

POLITECNICO DI MILANO  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA



LABORATORIO PROGETTUALE DI DISEGNO  
ASSISTITO DA CALCOLATORE

ANNO ACCADEMICO 2005/2006

PROGETTO D'ANNO

SCHIAVI MACCHINE S.p.a.



Tel. 0523 550711 - FAX 0523 524381

MISURATORE D'ANGOLO

Docenti:

Prof. Roberto Viganò

Ing. Paolo Magni

Autori:

Davide Cammi

Demetrio Malara

Mauro Scrivani

matr. 663198

matr. 661413

matr. 663165

Piacenza ,lì 15/06/2006

# **RINGRAZIAMENTI**

Si ringraziano i docenti:

Prof. Roberto Viganò

Ing. Paolo Magni

Il personale addetto della Schiavi Macchine S.p.a.:

Filippo Mondani

Matteo Agnelli

1	INDICE DELLE FIGURE	4
2	SCHIAVI MACCHINE	5
3	LA PIEGATURA DELLA LAMIERA	6
3.1	IL PROBLEMA DEL RITORNO ELASTICO	6
3.1.1	NEL CASO DI MATERIALE OMOGENEO E ISOTROPO	6
3.1.2	NEL CASO DI MATERIALE NON OMOGENEO E ANISOTROPO	7
3.2	IL METODO DEL MISURATORE D'ANGOLO	7
4	SCOPO DEL PROGETTO: IL MISURATORE D'ANGOLO	7
4.1	UNA POSSIBILE SOLUZIONE	8
4.1.1	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	9
4.1.2	FUNZIONE E DESCRIZIONE DEI COMPONENTI	10
4.1.3	LEGAME INGRESSO - USCITA	10
4.1.4	CARATTERISTICHE DELLA SOLUZIONE	11
4.2	ANALISI DELLE PROBLEMATICHE	12
4.2.1	IL PROBLEMA DELL'ACCURATEZZA	12
4.2.2	IL PROBLEMA DELL'IMPUNTAMENTO	13
4.2.3	SOLUZIONI ADOTTATE	13
5	LA NOSTRA SOLUZIONE	16
5.1	FUNZIONE E DESCRIZIONE COMPONENTI	16
5.1.1	MATRICE	16
5.1.2	GUIDA E PATTINO	20
5.1.3	SUPPORTI	21
5.1.4	SUPPORTO PER CORPO LVDT	22
5.1.5	SUPPORTO PER PISTILLO LVDT	23
5.1.6	MOLLE	24
5.1.7	SENSORE INDUTTIVO LVDT	25
5.1.8	TASTATORE	26
5.1.9	PIASTRA	27
5.2	VERIFICA DI MASSIMA COMPRESSIONE DELLE MOLLE	29
5.3	VERIFICA DI RESISTENZA DELLA GUIDA	30
5.4	CALCOLO DELLA RELAZIONE INGRESSO-USCITA	33
5.4.1	DEDUZIONE LEL LEGAME $\Delta H - \alpha$	34
5.4.2	DEDUZIONE LEL LEGAME $\Delta V - \Delta H$	35
5.4.3	DEDUZIONE LEL LEGAME $\Delta V - \alpha$	35
5.5	CARATTERISTICHE DELLA SOLUZIONE	35
6	ALTRI POSSIBILI SVILUPPI	36
7	CONCLUSIONI	37
8	RIFERIMENTI	38

# 1 INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: soluzione proposta.....	8
Figura 2: componenti.....	9
Figura 3: schema di misura.....	11
Figura 5.....	14
Figura 6: la nostra soluzione.....	16
Figura 7.....	17
Figura 8.....	18
Figura 9.....	18
Figura 10.....	19
Figura 11.....	20
Figure 12a e 12b.....	20
Figura 13.....	21
Figura 14.....	22
Figura 15.....	23
Figura 16.....	23
Figura 17.....	24
Figura 18.....	25
Figura 19.....	26
Figura 20.....	26
Figura 21.....	27
Figura 22.....	27
Figura 23: sistema a riposo.....	28
Figura 24.....	29
Figura 25.....	30
Figura 26.....	30
Figura 27.....	31
Figura 28.....	33
Figura 29.....	34
Figura 30.....	34

## 2 SCHIAVI MACCHINE

Schiavi Macchine Industriali é la societ  del gruppo Schiavi di Piacenza che opera nella produzione di macchine per la lavorazione della lamiera ed é diventata leader in Italia nella costruzione di presse piegatrici e cesoie.

La produzione é iniziata nel 1958 su licenza della societ  francese Promecam che aveva introdotto sul mercato le prime presse piegatrici idrauliche. La collaborazione tecnica é poi continuata con la societ  giapponese Amada Co., subentrata a Promecam, con la quale é stata nel 1987 costituita Amada Schiavi srl, anch' essa divenuta leader nel settore complementare delle punzonatrici, delle intagliatrici laser e delle segatrici.

Oggi, Schiavi Macchine Industriali, oltre alle cesoie, produce una vasta gamma di presse piegatrici che dalla serie RG attraverso le SEB e le HFB vanno fino alle serie NMP e STP-C che rappresentano il top della gamma. Le presse Schiavi possono essere dotate di Robots appositamente studiati per l'applicazione della piegatura che, accoppiati alle macchine Schiavi rappresentano il futuro del settore.

Tradizionalmente impegnata a lavorare con l'utente, Schiavi Macchine Industriali unisce la qualit  del servizio specialistico alle competenze ed al know-how del grande gruppo, ed assicura un supporto costante e completo in tutti i settori di qualsiasi campo produttivo.



**Schiavi** 

Tel. 0523 550711 - FAX 0523 524381

### 3 LA PIEGATURA DELLA LAMIERA

La piegatura dei fogli di lamiera è un processo di lavorazione industriale che avviene mediante la deformazione plastica della lamiera prodotta dalla forza di chiusura che si sviluppa tra punzone e matrice; ovvero, la lamiera, che inizialmente appoggia sulla parte superiore della matrice, vede avvicinarsi dall'alto il punzone, che la schiaccia all'interno della matrice, determinandone così la nuova forma.

La piegatura della lamiera può essere essenzialmente di due tipi:

- piegatura in aria, in cui il punzone non arriva fino in fondo alla matrice, in modo tale che l'angolo di piegatura della lamiera sia inferiore all'angolo caratteristico della matrice a V;
- piegatura coniatata, in cui, contrariamente a prima, il punzone viene fatto arrivare fino in fondo alla matrice, così che l'angolo assunto dalla lamiera sia pari all'angolo caratteristico della matrice.

I due metodi differiscono per due aspetti:

- la forza di piegatura, infatti la piegatura coniatata richiede forze di piegatura pari a 4 – 5 volte la forza nel caso di piegatura in aria;
- la precisione angolare, infatti quando la piegatura è di tipo in aria, l'angolo di piega subisce l'influenza del ritorno elastico del materiale; nel caso di piegatura coniatata, invece, la precisione angolare è assoluta perché la coniatatura del raggio interno annulla il ritorno elastico del materiale.

#### 3.1 IL PROBLEMA DEL RITORNO ELASTICO

##### 3.1.1 NEL CASO DI MATERIALE OMOGENEO E ISOTROPO

Se il materiale in questione è omogeneo e isotropo, allora i parametri E (modulo di Young), Rm (resistenza a trazione), Rsn (carico di snervamento) e A (allungamento percentuale) sono costanti in ogni punto del materiale e per ogni direzione. Il ritorno elastico della lamiera dopo la risalita del punzone è perciò calcolabile a priori attraverso la curva di trazione (legame sforzi - deformazioni) del materiale costituente la lamiera.

Prendendo come esempio un provino soggetto a trazione e descrivendo la curva di trazione come  $\sigma = \sigma(\epsilon)$ , dove  $\sigma$  è lo sforzo [MPa] ed  $\epsilon$  è la deformazione [ - ], se il provino viene deformato fino a superare il limite elastico (limite al di sotto del quale le deformazioni sono reversibili), questo si deforma plasticamente fino ad individuare sulla curva di trazione il generico punto di coordinate  $(\epsilon^*, \sigma^*)$ . Rilasciando il carico, il provino si porta ad un nuovo punto di coordinate  $(\epsilon^* - \epsilon_{el}, 0)$ , dove  $\epsilon_{el}$  (ritorno elastico) è calcolabile come  $\sigma^* / E$ . Nel caso di piegatura della lamiera, il ritorno elastico si potrebbe ad esempio misurare come ritorno elastico angolare (anziché lineare) eseguendo delle prove meccaniche di piegatura, e sfruttare poi tali misure durante il processo di piegatura nel seguente modo: volendo conferire alla lamiera un angolo di piega  $\alpha$ , sarà sufficiente, in fase di lavorazione, fornire un angolo iniziale pari ad  $\alpha + \alpha_{el}$ , (dove  $\alpha_{el}$  è il ritorno elastico angolare), così che alla risalita del punzone l'angolo risulti  $\alpha + \alpha_{el} - \alpha_{el} = \alpha$ , che coincide proprio con l'angolo desiderato.

### 3.1.2 NEL CASO DI MATERIALE NON OMOGENEO E ANISOTROPO

Se il materiale non è omogeneo e isotropo, come appunto nel caso della lamiera, il ritorno elastico è un parametro non calcolabile a priori perché dipende dal punto del materiale in considerazione nonché dalla direzione scelta. Questo fatto costituisce un problema nel processo di piegatura se l'accuratezza richiesta per la lavorazione è molto spinta; infatti se l'accuratezza non fosse particolarmente elevata, si può considerare valida l'ipotesi di materiale omogeneo e isotropo, con i vantaggi sopra descritti, mentre in caso di accuratezze molto elevate tale ipotesi non può ritenersi valida. Si rende necessaria quindi l'implementazione di un **nuovo metodo** per la determinazione del ritorno elastico, rendendo così possibili lavorazioni di accuratezze superiori, con ovvi vantaggi in termini di competitività dell'azienda sul mercato.

### 3.2 IL METODO DEL MISURATORE D'ANGOLO

Il metodo del misuratore d'angolo, proposto dalla Schiavi S.p.a. per determinare il ritorno elastico, consiste nella misura in tempo reale dell'angolo di piega della lamiera durante la fase di lavorazione. La valutazione del ritorno elastico angolare non passa attraverso prove meccaniche precedenti, ma avviene **durante la lavorazione**. Tale metodo si basa su un dispositivo chiamato appunto "misuratore d'angolo", che è un trasduttore che prende in ingresso la configurazione della lamiera e manda in uscita un segnale (che può essere ad esempio di tipo elettrico) che dipende dall'angolo di piega attraverso una legge nota.

L'esecuzione di una lavorazione di piegatura che implementa il metodo del misuratore d'angolo comprende le seguenti fasi:

- a. viene impostato sulla pressa il valore dell'angolo desiderato  $\alpha$ ;
- b. alla prima passata di lavorazione la lamiera viene deformata fino a che, alla massima discesa del punzone, l'angolo di piega coincida con l'angolo desiderato  $\alpha$ , valutato in termini di discesa del punzone;
- c. alla risalita del punzone l'angolo di piega subisce un incremento  $\alpha_{el}$  per effetto del ritorno elastico, fino a portarsi al valore  $\alpha + \alpha_{el}$  (incognito);
- d. il misuratore d'angolo misura l'angolo di piega  $\alpha + \alpha_{el}$ , così che il computer di bordo della macchina (con il quale il misuratore d'angolo comunica) ricavi per differenza il valore  $\alpha_{el}$ ;
- e. si esegue quindi una seconda passata in cui la discesa del punzone pieghi la lamiera fino al valore  $\alpha - \alpha_{el}$ ;
- f. alla risalita del punzone, considerando valida l'ipotesi che il ritorno elastico, per angoli di piega vicini sia costante, la lamiera subisce un incremento angolare pari al precedente  $\alpha_{el}$  portandosi al valore finale  $\alpha - \alpha_{el} + \alpha_{el} = \alpha$ , che è esattamente il valore desiderato.

## 4 SCOPO DEL PROGETTO: IL MISURATORE D'ANGOLO

Tale progetto si prefigge di progettare un misuratore d'angolo come sistema di tipo meccanico che prende in ingresso la configurazione della lamiera e, in tempo reale, in uscita porterà il valore dell'angolo di piegatura. Il progetto consisterà della relativa modellazione funzionale.

