



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Analisi di fattibilità di sistemi di presa elettro-meccanici per  
processi di deformazione di componenti metallici**

Relatore: Prof. Andrea Ghiotti

Correlatore: Ing. Enrico Simonetto

Laureando: Tommaso De Toffol

Numero Matricola: 1184999

Anno Accademico 2019/2020



# Indice

Sommario.....	6
Introduzione.....	7
Capitolo 1.....	9
Stato dell'arte .....	9
1.1 Introduzione sulle lavorazioni della lamiera .....	11
1.1.1 Allungamento .....	13
1.1.2 Anisotropia .....	15
1.1.3 Dimensione del grano .....	16
1.1.4 Tensioni residue .....	16
1.1.5 Ritorno elastico .....	17
1.2 Processo di imbutitura .....	18
1.2.1 Stato tensionale e LDR .....	20
1.2.2 Premilamiera .....	22
1.2.3 Punzone .....	24
1.2.4 Lubrificanti .....	27
1.3 Piegatura tubi .....	28
1.3.1 Ritorno elastico draw bending .....	31
1.4 Sistemi di serraggio: stato dell'arte .....	32
1.4.1 Sistemi meccanici .....	32
1.4.2 Sistemi a magneti permanenti.....	36
1.4.3 Sistemi elettromagnetici .....	39
Capitolo 2.....	45
Soluzione scelta .....	45
2.1 Sistema elettromagnetico a sella.....	47
2.2 Modello numerico.....	48
2.2.1 Costruzione modello geometrico e fisico .....	49
2.2.2 Impostazione simulazione .....	57

2.3 Ottimizzazione parametri .....	61
2.3.1 Materiale.....	70
2.3.2 Distribuzione delle selle .....	72
2.3.3 Spessore della lamiera.....	75
2.3.4 Correlazione larghezza cava e spessore lamiera.....	78
2.3.5 Distribuzione della corrente nelle cave .....	81
2.3.6 Traferro.....	88
2.3.7 Numero delle selle.....	90
Capitolo 3.....	95
Risultati .....	95
3.1 Materiale.....	97
3.2 Geometrie .....	98
3.2.1 Allargamento lamiera .....	103
3.3 Avvolgimenti .....	107
Capitolo 4.....	111
Apparato sperimentale .....	111
4.1 Macchina Strip Drawing test.....	112
4.2 Raddrizzatore di corrente Powerel.....	117
Capitolo 5.....	119
Progettazione sistema di prova .....	119
5.1 Stampi .....	123
5.1.1 Verifica a taglio dei blocchi .....	126
5.1.2 Canali di raffreddamento.....	129
5.2 Piatto di aggancio.....	130
5.3 Aggancio motore elettrico.....	133
5.3.1 Aggancio base .....	133
5.3.2 Morsa superiore.....	134
5.3.3 Morsa inferiore.....	135
5.4 Provino .....	139
5.4.1 Verifica sezione netta.....	140
5.4.2 Verifica a rifollamento .....	141

Conclusioni.....	144
Indice delle figure .....	148
Indice delle tabelle .....	153
Bibliografia .....	154
Appendice.....	156

# Sommario

Questa tesi ha l'obiettivo di sviluppare un sistema di afferraggio elettromagnetico che funga da ausilio ad un sistema meccanico già presente, al duplice scopo di ridurre le dimensioni e di poter garantire una migliore regolazione della pressione esercitata sul componente andando a variare la corrente immessa nel circuito.

Ciò risulta vantaggioso in diverse tipologie di processo tra cui l'imbutitura, dove la pressione esercitata dal premilamiera è un parametro fondamentale su cui si basa la riuscita del processo e la qualità del prodotto. Un altro processo è la piegatura tubi, nello specifico il draw bending, dove lo stampo preposto al serraggio del tubo, il clamp die, ha una lunghezza che è funzione della resistenza del pezzo alla piega e rappresenta un parametro commerciale in quanto determina la lunghezza minima di piega, lo spazio necessario per realizzare due pieghe consecutive.

Si ritiene utile quindi la possibilità di inserire un sistema che sfrutti i principi dell'elettromagnetismo, in grado di fornire una pressione ausiliaria e regolabile, per poter gestire meglio il processo.

# Introduzione

Lo stampaggio della lamiera è un processo utilizzato in molti settori produttivi industriali:

- Automotive, nella produzione di portiere, cofani ed elementi di carrozzeria
- Aeronautico, nella produzione di ali e fusoliere
- Elettrodomestico, nella produzione di lavatrici, cappe e congelatori
- Alimentare, nella produzione di pentole e lavelli

Il largo utilizzo delle lamiere è dovuto alla loro notevole versatilità in termini di utilizzo e di magazzinaggio, alla precisione sullo spessore, alla possibilità di ottenere finiture superficiali di qualsiasi livello ed al loro basso costo di lavorazione.

La forma finale dell'elemento viene realizzata a partire da un foglio di lamiera che viene deformato plasticamente senza subire ulteriori lavorazioni meccaniche di asportazione di truciolo come, per esempio, la fresatura, che comportano costi di processo elevati. Il processo di formatura può avvenire in varie modalità e attraverso diversi strumenti: meccanici, a fluido, magneticamente o tramite cariche esplosive.

Generalmente, il serraggio di questi elementi avviene in modo meccanico, e se da una parte comporta il vantaggio di poter esercitare forze molto elevate sul componente, dall'altra comporta la presenza di determinati ingombri minimi per poter garantire il livello di forza desiderato, oltre al fatto che risulta difficile poter regolare in tempi brevi la quantità di forza da imprimere al serraggio.

In questi tesi viene approfondito lo studio di fattibilità di un sistema di serraggio elettromagnetico integrabile direttamente all'interno del sistema meccanico, pertanto che non richieda ulteriori ingombri e che possa essere regolato tramite un generatore di corrente a sei moduli. Viene inoltre progettato il sistema di prova basandosi su una macchina già presente in laboratorio e adattata alle esigenze di prova.

Nella prima parte si è fatta una panoramica sulle lavorazioni della lamiera e sui sistemi di serraggio meccanici ed elettromagnetici presenti al giorno d'oggi.

Nella seconda parte si è descritta la soluzione scelta, i parametri impostati ed il lavoro di simulazione che ha portato alla definizione della configurazione finale del sistema, con un riassunto finale dei risultati principali raccolti.

Nella terza parte si è descritto l'apparato sperimentale presente in laboratorio, utilizzato come base su cui impostare la prova vera e propria.

Nella quarta parte si è descritta la progettazione del sistema di prova, con le conseguenti modifiche all'apparato strumentale già presente per poter svolgere i test correttamente.

Alla fine, vengono tratte le conclusioni sul lavoro svolto e sull'efficacia del sistema di serraggio progettato.



# Capitolo 1

## Stato dell'arte



## 1.1 Introduzione sulle lavorazioni della lamiera

Le lamiere sono caratterizzate da un elevato rapporto tra area della superficie e spessore. Solitamente si considera  $t = 6$  mm come valore limite di spessore per una lamiera.

Il loro impiego è vastissimo e copre vari campi in funzione del materiale con cui vengono realizzate.

Le lamiere di acciaio e alluminio vengono utilizzate principalmente nella carpenteria metallica, nelle costruzioni meccaniche ed in molti settori industriali, in particolare l'automotive dove la necessità di materiali leggeri ha incoraggiato l'utilizzo sempre più frequente di leghe di alluminio. In ambito aeronautico vengono impiegate leghe di titanio, poiché garantiscono un'elevata resistenza a frattura, a fatica e a corrosione ma richiedono processi dedicati per cui si tratta di nicchie di produzione.

Le lamiere in rame trovano impiego soprattutto nel settore elettrico, elettromeccanico e nella lattoneria.

Le lamiere di ottone vengono impiegate nell'oggettistica, minuteria metallica, arredamento, orologeria, idraulica.

I vantaggi che presentano sono:

- Peso ridotto
- Possibilità di realizzare geometrie complesse
- Costi ridotti

I costi ridotti derivano da tre fattori:

- Materie prime
- Tonnellaggio basso richiesto alla macchina
- Lavorazioni a freddo, poiché non viene richiesta l'applicazione di tonnellaggi elevati

La possibilità di lavorare a freddo comporta un serie di vantaggi tra cui una miglior finitura superficiale ed una precisione dimensionale molto buona.

Il principale svantaggio consiste nell'elevato costo degli stampi, in quanto possono risultare molto complessi geometricamente e sono soggetti a fenomeni di usura. Questo porta a privilegiare la produzione di massa delle lamiere, affinché i costi fissi derivanti dall'acquisto e la manutenzione degli stampi vengano assorbiti da volumi elevati di produzione.

La formatura delle lamiere avviene per applicazione di tensioni di trazione sul piano della lamiera stessa; si distingue dai processi massivi dove si lavora prevalentemente in compressione e con tassi di deformazione elevati. In questo caso la variazione di spessore, che avviene per effetto Poisson ed è dovuto alla stiratura della lamiera, è un fenomeno da evitare in quanto può provocare strizione e frattura.

Si identificano tre processi fondamentali:

- Taglio della lamiera in forma di semilavorato (blank)
- Formatura, principalmente piegatura, imbutitura e stiratura
- Finitura superficiale

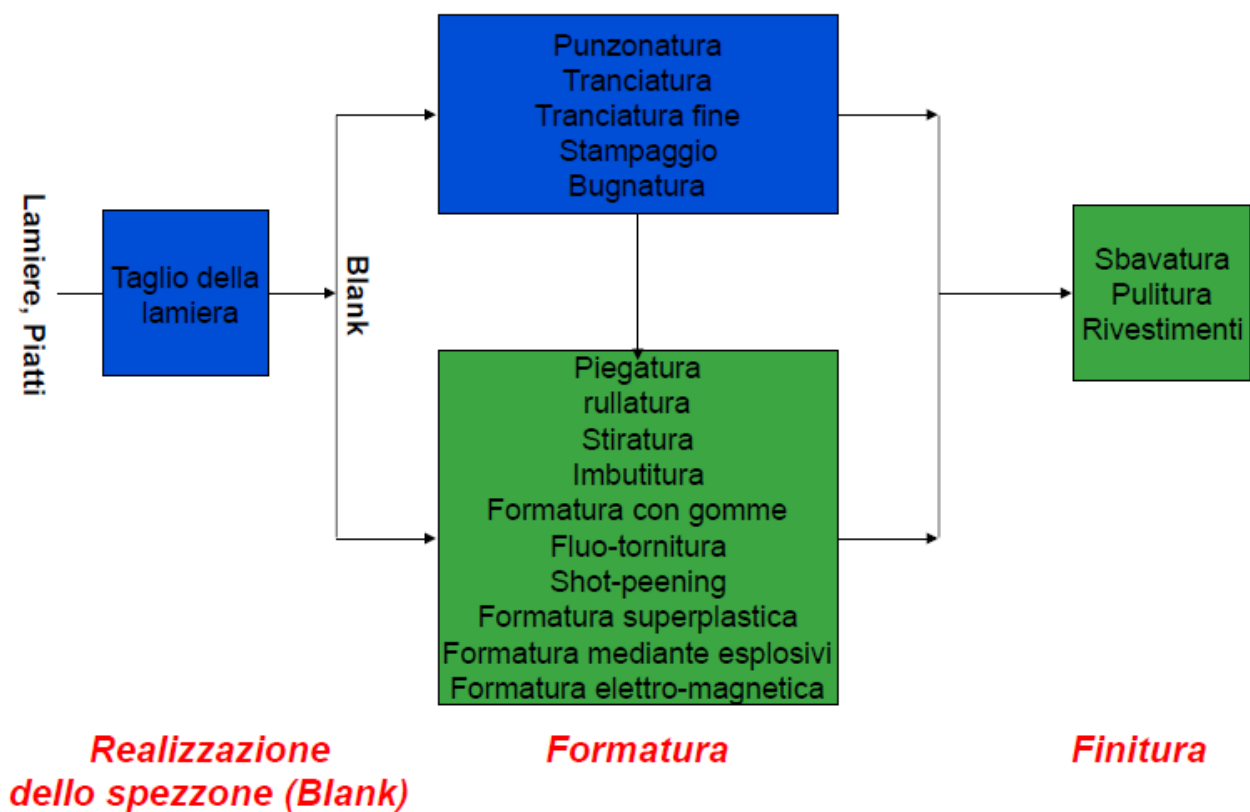


Figura 1: Processi di lavorazione della lamiera.

I parametri che influenzano maggiormente il processo sono [1]:

- Allungamento
- Anisotropia
- Dimensione del grano
- Tensioni residue
- Ritorno elastico

### 1.1.1 Allungamento

In figura 2, dal diagramma tensione – deformazione relativo alla classica prova di trazione eseguita in laboratorio, si registra un allungamento uniforme fino al valore limite di tensione UTS, oltre il quale inizia una seconda fase definita strizione dove avviene un allungamento non uniforme fino alla rottura del provino. In termini di formabilità della lamiera, ne consegue che un materiale con una buona formabilità deve garantire elevati valori di allungamento uniforme.

Il modello di deformazione a freddo più utilizzato è quello relativo alla legge di Hollomon:

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

Con K coefficiente di resistenza ed n esponente di incrudimento.

