logica e semplice da realizzare.

5.11 - Studio cinematico

Dal punto di vista cinematico, indicando i cinematismi con ①,②,③ per i rinvii angolari, come mostrato in figura 5.14, è possibile scrivere i rapporti di riduzione :

$$i\,① = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

$$i\,② = \frac{\omega_3}{\omega_4}$$

$$i\,③ = \frac{\omega_5}{\omega_7}$$

$$i\,④ = \frac{\omega_6}{\omega_8}$$

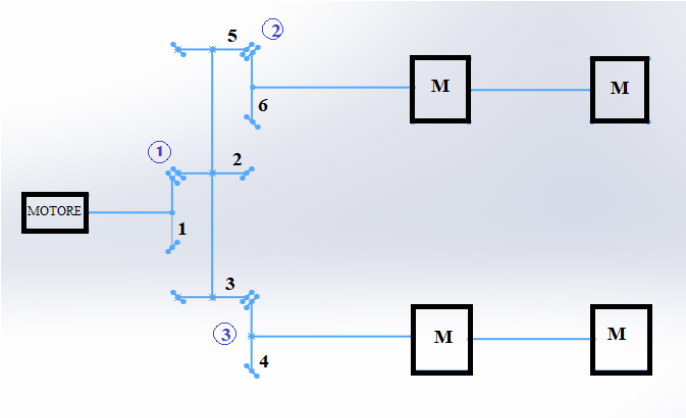


Figura 5.14 : Schema cinematico della struttura.

dove, le velocità ω_1-ω_2, ω_3 -ω_4 eω_5 -ω_6 sono le velocità relative alle ruote ingrananti in ciascun rinvio angolare.
Tenendo conto che alcune ruote sono calettate sullo stesso albero, è possibile scrivere:

$$\omega_1 = \omega_{\text{MOTORE}}$$

$$\omega_2 = \omega_3$$

$$\omega_4 = \omega_5 = \omega_6$$

$$\omega_7 = \omega_9 = \omega_{10}$$

$$\omega_8 = \omega_{11} = \omega_{12}$$

I rapporti di riduzione scelti sono: 1:1 per ciascun rinvio angolare, in quanto sono stati inseriti per trasmettere il moto rotatorio da un albero all'altro tra loro perpendicolari, senza ridurre il numero di giri degli alberi.
Per quanto riguarda i martinetti, catalogo fornisce i seguenti rapporti di trasmissione 1:4 , 1:10, 1:16 e 1:30. Al fine di ottenere la corretta precisione nel movimento è stato scelto un rapporto 1:30 per ciascun martinetto.
Infine, un rapporto 1:7 per il riduttore associato al motore. In tal modo è possibile realizzare il movimento lineare del banco desiderato.

Velocità rotazione del motore: 3000 rpm = 314.1rad/s

Passo vite: 4mm

$$i\ \textcircled{1} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 7$$

$$\omega_2 = \frac{3000}{7} = 428.57\text{rpm}$$

$$i\ \textcircled{4} = \frac{\omega_9}{\omega_{13}}$$

$$\omega_{13} = \frac{428.57}{30} = 14.28\ \text{rpm} = 1.46\text{rad/s}$$

$$R = \frac{\text{passovite}}{2\pi} = 0.000637\ \text{m/rad}$$

$$\text{Velocità lineare: } \frac{314.1 \text{ x } 0.637}{210} = 0.952\ \text{mm/s}$$

Definito lo schema di montaggio, è stato considerato in che modo collegare tra loro i vari elementi.

5.12 - Schema del banco di prova

Le figure5.15 e 5.16 mostrano uno schema semplificato del banco di prova con i relativi ingombri.

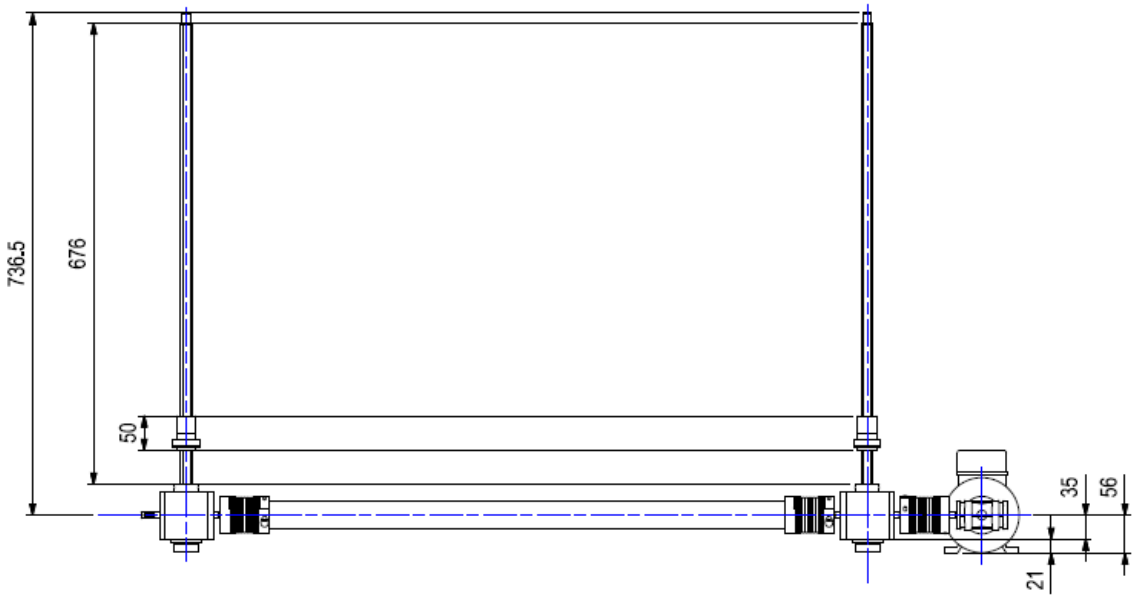


Figura5.15: Banco di prova vista laterale.

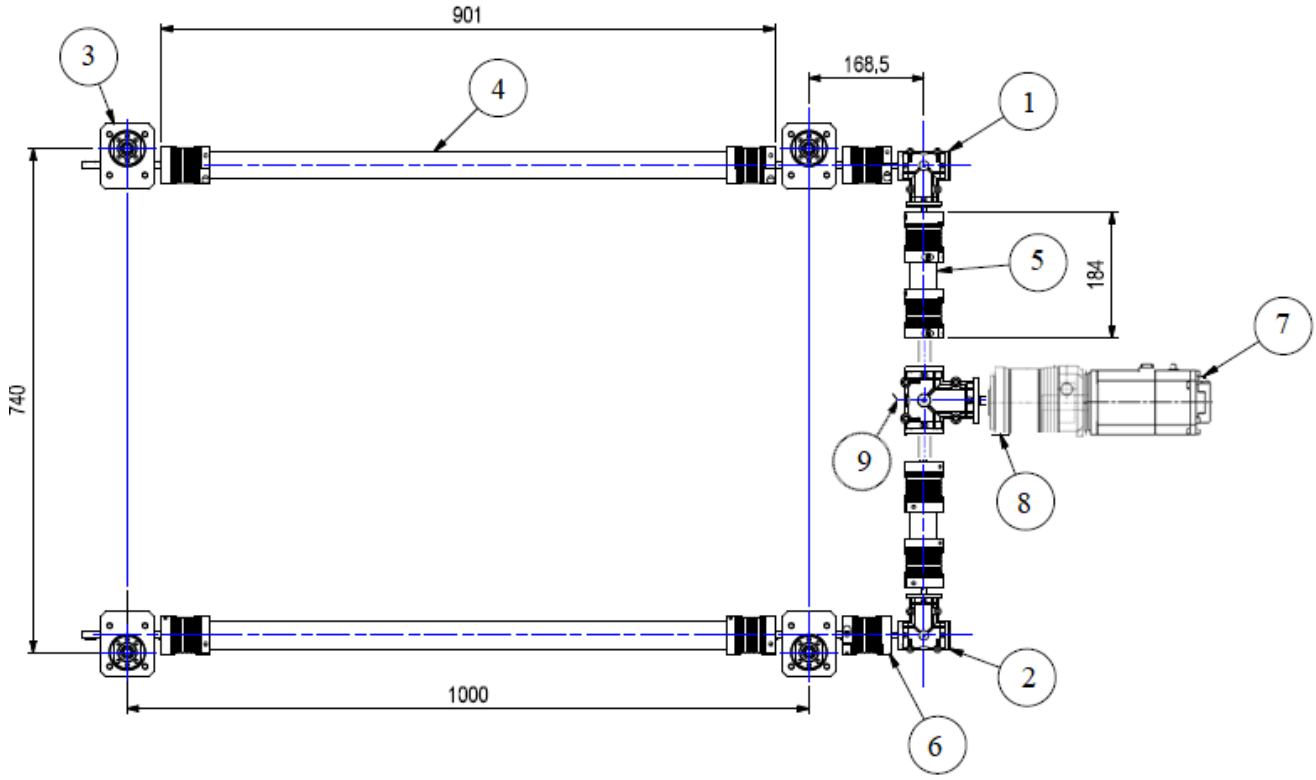


Figura5.16: Banco di prova vista dall'alto.

In tabella 5.17 sono riportati gli organi di trasmissione che compongono il banco di prova.

9	*RINVIO DI PRECISIONE*
8	*RIDUTTORE DEL MOTORE*
7	*MOTORE Brushless OMRON*
6	*GIUNTO A SOFFIETTO*
5	*ALBERO DI TRASMISSIONE*
4	*ALBERO DI TRASMISSIONE*
3	*MARTINETTO HR05*
2	*RINVIO ANGOLARE*
1	*RINVIO ANGOLARE*
POS.	**Denominazione**

Tabella 5.17: Organi di trasmissione che compongono il del banco di prova.

Per esigenze di montaggio, oltre agli organi di trasmissione, sono stati previsti degli elementi di collegamento.

Capitolo 6

In questo capitolo verranno trattati dettagliatamente tutti gli organi di trasmissione necessari per garantire la movimentazione del banco e verranno analizzati e discussi gli elementi accessori di cui è stato necessario dotare il banco di prova al fine di collegare tra loro i vari componenti.