## 4.1 UNA POSSIBILE SOLUZIONE

La Schiavi S.p.A. ci ha fornito come spunto progettuale una possibile soluzione di tipo meccanico, assolutamente non vincolante per lo sviluppo del progetto. La soluzione è rappresentata nelle seguenti raffigurazioni:

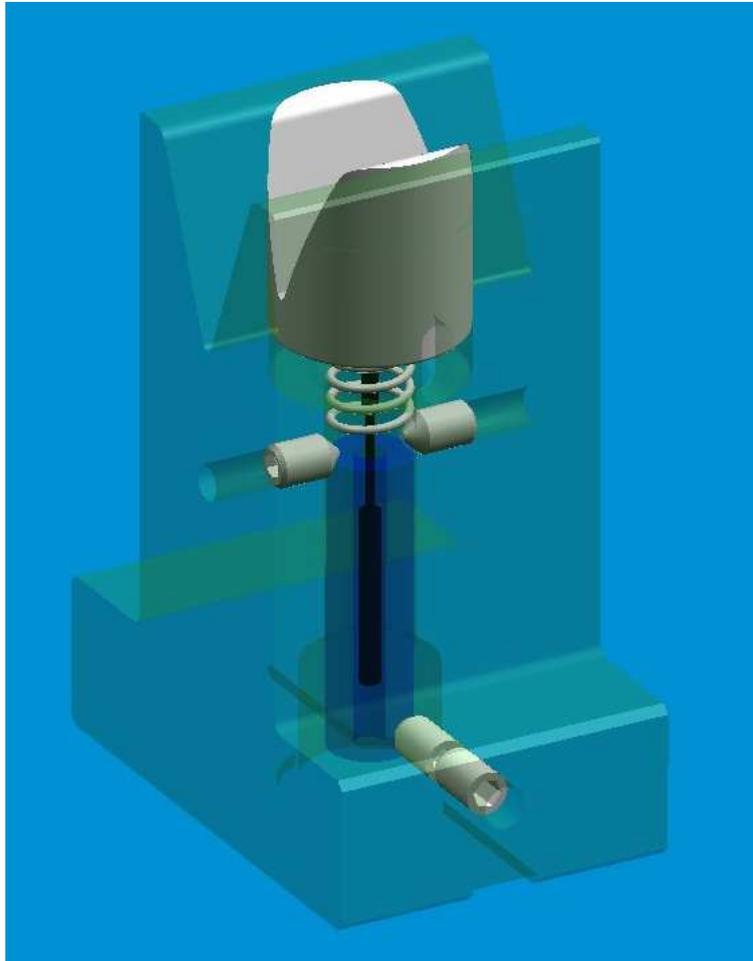


Figura 1: soluzione proposta

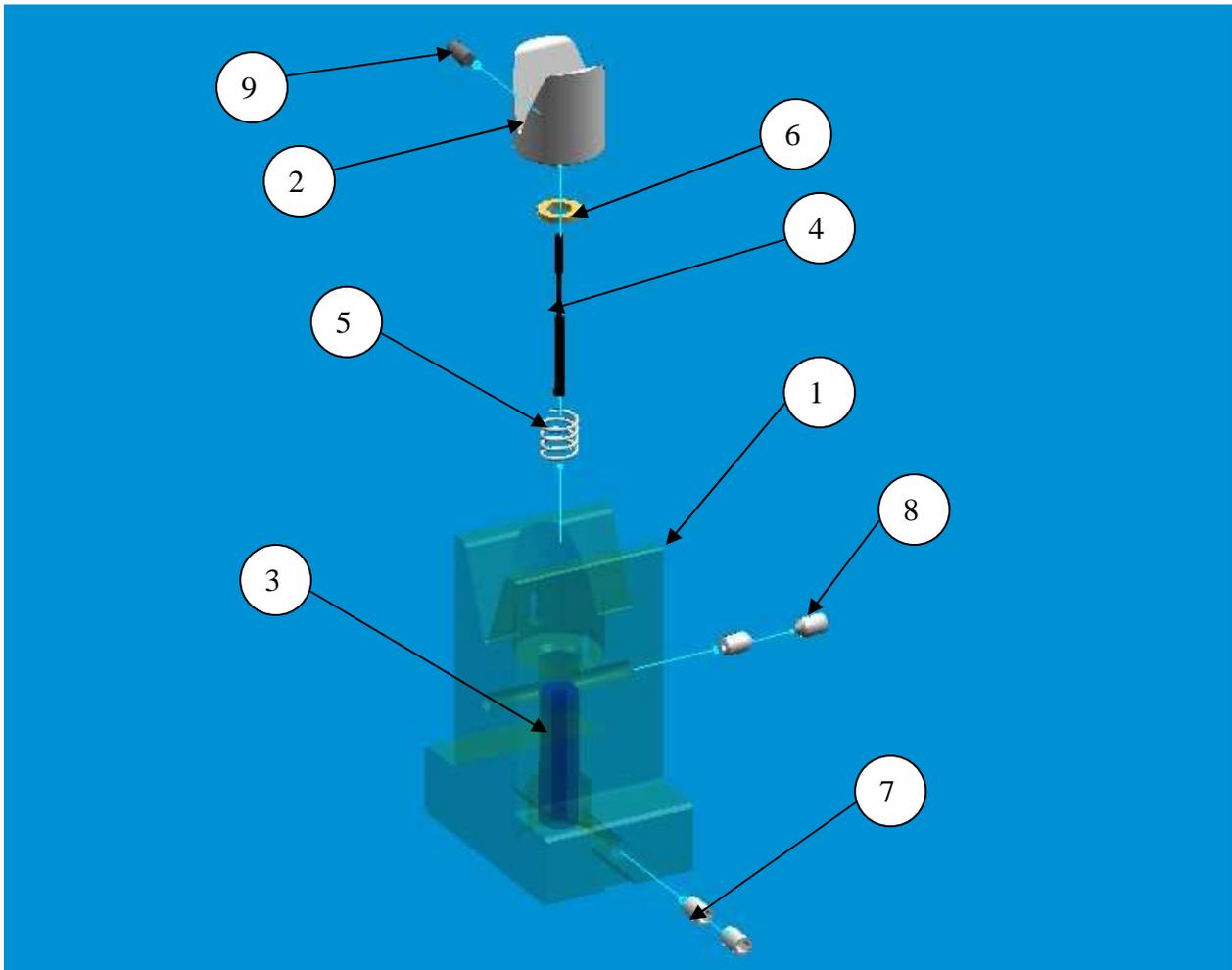


Figura 2: componenti

- 1 matrice;
- 2 tastatore;
- 3 bobina lvdt
- 4 pistillo lvdt;
- 5 molla di ritorno;
- 6 rondella;
- 7 grani base lvdt;
- 8 grani testa lvdt;
- 9 grano di finecorsa.

#### 4.1.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La soluzione proposta consiste in un vero e proprio strumento di misura che, presa in ingresso la configurazione angolare della lamiera, restituisce un segnale (che in questo caso è di tipo elettrico) che dipende attraverso una certa legge (legame ingresso-uscita) dall'angolo di piega.

Il principio di funzionamento consiste nelle modalità con le quali lo strumento converte l'angolo di piega della lamiera nel segnale di uscita, e può essere facilmente compreso analizzando la funzione dei singoli componenti come riportata di seguito.

## 4.1.2 FUNZIONE E DESCRIZIONE DEI COMPONENTI

- **MATRICE:** la matrice, o meglio, la frazione di matrice, è una parte della pressa piegatrice che serve, in accoppiamento con il punzone, a conferire la forma alla lamiera; in questo caso la matrice è stata opportunamente scavata all'interno e modificata al fine di alloggiare e fissare tutte le altre componenti;
- **TASTATORE:** è l'elemento mobile la cui posizione in direzione verticale è funzione dell'angolo di piega della lamiera; il suo movimento è guidato dall'apposito scavo a sezione circolare ricavato nella parte superiore della matrice;
- **LVDT:** è l'elemento sensibile del dispositivo, cioè il trasduttore che converte la posizione verticale del tastatore in un segnale di tipo elettrico. Esso a sua volta è costituito da due parti, che sono la "bobina", detta anche statore o corpo, che è la parte fissa dello strumento da cui si dipartono i fili elettrici di alimentazione e di uscita, e il pistillo, che è l'elemento mobile il cui movimento relativo rispetto alla bobina determina l'entità del segnale in uscita; la bobina è solidale alla matrice, mentre il pistillo al tastatore;
- **MOLLA DI RITORNO:** conferisce una forza verticale al tastatore assicurando il continuo contatto tra tastatore e lamiera;
- **RONDELLA:** fa da collegamento tra molla di ritorno e tastatore;
- **GRANI DI FISSAGGIO:** la coppia di grani nella parte superiore (8) serve a impedire alla bobina dell'lvdt di spostarsi verso l'alto, mentre quella nella parte inferiore (7) tiene premuta la bobina contro lo scavo dedito al suo alloggiamento nella matrice. I grani 7 e 8 rendono quindi solidale la bobina dell'lvdt alla matrice. Il grano di finecorsa (9), fissato nell'apposito foro del tastatore, serve a limitare le corse superiore ed inferiore di quest'ultimo, oltre ad impedirne la rotazione intorno al suo asse.

## 4.1.3 LEGAME INGRESSO - USCITA

Il legame ingresso-uscita è quella funzione  $F$  che ha come dominio l'insieme di tutti i possibili angoli di piega  $\alpha$ , e come immagine i corrispondenti valori dell'output  $\Delta V$ ; può quindi essere espresso come:

$$\Delta V = F(\alpha)$$

Al fine di ricavare il legame ingresso-uscita è necessario comprendere quali componenti concorrono a determinare tale legame; tali componenti sono:

- **TASTATORE:** a cui è attribuita la conversione dell'angolo di piega in traslazione verticale;
- **LVDT:** che converte la traslazione verticale del tastatore in segnale elettrico, rendendo così disponibile il segnale per la parte di automazione del processo.

Lo schema logico è il seguente:

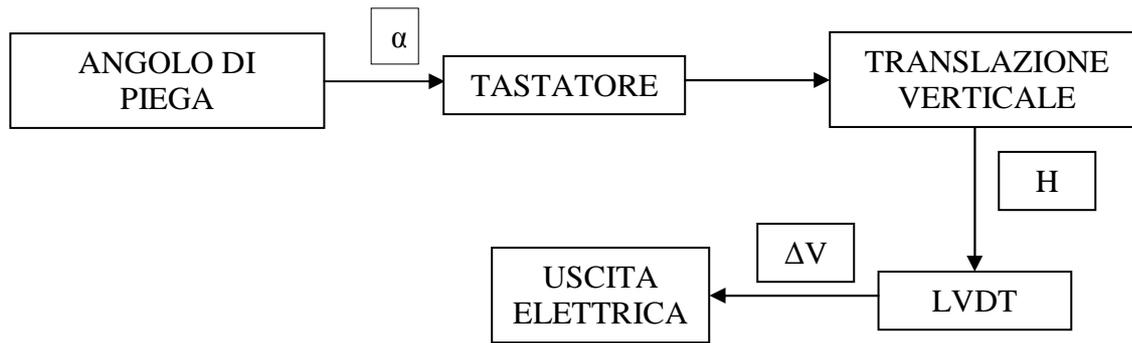


Figura 3: schema di misura

Se definiamo  $\Delta H = f(\alpha)$ ;  $\Delta V = g(\Delta H)$  otteniamo:

$$\Delta V = F(\alpha) = g(f(\alpha))$$

Senza addentrarci nella natura di questo legame, possiamo comunque affermare che l'uscita dello strumento di misura è funzione dello spostamento del pistillo dell'lvdt che a sua volta è funzione dell'angolo di piega della lamiera.

#### 4.1.4 CARATTERISTICHE DELLA SOLUZIONE

La Schiavi S.p.A., dopo avere realizzato un prototipo del misuratore, ha praticato delle prove di funzionamento, dalle quali sono emerse sia caratteristiche vantaggiose che caratteristiche svantaggiose.

Le caratteristiche vantaggiose emerse sono:

- Compattezza: lo strumento proposto è di piccole dimensioni poiché impegna la matrice per una estensione di soli 40 mm;
- Robustezza: gli scavi ricavati all'interno della matrice, essendo di piccola entità, non penalizzano eccessivamente la robustezza dello strumento;
- Semplicità di realizzazione: tutti i componenti a meno del tastatore sono normalizzati o di catalogo e non c'è l'esigenza di produrre particolari di geometria complessa;
- Facilità di installazione e di montaggio: una volta ricavato il pezzo di matrice e scavato come previsto, i componenti sono facilmente montabili prima di andare ad installare il misuratore sulla base della macchina.

Mentre le caratteristiche svantaggiose sono:

- Scarsa accuratezza: per consentire il movimento del tastatore è necessario prevedere un certo gioco nell'accoppiamento tra tastatore e matrice, il che comporta una perdita di precisione;

- Ingresso di polveri dall'esterno: è determinato dal gioco presente tra tastatore e scavo di alloggiamento e, con il progressivo loro accumulo all'interno dello strumento può causare malfunzionamenti dello stesso. Tale problema è accentuato dal fatto che i fogli di lamiera che entrano nella piegatrice sono spesso sporchi e sono quindi fonte di detriti;
- Impuntamento: è causato dal fatto che il movimento traslatorio del tastatore avviene per strisciamento relativo nell'apposito scavo a sezione circolare della matrice, con i conseguenti problemi che si riflettono nell'esecuzione della piegatura.

Il personale addetto della Schiavi S.p.A., visti gli svantaggi fortemente penalizzanti per uno strumento di misura quale deve essere il misuratore d'angolo, ha noi sconsigliato la progettazione di una soluzione di questo tipo, chiedendoci di proporne una che sia migliore di quella proposta soprattutto per quanto riguarda:

- L'accuratezza: che è di fondamentale importanza in quanto il misuratore d'angolo deve essere in grado di migliorare la precisione del processo di piegatura; se non fosse in grado di farlo non converrebbe progettarlo e produrlo;
- L'impuntamento: che, impedendo l'esecuzione della misura, sarebbe causa della produzione di sfridi (lamiera piegata male) e rallentamenti del processo;

## **4.2 ANALISI DELLE PROBLEMATICHE**

Il nostro progetto, che porterà ad una nuova soluzione descritta in seguito, si prefigge di creare un misuratore d'angolo che, rispetto al precedente, sia migliore per quanto riguarda i suoi aspetti penalizzanti (scarsa accuratezza e impuntamento).