La strizione avviene per  $\varepsilon_{necking} = n$ , pertanto vengono preferiti materiali ad alto esponente di incrudimento.

In figura 3, vengono mostrate due tipologie di strizione:

- Localizzata, dove la deformazione si concentra in una zona critica anticipando la rottura del componente
- Diffusa, dove si ha una strizione distribuita più uniformemente che ritarda la rottura del componente

Questi fenomeni sono influenzati dal valore di m, il coefficiente di sensibilità alla velocità di deformazione. È un parametro che generalmente viene usato per processi a caldo, ma in questo si è registrata una forte dipendenza dalla velocità di deformazione nella zona strizionata. Più m è elevato più la strizione risulta diffusa.

In conclusione, l'allungamento totale è dato dalla somma dell'allungamento uniforme, dipendente da n, e dell'allungamento non uniforme, dipendente da m. Per garantire una buona formabilità sono necessari elevati valori dell'esponente di incrudimento n e del coefficiente di sensibilità alla velocità di deformazione m.

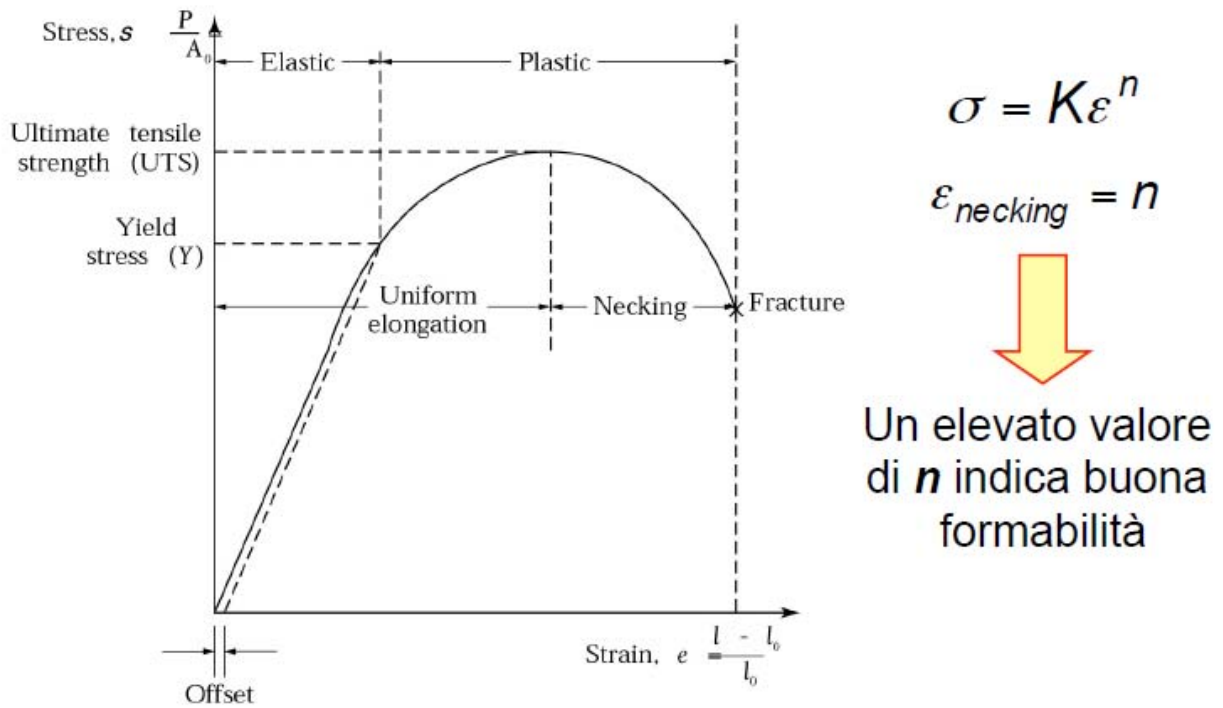


Figura 2: Diagramma tensione - deformazione prova di trazione.

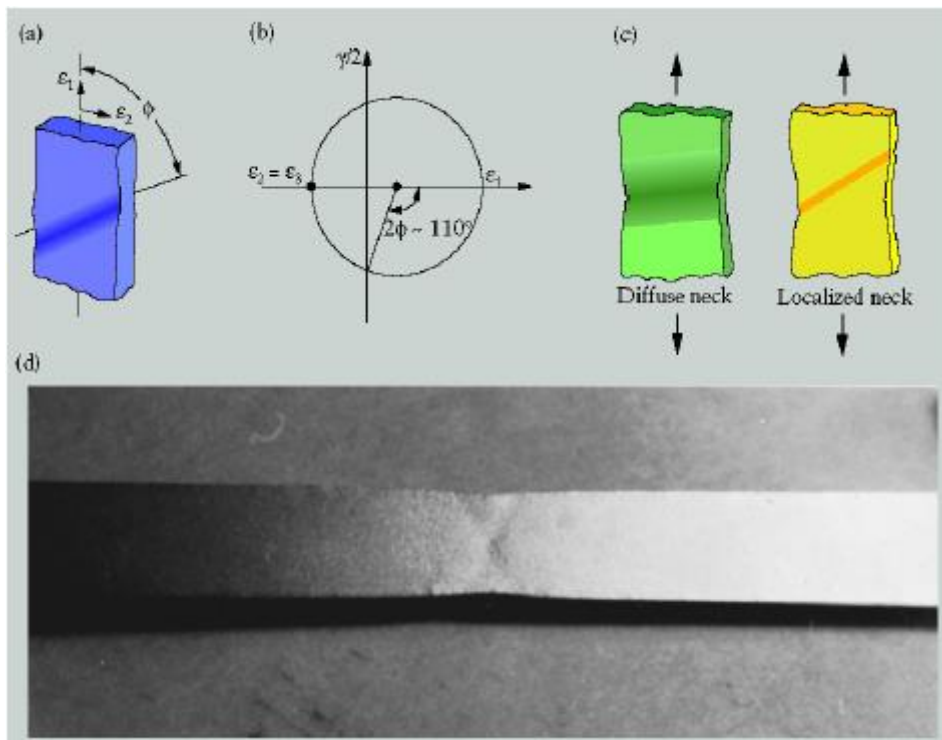


Figura 3: Strizione localizzata e diffusa.

## 1.1.2 Anisotropia

Un materiale si definisce anisotropo quando le sue proprietà variano a seconda della direzione considerata. Nel caso di materiali metallici anisotropi, si nota che le fibre seguono un orientamento ben definito e la loro risposta alla sollecitazione è dipendente dalla direzione di applicazione del carico.

Nei processi massivi non si instaurano fenomeni di anisotropia, diventa solo funzione del materiale di partenza; un esempio sono le leghe di titanio [2] e zinco, dove la struttura cristallina ad esagonale compatto li rende intrinsecamente anisotropi.

Nella lavorazione delle lamiere questa caratteristica viene indotta dal processo di laminazione e dagli eventuali trattamenti termici che la lamiera subisce, pertanto va presa in considerazione.

Nella pratica, si utilizza l'indice di anisotropia normale  $R$  per verificare l'anisotropia di un materiale:

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

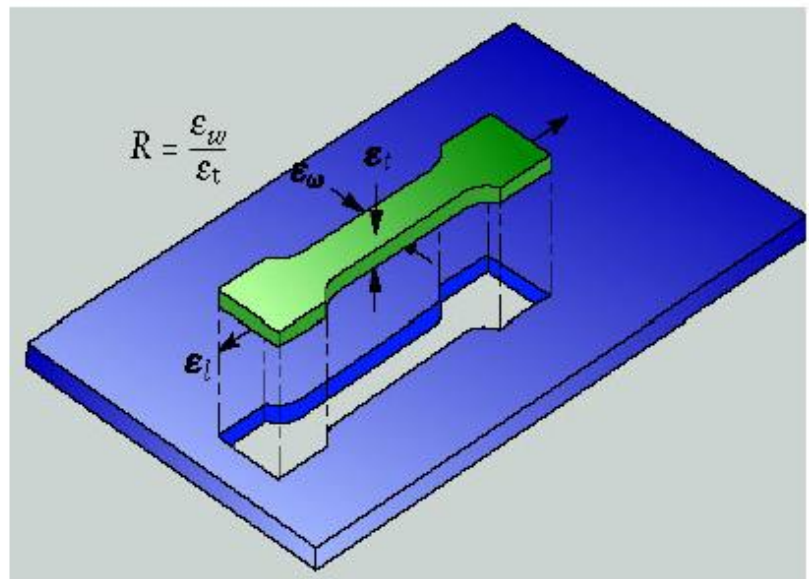


Figura 4: Anisotropia normale.

Dove  $R$  viene misurato a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  rispetto alla direzione di laminazione.

Vengono poi definiti l'indice di anisotropia normale media  $\bar{R}$  e l'indice di anisotropia planare:

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

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

Un materiale si definisce isotropo se  $R_m = 1$  e  $\Delta R = 0$ .

### 1.1.3 Dimensione del grano

La dimensione del grano è un parametro fondamentale nella determinazione delle proprietà meccaniche del materiale.

Le strutture a grana fine favoriscono le proprietà meccaniche a temperature basse (fino a 400° C), poiché i bordi di grano costituiscono un ostacolo al movimento delle dislocazioni, mentre strutture a grana grossa o, al limite, monocristalli, migliorano la resistenza del materiale a creep in alta temperatura.

Inoltre, una struttura a grana fine risulta migliore in termini di aspetto superficiale, in quanto una dimensione maggiore dei grani fa apparire la superficie più ruvida, dando l'effetto di "buccia d'arancia".

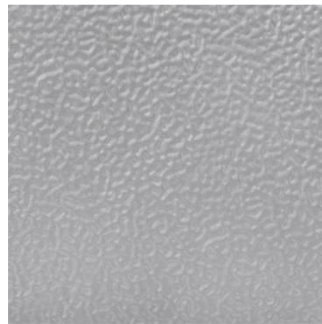


Figura 5: Effetto "buccia d'arancia".

### 1.1.4 Tensioni residue

Le tensioni residue sono sforzi di trazione o di compressione a risultante nulla senza che vi sia applicato un carico esterno (forza o gradiente termico) in un componente che risulta, quindi in equilibrio; solitamente essi sono presenti in zone ben delimitate ed hanno il loro massimo in superficie [3].

Solitamente si generano a causa di una deformazione plastica non omogenea che può derivare, oltre che dall'applicazione di un carico, anche da una contrazione o dilatazione termica o da una trasformazione di fase avvenuta durante il processo di produzione del componente.

In figura 6, si può vedere come in fase di laminazione la distribuzione delle tensioni residue vari a seconda del diametro dei rulli e di conseguenza del grado di riduzione dello spessore.



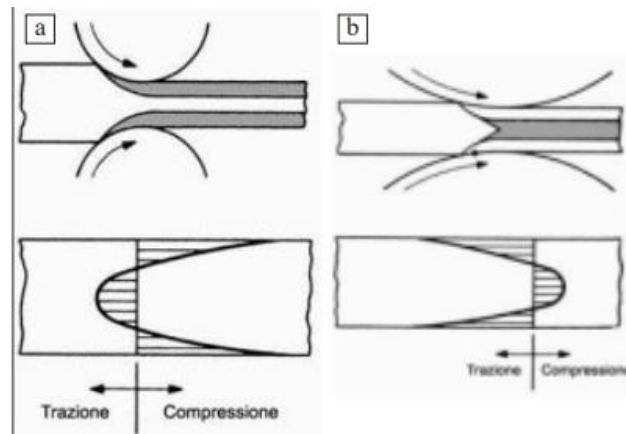


Figura 6: Distribuzione tensioni residue nel processo di laminazione: a) Diametro rulli piccolo, plasticizzazione bordo con stato residuo di trazione in superficie, b) Diametro rulli grande, plasticizzazione cuore con stato residuo di compressione in superficie.

### 1.1.5 Ritorno elastico

Fenomeno tipico della piegatura di lamiere e di tubi, avviene per alti rapporti tra raggio di curvatura e spessore di lamiera. Si tratta del recupero della quota parte di tipo elastico della deformazione [4], per cui, come si vede in figura 8, l'angolo iniziale di piega  $\alpha_i$  risulta maggiore dell'angolo finale  $\alpha_f$ , ed il relativo raggio di curvatura  $R_i$  risulta minore del raggio di curvatura  $R_f$ . In figura 7 viene evidenziato il ciclo di carico e scarico con relativa quota plastica, rappresentata dalla deformazione permanente, e quota elastica.

È possibile compensare questo effetto, ottenendo il valore  $\alpha_i$  desiderato:

- Sovrapiegando (imponendo un  $R_i$  maggiore ma rispettando il raggio minimo di piega)
- Applicando una compressione in corrispondenza della piega
- Stirando il componente in corrispondenza della piega, aumentando la quota plastica a discapito della quota elastica
- Lavorando a caldo

Questo fenomeno verrà approfondito nel paragrafo riguardante il draw bending.