6.1 - I giunti meccanici

L'utilizzo di un giunto si rende necessario quando occorre consentire dei piccoli disallineamenti e disassamenti tra gli alberi in rotazione, senza introdurre sovrasollecitazioni negli organi rotanti; quando occorre assemblare una linea di trasmissione molto lunga, per la quale è più conveniente realizzare separatamente più tronchi piuttosto che un unico albero; oppure, come in questo caso, quando occorre collegare tra loro elementi diversi, tenendo in conto di possibili errori di montaggio.

La classificazione dei giunti si basa sull'entità e sul tipo di spostamento consentito tra gli elementi collegati:

- *giunti rigidi*: gli alberi collegati sono perfettamente coassiali e sono esclusi durante il funzionamento eventuali disassamenti, dilatazioni e rotazioni relative.
- *giunti semielastici ed elas*tici: gli alberi collegati possono subire spostamenti e rotazioni relative di varia natura, grazie alla presenza di elementi elastici o deformabili a base di elastomeri.
- *giunti mobili o articolati*: gli alberi collegati possono subire spostamenti anche piuttosto elevati grazie allo schema cinematico del giunto.

Per la specifica applicazione sono necessari quattro giunti elastici a settori di cui due (indicati con 5 in figura 5.16) per il collegamento tra i martinetti e due per il collegamento tra il rinvio di precisione (indicato con 8 in figura 5.16) e i due rinvii angolari (indicati con 1 e 2 in figura 5.16), e due giunti elastici a soffietto per il collegamento tra martinetti e rinvii angolari (indicati con 6 in figura 5.16).
Scegliendo la coppia di giunti collegata con albero di trasmissione è possibile modulare la struttura: basterà sostituire la coppia di giunti collegata con un albero di trasmissione più lungo o più corto per realizzare pezzi di dimensioni diverse.
La scelta dei giunti elastici a soffietto è stata dettata dal fatto che si vuole una rapida risposta dinamica e un'elevata precisione di trasmissione tra martinetti e rinvii, ciò è possibile grazie ad un anello smorzatore che minimizza le vibrazioni.

I giunti elastici realizzano un collegamento con una rigidezza limitata rispetto ad alcuna o a tutte le possibili sollecitazioni. Grazie alla limitata rigidezza, in presenza di disallineamenti e spostamenti relativi, le sovrasollecitazioni introdotte negli elementi collegati sono limitati. I giunti elastici consentono di recuperare disallineamenti iniziali dovuti ad errori di assemblaggio tra macchine diverse. Inoltre, possono essere utilizzati per una vasta gamma di coppie e velocità angolari.

La ridotta rigidezza può essere costruttivamente ottenuta attraverso vari sistemi: definendo una configurazione geometrica degli elementi che conferisce loro una bassa rigidezza; introducendo dei materiali di tipo elastomerico; introducendo dei giochi opportuni tra gli elementi collegati.

In figura 6.1è raffigurato il tipico schema di un giunto elastico a settori.

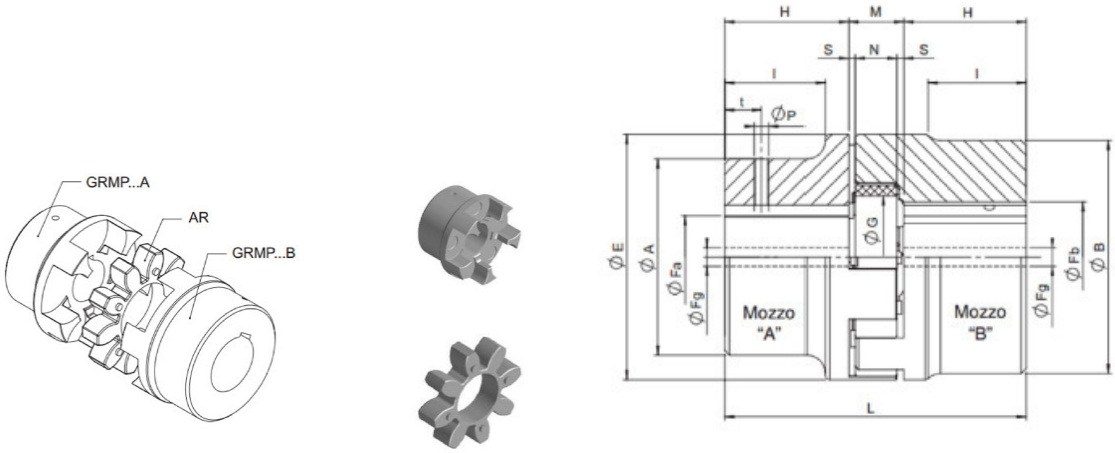


Figura 6.1: Giunto elastico a settori.

I due mozzi presentano dei denti ricavati assialmente che si impegnano in un anello elastico dentato in materiale elastomerico.

Nel caso specifico, i martinetti sono distanti e quindi è necessario utilizzare una coppia di giunti collegata con un albero di trasmissione, come mostrato in figura 6.2. Le dimensioni di quest'ultimo sono state scelte in base agli ingombri della struttura esistente ed indicate in figura 5.16.

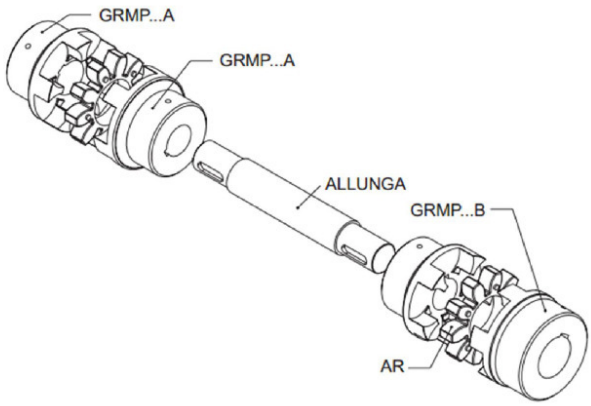


figura 6.2:Coppia di giunti collegata con un albero di trasmissione.

6.2 - I rinvii angolari

In abbinamento ai martinetti meccanici spesso vengono utilizzati i rinvii.
Nel caso specifico, sono stati inseriti due rinvii angolari ed un rinvio di precisione come mostrato nella figura 6.3.

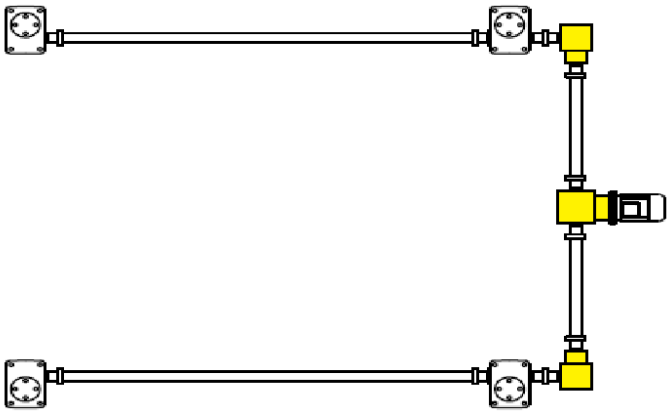


Figura 6.3 :In giallo sono evidenziati i tre rinvii .

Si tratta di dispositivi meccanici facenti parte della trasmissione di potenza.
Sono composti da ingranaggiconici con denti a spirale alloggiati all'interno di un carter di solito di forma cubica. Quest'ultima consente un montaggio universale su ogni macchina.
Gli ingranaggi conici con denti a spirale permettono la trasmissione del moto rotatorio continuo fra assi concorrenti. La differenza fra le ruote coniche e quelle cilindriche è rappresentata dai denti, che, in queste ultime, hanno sezione costante, mentre nelle ruote coniche le loro dimensioni decrescono con continuità verso la parte più piccola della ruota.
Pertanto, la scelta di ingranaggi conici risulta quella più adeguata in quanto essi danno luogo ad un'azione di ingranamento dei denti più graduale, con carico distribuito permanentemente

su due o più denti e sono, nel complesso, meno rumorosi. Tali caratteristiche sono fondamentali per il tipo di applicazione richiesta.
Scegliendo opportunamente il rapporto di riduzione è possibile ridurre la velocità di rotazione dall'albero in ingresso a quello in uscita.
Nel caso specifico, i rinvii sono stati inseriti per trasmettere il moto rotatorio da un albero all'altro, tra loro perpendicolari, senza ridurre il numero di giri degli alberi.
Infatti è stato scelto un rapporto di riduzione 1:1.

La selezione di un rinvio angolare dipende da diversi fattori legati all'applicazione:

▪ lo schema cinematico dell'applicazione per determinare la forma costruttiva, lo schema cinematico del montaggio degli ingranaggi ed i versi di rotazione degli alberi ;

▪ dati di momento torcente e velocità di rotazione richiesti dal carico (macchina operatrice);

▪ condizioni di funzionamento in termini di variabilità del carico legati alla macchina operatrice ed alla sua inerzia;

▪ ciclo di funzionamento: numero di avviamenti orari, numero di ore lavorative per giorno, intermittenza di utilizzo. E' stato stimato un tempo lavorativo pari a 7 h al giorno;

▪ condizioni ambientali, temperatura ambiente, presenza di agenti ambientali aggressivi. Per quanto concerne questo punto, non ci sono particolari condizioni operative da tenere in considerazione;

▪ tipo di macchina motrice o tipo di azionamento. In entrata al rinvio di precisione vi è il motore brushless le cui caratteristiche tecniche verranno discusse nel prossimo paragrafo.

I punti sopra elencati sono tutti di grande importanza per determinare la corretta grandezza ed il tipo di rinvio angolare idoneo per l'applicazione che si considera.

6.3 - Il motore

Sul mercato esistono varie tipologie di motori elettrici, per cui è stato necessario approfondire le diverse caratteristiche dei motori al fine di individuarne il modello idoneo.

Tutti i motori elettrici sfruttano il principio di interazione tra correnti elettriche e campi magnetici generando una coppia espressa in Newton per metro ed una velocità espressa in giri al minuto. Attraverso questi due parametri si identificano le prestazioni del motore.

I vari tipi di motore si distinguono per come viene generato il campo magnetico:

- Motori in continua (DC): campo statico, generato da magneti o da avvolgimenti nello statore; ruotano gli avvolgimenti nel rotore.
- Motori in Alternata (AC): campo dinamico, generato dall'interazione tra campi generati dalle correnti e rotore.
- Motori Brushless: campo statico, generato da magneti che ruotano, fissati sul rotore.