### **4.2.1 IL PROBLEMA DELL'ACCURATEZZA**

Come già stato sottolineato in precedenza, la scarsa accuratezza è un difetto non trascurabile per il misuratore d'angolo; infatti la ragione per la quale lo si implementa nel processo di piegatura è proprio il miglioramento dell'accuratezza della lavorazione, altrimenti limitata dalla non perfetta conoscenza dell'entità del ritorno elastico del foglio di lamiera in lavorazione.

Nella soluzione proposta la scarsa accuratezza è determinata essenzialmente da due fattori:

1. il movimento traslatorio del tastatore è guidato dallo scavo a sezione circolare posto nella parte superiore della matrice; tale scavo dovrà avere un diametro leggermente superiore a quello del tastatore per non impedire il movimento. Il gioco che si va ad instaurare tra le due componenti è la principale causa della perdita di accuratezza.
2. Il riferimento dello strumento è interno, il che può dare dei problemi se, ad esempio, la deformazione angolare della lamiera non fosse pari a quella ideale; in tal caso i raggi di piega non sarebbero uguali ai raggi di raccordo della matrice ( 1 e 2 ) e al raggio di punta del punzone ( 3 ), perciò in corrispondenza di tali punti si potrebbe verificare la situazione rappresentata in figura: a due angoli di piega uguali (ideale e reale) potrebbero corrispondere differenti discese del punzone. Lo strumento di misura andrebbe quindi a misurare angoli di piega differenti quando questi sono uguali, oppure, ragionando a parità di discesa del punzone, lo strumento darebbe indicazioni uguali per angoli diversi. Questo perché l'lvdt,

avendo il corpo solidale alla matrice, misura la distanza tra un punto della lamiera ed un punto di riferimento della matrice.

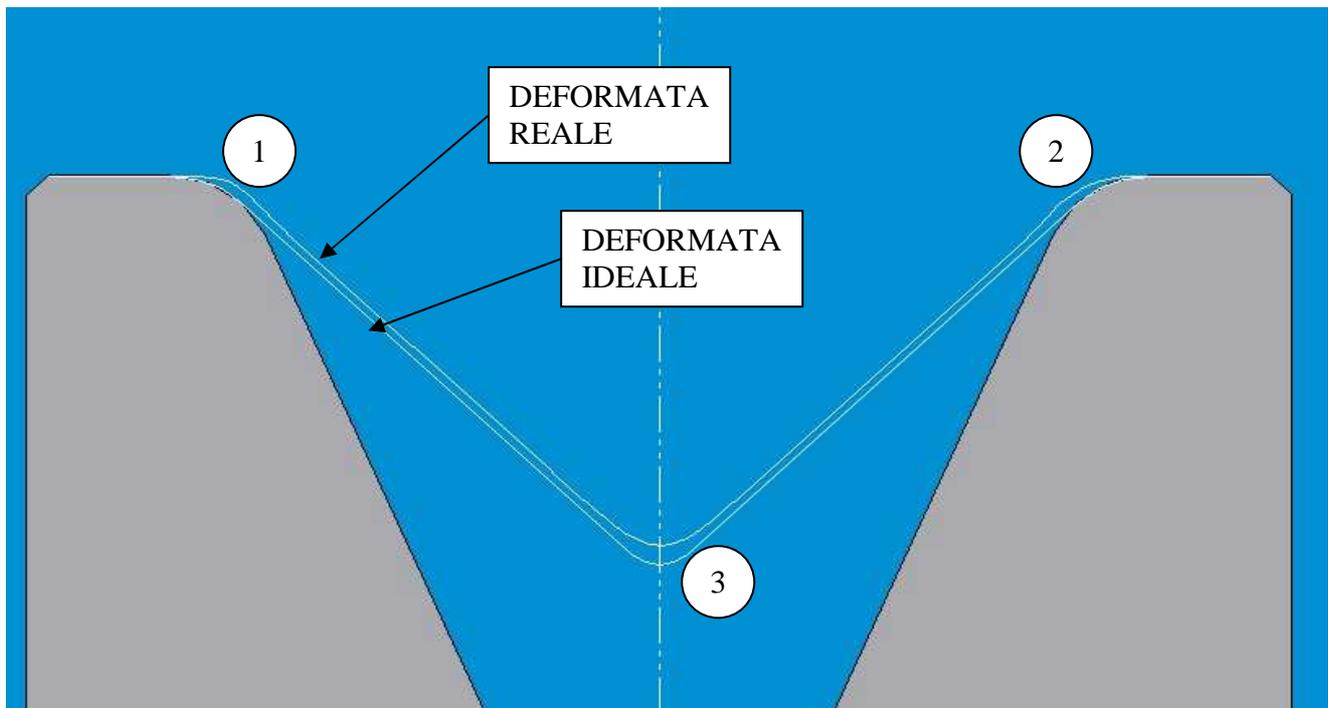


figura 4

## 4.2.2 IL PROBLEMA DELL'IMPUNTAMENTO

Per quanto riguarda l'impuntamento, anch'esso rappresenta un problema non trascurabile. Un impuntamento del tastatore infatti impedirebbe la misura dell'angolo, con effetti gravosi sulla lavorazione come ad esempio l'interruzione del processo o la realizzazione di angoli di piega imprecisi (o casuali, nella più grave delle ipotesi); ne conseguirebbe la produzione di scarti di lavorazione e quindi un aumento dei costi di produzione.

L'impuntamento è imputabile, come nel caso della scarsa accuratezza, al gioco che si origina dall'accoppiamento tastatore-scavo. Siccome i fogli di lamiera introdotti nel processo sono solitamente sporchi e pieni di detriti, il progressivo accumulo di questi ultimi nello spazio definito dal gioco genererebbe difficoltà di movimento al tastatore. Tale fenomeno potrebbe essere inoltre accentuato dalla leggera inclinazione dell'asse del tastatore rispetto alla verticale determinata dal medesimo gioco.

## 4.2.3 SOLUZIONI ADOTTATE

### PER I PROBLEMI DOVUTI AL GIOCO

Per sopperire ai problemi di scarsa accuratezza e di impuntamento dovuti al gioco che si realizza tra tastatore e scavo, si è deciso di adottare un nuovo sistema per garantire la precisione di movimento del tastatore; un sistema che non affidi la precisione al semplice scorrimento del tastatore all'interno dello scavo nella matrice. Si è perciò ricorsi ad una guida lineare di precisione, che è in grado di assicurare allo stesso tempo una eccellente accuratezza di movimento (impedendo l'eventuale inclinazione dell'asse del tastatore) e una buona scorrevolezza dello stesso.

Per quanto riguarda il problema dell'accumulo di detriti all'interno del gioco, ci si è quindi limitati a contenere l'inclinazione del tastatore che altrimenti esalterebbe il fenomeno dell'impuntamento dovuto ai detriti.

#### PER I PROBLEMI DUVUTI ALL'ESECUZIONE DELLA MISURA

Per evitare il rischio di effettuare una misura scorretta a causa di una deformazione che si discosta da quella ideale, si è deciso di implementare un tastatore, o un insieme di tastatori, che non misuri la distanza tra un punto della lamiera ed un punto della matrice, ma che misuri piuttosto la distanza tra due punti della lamiera. Per attuare questo sistema è stato modificato il misuratore d'angolo in modo venga dotato di due tastatori sfalsati lungo la direzione x, così come rappresentato in figura:

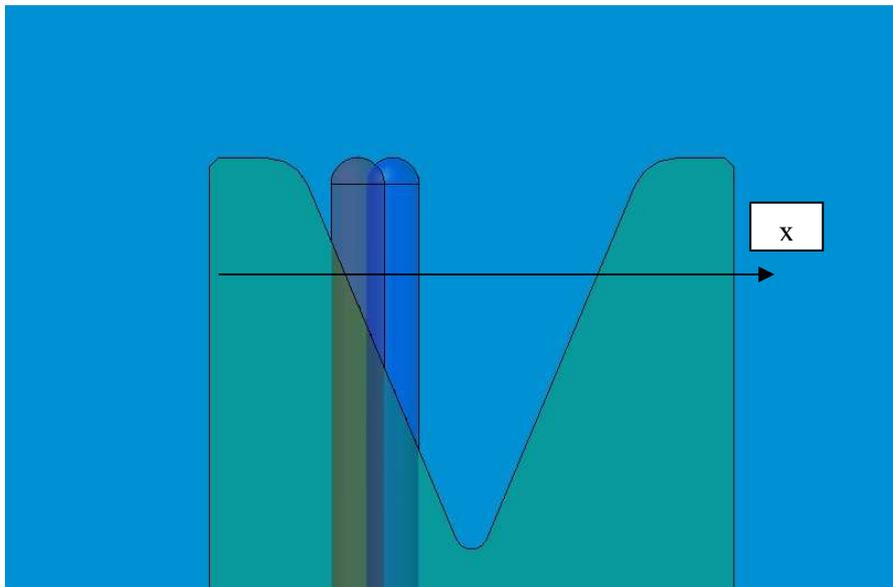


Figura 5

In questo il corpo dell'lvdt sarà reso solidale ad uno dei due tastatori, facendo da riferimento, e il pistillo sarà dualmente solidale all'altro. In questo modo l'lvdt misurerà la differenza tra le quote dei due tastatori, nonché la loro distanza in direzione verticale. Il vantaggio di questo approccio sta nel fatto che entrambi i tastatori porteranno con sé gli errori dovuti allo scostamento della deformata reale rispetto a quella ideale, ma questi errori si sottraggono.

Chiamando

$z_1$  e  $z_2$  le quote dei due tastatori nel caso di deformazione ideale;

$e_1$  ed  $e_2$  i due errori, ovvero gli scostamenti del caso reale rispetto a quello ideale;

allora le quote dei due tastatori saranno

$h_1 = z_1 + e_1$  per il primo;

$h_2 = z_2 + e_2$  per il secondo;

La differenza tra le due quote, ovvero la misura dell'lvdt, sarà quindi:

$$h = h_1 - h_2 = (z_1 + e_1) - (z_2 + e_2) = (z_1 - z_2) + (e_1 - e_2)$$

dove il termine  $(e_1 - e_2)$  rappresenta l'errore nella misura.

Se adesso si considera di posizionare i due tastatori sufficientemente vicini lungo la direzione  $x$ , è ragionevole ipotizzare:

$$e_1 \approx e_2 \rightarrow (e_1 - e_2) \approx 0$$

che significa totale compensazione degli errori.

## 5 LA NOSTRA SOLUZIONE

In figura 6 è rappresentata un'anteprima dell'assieme da noi progettato e modellato con Solid Edge.

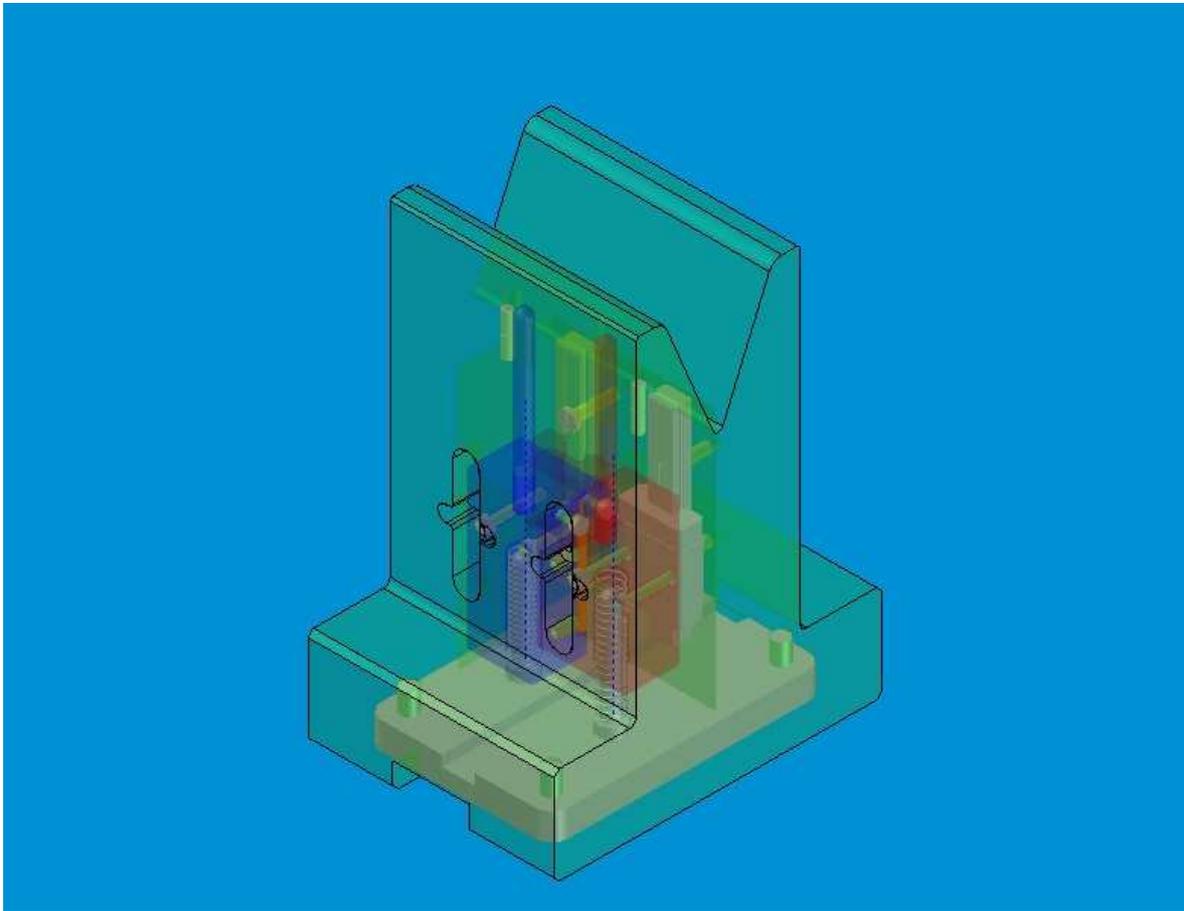


Figura 6: la nostra soluzione

Nei paragrafi successivi tale soluzione verrà descritta nei suoi componenti, aspetti principali e caratteristiche.