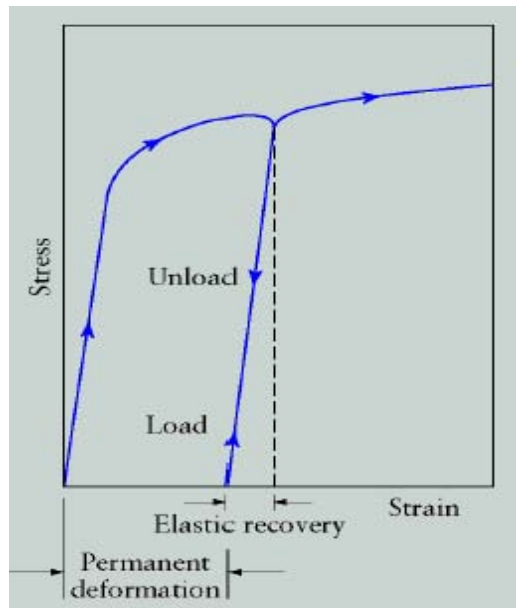


Figura 7: Grafico tensione - deformazione ingegneristica al momento dello scarico del pezzo, con evidenziata la quota plastica rimanente.

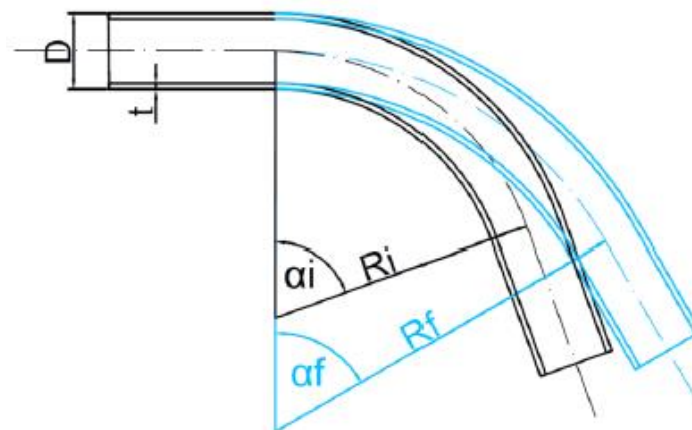


Figura 8: Ritorno elastico lamiera, posizione iniziale e finale.

## 1.2 Processo di imbutitura

Il processo di imbutitura è uno dei più diffusi processi di formatura di lamiera dell'industria manifatturiera e consiste nello spingere la lamiera in una cavità tramite l'azione di un punzone che la deforma plasticamente facendole assumere differenti forme, a seconda della geometria del punzone stesso. È un processo molto diffuso nel campo automotive, degli elettrodomestici e in settori analoghi, oltre che nei laboratori per effettuare test di

formabilità delle lamiere [6], come per esempio le prove di Swift e Fukui. I principali vantaggi di questa tecnologia sono:

- Buona finitura superficiale
- Alta precisione geometrica
- Elevata rigidezza del materiale, specialmente nei processi a freddo

In figura 9 vengono identificati diversi elementi geometrici che fanno parte dei parametri di processo:

- Diametro del punzone  $D_p$
- Raggio di uscita del punzone  $R_p$
- Diametro della lamiera  $D_o$
- Spessore della lamiera  $t$
- Gioco tra punzone e stampo  $c$

A cui si vanno ad aggiungere altri tre parametri fondamentali:

- Forza del premilamiera
- Lubrificante
- Forza del punzone  $F$

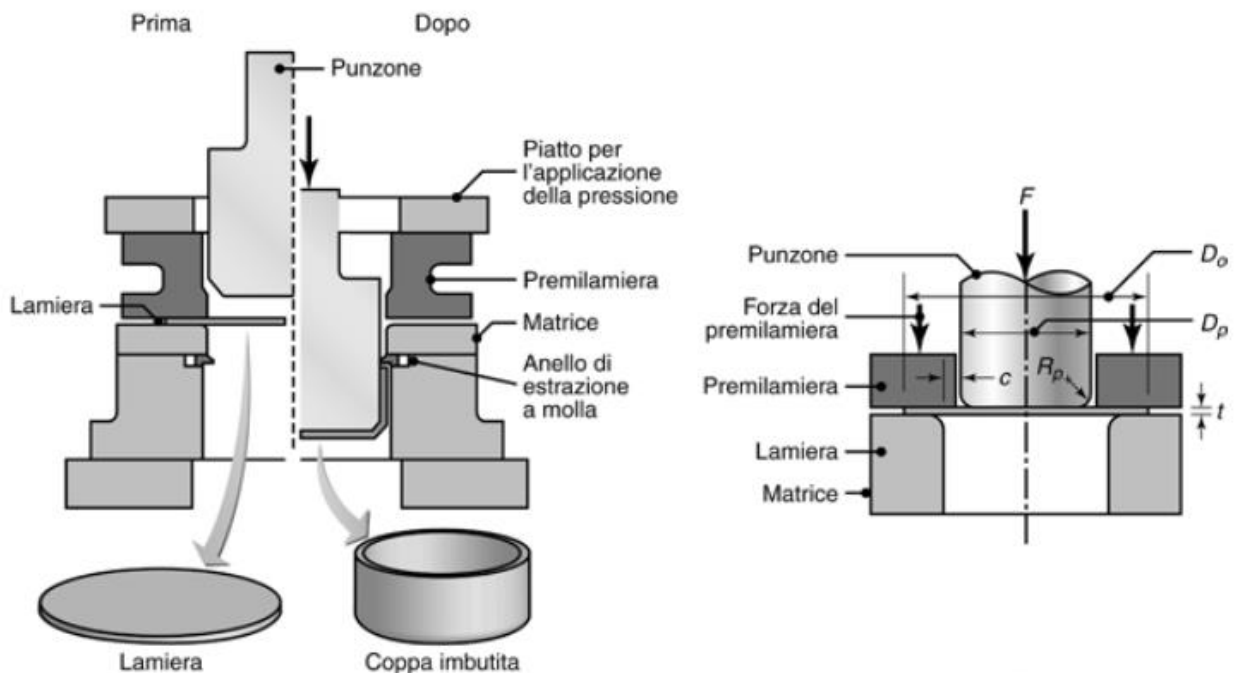


Figura 9: Schema processo di imbutitura.

## 1.2.1 Stato tensionale e LDR

Il processo di imbutitura presenta uno stato tensionale complesso, con diverse sollecitazioni agenti lungo la lamiera di cui tenere conto.

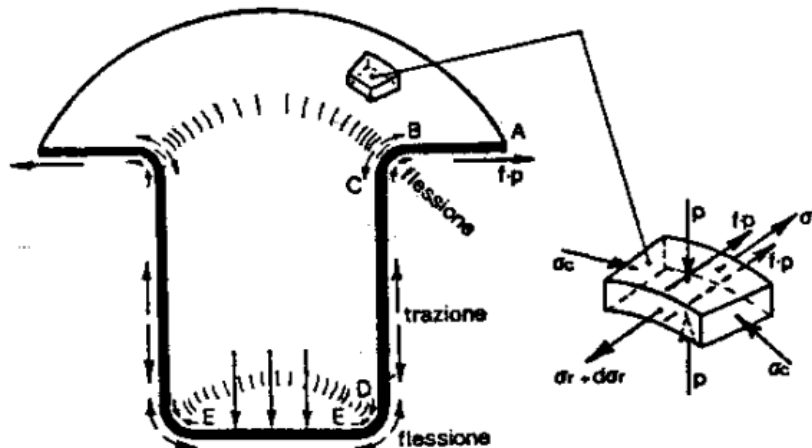


Figura 10: Stato tensionale processo di imbutitura.

In figura 10, si suddivide la lamiera in diverse zone [7]:

- *Zona AB Flangia*
  - Sollecitazione radiale di trazione  $\sigma_r$
  - Compressione del prelamiera  $p$
  - Attrito  $f \cdot p$
  - Sollecitazione circonferenziale di compressione  $\sigma_c$
- *Zona BC*
  - Sollecitazione di flessione
- *Zona CD Parete cilindrica*
  - Sollecitazione di trazione assiale dovuta all'azione del punzone
  - Sollecitazione di trazione circonferenziale dovuta alla presenza del punzone che impedisce contrazioni di diametro
- *Zona DE*
  - Sollecitazione di flessione
- *Zona EE Fondello*
  - Sollecitazione biassiale di tensione, zona con deformazioni limitate

Generalmente, si parla sempre di stiro – imbutitura, poiché nella zona CD il punzone tende a richiamare la lamiera trattenuta dalla compressione del prelamiera inducendo uno stato di trazione assimilabile alla stiratura.

Il processo viene governato da un parametro definito rapporto limite di imbutitura (Limiting Drawing Ratio):

$$LDR = \max\left(\frac{D_0}{D_p}\right)$$

Superato questo rapporto si assiste alla frattura del componente. La frattura avviene generalmente per assottigliamento della parete cilindrica a seguito dello stato di trazione assiale a cui è soggetta.

Questo rapporto è influenzato dalle caratteristiche del materiale, in particolare dall'anisotropia. Di seguito viene mostrato un grafico dove è possibile notare che all'aumentare dell'indice di anisotropia normale media aumenta il LDR, questo perché aumentando  $\bar{R}$  si riduce l'assottigliamento che provoca la rottura della lamiera. Per questi motivi le leghe di titanio risultano le migliori in termini di riduzioni di diametro con un LDR pari a circa 3, mentre per gli acciai i valori si attestano tra 2.2 e 2.4.

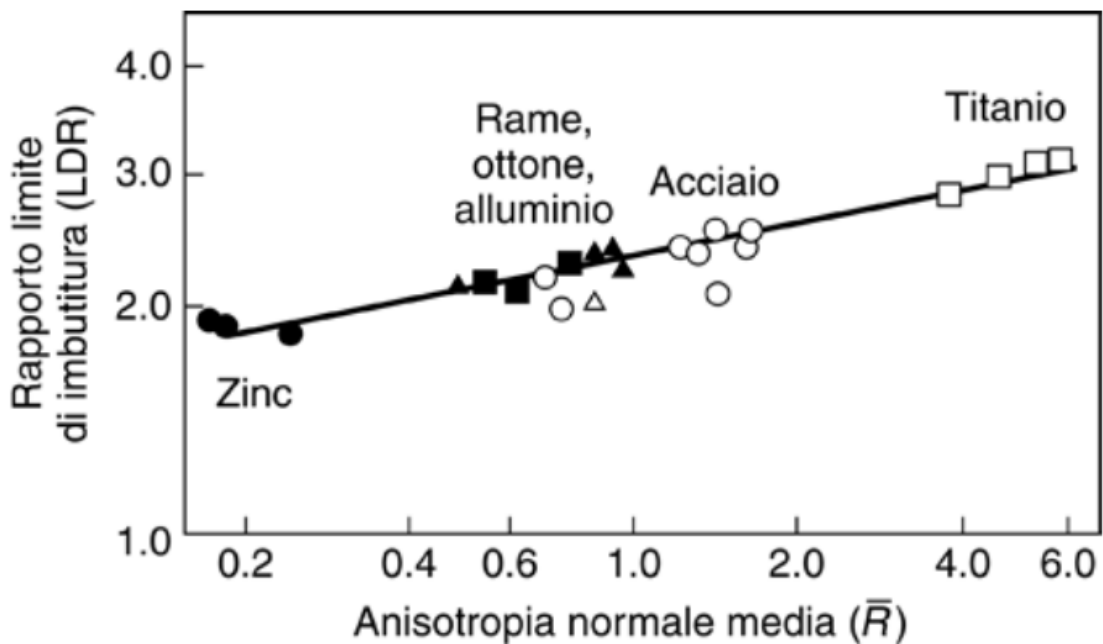


Figura 11: LDR e anisotropia.

Nella pratica, questo parametro viene utilizzato in fase di progettazione per determinare il numero di passaggi per ottenere il diametro finale  $d_f$  partendo dal diametro iniziale  $D_0$  della lamiera [7].

Noto il rapporto  $D_0/d_f$  e posto  $\beta_{tot} = D_0/d_f$ , si calcola il rapporto limite di imbutitura come:

$$\beta_{max} = \beta_i C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6$$

Dove  $\beta_i$  rappresenta il rapporto ideale dipendente dal materiale, ed i coefficienti  $C_i$  ( $i = 1,6$ ) sono dei parametri che caratterizzano il processo e tengono conto del lubrificante, del rapporto tra raggio del punzone e spessore, del rapporto tra raggio della matrice e spessore, del rapporto tra diametro di partenza e spessore, dall'isolamento del raggio di partenza e dal numero del passaggio.

Se  $\beta_{tot} > \beta_{max}$  sarà necessario fare più passaggi, imponendo  $\beta_{max}$  come valore limite e ricavando il diametro minimo ottenibile al primo passaggio.

### 1.2.2 Premilamiera

Il premilamiera svolge una funzione fondamentale nel processo di imbutitura; come suggerisce la figura 10 qui riproposta, il punzone, trascinando la lamiera in una sezione più piccola, induce sulla flangia uno stato di compressione circonferenziale che porterebbe la lamiera a formare delle grinze sulla superficie (fenomeno di wrinkling). Il premilamiera ha il compito di imporre una forza di compressione sulla lamiera facendo così insorgere nella lamiera uno stato di trazione che contrasti l'azione del punzone.

Allo stesso tempo, il valore della pressione imposta dal premilamiera non può essere eccessivamente elevato, altrimenti si porrebbe il problema inverso, ossia che il punzone, per trascinare la lamiera all'interno della cavità, dovrebbe esercitare una pressione ancora maggiore rischiando di compromettere l'integrità della lamiera e portandola a rottura (fenomeno di splitting).