Il motore in corrente continua DC

La generazione del campo magnetico è effettuata dallo statore. I magneti possono essere permanenti nei motori di piccola potenza, mentre vengono generati da avvolgimenti dedicati nei motori di media e grossa potenza, detti anche a campo avvolto.

La potenza viene portata al rotore tramite collettori rotanti e spazzole, soggette ad usura e che sono causa degli interventi di manutenzione su questi motori.

Hanno buone caratteristiche di robustezza e affidabilità; sono semplici da costruire e da controllare. Per quanto riguarda la coppia è sufficiente controllare la corrente fornita al motore; per controllare la velocità basta la tensione che eroga l'inverter.

Possibili applicazioni di motori in continua DC:

- applicazioni semplici in cui è richiesta coppia da 0rpm, come estrusori, laminatoi, calandre ed una rotazione in un solo senso di rotazione;
- applicazioni dove è richiesta una generazione di potenza considerevole, oltre i 100 KW;
- applicazioni che non richiedono inversioni rapide del senso di rotazione.

Il motore in corrente alternata AC

La generazione del campo magnetico è ottenuta dalla differenza di velocità angolare tra le correnti dello statore e quelle che si generano nel rotore. Il rotore è composto da un circuito elettrico costituito da due anelli alle estremità e dalle barre che li collegano, tutti e tre di materiale conduttore, alluminio per piccoli motori e rame per motori più grandi o ad alta velocità.

I motori asincroni sono molto robusti non avendo né parti soggette ad usura né magneti. Vengono quindi agevolmente controllati dagli inverter in quanto la posizione non è determinante.

Poiché il campo viene generato da un'interazione, la generazione richiede un tempo finito che implica un ritardo nella risposta del motore alle sollecitazioni delle correnti o del carico.

Possibili applicazioni di motori in alternata AC sono:

- applicazioni in cui è richiesta una potenza in "rotazione" e piccola coppia di spunto alla partenza;
- applicazioni in cui non è richiesta una regolazione accurata della velocità di rotazione;
- applicazioni con coppie resistenti quadratiche;
- ventilatori, pompe, carrelli, nastri trasportatori;
- estrusori, calandre, laminatoi (tenendo in conto che è necessario un controllo accurato, con encoder per esempio, per avere una coppia alta anche in partenza o un controllo vettoriale).

Il motore Brushless (SPM)

Nel motore SPM (Surface PermanentMagnet) i magneti sono incollati sul rotore e sono protetti da un bendaggio metallico oppure in fibra. La qualità dei magneti determina le prestazioni del motore. L'assenza di componenti soggetti ad attrito rende il motore molto robusto ed estremamente affidabile, Il campo sempre disponibile garantisce risposte pronte e soprattutto deterministiche e lineari: al raddoppio della corrente corrisponde il raddoppio della potenza erogata.

La difficoltà nel controllo deriva dal fatto che l'azionamento deve riconoscere la posizione dei magneti per ottenere la massima efficienza.

Possibili applicazioni di motori Brushless:

- applicazioni con rapide accelerazioni e frenate o inversioni del moto;
- applicazioni di posizionamento rapido e accurato;
- applicazioni di regolazione fine e controllo di movimenti interpolati per macchine utensili;
- controlli di tiro e di forza con estrema precisione e linearità;
- generazione di potenza con efficienza media elevata, maggiore del 95%.

Di seguito una tabella riassuntiva 6.4 delle caratteristiche dei diversi motori.

CARATTERISTICA TECNICA	MOTORE CONTINUA DC	MOTORE ASINCRONO AC	MOTORE BRUSHLESS
INERZIA DEL ROTORE	alta	alta	bassa
COPPIA DI STALLO	alta	bassa	alta
RAPPORTO COPPIA max/min	circa 3	circa 2	fino a 5
EFFICIENZA	media	media	alta
CONTROLLO	semplice	semplice	più complicato

Tabella 6.4 : Caratteristiche dei motori elettrici.

Poiché nella specifica applicazione sono richiesti una gestione accurata della velocità di movimentazione e un controllo preciso nel posizionamento del banco di prova, il motore più adatto è il motore Brushless.

Una volta individuata la tipologia di motore, ne sono state individuate le caratteristiche idonee.

Nella tabella 6.5sono riportati i dati tecnici del motore Brushless (OMRON) scelto.

	withoutmotor	with motor	drive/motor data	parameter ratio against drive/motor data
max speed[r/min]	6000		6000	100%
max torque [Nm]	1,2	1,8	8,4	21,61%
effectivetorque[Nm]	1,2	1,8	2,4	35.29%
inertia[kg m^2]	0,00011	0,00032	9,4	0,53
power of regeneration [W]	98,4	126,8		external R required

Figura 6.5 : Tabella riassuntiva dei dati tecnici del motore Brushless Omron.

In figura 6.7 sono raffigurate le viste del motore Brushless Omron.

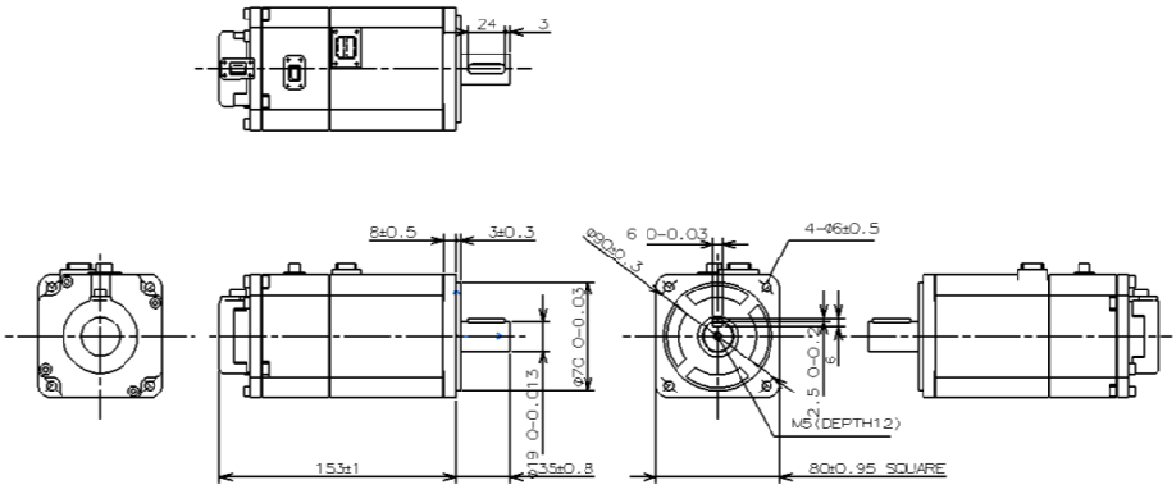


Figura 6.7 : Motore Brushless Omron.

6.4 - L'encoder

Se da un lato i motori brushless evitano l'uso delle spazzole e del commutatore, che possono influenzare l'affidabilità della macchina, dall'altro è necessario un sensore di posizione, l'encoder.

Il motore ha pertanto incorporato un encoder rotativo.

L'encoder è un dispositivo elettromeccanico che converte la posizione angolare meccanica del suo asse rotante in posizione angolare elettrica sotto forma di un segnale elettrico numerico digitale o analogico. Collegato ad opportuni circuiti elettrici e con appropriate interfacce meccaniche, l'encoder è in grado di misurare spostamenti angolari, movimenti rettilinei e circolari nonché velocità di rotazioni e accelerazioni.

I modelli più utilizzati sono gli encoder ottici, essi sfruttano la tecnica fotoelettrica e possono essere di tipo incrementale o di tipo assoluto.

Il tipo incrementale è costituito da un disco trasparente sulla cui superficie sono stati ricavati numerosi settori opachi ugualmente distanziati e da un rilevatore ottico che provvede a rilevare il diverso comportamento ottico della superficie del disco. Quando il disco viene messo in rotazione si generano una serie di impulsi ottici che vengono rilevati e convertiti da un circuito elettronico.
Un encoder di tipo assoluto è costruttivamente e funzionalmente identico a un encoder incrementale.
La differenza sta nel tipo di disco utilizzato che riporta un codice che viene ottenuto, come per l'encoder incrementale, sfruttando il contrasto tra aree trasparenti e opache sul disco stesso. La discriminazione degli impulsi viene effettuata attraverso la lettura di tale codice.

L'encoder assoluto è il più adatto all'applicazione in quanto oltre ad essere utilizzati per gli stessi fini cui sono destinati gli encoder incrementali, permettono anche il posizionamento indipendente da sistemi ausiliari esterni di supporto.
Il sistema assoluto trasforma la posizione dell'albero motore in un segnale codificato univoco per ogni posizione all'interno dell'angolo giro ed all'interno di un predefinito numero di giri.

È stato necessario definire un'interfaccia elettronica per l'alimentazione.
Essa viene utilizzata sia per l'alimentazione dell'encoder sia per la trasmissione dei dati tra l'encoder ed il sistema di elaborazione dati esterno (PLC).

6.5 - Il riduttore PE II 090-010 / OMRON R88M - 1M75030T

I riduttori di velocità sono ingranaggi situati tra il motore e la macchina che deve essere movimentata: il loro scopo è quello di limitare la velocità di trasmissione della potenza.
La funzione principale del riduttore, che è un organo di trasmissione, è quella di far si che la velocità e le coppie dei motori siano compatibili.
Caratteristica fondamentale è, dunque, il rapporto di trasmissione: in pratica, la velocità del motore è nettamente superiore rispetto alla velocità del carico, mentre la coppia sull'asse del motore è notevolmente più bassa rispetto all'asse del carico.
In figura 6.8 è raffigurato il riduttore scelto.
Esso è dotato di una flangia per l'attacco al motore ed è caratterizzato da un'elevata silenziosità, elevata precisione, ottime capacità di carico radiale e assiale e un rapporto di riduzione 1:7.