### 5.1 FUNZIONE E DESCRIZIONE COMPONENTI

#### 5.1.1 MATRICE

La matrice rappresentata è una frazione delle matrici presenti nelle presse piegatrici ricavata pertanto da tranciatura delle stesse, ne consegue quindi che le sue dimensioni, il materiale e la forma sono tutti parametri su cui non potremo andare ad agire in quanto vengono stabiliti dalla casa produttrice.

La sua funzione ai fini del nostro progetto è quella di contenere al suo interno tutto il sistema di misura; per fare ciò è stata praticata al suo interno una cava (v. fig. 7), che definisce lo *spazio di lavoro*, nella cui scelta delle dimensioni si è cercato un buon compromesso tra spazio sufficiente ad accogliere tutti i componenti e resistenza della matrice stessa alle sollecitazioni durante la lavorazioni.

Lo *spazio di lavoro* è risultato il parametro fondamentale nello sviluppo del nostro progetto visti gli spazi ridotti di cui si disponeva, si è cercato pertanto di ottenere un sistema di misura che fosse il più compatto possibile.

Per un normale acciaio considero  $\sigma_{sn}$  pari a circa 250 MPa; ne consegue che la forza massima applicabile alla matrice è data da:

$$F_{max} = \sigma_{sn} * A$$

Dove A indica la sezione resistente della matrice data dall'area della matrice meno quella della cava:

$$\begin{aligned} A &= A_{matrice} - A_{cava} \\ &= X_m * Y_m - X_c * Y_c \\ &= 30 * 45 - 17 * 30 = 840 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

(trascurando fori e scavi sulle pareti della matrice)

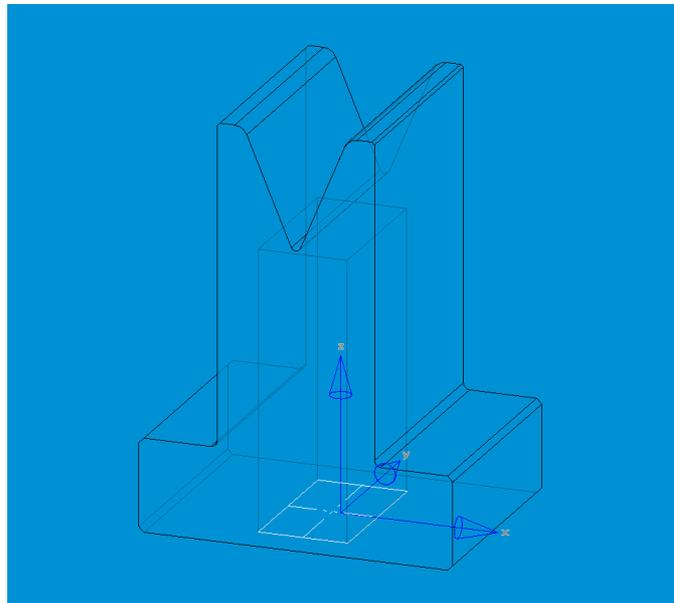


Figura 7

Dunque la forza massima applicabile espressa in [tonn/m], considerando la resistenza a compressione circa uguale a quella a trazione, risulta essere:

$$\begin{aligned} F_{max} &= \sigma_{sn} * A = \\ &= 250 * 840 = 210000 \text{ N} \end{aligned}$$

Pari a circa 460 [tonn/m] e quindi ben al di sopra di un carico massimo applicabile dalle nostre piegatrici (il tonnellaggio applicato varia in funzione dello spessore della lamiera da piegare e considerando uno spessore del foglio di lamiera pari a 0,5 mm esso non supera le 70 [tonn/m]). Le dimensioni considerate per la cava derivano dalla scelta e dal posizionamento degli altri componenti del sistema di misura.

La seconda lavorazione necessaria alla matrice consiste nel praticare altre due cave (v. fig. 8) necessarie una al posizionamento di una piastra che applicata nella parte inferiore della matrice avrà funzione di *piano di riferimento* per il funzionamento dei componenti e di chiusura del sistema di misura all'interno della matrice, mentre la seconda permetterà la fuoriuscita dallo spazio di lavoro dei collegamenti elettrici provenienti dal sensore induttivo posto internamente.

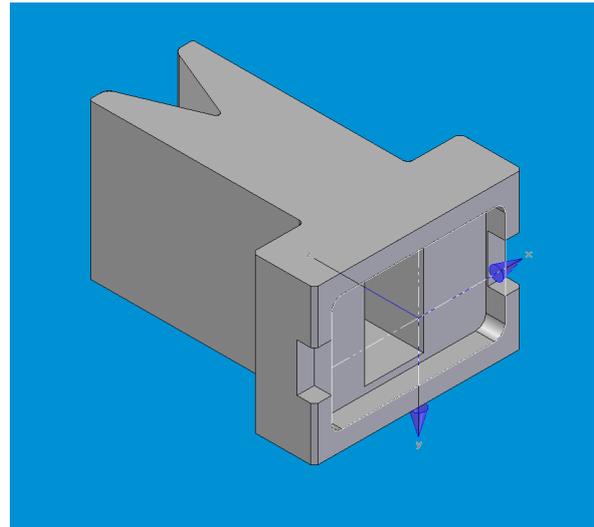


Figura 8

Successivamente vengono effettuati fori alla matrice con diverse funzionalità:

- 4 fori per il fissaggio della piastra praticati sul *piano di riferimento*
- 4 fori per il fissaggio delle due guide all'interno dello *spazio di lavoro*
- 2 fori per permettere la fuoriuscita dei due tastatori dello *spazio di lavoro*, praticati sulla superficie a "V"

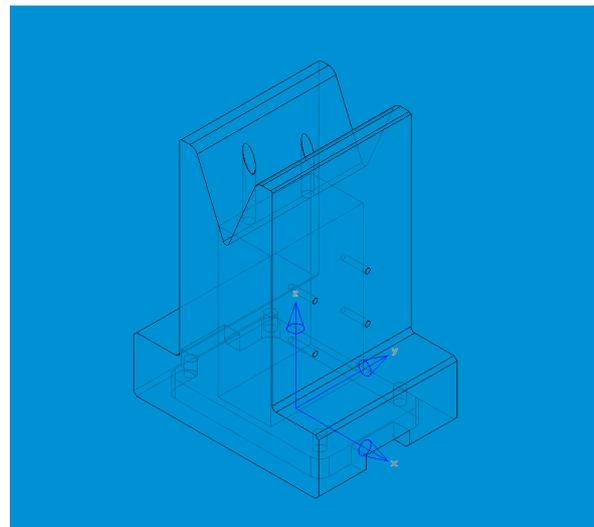


Figura 9

Infine per poter bloccare correttamente le guide all'interno dello *spazio di lavoro* vengono praticate due asole verticali sul lato della matrice opposto a quello contenente i 4 fori per il loro fissaggio in modo tale da consentire l'avvitamento manuale da parte del operatore addetto al montaggio; per fissare invece i supporti ai rispettivi pattini vengono praticate altrettante asole orizzontali sullo stesso lato della matrice

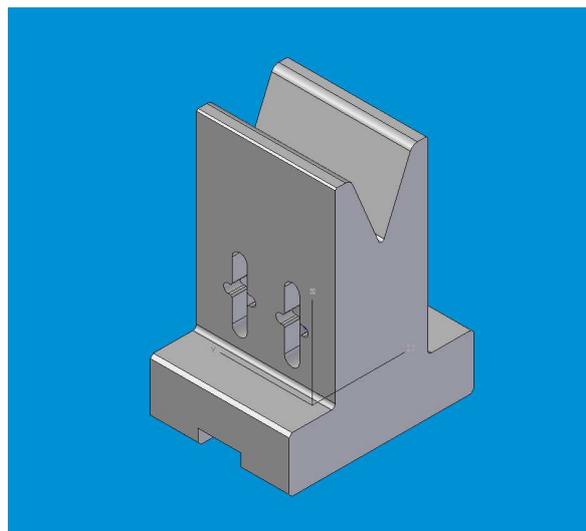


Figura 10

## 5.1.2 GUIDA E PATTINO

Il sistema composto da *guida e pattino* rappresenta l'unità su cui si basa principalmente la precisione di tutto il sistema di misura. Per questo motivo si è scelto di elemento questo elemento da un'azienda specializzata nella produzione di questo tipo di componenti ovvero la MEDIAS INA ITALIA S.r.l.; sulla base dei cataloghi messi a disposizione dalla casa produttrice sul web si è scelto di utilizzare un prodotto della sezione 'unità in miniatura a ricircolazione di sfere' (cod. KWEM5-C/TKDM5) di cui si riporta come allegato la pagina che ne descrive le caratteristiche fisico-geometriche. In figura 11 viene riportato il prodotto:

La soluzione adottata, come riportato anche nel nome, si compone di una guida lineare sulla quale scorre un pattino; il movimento di quest'ultimo viene notevolmente favorito dall'interposizione di piccole sferette fra di esso e la guida poste nella cavità più interna della guida stessa, mentre grazie a dimensioni realizzate con elevata precisione viene garantito dal costruttore un movimento perfettamente orizzontale del pattino sulla guida (a meno di sollecitazioni superiori ai limiti sopportati).

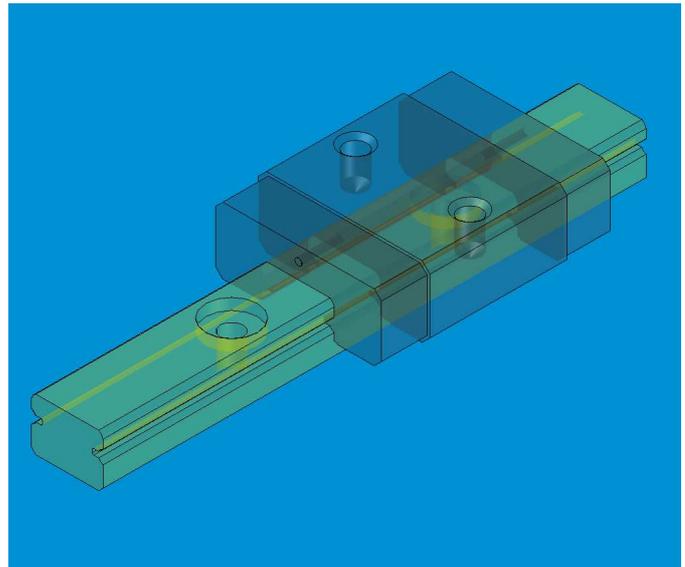


Figura 11

All'interno del sistema di misura vengono posizionati due sottosistemi composti da *guida e pattino* in modo tale da averne a disposizione uno per ognuno dei due supporti interni che discendono durante il funzionamento del sistema di misura come in figura 12a e 12b riportate qui di seguito:

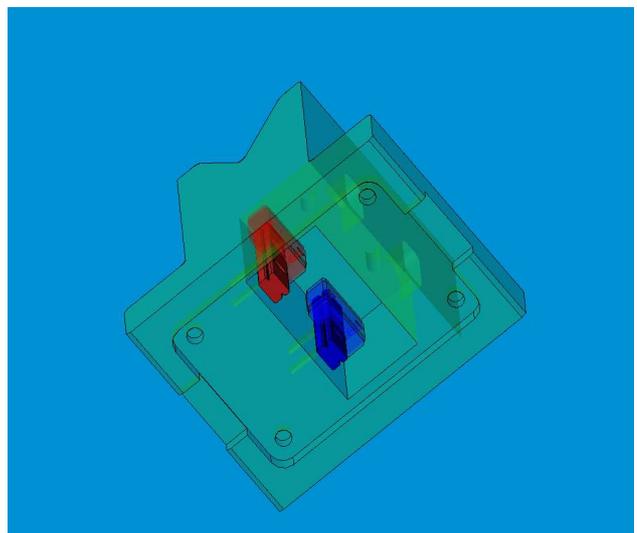
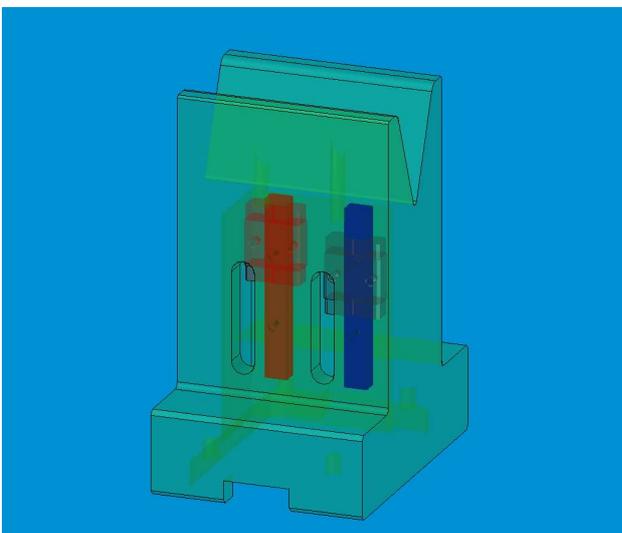


Figure 12a e 12b

Nella stesura della relazione sono state denominate *guida e pattino\_pistillo LVDT* e *guida e pattino\_corpo LVDT* rispettivamente quelle che in figura 12 sono di colore rosso e blu, in quanto quella rossa sarà fisicamente vincolata al movimento del supporto collegato al pistillo dello strumento di misura LVDT, al contrario quella blu sarà fisicamente vincolata al movimento del supporto collegato al corpo del medesimo strumento di misura.