Risulta quindi la presenza di una finestra di formatura, funzione della forza impressa dal premilamiera e dalla profondità imposta.

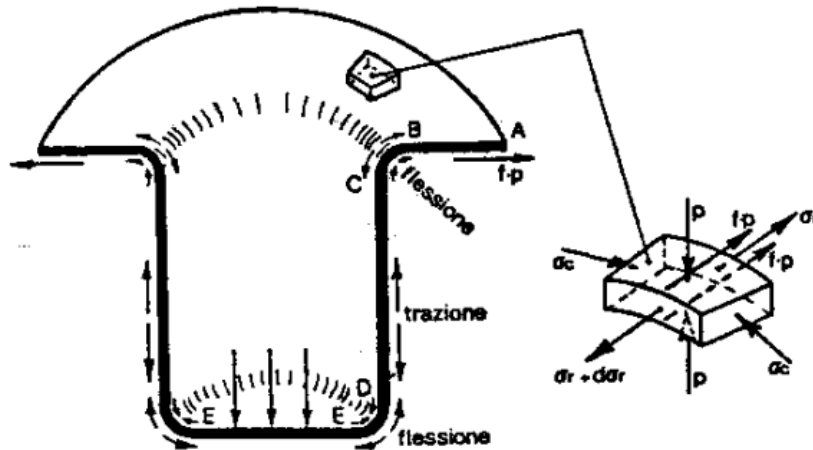


Figura 12: Stato tensionale processo di imbutitura.

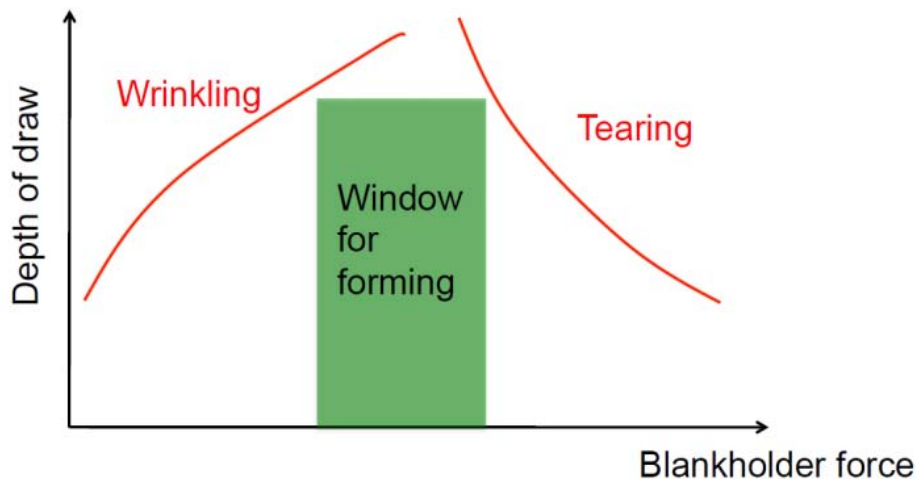


Figura 13: finestra di formatura.

Vari studi [8,9] testimoniano la necessità di poter controllare in modo agevole la pressione esercitata dal premilamiera di modo da ottimizzare il processo, riducendo la dimensione degli stampi e migliorando la quantità del prodotto.

Nella pratica, viene esercitata una pressione dell'ordine di 1.0 – 2.5 Mpa. I valori standard sono i seguenti:

- 1.2 MPa per leghe di alluminio
- 2.0 MPa per leghe di ottone
- 2.5 MPa per acciaio

La pressione minima può essere calcolata mediante la seguente formula [7]:

$$p_{min} = R_m \frac{[(\beta - 1)^2 + 0.005 \cdot \frac{d}{s}]}{400}$$

Dove  $R_m$  è la tensione di rottura del materiale,  $d$  il diametro dell'imbutito,  $\beta$  il rapporto di imbutitura e  $s$  lo spessore della lamiera.

Per regolare il flusso di materiale durante il processo si fa uso del rompigrinza (fig.13), un elemento posto all'interno del premilamiera che spinge la lamiera all'interno di una cavità posta sulla matrice.

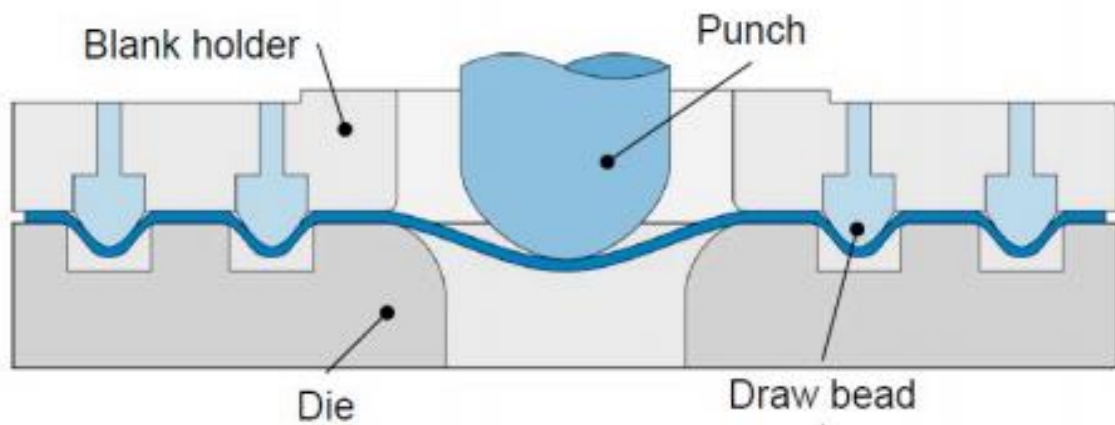


Figura 14: Processo di imbutitura con rompigrinza.

### 1.2.3 Punzone

Il punzone è l'elemento che conferisce la forma all'imbutito, trascinando la lamiera all'interno della cavità e determinando il diametro finale. Per un corretto dimensionamento bisogna tenere conto di due parametri già citati precedentemente:

- Raggi di raccordo di matrice  $r_m$  e punzone  $r_p$
- Gioco tra matrice e punzone

Per quanto riguarda i raggi di raccordo, è necessario imporre un valore sufficientemente elevato rispetto allo spessore per evitare rotture in prossimità delle zone di flessione. Al contempo il raggio della matrice non potrà essere troppo grande altrimenti si rischia di provocare il fenomeno di grinzatura.



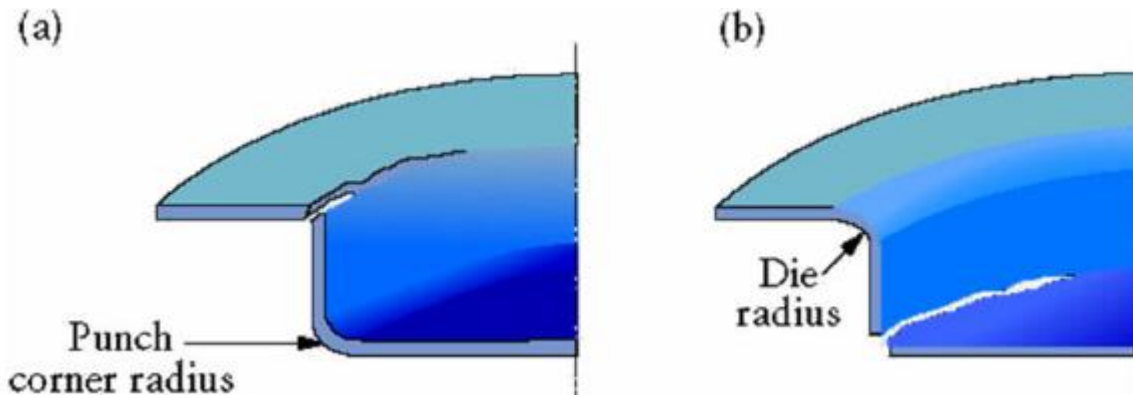


Figura 15: Raggi di raccordo punzone e matrice: a) Rottura dovuta al raggio troppo ridotto della matrice, b) Rottura dovuta al raggio troppo ridotto del punzone.

In generale si utilizzano queste regole empiriche [10]:

- Prima imbutitura
 
$$r_m = 4 \cdot t$$

$$r_p = (5 \div 6) \cdot t$$
- Successive
 
$$r_m = (3 \div 4) \cdot t$$

$$r_p = (5 \div 6) \cdot t \geq r_m$$

Per quanto riguarda il gioco tra matrice e punzone, a causa delle variazioni di spessore della lamiera dovrà essere sempre maggiore dello spessore della lamiera. Si tratta sempre di un compromesso tra la deformazione non desiderata della lamiera (grinze) e l'eccessivo assottigliamento della parete.

Nella pratica si utilizza la seguente formula empirica [7]:

$$c = t + C\sqrt{t}$$

Con C dipendente dal materiale:

- C = 0.22 per gli acciai
- C = 0.06 per le leghe di alluminio
- C = 0.12 per materiali non ferrosi

La forza massima richiesta dipende da diversi contributi:

- Forza richiesta per comprimere circonferenzialmente la lamiera

- Forza richiesta per vincere le forze di attrito imposte dal premilamiera
- Forza richiesta per piegare la lamiera rispetto ai raggi di raccordo di matrice e punzone

Viene utilizzata la seguente formula:

$$F_{max} = \pi D_0 t_0 UTS \left( \frac{D_0}{D_p} - 0.7 \right)$$

In fase di progettazione, se dal calcolo del rapporto limite di imbutitura risulta necessario effettuare più passaggi per ottenere il diametro desiderato, si dovrà tenere conto di ogni singolo raggio di raccordo e angolo di ingresso e calibrarli in base alla geometria ottenuta nel passaggio precedente, sia per quanto riguarda il punzone che per quanto riguarda il premilamiera.

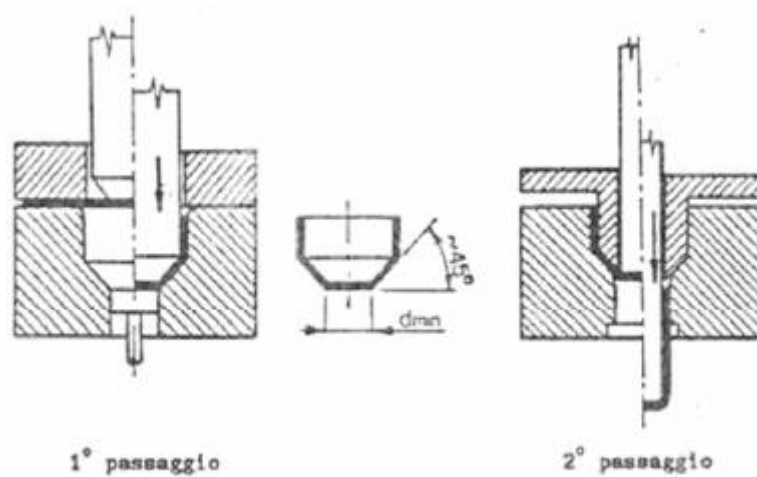


Figura 16: Imbutitura a 2 passaggi, il premilamiera dovrà essere inclinato di 45° nel secondo passaggio.



## 1.3 Piegatura tubi

Viene presentato un breve approfondimento riguardante il processo di piegatura tubi, in particolare del draw bending.

Il draw bending è un processo di piegatura tubi molto accurato e flessibile. Prevede l'utilizzo di un bending die che fornisce un raggio di curvatura fisso, di un clamp die che permette di mantenere il tubo aderente al bending die e che si muove parallelamente a quest'ultimo, e di un pressure die, fisso, che mantiene l'aderenza del pezzo a monte del bending die.

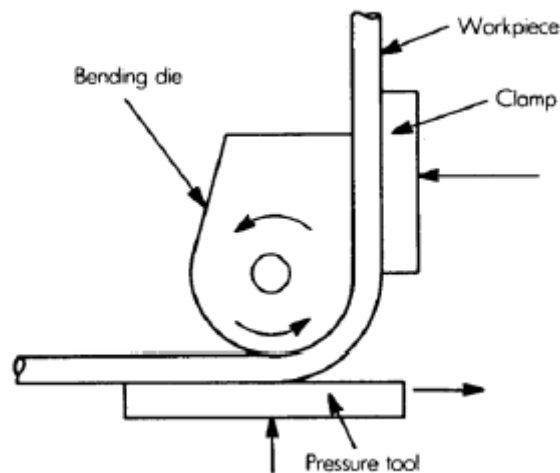


Figura 18: Draw bending e componenti principali.

Questo processo è indicato per raggi di curvatura severi e per tubi in parete sottile, ma presenta due limiti principali:

- La presenza della lunghezza di piega, che corrisponde al tratto rettilineo di afferraggio del clamp die. Questo comporta una distanza limite tra una piega e l'altra ed è considerato come parametro commerciale. La riduzione di questo tratto comporta il rischio che la pressione necessaria ad afferrare il tubo sia così elevata da deformare il pezzo o da lasciare dei segni sul tubo che non sono accettabili in determinati settori di produzione.
- Il raggio di curvatura del bending die è fisso, pertanto la macchina è limitata del numero di raggi di curvatura delle matrici che ha a disposizione. Un raggio di curvatura differente porta inevitabilmente a fermare la produzione per l'inserimento della nuova matrice.