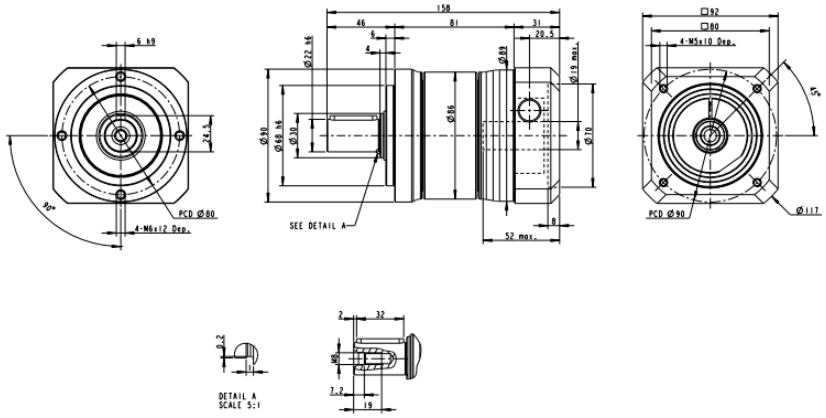


Figura 6.8 : riduttore PE II 090-010 / OMRON R88M - 1M75030T.

6.6 - Piastrina di collegamentotra piastrone-martinetto

Al fine di collegare il piastrone ai martinetti, sono staterealizzate4 piastrine di collegamento.
Ciascuna piastrina di collegamento prevede un foro di diametro 47 mm che ospiterà la bussola guida del martinetto, 4 fori aventi diametro 10 mm per il collegamento della piastrina al piastrone ed altri 4 fori aventi diametro 10 mm per il collegamento della piastrina alla base del martinetto.
L'altezza della piastrina di fissaggio è stata scelta tenendo conto dell'ingombro della bussola.

In figura 6.9 sono riportate le dimensioni della piastrina.

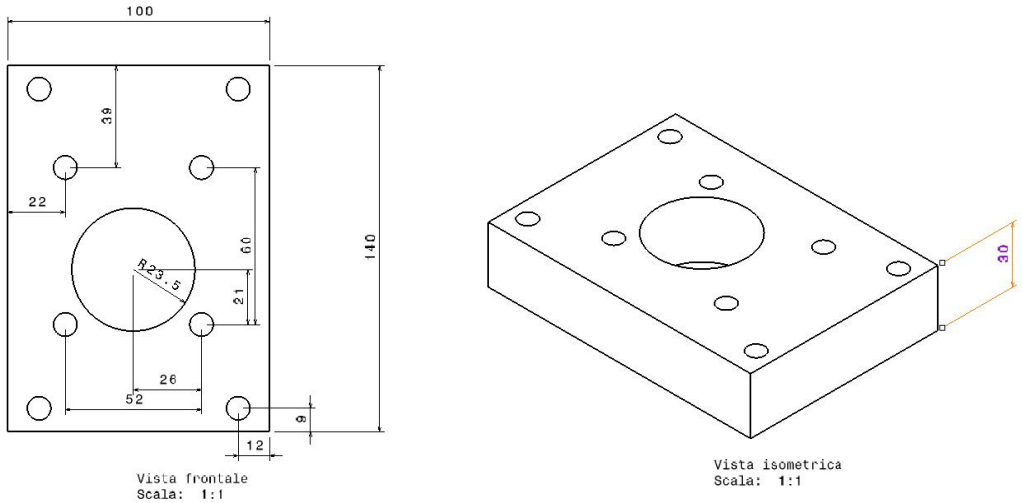


Figura 6.9 : Dimensioni della Piastrina di collegamento tra piastrone-martinetto.

6.7 - Rinvio angolare di precisione

Per trasmettere il moto rotatorio tra l'albero del riduttore (8) e i due alberi di trasmissione (5), disposti perpendicolarmente tra loro, occorre inserire un rinvio angolare di precisione (9).
Tale rinvio angolare presenta un ingresso, lato riduttore, e due uscite, lato trasmissione.
Le figure 6.10 e 6.11 mostrano le dimensioni del rinvio e i versi di rotazione.

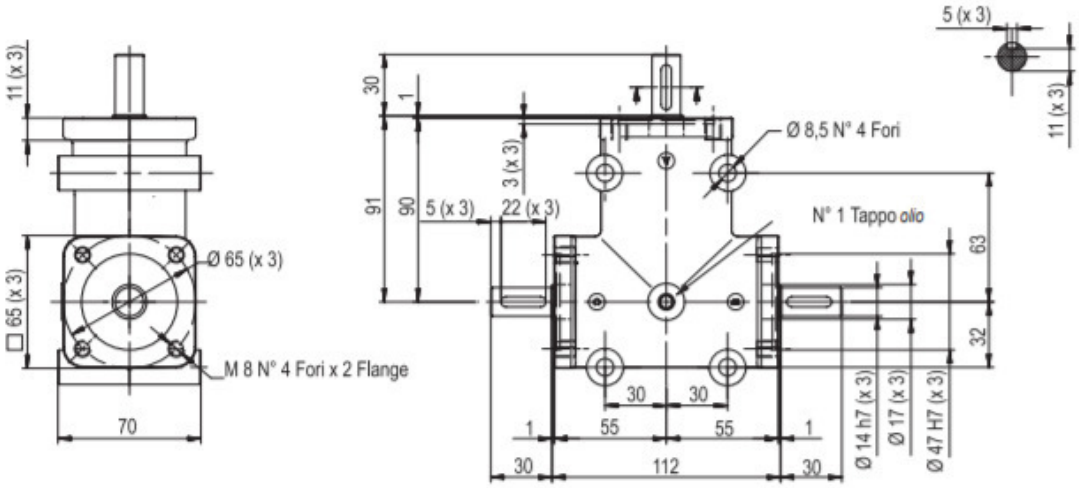


Figura 6.10: Ingombri del rinvio angolare.

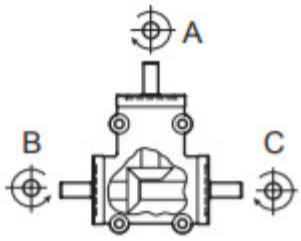


Figura 6.11: versi di rotazione degli alberi del rinvio angolare.

Sulla base del disegno sono stati progettati degli elementi di accoppiamento al fine di adattare il rinvio di precisione al riduttore e agli alberi di trasmissione.

Per quanto riguarda l'adattamento con il riduttore, sono stati progettati tre elementi.
Una piastra avente un foro da 32mm passante, 4 fori ribassati da 8 mm per il fissaggio al rinvio angolare, 4 fori passanti M8 per il fissaggio alla flangia descritta di seguito.
Una flangia con 8 fori M8 e due fori di diametro 32 mm. La sua forma è stata scelta secondo considerazioni di montaggio, in modo che fosse semplice, che non appesantisse eccessivamente la struttura e in modo tale che ospitasse l'elemento necessario alla trasmissione della rotazione. Quest'ultimo presenta le sedi per l'inserimento degli alberi (mozzi); il collegamento albero-mozzo avviene mediante linguetta arrotondata.
In figura 6.12 è rappresentata la piastrina, in figura 6.13 è rappresentata la flangia di fissaggio e in figura 6.14 è rappresentato l'elemento con i mozzi.

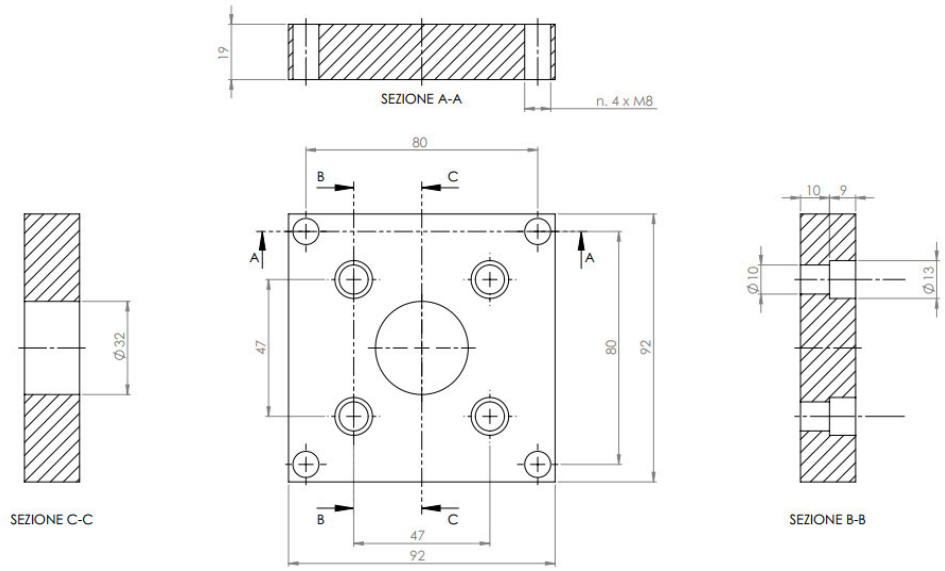


Figura 6.12: Piastrina da fissare al rinvio angolare.

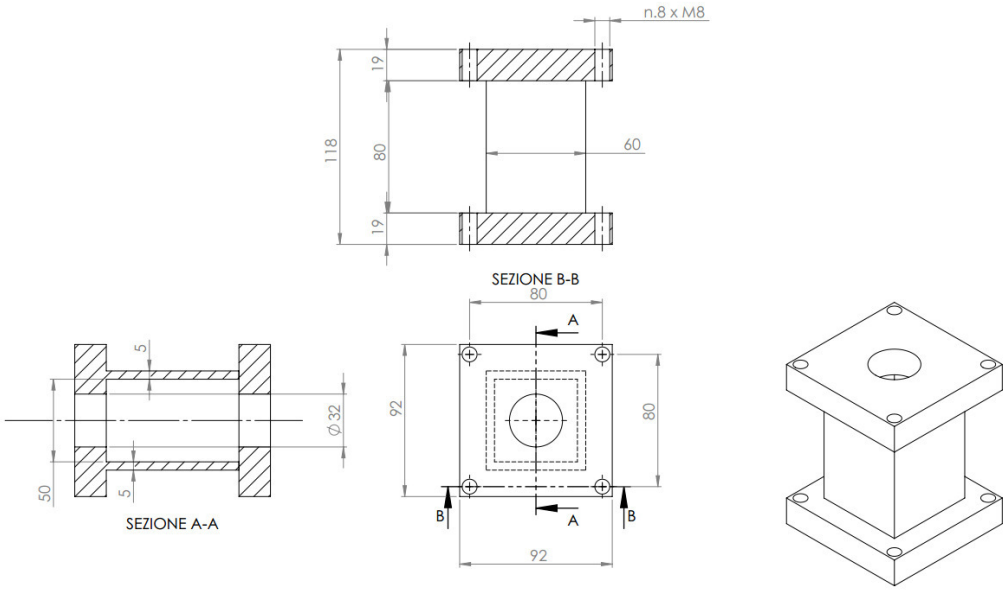


Figura 6.13 : Flangia di accoppiamento.