Nelle figure 12a e 12b si è mostrato come vengono collocati i due sottosistemi *guida e pattino*, da qui l'esigenza di creare le due asole verticali sulle superficie laterale della matrice, ovvero per la necessità di fissare i due sottosistemi all'interno dello *spazio di lavoro*.

L'unico parametro su cui è stato possibile agire è la lunghezza della guida, che viene stabilita a seconda del tipo di applicazione.

Nel nostro caso, visti i ridotti spazi di cui si ha a disposizione, è stato necessario calcolarlo basandosi sulla formula:

$$L_{guida} = L_{pattino} + Corsa_{max} + S$$

Dove:

- $L_{pattino}$  è la lunghezza del pattino nella direzione del movimento pari a 16mm;
- $Corsa_{max}$  rappresenta l'escursione massima discesa massima che possono subire le guide durante la misura, nel nostro caso quella massima appartiene al tastatore più interno pari a circa 15,7mm;
- $S$  è un valore di sicurezza posto in modo tale da evitare urti del pattino durante la misura interni allo *spazio di lavoro*; la scelta è stata 6,3mm.

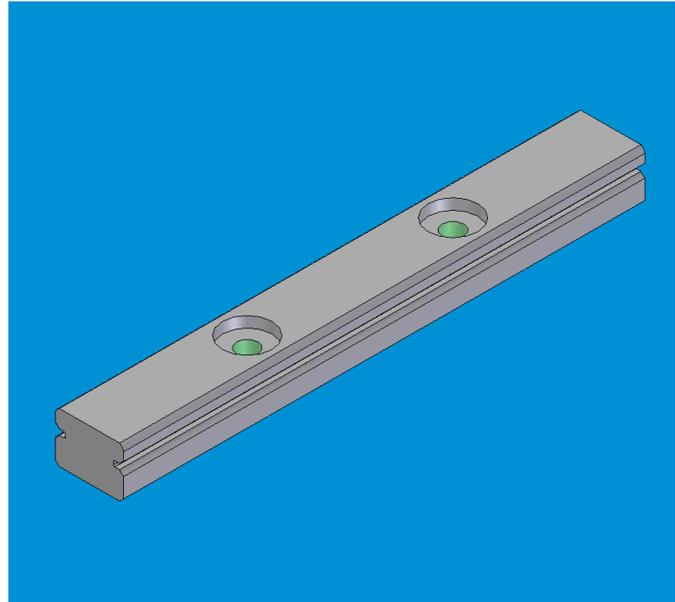


Figura 13

$$\begin{aligned} L_{guida} &= L_{pattino} + Corsa_{max} + S = \\ &= 16 + 15,7 + 6,3 = 38\text{mm} \end{aligned}$$

### 5.1.3 SUPPORTI

I supporti sono elementi realizzati appositamente per permettere la corretta funzionalità della misurazione. Questi hanno infatti la funzione di trasmettere il movimento discendente dei tastatori allo strumento di misura LVDT in modo solidale, ne sono dunque presenti due in quanto uno, denominato *supporto per corpo LVDT* manterrà solidali il corpo dello strumento di misura e il tastatore più esterno, mentre un secondo, denominato *supporto per pistillo LVDT* conserverà solidali il pistillo del medesimo strumento di misura e il tastatore più interno. Inoltre grazie al fissaggio di entrambi i supporti ai rispettivi sistemi guida e pattino scelti appositamente ad elevata precisione dimensionale viene garantito il corretto movimento puramente verticale sia dei tastatori che dell'LVDT, così da non creare problemi di *impuntamento* dei primi e/o danneggiamento del secondo.

Durante lo studio per il dimensionamento di questi elementi si è notato che non sono soggetti a forze particolarmente gravose da dover ricorrere a materiali con elevate caratteristiche meccaniche;

si è dunque scelto di utilizzare un comune acciaio dolce al carbonio per la loro realizzazione in modo tale da ottenere una soluzione più economica e dalle componenti più facilmente lavorabili.

#### 5.1.4 SUPPORTO PER CORPO LVDT

Questo elemento come detto ha la funzione di collegare rigidamente il corpo dello strumento di misura al rispettivo tastatore.

Per far ciò vengono previsti seguenti fori (v. fig. 14):

- foro 1 all'interno del quale si posiziona lo statore dello strumento di misura LVDT fissato tramite grani posti nei fori 1a (v. figura14)
- foro 2 all'interno del quale viene collocato il tastatore più esterno
- foro 3 necessario per il posizionamento della molla di ritorno
- fori 4 necessari per il fissaggio del supporto al relativo sistema guida e pattino.

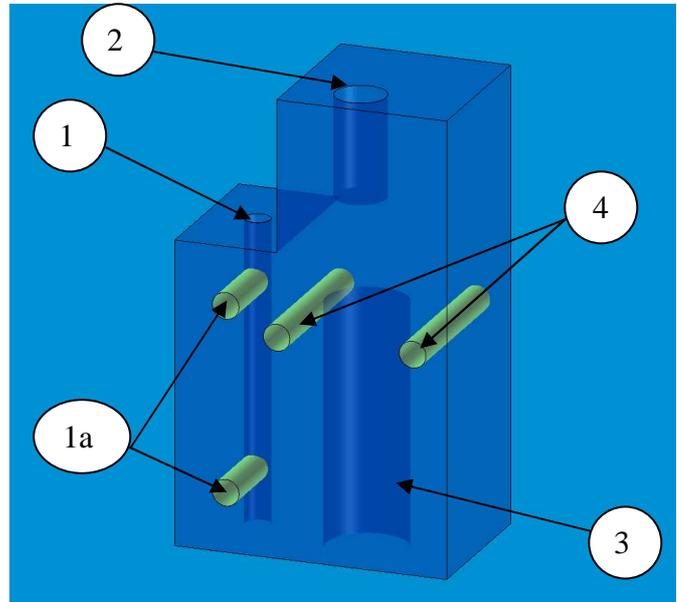


Figura 14

### 5.1.5 SUPPORTO PER PISTILLO LVDT

Questo componente ha dunque la funzione di mantenere solidali durante la misura il pistillo del dispositivo di misura al rispettivo tastatore.

Per fare ciò vengono previsti i seguenti fori (v. fig. 15):

- foro 2 all'interno del quale viene collocato il tastatore più interno;
- foro 3 necessario per il posizionamento della molla di ritorno;
- fori 4 necessari per il fissaggio del supporto al relativo sistema guida e pattino.

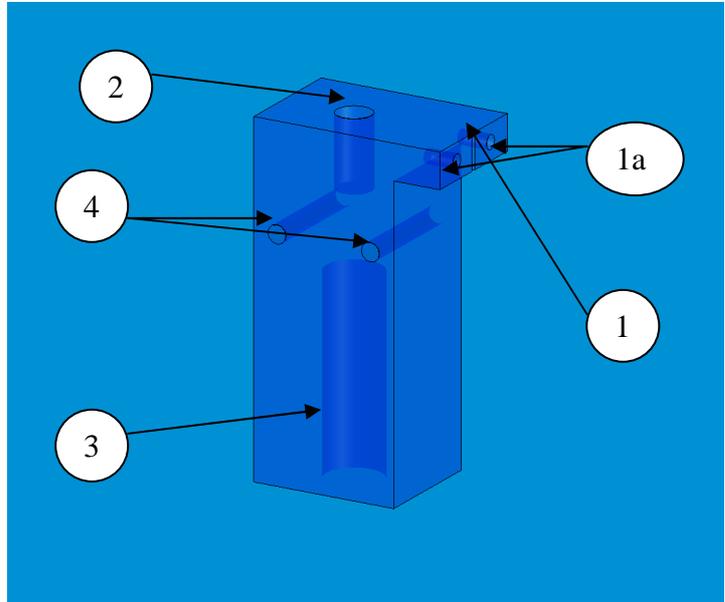


Figura 15

Per il fissaggio del pistillo dello strumento di misura si è scelto un semplice bloccaggio meccanico realizzato attraverso:

- fresatura di elevata precisione in modo da garantire la corretta movimentazione del pistillo all'interno del proprio statore (designata con la cifra 1);
- fori 1a necessari al fissaggio di un ulteriore componente denominato *elemento di fissaggio* (v. fig. 16).

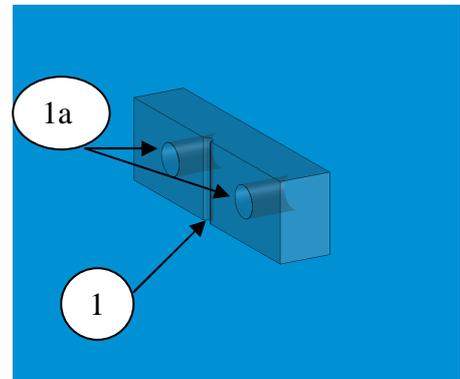


Figura 16

## 5.1.6 MOLLE

All'interno del sistema di misura vengono posizionate due molle. Queste hanno due funzioni principali: innanzitutto quella di garantire il ritorno alla posizione di riposo di tutti i componenti al termine di ogni misurazione, ma anche di contrastare la discesa dei tastatori durante l'operazione di misura garantendone il contatto continuo con la lamiera.

La scelta per il tipo di molla è stata una *molla di compressione in acciaio al carbonio* (v. fig. 17) prodotta dalla casa produttrice DIM (si riporta come allegato il file della brochure della molla).

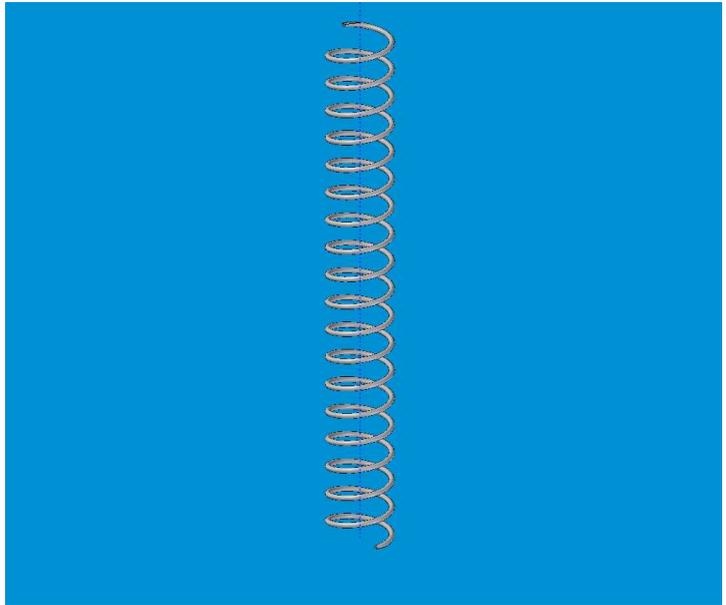


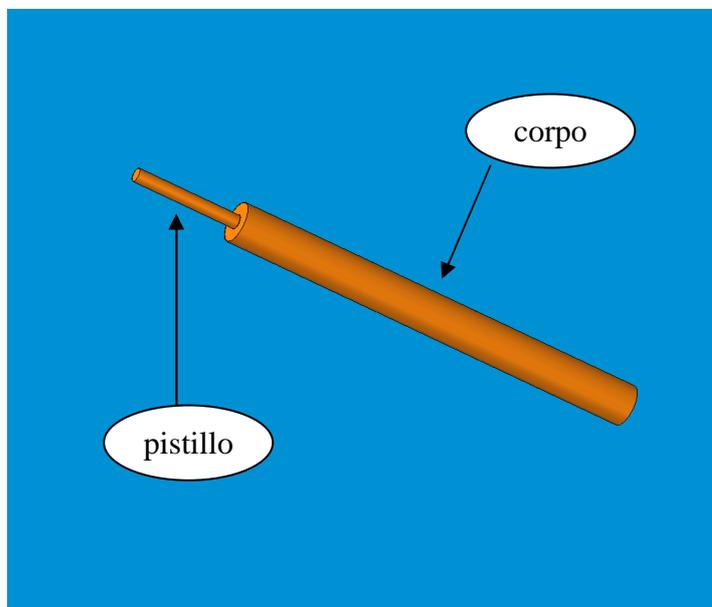
Figura 17

Questa molla è stata scelta principalmente per caratteristiche dimensionali opportune all'interno del sistema di misura, in quanto garantisce una buona funzionalità in un campo di lavoro di 32,4mm ben superiori alle corse dei supporti lungo le rispettive guide, mantenendo tuttavia un ridotto diametro medio e quindi un limitato spazio occupato pur garantendo la forza necessaria alle sue funzionalità.