Oltre ai 3 componenti principali che permettono di svolgere il processo si citano altri 2 elementi:

- Mandrino

- Wiper die

Il mandrino è un elemento di rinforzo inserito dentro al tubo per evitare la formazione di grinze e per prevenire l'appiattimento o il collasso del tubo. Durante il processo rimane fisso, dopodiché viene sfilato nel momento in cui il tubo viene fatto avanzare per la piega successiva. Questo comporta la presenza di fenomeni di usura da contatto, che vengono minimizzati scegliendo appositamente il materiale del mandrino di modo che non abbia affinità chimica con il materiale del tubo ed abbia un'elevata durezza, poiché solitamente non si è interessati alla finitura superficiale delle pareti interne del tubo. Vengono inoltre realizzati dei fori nella zona delle sfere dove far passare del lubrificante.

In figura 18 vengono mostrate le principali tipologie di mandrino utilizzate.

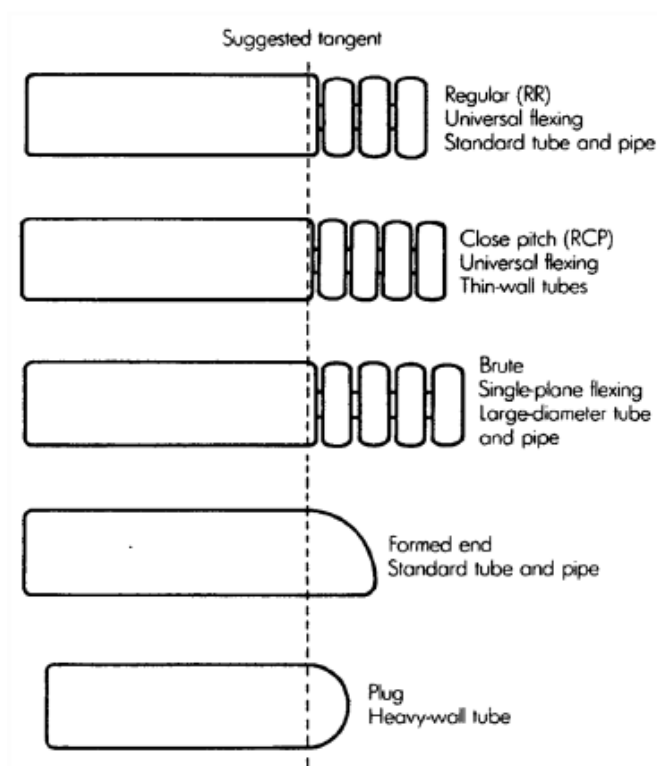


Figura 19: Tipologie di mandrino.

Il wiper die è un componente richiesto quando il tubo presenta una forte resistenza a compressione, funge da supporto per evitare fenomeni di instabilità. Viene posizionato a monte del bending die, permettendo così un accompagnamento più dolce del tubo.



Figura 20: Wiper die.

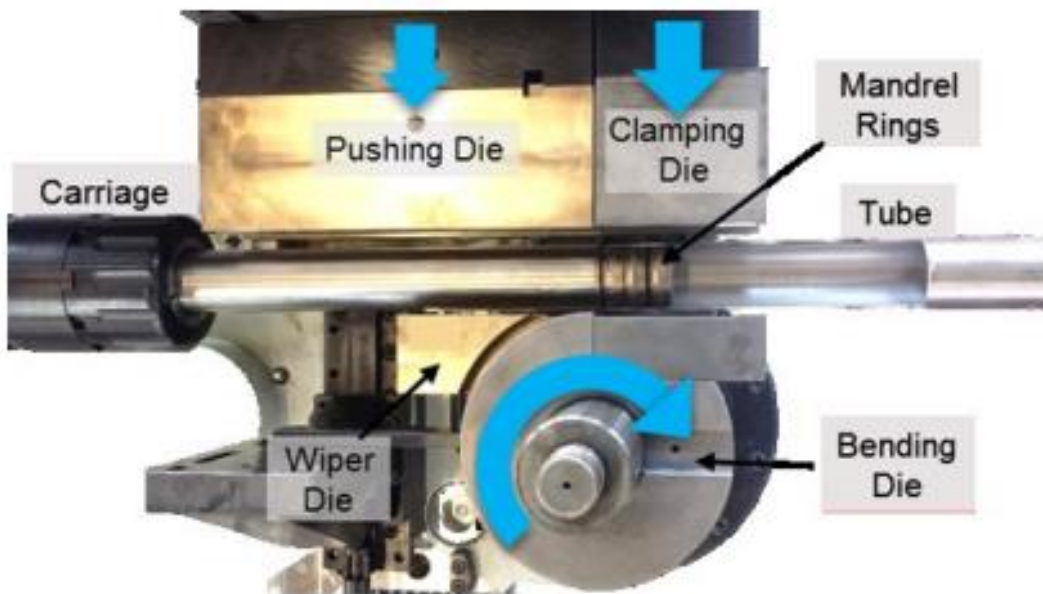


Figura 21: Componenti draw bending.

### 1.3.1 Ritorno elastico draw bending

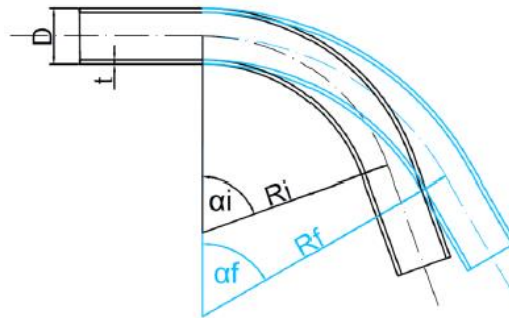


Figura 22: Ritorno elastico lamiera, posizione iniziale e finale.

Vengono riprese le figure utilizzate nei precedenti paragrafi. In figura 8 è visibile l'asse neutro delle tensioni e deformazioni, derivante dalla sollecitazione di momento flettente a cui è sottoposto il componente durante la piega. Lungo questo asse le fibre rimangono indeformate e la sua lunghezza

L rimane costante secondo la formula:

$$L = \alpha(R + kt)$$

Con k costante e funzione della severità della piega. Nel caso ideale,  $k = 0.5$ , perciò si può calcolare L come:

$$L = \left(R_i + \frac{t}{2}\right) * \alpha_i = \left(R_f + \frac{t}{2}\right) * \alpha_f$$

Dal caso ideale si può ricavare un primo coefficiente detto fattore di ritorno elastico  $K_s$  [4]:

$$K_s = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{\left(\frac{2R_i}{t}\right) + 1}{\left(\frac{2R_f}{t}\right) + 1}$$

Basandosi sul grafico di figura 7, il ritorno elastico risulta dipendente dalla tensione applicata e dal modulo di Young del materiale. All'aumentare della tensione applicata si sale sulla curva, pertanto la quota sarà maggiore. Al diminuire del modulo di Young la pendenza del tratto elastico cala e ciò comporta sempre un aumento della quota di ritorno elastico.

Si riesce quindi a ricavare una seconda formula approssimata per stimare il ritorno elastico:

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left(\frac{R_i Y}{Et}\right)^3 - 3 \left(\frac{R_i Y}{Et}\right) + 1$$

Con Y tensione di snervamento del materiale allo 0.2% di deformazione.

Infine, viene ricavato un ulteriore modello per l'approssimazione del calcolo del ritorno elastico [5]:

$$\frac{R_i}{R_f} = 1 - \frac{MR_i}{EI_0}$$

Dove M è il momento flettente applicato e  $I_0$  è il momento d'inerzia della sezione cava. Le ipotesi alla base del risultato ottenuto sono:

- Sezione del tubo avente asse di simmetria perpendicolare al piano di applicazione delle forze esterne
- Effetti legati a incrudimento, instabilità e rottura assenti
- Materiale elastico – perfettamente plastico
- Diametro del tubo costante (deformazione piana)

## 1.4 Sistemi di serraggio: stato dell'arte

### 1.4.1 Sistemi meccanici

*A novel hybrid clamping system for sheet metals and thin walled structures [11]*

Si tratta di un sistema molto recente che prevede l'utilizzo di un sistema di serraggio ad aria classico, con l'aggiunta di uno strato di adesivo e di un rivestito di EVA.

Durante la fresatura, il calore sviluppato dal processo fonde il rivestimento di EVA che si combina con il metallo soprastante, aumentando la forza di serraggio. Questo sistema è stato pensato per il settore aerospaziale, dove c'è una richiesta di lamiere di elevata superficie garantendo un elevato grado di qualità e automazione.



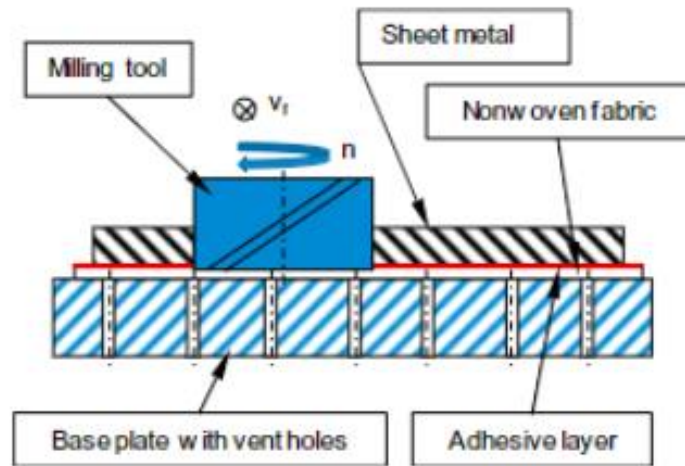


Figura 23: Schema di funzionamento.

*The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material (H. Ibrahim Demircia, Mustafa Yasbara, Kemal Demirayb, Mehmet Karalı) [12]*

La soluzione, pensata proprio per l'imbutitura, riguarda un sistema di serraggio che sfrutta l'azione di una pressa idraulica, regolabile a diversi valori di pressione.

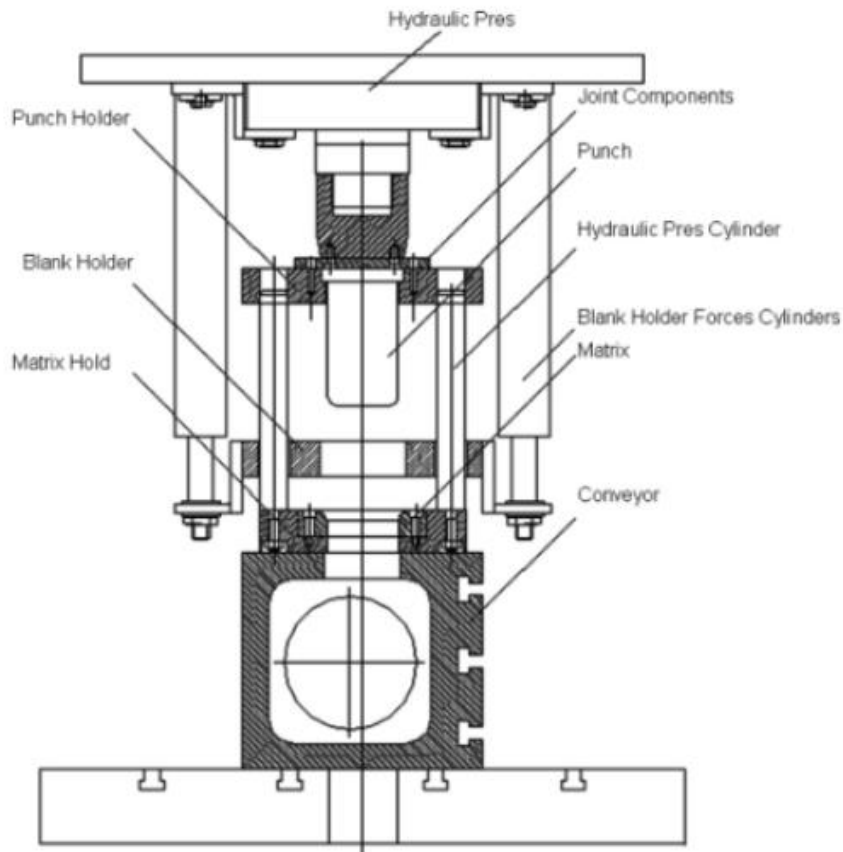


Figura 24: Macchina per processi di imbutitura.

*Clamp forming of local features on sheet metals (Zhiheng Zhanga, Zhenye Lianga, Dayong Lia, Shichao Ding) [13]*

In questo caso, viene proposto sistema di formatura della lamiera alternativo al processo di stampaggio, il "clamp forming". Questo, infatti, permette di amplificare la forza di trazione data da un attuatore idraulico sfruttando l'avanzamento di guide oblique su cui sono montati gli stampi.