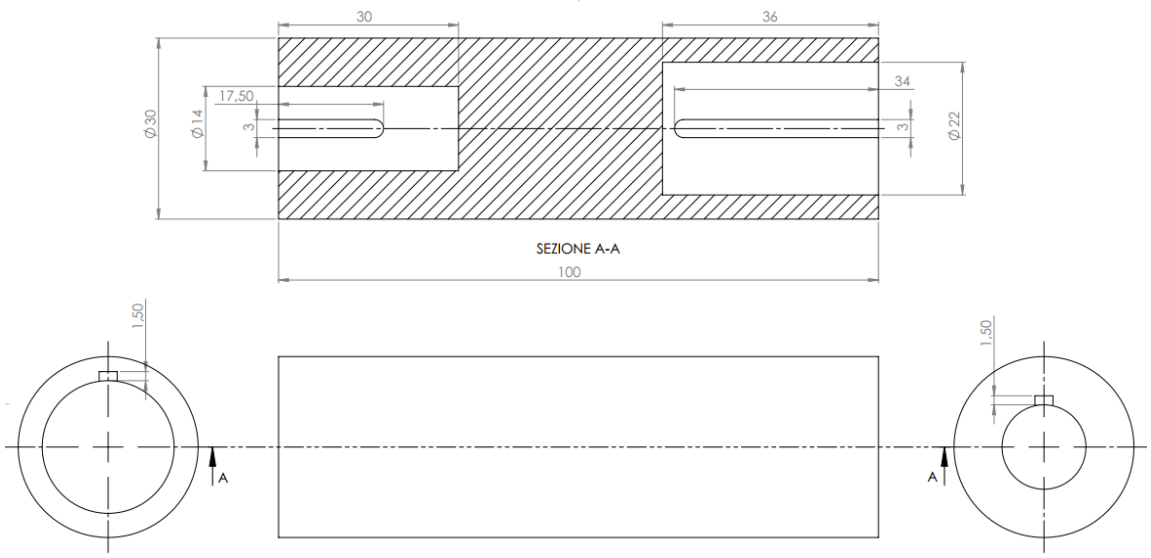


Figura6.14-: Elemento con le sedi per l'inserimento dei mozzi.

Per quanto riguarda l'adattamento con gli alberi di trasmissione (5) sono stati progettati due elementi identici aventi da un lato un mozzo per l'accoppiamento con l'albero del rinvio e dall'altro un albero con la sede per la linguetta per il collegamento con l'albero di trasmissione.
La figura 6.15 ne mostra il disegno quotato.

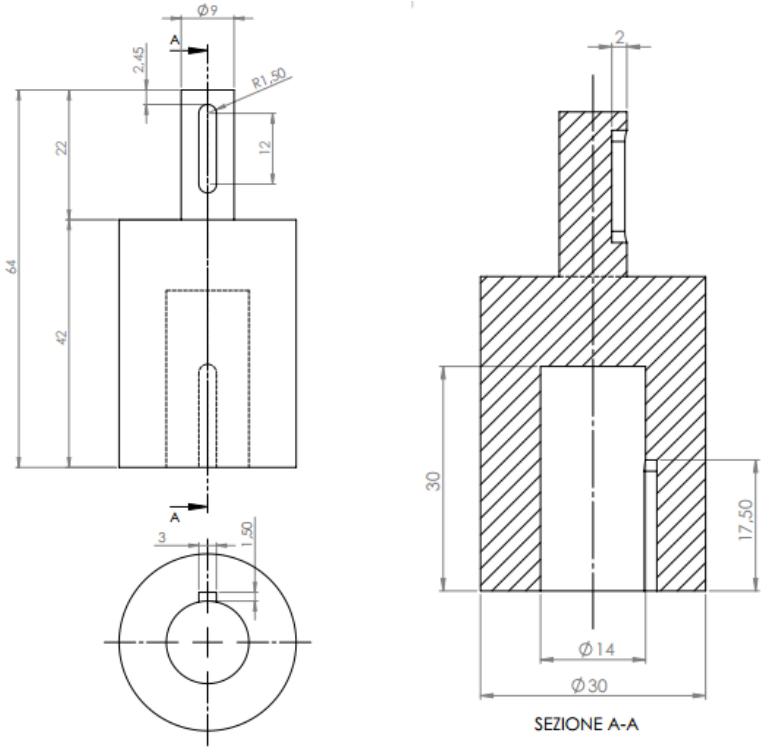


Figura 6.15: Elemento di collegamento rinvio angolare-albero di trasmissione.

Capitolo 7

In questo capitolo verrà presentata l'installazione meccanica degli organi di trasmissione e degli elementi accessori del banco e successivamente verrà trattato il collegamento elettrico necessario alla movimentazione.

7.1 - Installazione meccanica

In figura 7.1 è raffigurato il banco di prova finale provvisto di tutti gli organi di trasmissione edelementi accessori.

Figura 7.1: Banco di prova per ISF.

1	Motore Brushless Omron
2	Riduttore 1:7 del motore
3	Rinvio angolare di precisione 1:1
4	Rinvio angolare 1:1
5	Albero di trasmissione
6	Giunto elastico a settori
7	Albero di trasmissione
8	Martinetto 1:30
9	Bloccaggio del martinetto al piastrone di base
10	Utensile deformatore
11	Premilamiera
12	Punzone

Per effettuare un corretto assemblaggio del motore Brushless sul riduttore è assolutamente indispensabile effettuare un esatto allineamento fra albero motore e albero cavo del riduttore. Eventuali vibrazioni ed irregolarità di rotazione causerebbero allineamenti imprecisi e anomalie di funzionamento oltre che la rottura dell'albero motore.
Pertanto, è stato necessario controllare, in fase di inserimento dell'albero del motore all'interno dell'albero cavo del riduttore, la perpendicolarità e la concentricità della flangia del riduttore rispetto all'albero cavo.
Inoltre, poiché il montaggio del motore è a sbalzo, al fine di evitare flessioni del medesimo, è stato previsto il bloccaggio al piastrone di base.
Il riduttore del motore è accoppiato al rinvio di precisione mediante un albero di collegamento. Sia il riduttore che il rinvio in corrispondenza dell'attacco presentano due mozzi, per cui l'albero di collegamento è provvisto di linguetta su entrambi i lati. Quest'ultima garantisce il corretto centraggio di albero e mozzo, che una volta in rotazione risultano coassiali e danno luogo a vibrazioni assai limitate. Le dimensioni della linguetta sono normate dalla UNI 6604. Pertanto, base e altezza della sezione rettangolare sono state scelte in funzione del diametro dell'albero.
Inoltre, il rinvio di precisione è fissato al piastrone di base mediante una piastrina di bloccaggio.

Il rinvio di precisione ha la tipica forma a T ed è collegato in entrambe le direzioni a due alberi di trasmissione. Questi ultimi sono accoppiati ai rinvii angolari.
Il collegamento tra martinetti e rinvii angolari è realizzato attraverso i giunti elastici a settori che smorzano eventuali sovrasollecitazioni che potrebbero nascere durante il funzionamento, attutiscono le vibrazioni e compensano allineamenti imperfetti.
I restanti due martinetti sono collegati attraverso una coppia di giunti e un albero di trasmissione.

7.2 - Installazione elettrica

Il quadro elettrico, raffigurato nella 7.2, è stato posizionato in prossimità del sistema di movimentazione, in posizione verticale avendo cura di controllare la buona messa a terra dell'impianto generale. La macchina è provvista di messa a terra in ogni sua parte metallica.

Figura 7.2 :Layout del pannello elettrico.

Attraverso il quadro elettrico è possibile gestire il sistema di ascensione e discensione del banco.

Esso è provvisto di:

- *pannello di gestione*, attraverso il quale è possibile gestire l'impianto e svolgere le operazioni manualmente attraverso appositi PLS.Il pannello è collegato al PLC.

- *PLC*, sistema a logica programmabile in grado di realizzare un insieme di operazioni, definite da comandi facilmente modificabili. Il programma di gestione risiede nella memoria del PLC.
  Grazie al PLC è possibile interfacciare il sistema alla macchina CNC.
  Per poter controllare il sistema, il PLC deve acquisirne lo stato istante per istante ed in base alle istruzioni scritte nella propria memoria, determinare se devono o meno essere apportate delle modifiche allo stato attuale delle uscite. Per acquisire lo stato attuale del processo vengono collegati agli "ingressi" del PLC tutte quelle apparecchiature che possono fungere da "sensori" del sistema ("datori" di segnali). Per "attuare" quanto è stato determinato dall'elaborazione del programma, alle uscite del PLC sono collegate tutte quelle apparecchiature atte a realizzare quanto necessario per l'esecuzione del processo.

- *azionamento*, componente che permette l'interfacciamento tra il motore e il plc. Nell'azionamento risiedono tutti i dati di programmazione del motore.

Pannello di gestione, PLC e azionamento sono collegati , tramite switch , tra loro. Tramite software esterno (Sisma Studio) è possibile, con PC,creare il programma di gestione dell'insieme.

L'encoder assoluto incorporato nel motore, legge la posizione di quest'ultimo ed, essendo di tipo "assoluto" ha il vantaggio di mantenere in memoria il valore anche se viene tolta la corrente.

Poiché la macchina CNC utilizzata dall'azienda ha un protocollo di comunicazione complesso, l'interfacciamento tra di essa e il banco richiede tempi lunghi. Pertanto questo obiettivo verrà lasciato come sviluppo futuro.

7.3 - Gestione del pannello di controllo

Tramite i PLS di JOG + e JOG – è possibile movimentare il particolare da lavorare sino ad ottenere il punto di Zero meccanico (sfioramento con l'utensile della fresa). Questo può variare a seconda del tipo di particolare (dimensioni) ed utensile montato sulla testa di lavorazione.
Da pannello di controllo è possibile selezionare la velocità di accostamento JOG.
Un limitatore di coppia integrato nell' azionamento permette di salvaguardare la meccanica del motore di movimentazione.