### 5.1.7 SENSORE INDUTTIVO LVDT

La scelta del dispositivo di misura è ricaduta sul sensore di spostamento di tipo induttivo LVDT. La sua struttura è rappresentata in figura: lo strumento è composto essenzialmente da due parti (v. fig. 18):

- **CORPO LVDT** ovvero lo statore del dispositivo cioè la gabbia all'interno della quale è libero di scorrere il pistillo, al suo interno vi sono due avvolgimenti in opposizione che forniscono un'uscita in tensione proporzionale alla posizione del pistillo;
- **PISTILLO LVDT** formato da un piccolo aghetto vincolato a scorrere internamente al corpo.



F

igura 18

L'LVDT scelto, viste le particolari condizioni in cui viene applicato, ovvero spazi molto ridotti, è un LVDT miniaturizzato della ditta LEANE INTERNATIONAL s.r.l. (di cui se ne riporta come allegato il file della brochure).

Tuttavia va specificato che nel nostro caso, per il tipo di misura da effettuare, la scelta avrebbe potuto ricadere su altri dispositivi di misura sfruttando così diversi principi di funzionamento, ma una soluzione di tipo meccanico con contatto fisico dello strumento come quello da noi scelto offre una maggior semplicità nella progettazione di tutto il sistema pur garantendo un'ottima accuratezza di misura ed un effetto di carico trascurabile viste le forze in gioco.

### 5.1.8 TASTATORE

Il tastatore è l'elemento che fuoriuscendo da un apposito foro nella cava della matrice va direttamente a contatto con la lamiera durante la fase di piegatura trasmettendo l'informazione della posizione di quest'ultima all'interno del sistema di misura.

La soluzione da noi adottata per la misura prevede il posizionamento di due elementi tastatori fuoriuscenti dalla matrice e quindi entrambi a contatto con la lamiera (v. fig. 19).

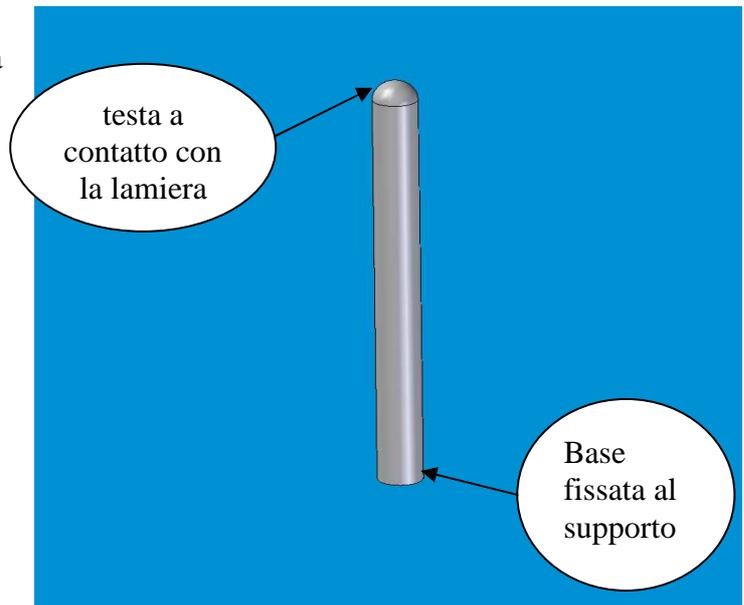


Figura 19

Nel dimensionamento di tutti i dispositivi presenti, si è tenuto conto che aumentando il carico fornito dalla molla aumentava il momento flettente cui sono sottoposti questi elementi. Si è cercato dunque di ridurre al massimo la forza della molla evitando eccessivi sforzi flessionali che avrebbero potuto falsare la misura anche se in modo notevolmente ridotto (v. fig. 20).

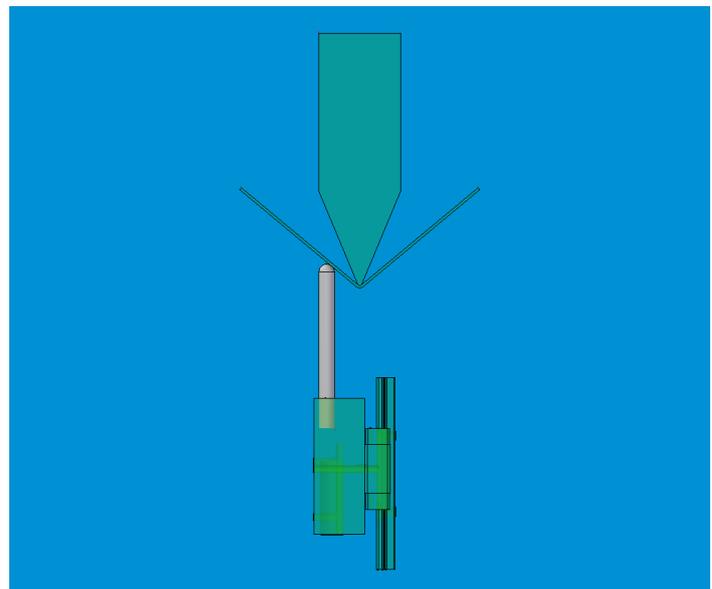


Figura 20

### 5.1.9 PIASTRA

La piastra posta nella parte inferiore della matrice rappresenta l'elemento di chiusura dello *spazio di lavoro*; essa infatti costituisce nella sequenza di montaggio l'ultimo elemento posizionato ricoprendo comunque una notevole importanza.

Questo elemento si compone di tre parti:

- piastra a base rettangolare:

è la base dello *spazio di lavoro* che dà dunque luogo allo *piano di riferimento*, su di essa vengono posizionate le guide di tipo assiale per le due molle nei fori filettati 1a ed 1b, mentre viene fissata alla matrice tramite i fori 2a, 2b, 2c e 2d (v. fig. 21)

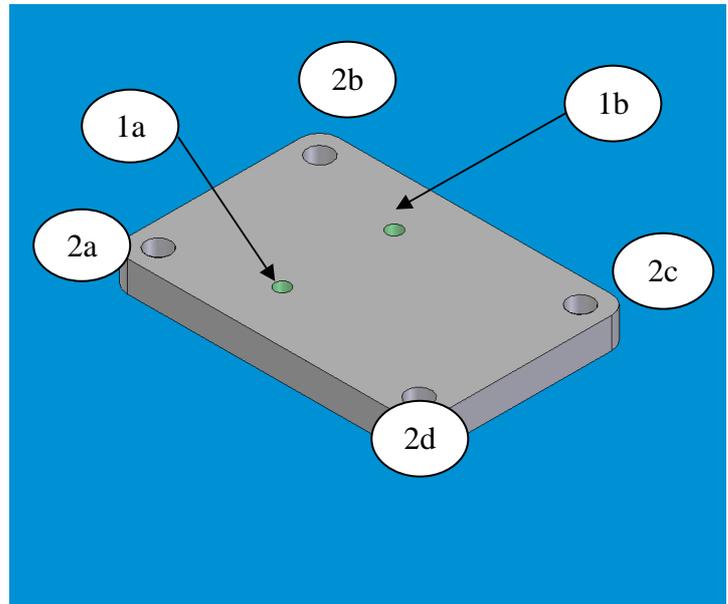


Figura 21

- guide assiali:

sono due elementi cilindrici, posti come in figura, che fanno sia da basi che da guide alle due molle, permettendone così il corretto funzionamento senza pericolo di incurvamenti. Le loro lunghezze differiscono in quanto la guida assiale (2), relativa al supporto per pistillo LVDT, nella posizione di riposo deve garantire il corretto funzionamento della rispettiva molla per una corsa maggiore rispetto alla vicina guida assiale (1), e quindi avrà un'altezza inferiore (v. fig. 22).

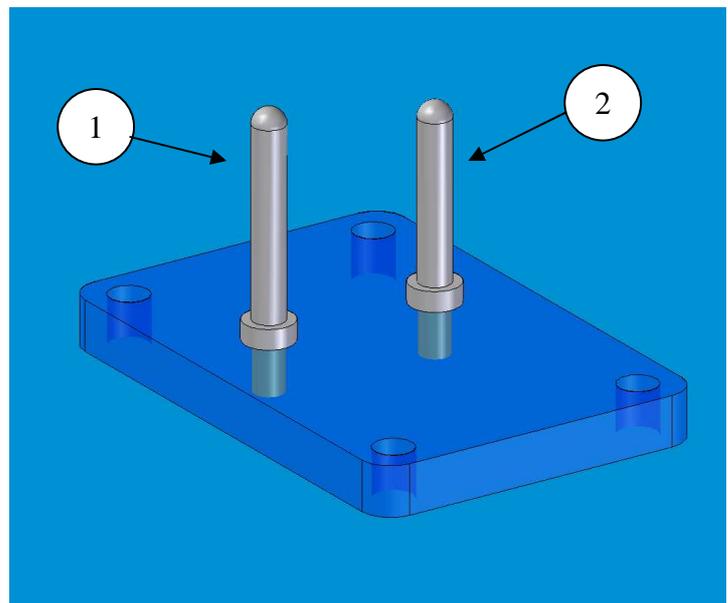


Figura 22

## CALCOLO DEL PRECARICO DELLE MOLLE

Nella posizione di quiete, il misuratore d'angolo dovrebbe trovarsi nella configurazione tale per cui i due tastatori si trovano alla loro massima quota; per questo motivo è necessario che le molle di contrasto (che sostengono i due supporti sui quali vengono montati i tastatori e l'lvdt) abbiano un precarico adeguato. Più precisamente è necessario che, in posizione di quiete, le molle trasmettano ancora un certo valore di forza ai due supporti.

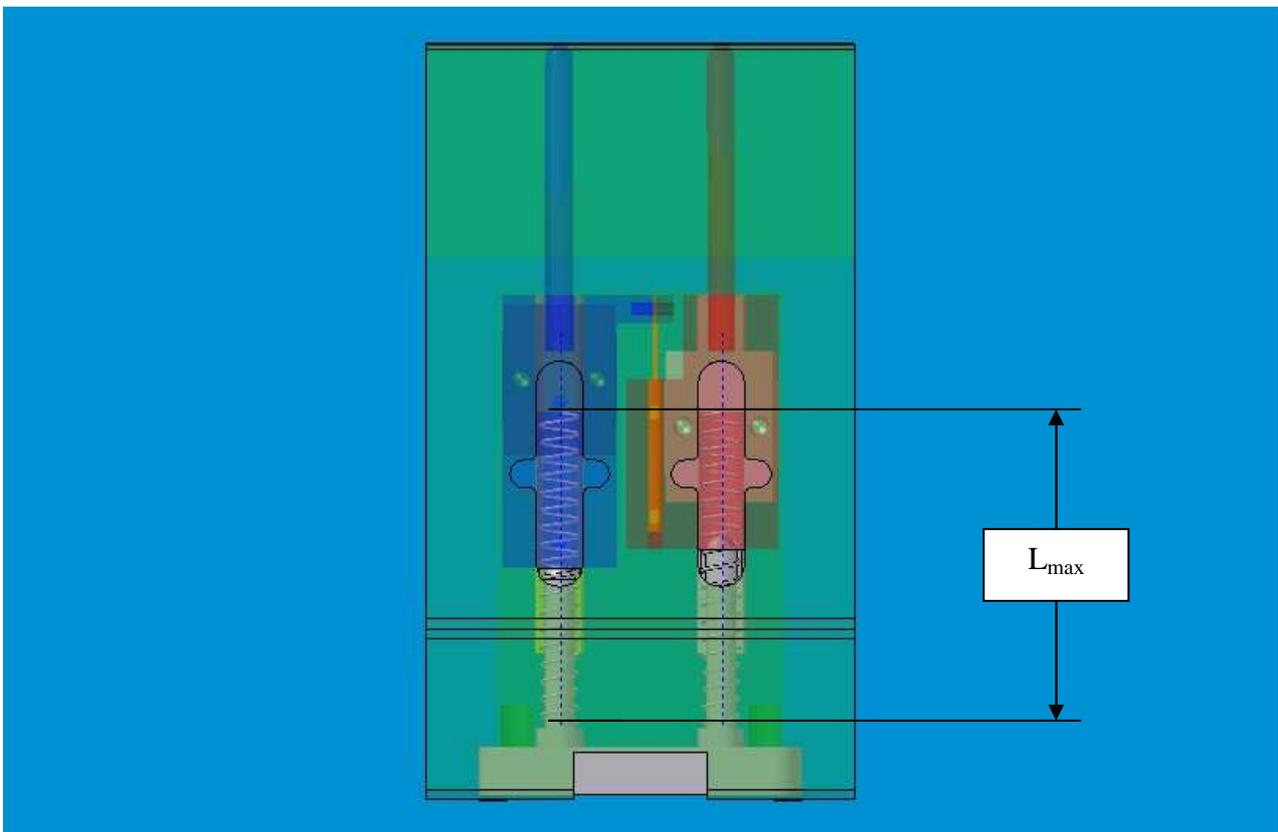


Figura 23: sistema a riposo

Considerando la massa volumica mediamente pari a  $7,81 \text{ kg/dm}^3$ , i dati per il calcolo del precarico delle molle sono i seguenti:

- $L_{\text{max}} = 33,5 \text{ mm}$ : lunghezza delle molle con misuratore d'angolo a riposo (come da fig. 23);
- $L_0 = 41,9 \text{ mm}$ : lunghezza delle molle in condizione di riposo (quando la forza applicata è nulla).
- $K = 0,1 \text{ N/mm}$ : rigidezza delle molle;
- $M_1 = 0,034 \text{ kg}$ : massa dell'insieme supporto, tastatore, pattino e corpo lvdt.
- $M_2 = 0,033 \text{ kg}$ : massa dell'insieme supporto, tastatore, pattino, pistillo lvdt ed elemento di fissaggio.