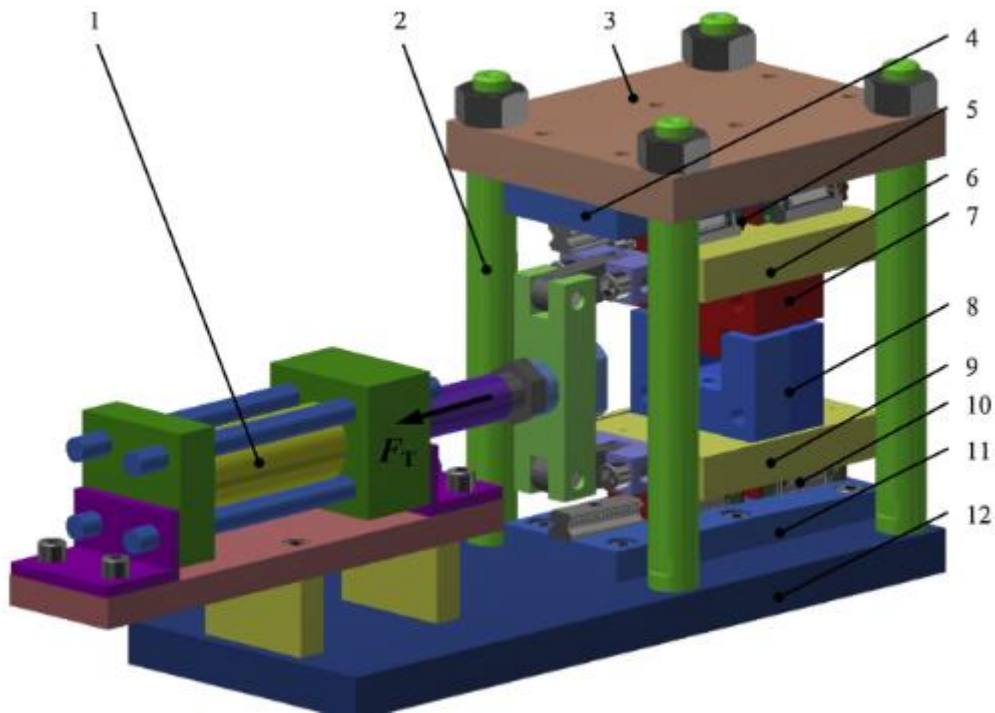


Figura 25: Macchina clamp forming.

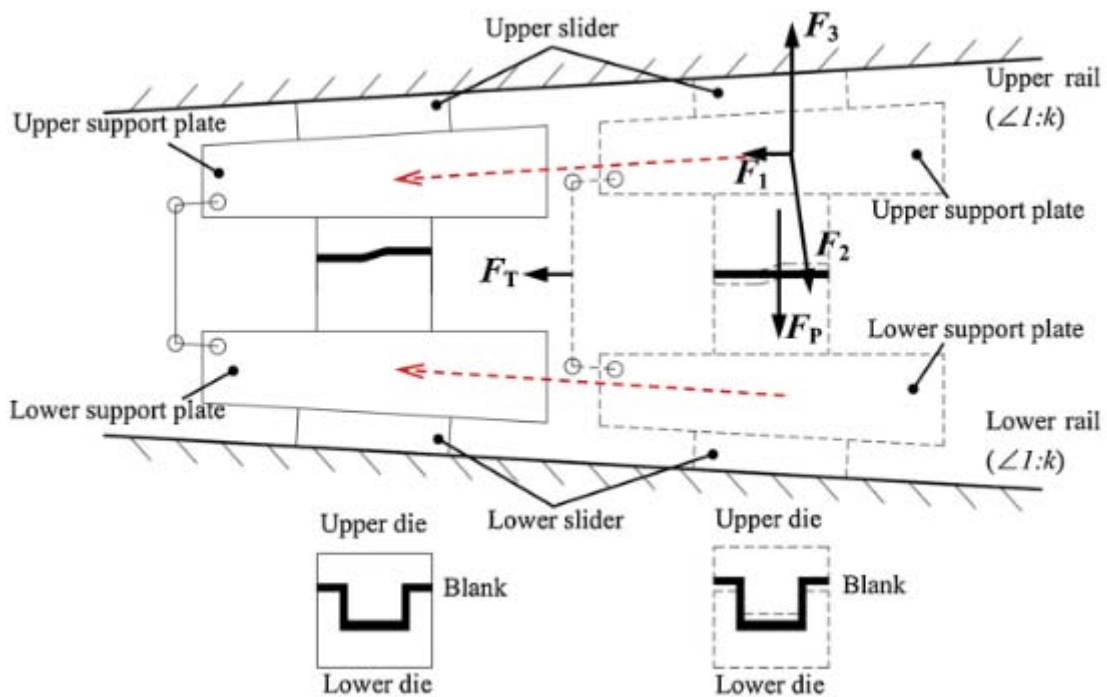


Figura 26: Forze agenti nel processo.

In figura 22 viene mostrato un esempio di applicazione per una lamiera sagomata su cui è necessario realizzare uno scalino. Vengono mostrate le forze in gioco e dall'analisi risulta che la forza di formatura  $F_p$  è pari a:

$$F_p \approx \frac{k}{2} F_t$$

Dove  $k$  è l'inclinazione delle guide che sorreggono gli stampi. Più  $k$  è elevato, più la forza verrà amplificata a parità di  $F_t$ .

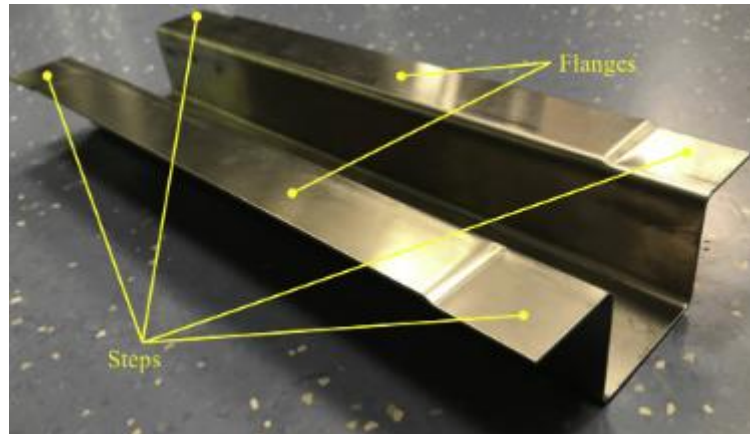


Figura 27: Esempio componente lavorato.

## 1.4.2 Sistemi a magneti permanenti

*Magnetic attraction forces between permanent magnet group arrays in a mobile magnetic clamp for pocket machining (A.Mahmud, J.R.R.Mayer, L.Baron) [14]*

Metodo di afferraggio magnetico usato per pannelli. Vengono utilizzati dei magneti permanenti in configurazione triangolare con due moduli: master module, che comanda il movimento, e slave module, che segue il percorso del master grazie all'attrazione magnetica. È stata testata in un processo di pocket milling per sopportare la spinta data dall'utensile e superare la resistenza data dall'attrito.

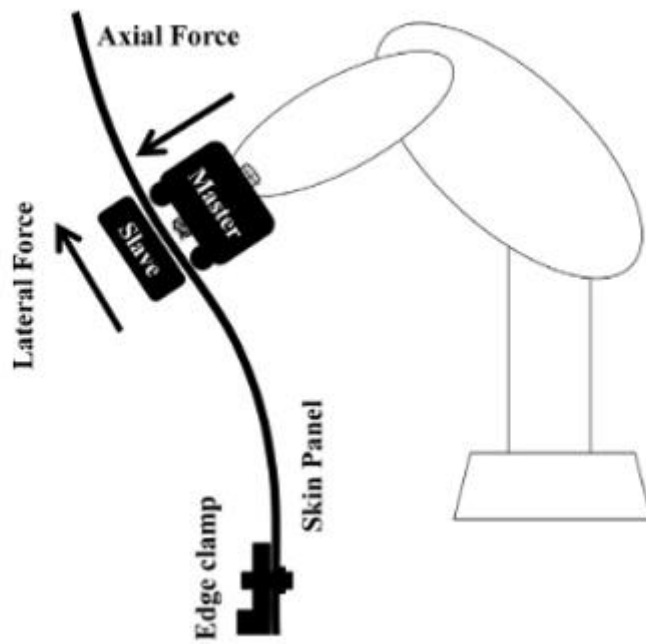


Figura 28: Schematizzazione processo.

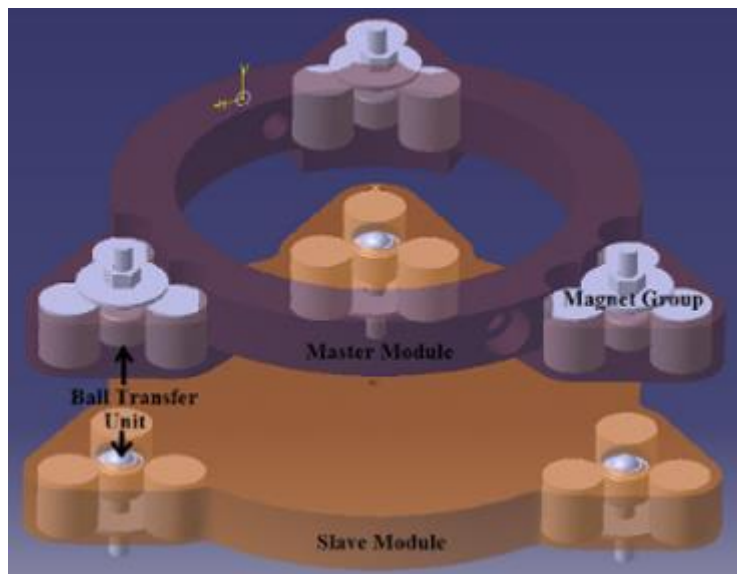


Figura 29: Struttura sistema di serraggio.

Vengono riportati i grafici della forza assiale e della forza laterale misurate e calcolate attivando rispettivamente un magnete per gruppo e tutti i magneti per ciascun gruppo, con due diversi valori del gap presente tra master e slave, rispettivamente di 5.5 mm e 6.5 mm.

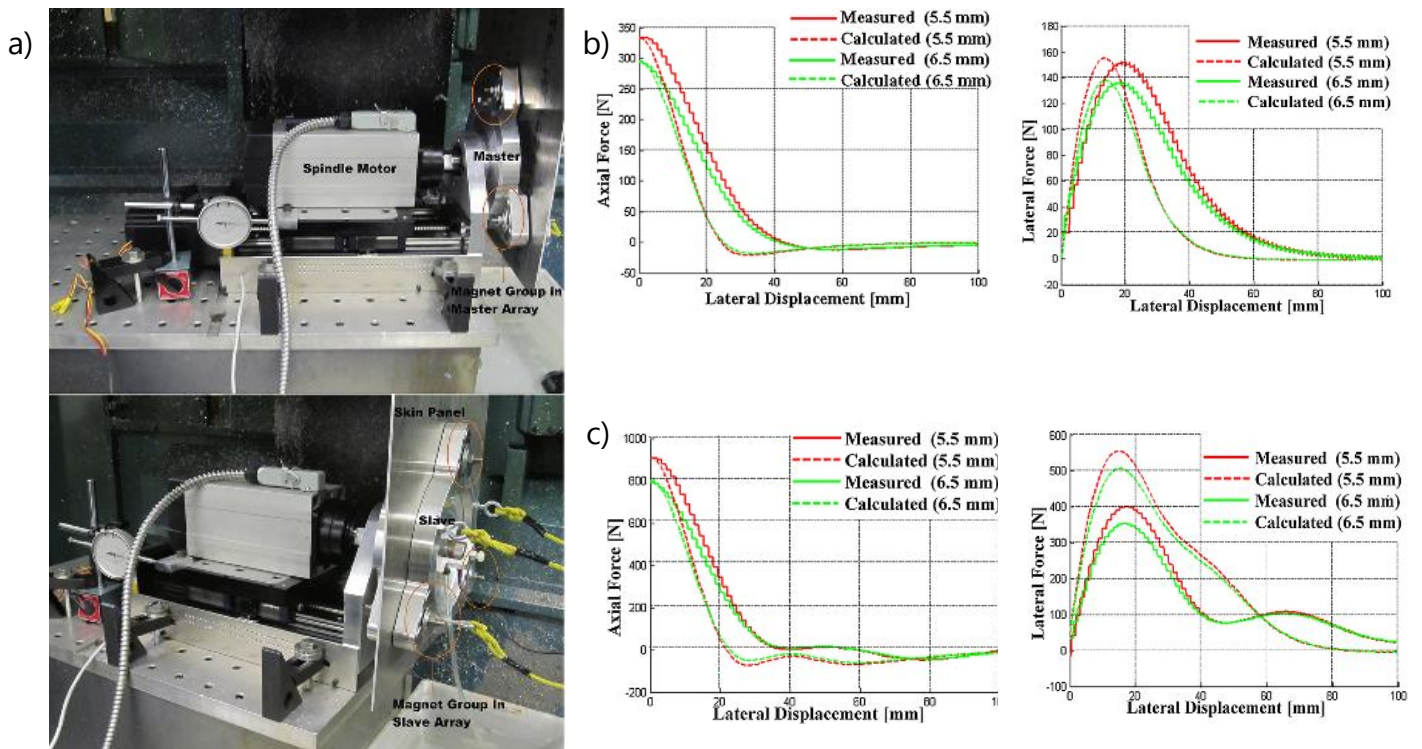


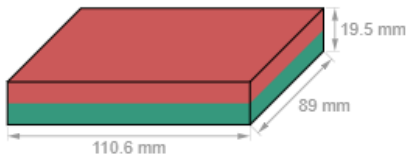
Figura 30: a) Setup prototipo verticale, b) Forza assiale e laterale misurate attivando solo un magnete per gruppo, c) Forza assiale e laterale misurate attivando tutti magneti.