Una volta che si è raggiunta la posizione desiderata si preme da pannello HMI il PLS “INIBIT zero”.Sul pannello HMI la casella di zero segnerà la quota “0” macchina.
A questo punto si può scegliere se lavorare in modalità ASSOLUTA o RELATIVA.
In modalità assoluta: da pannello si può selezionare la velocità di movimento e la quota da raggiungere (in positivo o negativo rispetto allo “0” macchina)
Premendo il PLS della funzione il motore sposta il portale alla quota desiderata.
La velocità di spostamento e la quota di movimento sono visualizzabili sul Display.
Al raggiungimento della quota impostata il motore si arresta in attesa di ricevere la successiva istruzione.
In modalità relativa: da pannello si può selezionare la velocità di movimento e la quota di spostamento (in positivo o negativo rispetto allo “0” macchina)
Premendo il PLS della funzione il motore sposta il portale della quota impostata
La velocità di spostamento e la quota di movimento sono visualizzabili sul Display.
Al raggiungimento della quota impostata il motore si arresta in attesa di ricevere la successiva istruzione.

7.4 - Messa a punto

E' stato necessario verificare che, impostando una idonea velocità lineare e lo spostamento verticale desiderato, il sistema lamiera/premilamiera fosse movimentato del medesimo spostamento.

Velocità rotazione del motore: 3000 rpm=314.1rad/s

Passo vite: 4mm

R = 0.637 mm/rad

Rapp. riduzione complessivo: 1/210

Velocità lineare: 0.952 mm/s

Per realizzare la sincronizzazione con la velocità della fresa è necessario definire e impostare i seguenti parametri.

Vel. max [mm/s]
Accel. max [mm/s^2]
Decel.max[mm/s^2]
Distanza percorsa per rotazione motore [mm/rev]

Capitolo 8

In questo capitolo sono riportate le prove svolte sulla lamiera metallica.

Lo scopo di tali prove è stato essenzialmente quello di testare l'adeguatezza del macchinario progettato.

Le prove sono state svolte sulla lega di Alluminio 6000, essendo una delle leghe maggiormente utilizzate dall'azienda per la realizzazione di parafanghi, fiancate, padiglioni e altre parti della scocca dell'autoveicolo.
Inoltre, poiché non esistono articoli sperimentali significativi su prove condotte utilizzando lamiere in lega di Alluminio 6000 , l'azienda ha deciso di intraprendere uno studio sul comportamento di tale materiale.
Per cui, al fine di capire se la progettazione del sistema fosse valida, è stata impostata una campagna sperimentale, svolgendo le prime prove utilizzando come riferimento i parametri di processo considerati nello studio effettuato precedentemente .

8.1-Lega di alluminio 6016

E' una classe di leghe a tre componenti Alluminio/Magnesio/Silicio, che ha un rilevante impiego nel settore aerospaziale. Il silicio insieme al magnesio può dar luogo al composto Siliciuro di Magnesio Mg_2Si che forma un eutettico con l'Alluminio a 595°C (il Mg2Si è pari al 12.2%). I precipitati di Magnesio si collocano ai bordi grano causando una maggiore suscettibilità alla rottura intergranulare e alla corrosione. La precipitazione del composto Mg2Si nella soluzione di Alluminio, dopo l'invecchiamento causa una maggiore resistenza della lega, pur mantenendone inalterata la duttilità.

Le caratteristiche meccaniche che si ottengono sono abbastanza buone, anche se inferiori a quelli delle leghe 2000 e 7000.
Le leghe serie 6000 sono definite a media resistenza meccanica, tuttavia presentano ottime caratteristiche di resistenza alla corrosione.
La ragione principale del notevole impiego risiede nel fatto che queste leghe presentano una buona formabilità e sono ottimamente lavorabili plasticamente in termini di estrudibilità e laminabilità. Sono anche perfettamente saldabili, caratterizzate da un elevato rapporto resistenza/peso, elevate conducibilità termica ed elettrica, non-tossicitàe si prestano bene alle lavorazioni per asportazione di truciolo.

Di seguito vengono riportate le composizionidi una lamiera in lega di alluminio 6016avente 2 mm e 1.5 mm di spessore.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1.1	0.25	0.06	0.13	0.49	0.02	0.01	0.02

SNERVAMENTO [N/mm$^{2]}$	CARICO DI ROTTURA [N/mm$^{2]}$	ALLUNGAMENTO A 50 %	SPESSORE [mm]
113	232	40	2

(a)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
1.13	0.16	0.08	0.07	0.36	0.01	0.01	0.02

SNERVAMENTO [N/mm$^{2]}$	CARICO DI ROTTURA [N/mm$^{2]}$	ALLUNGAMENTO A 50 %	SPESSORE [mm]
105	209	27	1.5

(b)

Figura 8.1: Scheda tecnica Alluminio lega 6000 per una spessore di 2 mm (a) e 1.5 mm (b).

8.2 -Le prove

In letteratura è riportato che i parametri che maggiormente influenzano il processo sono:

- lo spessore della lamiera:non deve essere troppo sottile al fine di garantire un corretto apporto di materiale nella zona della deformazione. Un aumento dello spessore migliora la formabilità e la sua influenza è descritta con una legge sinusoidale;

- l'incremento verticale in Z: un suo aumento deforma di più la lamiera;

- la velocità del mandrino: al suo aumento avviene riscaldamento locale e riduzione dell'attrito tra utensile e lamiera, entrambi fattori positivi per la formabilità della lamiera;

- il diametro dell'utensile: se è piccolo, la deformazione rimane localizzata, al contrario se è grande la deformazione risulta più estesa e il processo assomiglia al più tradizionale stampaggio.

Nell'ambito di questa tesi verrà presa in considerazione l'influenza che ha lo spessore della lamiera sulla lavorazione di incrementalsheetforming.
Per cui le prove sono state impostate considerando due spessori differenti (2mm e 1.5mm) lasciando inalterati gli altri parametri.

Piano di prova_IncrementalSheetForming TPIF Full Die

1) Posizionamento del foglio metallico all'interno del premilamiera.

2) Serraggio delle viti a 5 N/m mediante chiave dinamometrica.

3) Posizionamento del sistema premilamiera/lamiera tramite i PLS di JOG + e JOG – sino ad ottenere il punto di zero meccanico (contatto della lamiera con punzone).

4) Azzeramento fresa(contatto utensile /lamiera).

5)Inizio della lavorazione e contemporanea discesa del banco.

Lamierametallica:

- Materiale: lega Alluminio6016
- Spessore: 1.5 e 2 mm
- Dimensioni : 1000x740 mm
- Forma: spezzone con asole

Precedentemente la lamiera era stata pensata con delle asole ai lati, figura 8.2.
Poiché tale sistema ad asole permette di ottenere la planarità necessaria a evitare un eventuale gioco tra le barre mantenendo all'interno del premilamiera uno spessore uniforme pari allo spessore della lastra metallica, ne è stata mantenuta la geometria.
In questo modo è possibile avvicinare la posizione dei fori delle viti al bordo più interno del premilamiera, senza dover forare la lamiera: ciò, insieme alla planarità della struttura, permette di contrastare la tendenza all'apertura delle barre sotto lo sforzo di lavorazione e la conseguente apertura del premilamiera.
Le asole sono state ottenute effettuando un taglio laser dello spezzone di lamiera.

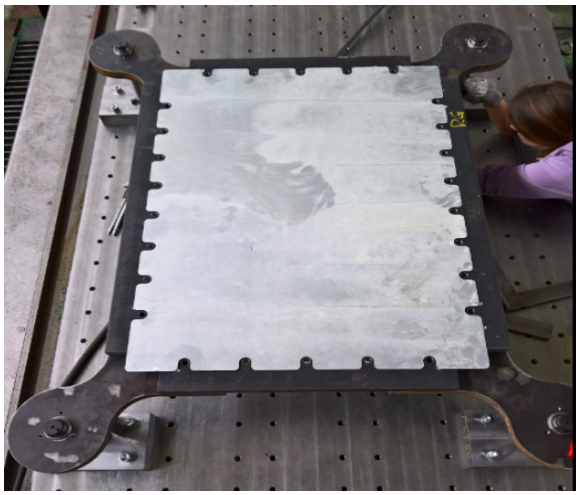


Figura 8.2: Sistema ad asole della lamiera.

Punzone:

- Dimensioni: 800x980 mm
- Altezza: 100 mm
- Fuorifigura: 167mm
- Materiale: resinaepossidica

Il vantaggio dell'utilizzo di un punzone d'appoggio full die (figura 8.3) riduce il problema del ritorno elastico della lamiera, al contrario di quanto avviene nello SPIF in cui l'assenza del supporto inficia sull'accuratezza geometrica del pezzo.

Figura 8.3 : Punzone.

Utensile:

- Forma: semisferica
- Diametric: 20 mm
- Materiale: C40 temprato

Figure 8.4: Testdell 'tensile.

Percorso elicoidale:

Il metodo migliore per ottenere una buona accuratezza geometrica è quello di utilizzare traiettorie dell'utensile ottimizzate.
Poiché la tecnologia ISF è relativamente recente, non esistono ancora dei software dedicati per l'incrementalsheetforming. Per cui è difficile simulare correttamente il processo.

Investigando i diversi tipi di percorsi disponibili al CAM, il percorso elicoidale con incremento costante è quello più adatto a soddisfare le esigenze dell' ISF.
Infatti, la traiettoria elicoidale riduce il rischio di creare una zona preferenziale di innesco rottura e in tal modo le sollecitazioni indotte dall'avanzamento lungo z dell'utensile si distribuiscono su una linea più estesa e non perpendicolare alla direzione di stiramento del materiale.

Tale percorso utensile è stato adottato per entrambe le prove.