Il precarico delle molle sarà quindi:

$$S = k * (L_0 - L_{\text{max}}) = 0,1 * (41,9 - 33,5) = 0,84 \text{ N}$$

Mentre le forze che si oppongono a quelle delle molle sono date dai pesi degli insiemi mobili, e quindi sono:

$$P_1 = M_1 * g = 0,034 * 9,81 \approx 0,33 \text{ N}$$

$$P_2 = M_2 * g = 0,033 * 9,81 \approx 0,32 \text{ N}$$

Che sono sufficientemente inferiori al precarico della molla da garantire che in condizione di riposo sui due insiemi mobili agiscano due forze verso l'alto pari a:

$$F_{01} = S - P_1 = 0,84 - 0,33 = 0,51 \text{ N}$$

$$F_{02} = S - P_2 = 0,84 - 0,32 = 0,52 \text{ N}$$

Si ha così la certezza che a riposo i due tastatori si trovino alla loro massima quota, pronti a muoversi non appena inizia la piegatura della lamiera.

## 5.2 VERIFICA DI MASSIMA COMPRESSIONE DELLE MOLLE

Si vuole adesso verificare che, per una piegatura della lamiera di  $45^\circ$  (come in fig.24), in cui i due insiemi mobili raggiungono la loro quota minima, le molle non abbiano una compressione tale da avere le spire a pacco.

Si può ricavare interrogando l'assieme che le molle, per angoli di piega di  $45^\circ$  hanno lunghezze:

- $L_{\min 1} = 22,63 \text{ mm};$
- $L_{\min 2} = 17,80 \text{ mm}.$

Confrontando questi due valori con il valore di lunghezza minima di lavoro ammissibile dato per la molla  $L_1 = 9,5 \text{ mm}$ , siamo certi che le spire non andranno mai a pacco.

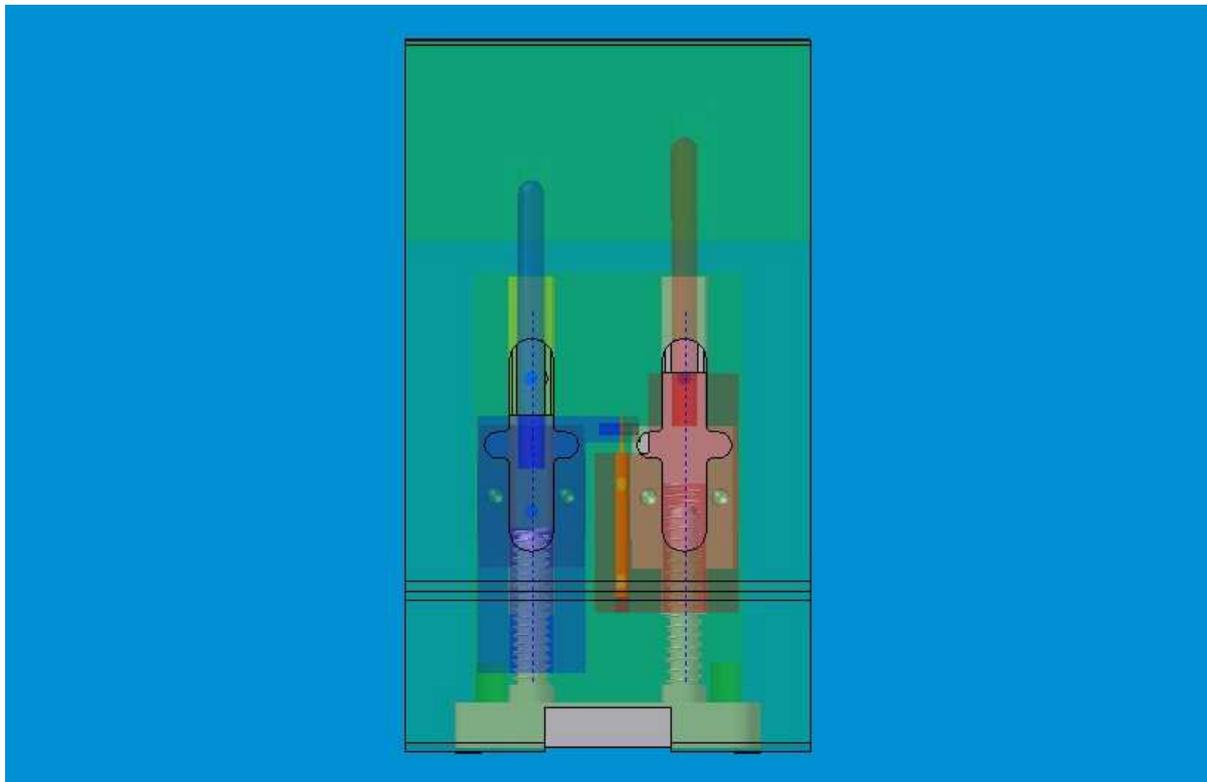


Figura 24

### 5.3 VERIFICA DI RESISTENZA DELLA GUIDA

Le guide per i supporti dei tastatori hanno una certa resistenza a momento flettente nelle tre direzioni rappresentate in figura 25, come dettato da catalogo:



Figura 25

Per capire a quali forze e momenti sono soggette le guide è necessario uno schema a travi sulla base di figura 26 così come proposto in figura 27:

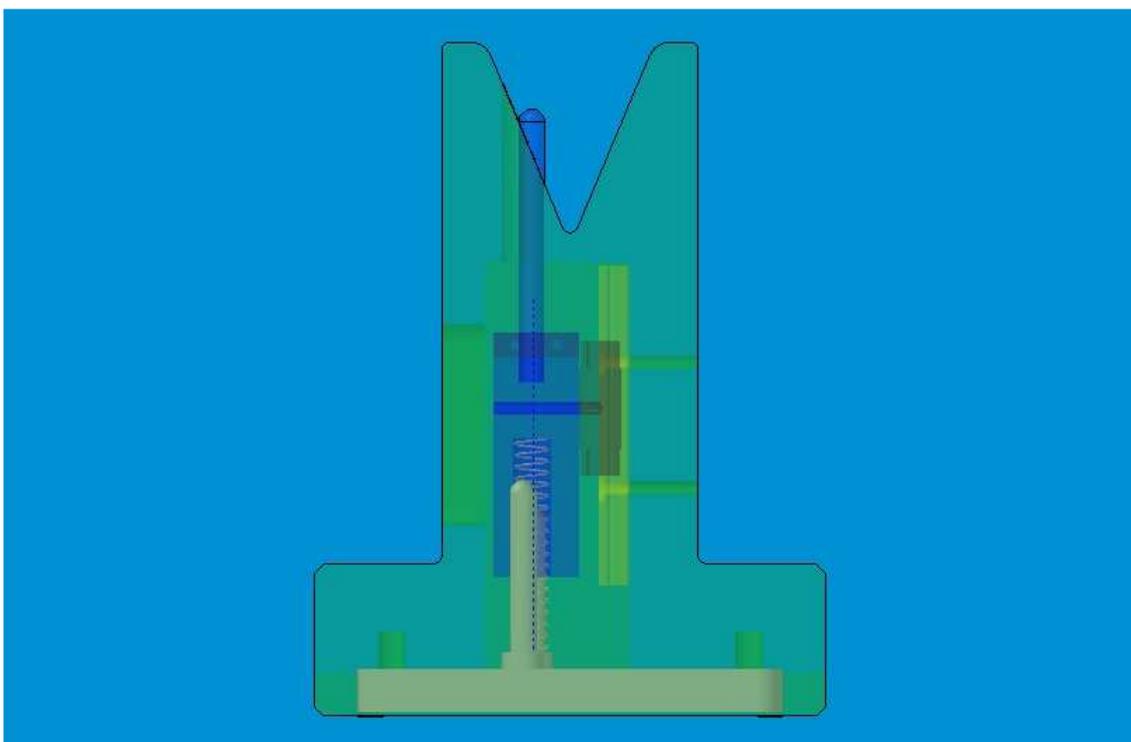
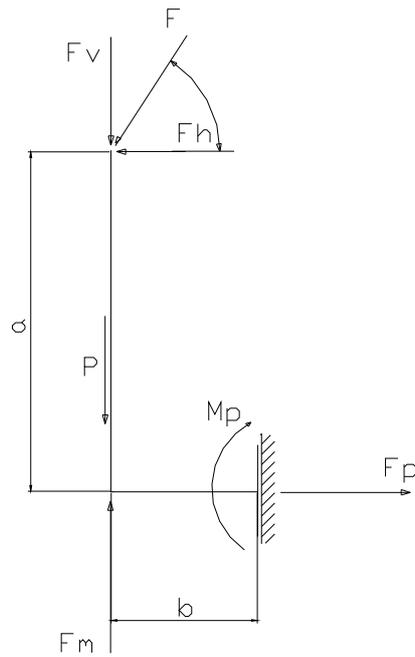


Figura 26



F = forza della lamiera  
 Fv = componente verticale di F  
 Fh = componente orizzontale di F  
 Fm = forza della molla  
 Mp = reazione vincolare del pattino (momento)  
 Fp = reazione vincolare del pattino (forza)  
 P = forza peso  
 $\alpha / 2$  = angolo compreso tra F ed Fh

Figura 27

Da cui è possibile ricavare le azioni (forze e momenti) in corrispondenza del pattino.

Equilibrio alla traslazione in direzione verticale:

$$F_v + P = F_m \rightarrow F_v = F_m - P$$

Equilibrio alla traslazione in direzione orizzontale:

$$F_p = F_h$$

Equilibrio alla rotazione intorno al pattino:

$$M_p = F_h * a \quad (1)$$

Poiché i contributi di Fv, P ed Fm danno luogo ad un momento risultante nulla. Per quanto riguarda le forze scambiate tra la lamiera ed il tastatore, essendo:

$$F_v = F * \sin(\alpha / 2)$$

$$F_h = F * \cos(\alpha / 2)$$

Si può scrivere:

$$F_h / F_v = 1 / \tan(\alpha / 2)$$

$$F_h = F_v / \tan(\alpha / 2) = (F_m - P) / \tan(\alpha / 2) \quad (2)$$

Per la molla, invece, la forza scambiata con il relativo supporto è:

$$F_m = S + K * \Delta l \quad (3)$$

Dove  $K$  è la costante elastica della molla, e  $\Delta l$  è l'allungamento (che in questo caso è l'accorciamento) relativo.

Sostituendo la (3) nella (2) si ottiene:

$$F_h = (S + K * \Delta l - P) / \tan(\alpha / 2)$$

Che, sostituita nella (2) consente di arrivare alla seguente:

$$M_p = a * (S + K * \Delta l - P) / \tan(\alpha / 2) \quad (4)$$

Se consideriamo:

$$S + K * \Delta l > P \rightarrow (S + K * \Delta l - P) > 0 \rightarrow M_p > 0$$

e

$$22,5^\circ < \alpha / 2 < 90^\circ \rightarrow 45^\circ < \alpha < 180^\circ$$

si può notare come il momento risultante visto dal pattino aumenti all'aumentare di:

- $a$ : distanza verticale tra punto di contatto lamiera-tastatore e baricentro del pattino;
- $S$ : precarico della molla;
- $K$ : rigidità della molla;
- $\Delta l$ : compressione della molla;

mentre diminuisce all'aumentare di:

- $P$ : peso dell'insieme supporto, tastatore, LVDT;
- $\alpha$ : angolo di piega della lamiera.

Volendo fare un calcolo cautelativo, si prendano  $a$ ,  $S$ ,  $K$  e  $\Delta l$  ai loro valori massimi, mentre  $P$  e  $\alpha$  ai loro valori minimi, così come di seguito:

- $a$ : pari a 40 mm, che è riferita al supporto per il corpo dell'LVDT;
- $S$ : essendo uguale nei due casi è pari a  $K * \Delta l_0 = 0,1 * 8,4 = 0,84$  N;
- $K$ : pari alla rigidità della molla, che, essendo le due uguali, è 0,1 N/mm;
- $\Delta l$ : pari a 15,7 mm, riferito al supporto per il pistillo dell'LVDT;
- $P$  pari a  $m * g = 0,03 * 9,81 = 0,29$  N;
- $\alpha$  pari a  $45^\circ$ ;

Così che risulti:

$$M_p = 40 * (0,84 + 0,1 * 15,7 - 0,29) / \tan(45 / 2) = 152 \text{ N*mm}$$

Tale valore, pur essendo cautelativamente superiore a quello che effettivamente si realizza alle guide, è inferiore a quello massimo tollerato dalla guida, che nello specifico è  $M_{oz} = 1,4 \text{ N*m}$ . Si può quindi scrivere:

$$M_p = 0,152 \text{ N} * m < M_{max} = M_{oz} = 1,4 \text{ N*m}$$

Che significa che, assumendo trascurabili i momenti in direzione o-x e o-y rispetto a quello in direzione o-z, la resistenza della guida è verificata.