### *Magneti permanenti disponibili in commercio*

Scorrendo vari cataloghi di aziende che forniscono sistemi a magnete permanente, viene riportata una soluzione che sfrutta il neodimio, un materiale altamente magnetico ma piuttosto fragile e di bassa durezza.

Viene riportato il magnete più prestazionale, con una forza di attrazione pari a circa 200 kg.

In generale, lo svantaggio principale dell'utilizzo di magneti permanenti è l'impossibilità di regolare la forza attrattiva, e ciò non li rende particolarmente adatti ai processi cui si fa riferimento.



ID articolo	Q-111-89-20-E
EAN	7640155436151
<u>Materiale</u>	NdFeB
Forma	Parallelepipedo
Dimensioni	110,6 x 89 x 19,5 mm
Tolleranza	+/- 0,2 mm
Direzione di magnetizzazione	Asse 19,5 mm
<u>Rivestimento</u>	rivestito in resina epossidica (Ni-Cu-Ni-Epoxy)
<u>Magnetizzazione</u>	N45
<u>Forza di attrazione</u>	ca. 200 kg (ca. 1960 N)
<u>Temperatura max. di esercizio</u>	80°C (evtl. inferiore)
Peso	1,5 kg

Figura 31: Scheda tecnica magnete permanente al neodimio.

### 1.4.3 Sistemi elettromagnetici

Questi sistemi si basano sui principi dell'elettromagnetismo, dove è presente una bobina di materiale conduttore in cui viene fatta passare corrente. Il suo passaggio genera un campo magnetico che nel caso del solenoide ha andamento rettilineo all'interno delle spire. In generale, gli elettromagneti permettono di sviluppare una forza attrattiva maggiore rispetto ai magneti permanenti, in quanto l'induzione  $B$  è direttamente proporzionale alla corrente immessa nella bobina. Solitamente, all'interno della bobina viene inserito un nucleo di ferro per rafforzare il campo magnetico indotto, in quanto le linee di campo passano attraverso un mezzo che ha una permeabilità magnetica maggiore dell'aria.

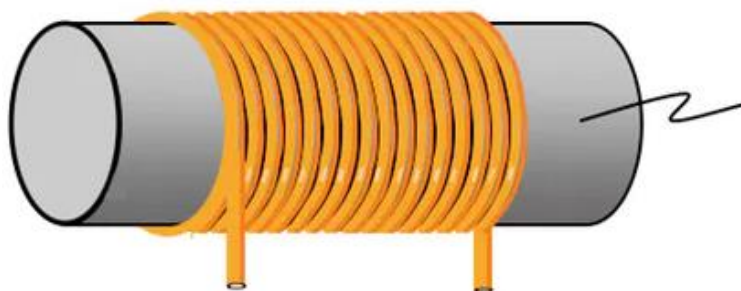


Figura 32: Schema sistema elettromagnetico con avvolgimento.

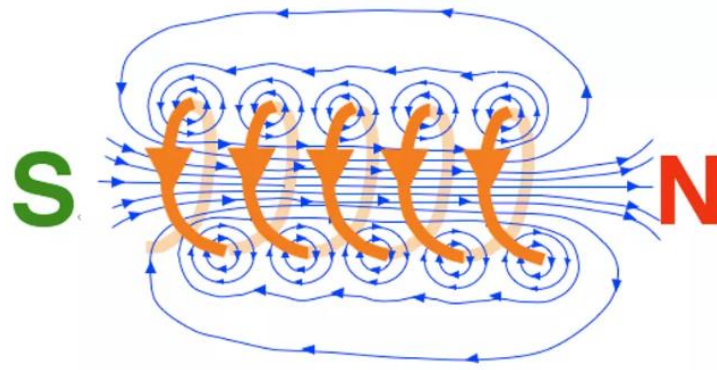


Figura 33: Campo magnetico indotto dalla corrente.

### *Soluzioni commerciali*

Sono disponibili varie geometrie, solitamente vengono proposte forme cilindriche, ad anello o a barra a seconda dell'esigenza. Più elevati sono gli ingombri più la forza di ritenuta massima aumenta.

Viene mostrato un esempio di elettromagnete a barra con relativi dati tecnici (fig. 32,33):

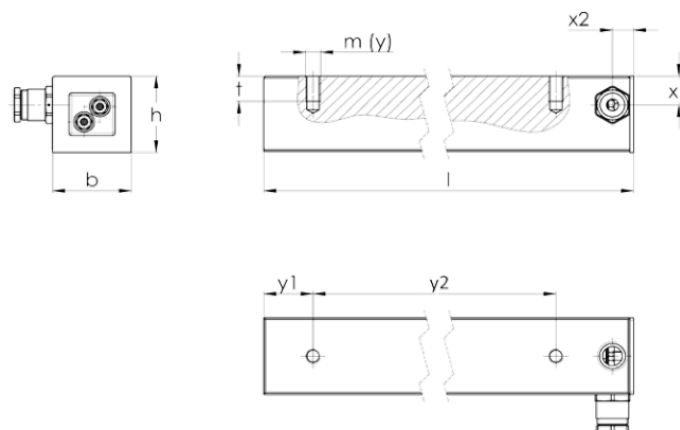


Figura 34: Elettromagneti con geometria a barra.



#### Dati Tecnici

Identificativo	lunghezza (l) x profondità (b) x altezza (h) [mm]	Forza di ritenuta max. [N]	Potenza nomnale [W]	Spessore controplastra [mm]	Filettatura (m) x profondità (t) [mm]	Numero di fori filettati (y)	Interasse (y <sub>1</sub> ) [mm]	Interasse (y <sub>2</sub> ) [mm]	Interasse (x <sub>1</sub> ) [mm]	Interasse (x <sub>2</sub> ) [mm]	Peso [kg]
10 31001A1	101.5 x 32 x 31	880	6,5	8	M6x10	2	20	50	12	8,5	0,60
10 31002A1	151.5 x 32 x 31	1.500	10,5	8	M6x10	3	20	50	12	8,5	1,00
10 31003A1	201.5 x 32 x 31	2.100	12,9	8	M6x10	4	20	50	12	8,5	1,20
10 31004A1	401.5 x 32 x 31	4.700	24	8	M6x10	7	20	50	12	8,5	2,60
10 31005A1	501.5 x 32 x 31	6.000	30,6	8	M6x10	9	20	50	12	8,5	3,20
10 31006A1	601.5 x 32 x 31	7.200	45,7	8	M6x10	11	20	50	12	8,5	4,00
10 31007A00	151.5 x 60 x 49	2.600	22,3	10	M8x12	2	30	75	18	10	2,20
10 31008A00	202 x 60 x 49	3.750	30,2	10	M8x12	2	35	120	18	10	3,10
10 31009A00	502 x 60 x 49	10.400	64,9	10	M8x12	4	35	140	18	10	8,00

Figura 35: Scheda tecnica elettromagnete a barra.

#### *Formatura elettromagnetica*

In questo caso, il sistema elettromagnetico non viene utilizzato come ausilio al processo, diventa il fattore principale della formatura.

La formatura elettromagnetica o magnetoformatura è un processo che consente la deformazione di metalli a freddo e senza contatto. Viene prodotta una corrente ad impulso ad alto amperaggio per mezzo di una batteria di condensatori, viene fatta passare per una bobina generalmente in rame; la corrente genera un campo magnetico che varia nel tempo, di conseguenza vengono generate delle correnti indotte nel componente (essendo un materiale conduttore) di verso opposto rispetto a quello della corrente di scarica. Ciò produce una forza di repulsione tra i due corpi che permette di deformare il materiale.

È un processo a freddo, molto efficiente in quanto quasi il 90% dell'energia elettrica prodotta viene trasformata in energia meccanica. Non vi è contatto tra le parti pertanto è esente da fenomeni di usura. Inoltre, è molto veloce, poiché la durata della scarica di energia elettrica è dell'ordine dei millisecondi.

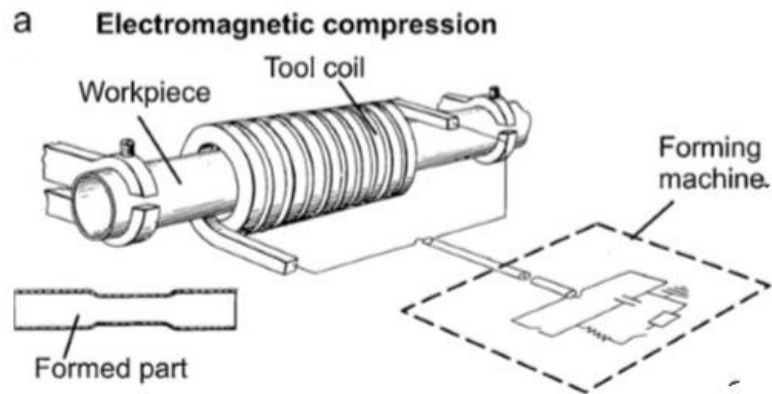


Figura 36: Schema elettroformatura [15].

**a Electromagnetic compression**

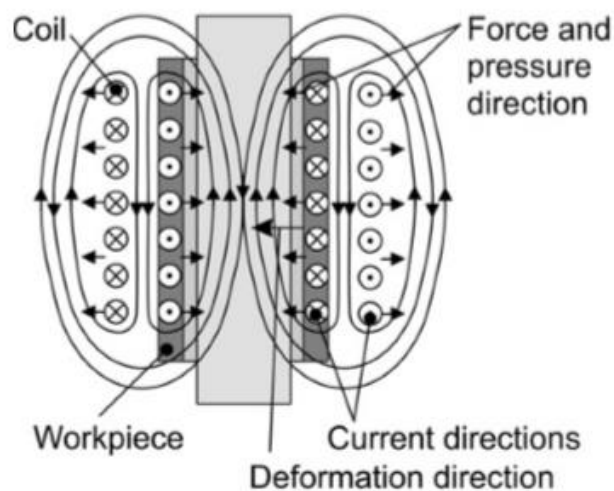


Figura 37: Forze in gioco nel processo.

*Design and implementation of tube bulging by an attractive electromagnetic force, Qi Xiong, Hongtao Tanga, Muxue Wang, Hao Huang, Li Qiu, Kun Yu, Qi Chen [16]*

Processo che prende origine dalla magnetoformatura citata in precedenza, con l'obiettivo di produrre delle forze non più repulsive, ma attrattive.

Perché ciò avvenga, sono necessari due circuiti, uno che rilasci la corrente lentamente, uno che la rilasci un impulso molto rapido, per poter avere un rapido decremento della corrente

totale; in questo modo si produce l'effetto opposto rispetto alla magnetoformatura, ossia che la corrente indotta avrà verso uguale a quella che circola nella bobina, e risulterà una forza di attrazione.

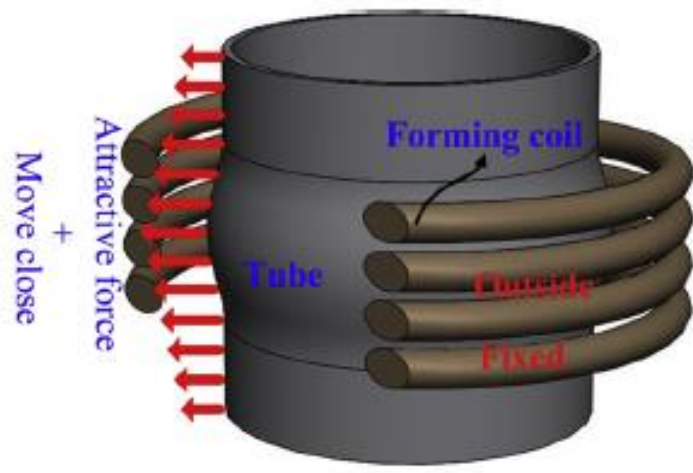


Figura 38: Schema di funzionamento elettroformatura per attrazione.

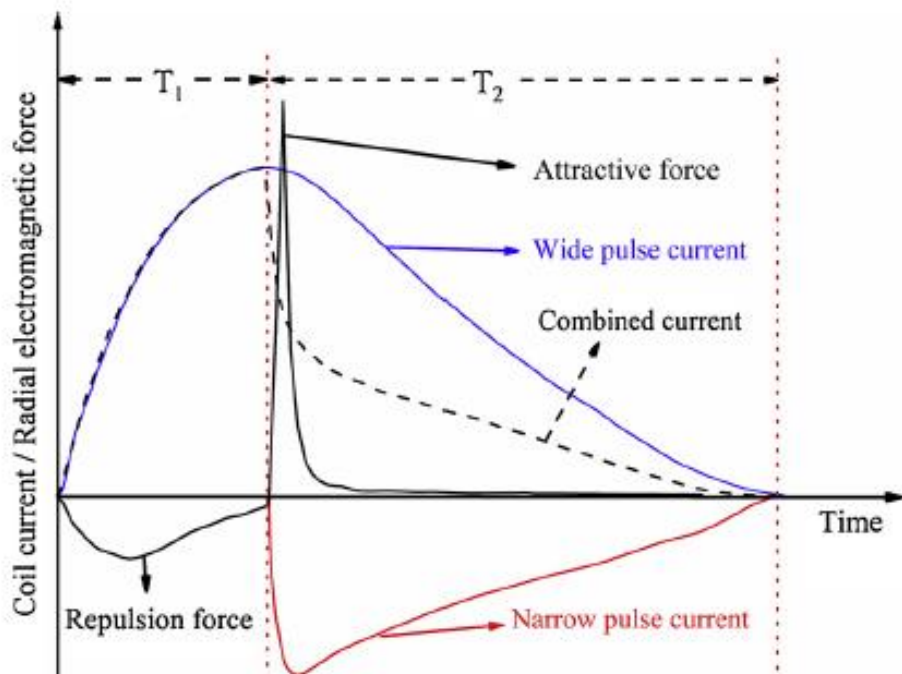


Figura 39: Andamento della corrente nei due circuiti, corrente combinata.