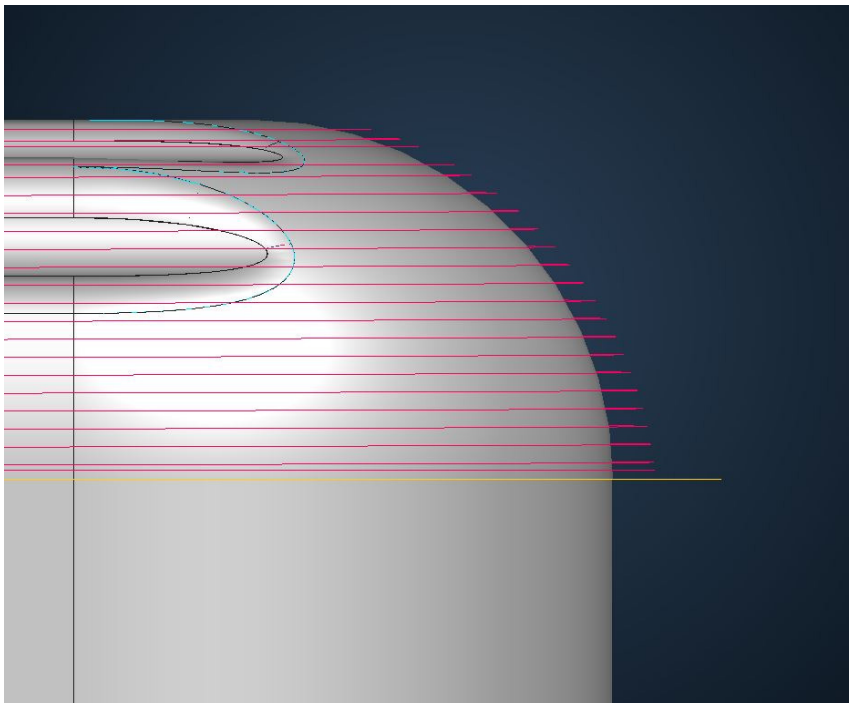


Figura 8.5 : Traiettoria elicoidale incremento costante.

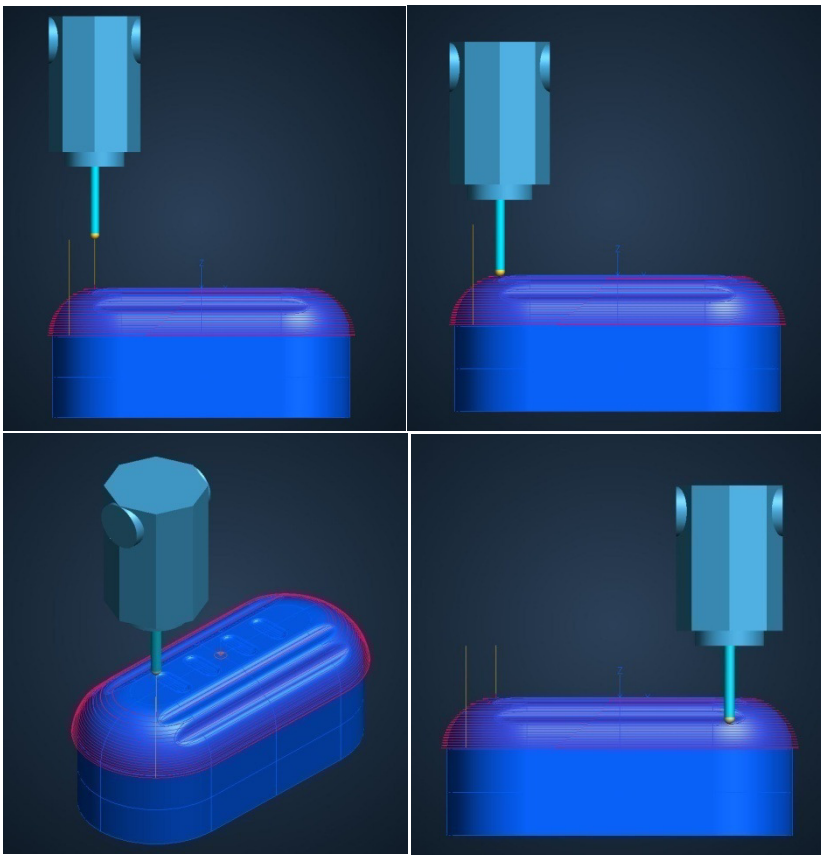


Figura 8.6 : CAM, simulazione della lavorazione.

Condizioni di serraggio:

La formabilità della lamiera risulta essere fortemente influenzata dalle condizioni di serraggio della lamiera. Quindi esiste una forte correlazione tra la lavorabilità e la possibilità di scorrimento della lamiera durante la lavorazione. E' necessario garantire un apporto continuo di materiale affinché sia scongiurata la rottura del pezzo ed è importante scegliere correttamente la coppia di serraggio.
Dallo studio precedente era emerso che con un serraggio di 5 Nm la lamiera riusciva a scorrere all'interno del premilamiera, anche se non apprezzabilmente. Infatti tracciando la posizione iniziale del foglio metallico, come mostrato in figura 8.7, eventuali scorrimenti sono stati valutati osservandone lo spostamento di quest'ultimo.
Queste condizioni di serraggio sono state adottate per entrambe le prove.

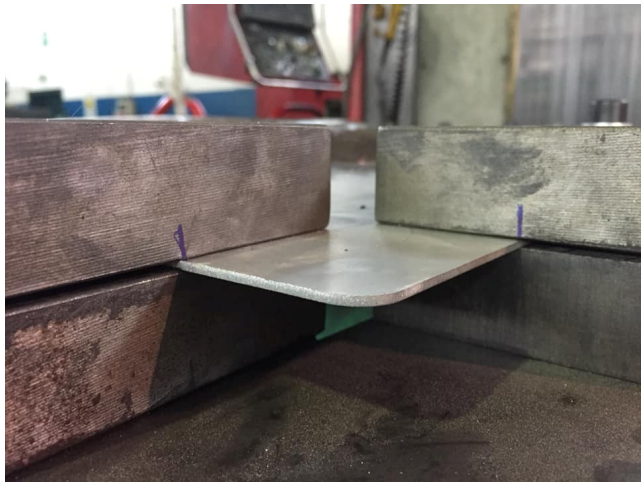


Figura 8.7 :Posizione iniziale del foglio metallico.

Lubrificazione:

Il lubrificante gioca un ruolo importante nella lavorazione. Esso influenza la finitura della superficie, lo stato tensionale della lamiera e l'eventualità di rotture. Inoltre, consente il corretto raffreddamento dell'utensile .

Il migliore compromesso tra lubrificazione e raffreddamento è stato ottenuto preparando la superficie della lamiera con uno strato di grasso di rame e, per garantire il raffreddamento dell'utensile, è stata utilizzata una miscela di acqua (80%) e olio (20%).

La condizione di lubrificazione sopra descritta è stata adottata per entrambe le prove.

Figura 8.8: Lubrificazione della lamiera.

Parametri di lavoro fresa:

Per quanto riguarda la velocità di avanzamento si è deciso di utilizzare il valore che nelle prove precedenti aveva dato i risultati migliori.
In generale al crescere della velocità di avanzamento del mandrino è possibile assistere ad una riduzione dell'accuratezza superficiale. Pertanto è stato utilizzata una velocità di avanzamento pari a 2000 mm/min ed è stata mantenuta costante in tutte e due le prove.

Prova 1

- *PARAMETRI DEL PROCESSO*

Percorso:	**elicoidale e incremento Z costante**
Incremento:	0,2 mm
Velocità di avanzamento:	2000 mm/min
Velocità di rotazione:	1500 rpm
Serraggio:	5Nm x vite

Spessore lamiera	2 mm
Lubrificante:	emulsione acqua-olio / grasso di rame
Velocità di discesa del banco:	0.01 mm/s

- *CONCLUSIONI*

Con questa prima prova si è dimostrato, innanzitutto, l'adeguatezza del sistema progettato per la lavorazione di Incremental Sheet Forming.

In figura 8.9 è riportato il pezzo formato.

Figura 8.9 : Pezzo finale formato.

Su una profondità in asse zeta di 34.26 mm, la superficie lavorata risulta integra e con discreta finitura superficiale ad eccezione della zona delle bugne laterali *1* e *2simm*in cui sono presenti dei solchi. Infatti, le bugne laterali sono elemento di forte sollecitazione della lamiera.
L'innesco di rottura si verifica in prossimità delle bugne *3* e *4simm*.In queste zone, il contatto utensile-lamiera aumenta, i punti di contatto aumentano e di conseguenza aumenta la sollecitazione della lamiera.

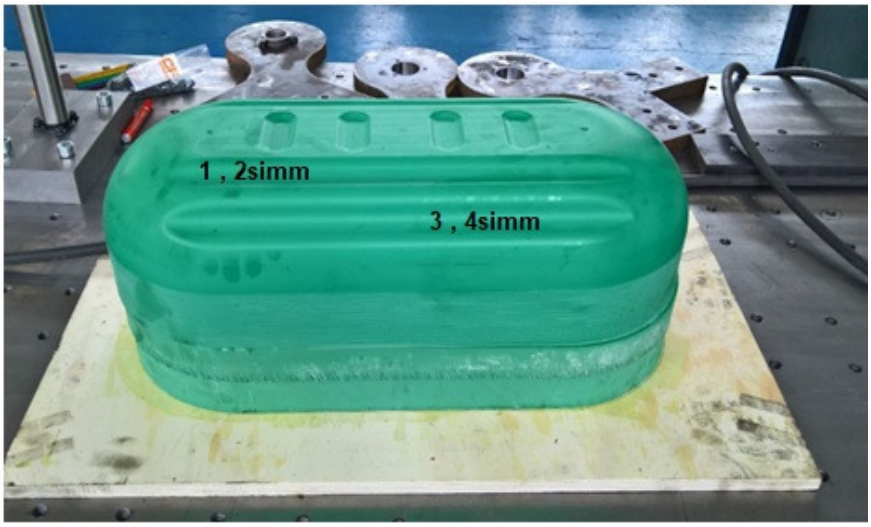


Figura 8.10 : Indicazione numerica delle bugne.

Figura 8.11: Innesco rottura nel pezzo e finitura sub-ottimale.

La superficie interna del profilo, rispetto a quella esterna, presenta una superficie con finitura peggiore (figura 8.12), sono più evidenti i solchi soprattutto in corrispondenza dei raccordi delle bugne.

Figura 8.12: Superficie interna del profilo.

Il tempo necessario per realizzare il pezzo (fino a rottura) è stato indicativamente di 2h e mezzo, un tempo decisamente inferiore a quello che avrebbe impiegato un battilastra per raggiungere la stessa profondità.