## 5.4 CALCOLO DELLA RELAZIONE INGRESSO-USCITA

La relazione ingresso-uscita è quella funzione  $F$  che, preso in ingresso il valore dell'angolo di piega della lamiera, restituisce il valore dell'uscita. Lo schema logico può essere rappresentato nel seguente modo (v. fig. 28):

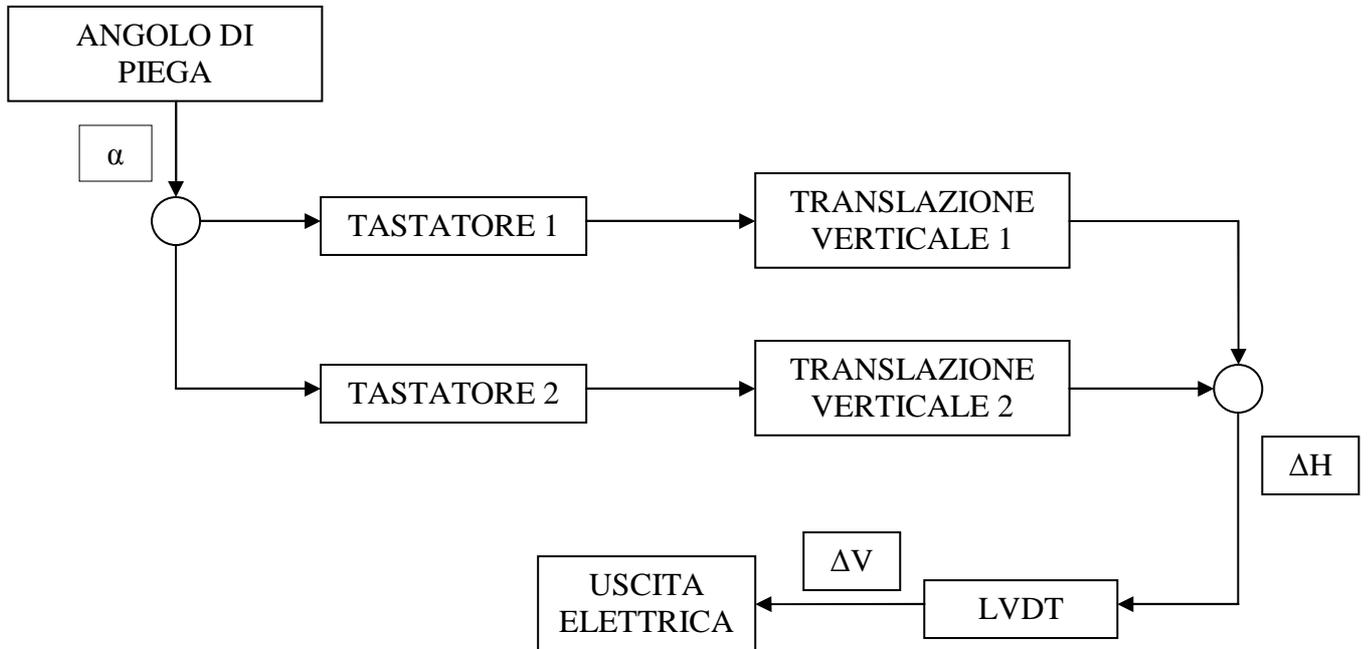


Figura 28

### 5.4.1 DEDUZIONE DEL LEGAME $\Delta H - \alpha$

Per la deduzione del legame  $\Delta H = f(\alpha)$  bisogna fare riferimento alle caratteristiche meccaniche dello strumento. Lo schema meccanico è il seguente (fig. 29):

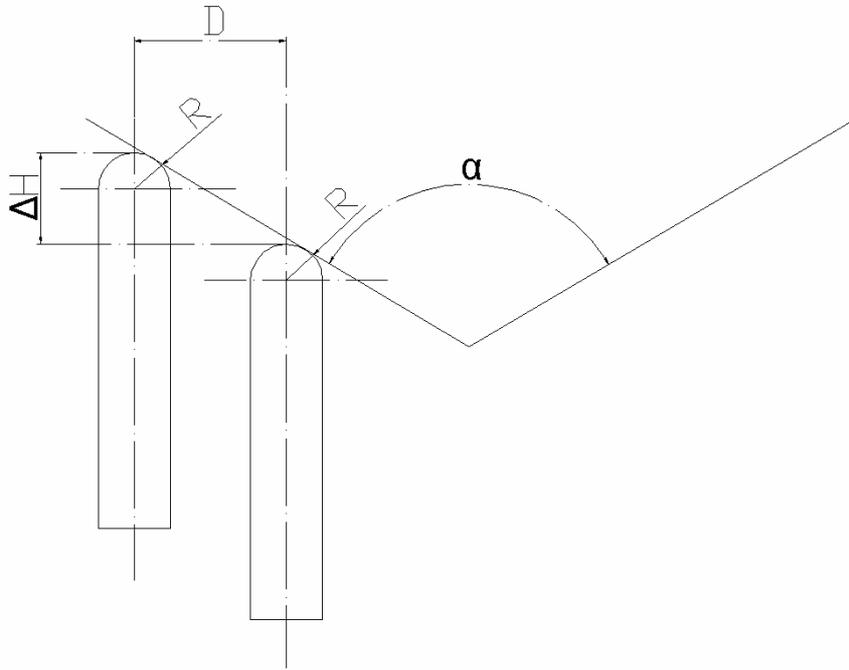


Figura 29

L'ingresso è l'angolo di piega  $\alpha$ , mentre l'uscita è la quantità  $\Delta H$ , cioè la variazione di quota tra due punti di riferimento arbitrari dei tastatori, ad esempio la distanza verticale tra le due sommità.

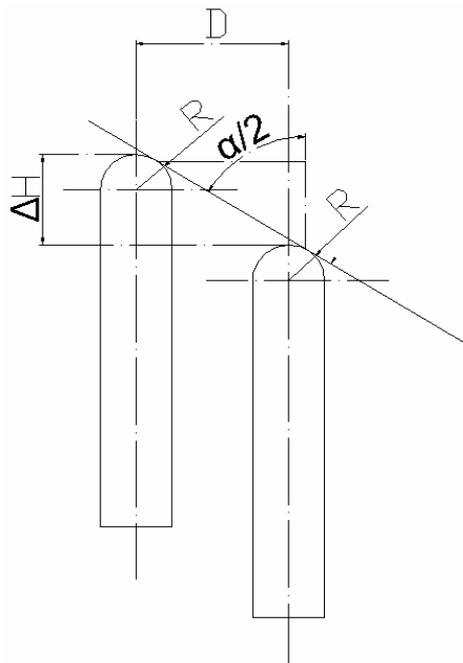


Figura 30

Essendo i due tastatori dello stesso diametro ed avendo le due sommità raccordate con lo stesso raggio, la distanza verticale tra le due sommità ( $\Delta H$ ) è pari alla distanza verticale tra i punti di tangenza lamiera-tastatore. Vale quindi la seguente formula:

$$D / \Delta H = \tan ( \alpha / 2 )$$

Da cui si ricava:

$$\Delta H = D / \tan ( \alpha / 2 )$$

#### 5.4.2 DEDUZIONE DEL LEGAME $\Delta V - \Delta H$

Essendo  $\Delta V$  l'uscita dell'lvdt nonché del misuratore d'angolo, supponendo che il legame ingresso-uscita dell'lvdt sia di tipo lineare è possibile introdurre la grandezza  $S$  (sensibilità dell'lvdt) che esprime il legame:

$$\Delta V = g ( \Delta H ) = S * \Delta H$$

#### 5.4.3 DEDUZIONE DEL LEGAME $\Delta V - \alpha$

Andando a sostituire l'espressione di  $\Delta H$  ricavata in precedenza si ottiene:

$$\Delta V = F ( \alpha ) = g ( f ( \alpha ) ) = ( S * D ) / \tan ( \alpha / 2 )$$

Volendo invece esprimere il legame inverso che restituisce il valore dell'angolo in funzione dell'uscita dello strumento si può scrivere:

$$\alpha = F^{-1} ( \Delta V ) = 2 * \arctan [ ( S * D ) / \Delta V ] [ \text{rad} ]$$

oppure, se si desidera esprimere l'angolo in gradi sessagesimali:

$$\alpha = ( 360 / \pi ) * \arctan [ ( S * D ) / \Delta V ] [ ^\circ ]$$

che è il legame che consente, una volta installato il misuratore d'angolo, di tradurre l'uscita dello strumento nella quantità fisica misurata.

### 5.5 CARATTERISTICHE DELLA SOLUZIONE

La nostra soluzione è stata creata appositamente per soddisfare le esigenze della Schiavi S.p.a. per quanto riguarda l'automazione del processo di piegatura dei fogli di lamiera; è stata progettata quindi al fine di sopperire alle carenze della soluzione proposta, senza penalizzare le altre caratteristiche.

Gli aspetti principali del confronto tra vecchia e nuova soluzione sono:

- Accuratezza: la nostra soluzione migliora sensibilmente l'accuratezza della lavorazione in parte grazie all'adozione di guide lineari di precisione, e in parte alla tecnica di misura basata su due tastatori, che svincola dal riferimento interno matrice;

- Impuntamento: la nostra soluzione riduce i problemi dell'impuntamento poiché il movimento delle parti mobili è guidato dalle guide di precisione a ricircolazione di sfere da noi scelte, a patto di lasciare un minimo di gioco tra i tastatori e i fori appositamente ricavati per loro all'interno della matrice;
- Compattezza: la compattezza del nostro strumento è leggermente inferiore a quella della soluzione proposta; ciò è dovuto al numero delle componenti interne al sistema e ai limiti di ingombro delle stesse. Il nostro strumento infatti occupa la matrice per un'estensione di 50mm, contro i 40mm della vecchia. Si presume che tale penalizzazione non sia eccessiva e non costituisca comunque un limite all'utilizzo del sistema stesso.
- Robustezza: vista la dimensione non trascurabile dello scavo realizzato nella matrice, si deduce che la nostra soluzione è meno robusta della precedente, però si mantiene nei limiti del processo di lavorazione, così come verificato nel paragrafo 3.1.1.
- Ingresso delle polveri esterne: per questo aspetto è difficile stabilire quale delle due soluzioni sia la migliore, poiché entrambe presentano fori e scavi che possono costituire ingresso per le polveri e i detriti;
- Facilità di realizzazione: lo strumento da noi proposto comprende pezzi provenienti da catalogo e parti da noi inventate, che comunque non presentano geometrie complesse; la soluzione quindi può essere definita di semplice realizzazione;
- Facilità di installazione e di montaggio: è paragonabile a quella della vecchia soluzione, nonostante il numero di componenti sia più elevato.

## 6 ALTRI POSSIBILI SVILUPPI

Il tipo di soluzione adottabile non è ovviamente univoco, ma si possono pensare ad altri metodi che differiscono essenzialmente per il tipo di trasduttore che si considera, definendo così svariate modalità per effettuare la misurazione dell'angolo di piega. Tutte queste soluzioni sono naturalmente studiate e progettate in funzione del tipo di strumento scelto.

Quella che a noi è sembrata la scelta più semplice, di più facile progettazione e più consona al nostro corso di studi è quella che abbiamo sviluppato, ovvero tramite un LVDT, che è uno strumento induttivo, ma è contornato da una non indifferente parte meccanica (guide, tastatori, molle).

Tuttavia si sarebbero potute studiare altre modalità di misura utilizzando diversi dispositivi, con differenti principi di funzionamento e quindi rivoluzionando più o meno marcatamente tutto il sistema di misura.

Altre soluzioni avrebbero potuto basarsi su trasduttori quali:

- Potenziometrici, il cui sistema di misura avrebbe potuto avvicinarsi alla nostra soluzione sostituendo solamente il dispositivo di misura LVDT in quanto anch'essi necessitano di un contatto meccanico con il pezzo sottoposto a misurazione;
- Capacitivi, per cui si poteva progettare un sistema di misura molto semplice in quanto non necessitano del contatto fisico con la lamiera, ma semplicemente posizionandolo opportunamente all'interno della matrice;

- Laser, anch'esso caratterizzato da un sistema di misura molto semplice in quanto è il raggio luminoso a colpire la lamiera, è posizionabili pertanto anche ad una buona distanza dal pezzo in piega; di particolare attenzione con questo strumento la progettazione di un sistema che eviti l'introduzione di residui dovuti alla lavorazione o all'ambiente in cui si opera in quanto potrebbero falsare la misura;
- Di pressione, tramite questi strumenti si poteva studiare un sistema di misura dell'angolo di piega misurando la perdita di pressione di un getto di fluido scagliato verso la lamiera; di particolare attenzione con questo strumento la progettazione di un sistema aggiuntivo che generi il flusso di fluido (per esempio acqua), permettendone il ricircolo, a precisi valori di pressione;

Questi sono esempi di possibili soluzioni, che necessitano ovviamente di studio e di sviluppo, ma che potrebbero rappresentare buone alternative alla soluzione da noi adottata.

## **7 CONCLUSIONI**

Il nostro progetto si è indirizzato verso una soluzione di tipo meccanico, semplice, pratica e funzionale al fine di risolvere il problema della misura in tempo reale dell'angolo di piega della lamiera durante il processo di lavorazione considerato. Ci possiamo ritenere soddisfatti del nostro lavoro e speriamo un domani di vederlo realizzato, così da poter verificare se effettivamente risponde alle esigenze della Schiavi Macchine S.p.a.

## 8 RIFERIMENTI

[www.schiavimacchine.it](http://www.schiavimacchine.it)

[www.leanes.it](http://www.leanes.it)

[medias.ina.de/medias/de!hp/a65kRtl9POB-?lang=it](http://medias.ina.de/medias/de!hp/a65kRtl9POB-?lang=it)

[www.dim.molle.com](http://www.dim.molle.com)