Prova 2

- *PARAMETRI DEL PROCESSO*

Percorso:	**elicoidale e incremento Z costante**
Incremento:	0,2 mm
Velocità di avanzamento:	2000 mm/min
Velocità di rotazione:	1500 rpm
Serraggio:	5 Nm x vite

Spessore lamiera	1.5 mm
Lubrificante:	emulsione acqua-olio / grasso di rame
Velocità di discesa del banco:	0.01 mm/s

- *CONCLUSIONI*

Su una profondità in asse zeta di 26.7 mm, la superficie lavorata risulta integra e con una finitura superficiale migliore rispetto alla prova precedente.
Nella zona delle bugne laterali *1* e *2simm* sono comunque evidenti i segni lasciati dal passaggio dell'utensile ma, rispetto alla prova precedente hanno profondità inferiore .
L'innesco di rottura si verifica in prossimità delle bugne *3* e *4simm* ma8 mm prima rispetto alla precedente prova.

Figura 8.12: Pezzo finale formato.

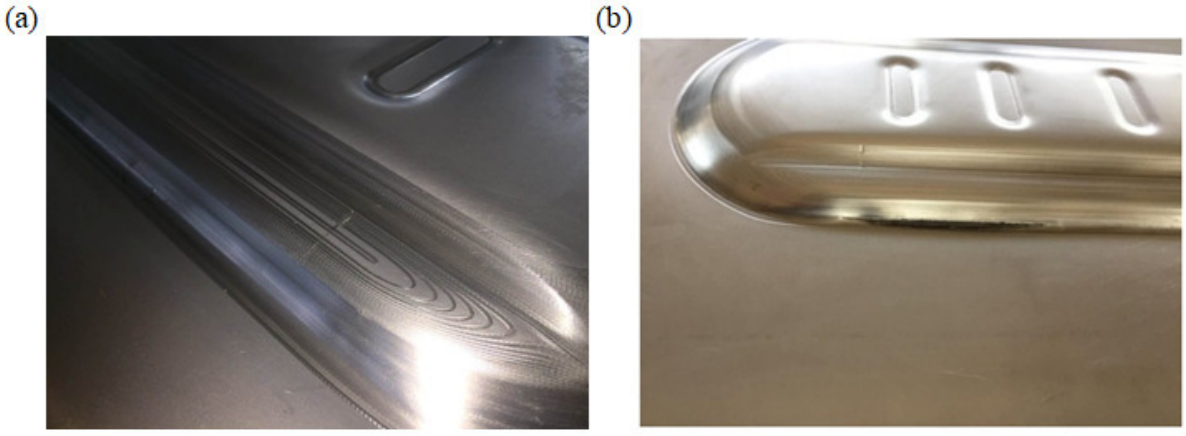


Figura 8.13: Innesco rottura nel pezzo e finitura sub-ottimale (a) e (b).

Anche per la seconda prova, la superficie interna del profilo, rispetto a quella esterna, presenta una superficie con finitura peggiore e sono più evidenti i solchi soprattutto in corrispondenza dei raccordi delle bugne.

Il tempo necessario per realizzare il pezzo (fino a rottura) è stato indicativamente di 2h 20 min, un tempo decisamente inferiore a quello che avrebbe impiegato un battilastra per raggiungere la stessa profondità.

Conclusioni

Nell'ambito di questo progetto di tesi ci si è posto come obiettivo la progettazione di un banco di prova innovativo che consentisse di realizzare una formatura positiva del tipo TPIFFD.
Si è dimostrato come sia possibile automatizzare un banco di prova per ISF , i cui carichi in gioco sono stati calcolati sulla base di studi precedenti sull'argomento.
Si è cercato di concepire un banco modulabile, in quanto in questo modo sarebbe stato possibile realizzare pezzi di varie dimensioni.
Nella scelta del sistema di movimentazione sono state valutate le soluzioni più appropriate presenti sul mercato industriale, valutandone la fattibilità in termini economici e in termini di soddisfacimento delle esigenze richieste.
Individuata la movimentazione, è stato delineato lo schema del banco di prova cercando di garantire una simmetria strutturale evitando sollecitazioni e impuntamenti eccessivi, che avrebbero complicato lo studio.
In seguito sono stati individuati e scelti gli elementi meccanici necessari alla movimentazione del banco, analizzando i vari modelli e approfondendo l'elemento chiave del progetto: il martinetto meccanico.
Successivamente si è provveduto a studiare come far funzionare e controllare il sistema delineato, cercando di ottenere un buon interfacciamento tra i blocchi software e hardware.
E' stato allestito e montato il banco facendone la messa a punto, il collaudo e interfacciando fisicamente i segnali hardware con i segnali software.
Infine sono state condotte delle prove sulla lega di Alluminio 6000, essendo una delle leghe maggiormente utilizzate dall'azienda.
Lo scopo di tali prove è stato essenzialmente quello di testare l'adeguatezza del macchinario progettato.
Per cui sono state impostate due prove sperimentali, su fogli di lamiera di differente spessore.
L'obiettivo è stato quello di valutare come influisce lo spessore, a parità degli altri parametri, sulla lavorazione di ISF.
E' emerso che all'aumentare dello spessore della lamiera migliora la formabilità e aumenta la profondità di lavorazione, coerentemente con la una legge sinusoidale riportata in letteratura.

Concludendo, la progettazione del banco soddisfa tutte le aspettative e i risultati delle prove svolte mostrano come il processo ISF possa effettivamente costituire una soluzione economica ed energeticamente efficiente per la produzione prototipale.

Sviluppi futuri

Il "know how" sulla tecnologia di Incrementalsheetforming è ad oggi limitato. Sono poche le informazioni e gli studi condotti sia sul macchinario che sui parametri che intervengono nel processo.

Uno dei limiti nell'applicazione su scala industriale dell'ISF è l'imprecisione geometrica a cui sono soggetti i componenti a causa del ritorno elastico e plastico che si manifesta nelle zone che circondano l'area di deformazione. Quindi nel futuro si potrebbe cercare di determinare la percentuale di ritorno elastico e prevedere un riscaldamento durante la lavorazione. Infatti, l'applicazione di calore permetterebbe di controllare le proprietà del materiale con cui viene realizzato il componente.

Inoltre,poiché il serraggio della lamiera sul telaio premilamiera è un parametro sensibile, si potrebbe determinare la reale influenza delle condizioni di serraggio sulla lavorabilità attraverso delle analisi FEM.

Un altro sviluppo futuro potrebbe essere quello di investigare il comportamento di materiali innovativi e funzionali alle esigenze del mercato industriale.

In conclusione l'ISF presenta grandi potenzialità in termini di tempo, di semplicità ed economicità.

Lo scoglio da superare per un'applicazione su larga scala industriale che lo renda effettivamente competitivo rispetto al classico stampaggio a caldo è dato dalle limitate profondità di lavorazione raggiungibili, come ampiamente discusso.

Bibliografia

Kun Dai, Z.R. Wang, YiFang. "CNC incremental sheet forming of an axially symmetric specimen and the locus of optimization", Journal of Materials Processing Technology

E. Leszak, Apparatus and Process for Incremental Dieless Forming, U.S. Patent 3342051A1, 1967

M. Bambach, Process Strategies and Modelling Approaches for Asymmetric Incremental Sheet Forming, UmformtechnischeSchriften, Vol 139, Shaker, Aachen, 2008

G. Hirt, J. Ames, and M. Bambach, A New Forming Strategy to Realise Parts Designed for Deep Drawing by Incremental CNC Sheet Forming, Steel Res., Vol 71 (No. 2–3), 2005, p 160–166

Institute of Metal Forming, RWTH Aachen University, Germany, 2009, www.ibf.rwth-aachen.de

M. b. Silva, M. Skjoedt2, P. A. F. Martin and N. Bay, Single point incremental forming of metal sheets

*Kathryn Jackson, Julian Allwood ,*The mechanics of incremental sheet forming*, Department of Engineering, University of Cambridge, 16 Mill Lane, Cambridge CB2 1RX, UK*

Le Van Sy, — Modeling of Single Point Incremental Forming Process For Metal and Polymeric Sheet‖ PhD thesis University Of Pauda-2009

W.C. Emmensa, G. Sebastianib, A.H. van den Boogaardc —The technology of Incremental Sheet Forming—A brief review of the history‖-Journal of Materials Processing Technology

Rajiv Malhotra , Jian Cao , Michael Beltran , Dongkai Xu , James Magargee ,VijithaKiridena , Z. Cedric Xia , —AccumulativeDSIF strategy for enhancing process capabilities in incremental forming.

H. Meier, B. Buff, R. Laurischkat, V. Smukala —Increasing the part accuracy in dieless robot-based incremental sheet metal forming

H. Meier , C. Magnus, V. Smukala —Impact of superimposed pressure on dieless incremental sheet metal forming with two moving tools

J. Belchior ,M.Guillo , E.Courteille , P.Maurine , L.Leotoing , D.Guines ―Off-line compensation of the tool path deviations on robotic machining: Application to incremental sheet forming.

E.Ceretti, A.Fiorentino, G.P.Marenda, M.Cabrini, C.Giardini, S.Lorenzi, T.Pastore, Valutazione della Formabilità di Lamiere di Titanio a Freddo e a Tiepido, La Metallurgia Italiana n.10, 2012.

M.J.Donachie, Titanium: A Technical Guide, ASM International, 2000.

K.Anselme, M.Bigerelle, Modelling Approach in Cell/Material Interactions Studies, Biomaterials, 2005.

S.R.Marabuto, D.Alfonso, J.A.F.Ferreira, F.Q.MElo, M.Martins,R.J.AlvesdeSousa, Finding the Best Machine for SPIF Operations, Key Engineering Materials vol.473, 2011.

K.P.Jackson, J.M.Allwood, M.Landert, Incremental Forming of sandwich panels, Journal of materials processing technology, Elsevier,2007.

P. Linez-Bataillon, F.Monchau, M.Bigerelle, H.F.Hildebrand, In Vitro MC3T3 Osteoblast Adhesion with Respect to Surface Roughness of Ti6Al4V Substrates.

H.Huang, C.Ho, T.Lee, T.LEE, K,Liao, F.Chen, Effect of surface roughness of ground titanium on initial cell adhesion, Biomoleculare Engineering, Elsevier, 2004.

Colombo D., dispense del corso di Metallurgia dei Metalli Non Ferrosi, 2007-2008

Rosso M., dispense del corso di Materiali Metallici, 2015-2016

Carrino L., dispense del corso di Tecnologie Speciali II, 2016