Come si vede in figura, si assiste ad un'iniziale forza di repulsione dovuta all'aumento della corrente immessa nel circuito, cui corrisponde un'opposizione della corrente indotta nel

componente; successivamente, con l'introduzione di un impulso di corrente molto stretto agente nel verso opposto, si assiste ad un cambiamento di segno nella forza totale, che risulta attrattiva.

# Capitolo 2

## Soluzione scelta



## 2.1 Sistema elettromagnetico a sella

Un sistema elettromagnetico a sella prevede l'inserimento dell'elettromagnete direttamente nel sistema di serraggio meccanico presente, asportando materiale e formando delle cave nelle quali inserire i fili di materiale conduttore. Questi fili avvolti all'interno dello stampo formano la bobina attraverso cui è possibile far passare corrente. Un sistema di due cave in cui è avvolta la bobina di materiale conduttore viene definito "sella elettromagnetica". Il passaggio di corrente genera un campo magnetico in grado di esercitare una forza attrattiva per materiali con alta permeabilità magnetica, i cosiddetti materiali ferromagnetici. Se il sistema di serraggio meccanico è a sua volta di materiale ferromagnetico, il campo magnetico prodotto dalla bobina viene amplificato in quanto dipendente dalla permeabilità magnetica del materiale che attraversa.

Il vantaggio che comporta questo sistema sta nella buona integrazione con il sistema di serraggio meccanico; essendo immerso nel materiale, non necessita di spazio ulteriore per essere implementato, e può sfruttare le proprietà magnetiche del sistema meccanico per incrementare la forza attrattiva.

Per verificare la fattibilità del sistema si è prima costruito un modello del sistema su un software ad elementi finiti, cercando di massimizzarne l'efficacia in termini di forze e pressioni esercitate, compatibilmente con alcuni accorgimenti pratici per evitare instabilità in fase sperimentale.

La fase sperimentale prevede l'utilizzo della macchina Strip Drawing Test, in grado di misurare contemporaneamente la forza normale e forza tangenziale applicate rispettivamente al punzone ed alla lamiera di prova. Dopo una prima misura a selle "spente", ossia senza effettivo passaggio di corrente, si confronteranno i valori di forza tangenziale richiesta alla macchina per percorrere un determinato valore di corsa una volta fatta passare corrente attraverso le selle, misurando l'effettivo contributo dato al serraggio meccanico già presente.

In figura 40 viene mostrato una rappresentazione semplificata del sistema: in verde è raffigurato lo stampo superiore con le rispettive cave attorno alle quali si avvolgono i fili di rame che formano la bobina. Il campo magnetico che si forma ha direzione parallela alla direzione dell'avvolgimento e tende a chiudersi alle estremità. In basso, si trova la lamiera su cui le linee di campo tendono a chiudersi provocando una forza di attrazione verso lo stampo.

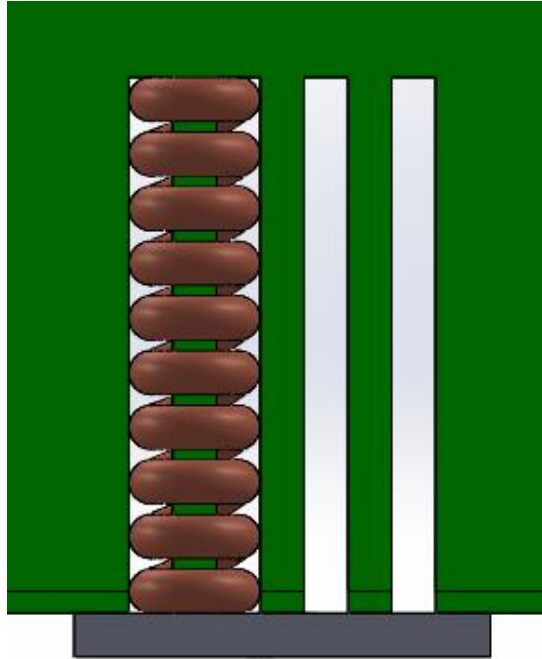


Figura 40: Schema semplificato sella elettromagnetica.

Inizialmente, si era deciso di implementare questo sistema in una macchina preposta alla piegatura tubi, ma date le difficoltà riscontrate nella realizzazione delle cave in stampi curvi si è preferito passare ad un sistema a geometria piana come appunto la lamiera.

## 2.2 Modello numerico

Con l'ausilio del software Flux prodotto da Altair, è stato possibile simulare la geometria del sistema attraverso alcuni parametri; si è impostato un modello Magneto Static 2D e, sulla base delle variazioni dei parametri geometrici e fisici, si sono calcolati i valori di forza e pressione magnetica esercitate sulla lamiera, l'andamento delle linee di campo ed il livello di saturazione della lamiera. Sulla base dei risultati e di alcune considerazioni pratiche, si è scelta la configurazione ritenuta migliore per quanto riguarda la massimizzazione delle prestazioni delle selle elettromagnetiche.



## 2.2.1 Costruzione modello geometrico e fisico

Una volta aperto un nuovo progetto, si è impostato il tipo di applicazione a cui è volta la simulazione:

*Application -> Define -> Magnetic -> Magneto Static 2D*

Per questo caso, si è scelta l'applicazione Magneto Static 2D. Il tipo di applicazione determina cosa impostare nella sezione "Physics", che verrà vista più avanti. In figura 41 viene mostrata la schermata iniziale e dove si imposta l'applicazione desiderata. Questo permette di specificare la profondità del dominio, che corrisponde alla lunghezza degli stampi su cui inserire le selle:

*Application -> Define -> Magnetic -> Magneto Static 2D -> Depth of the domain*

Si è scelta una lunghezza di 100 mm come profondità del dominio, in quanto inizialmente pensata per replicare la lunghezza del clamp die di un processo di draw bending, e ritenuta adatta all'apparato sperimentale presente in laboratorio.

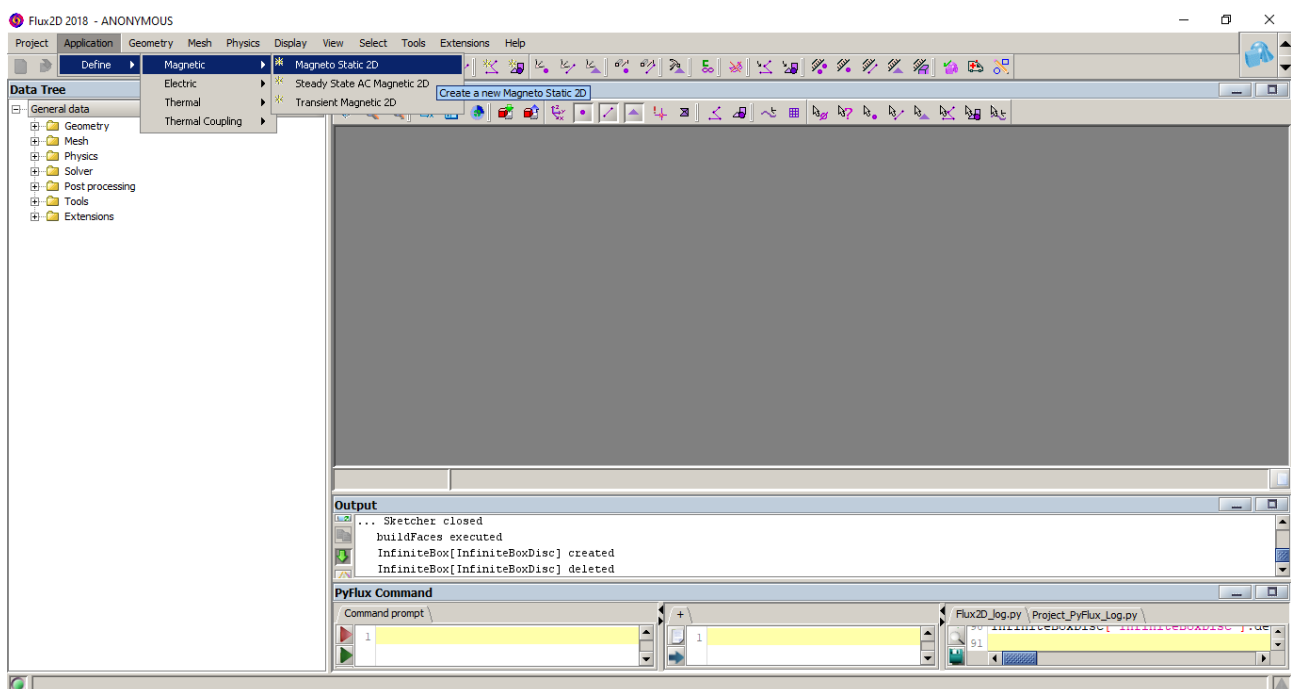


Figura 41: Impostare l'applicazione Magneto Static 2D.

Successivamente, si imposta il dominio della simulazione, in particolare si definiscono le dimensioni della "Infinite Box", che corrisponde alla zona limite della simulazione, oltre la quale non viene più applicata l'operazione di meshing:

*Geometry -> Domain -> Infinite Box -> Disc*

In figura 42 si vede la creazione della regione formata da due cerchi concentrici rispettivamente di raggio 150 mm e 200 mm.

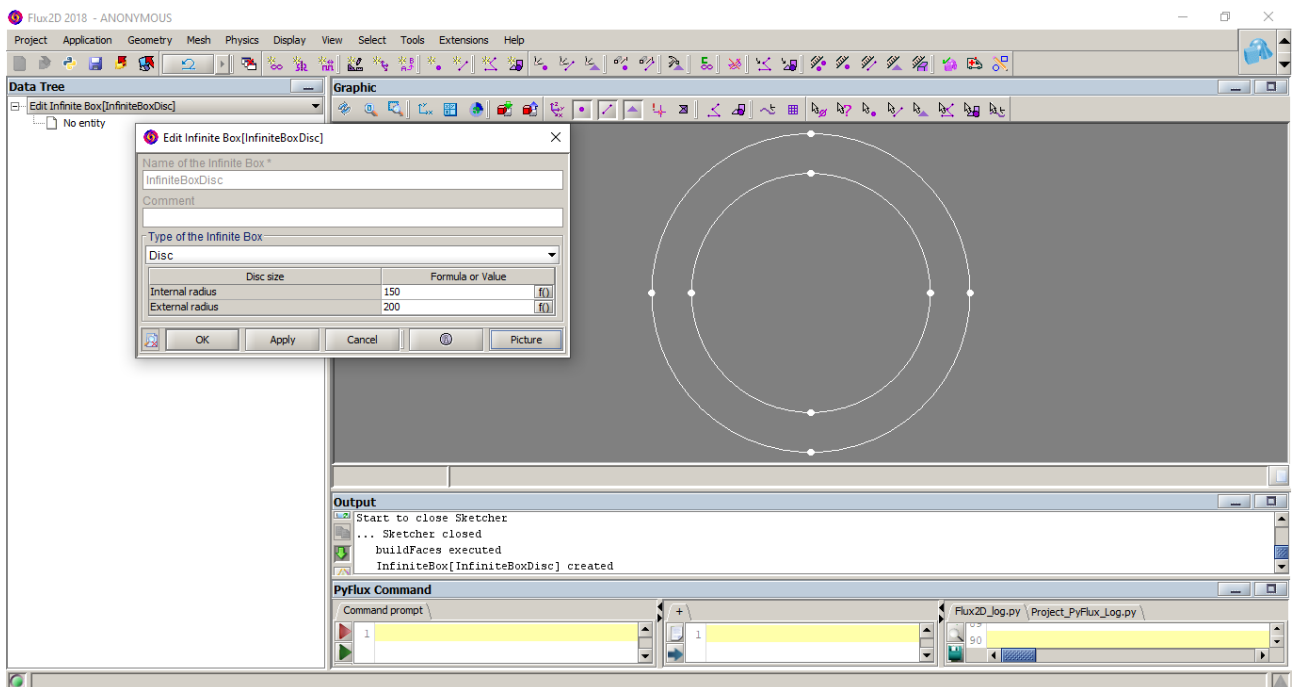


Figura 42: Creazione "Infinite Box".

In termini di modellazione geometrica, il software offre due scelte: determinare punto per punto le varie entità, sfruttando sistemi di coordinate appositamente realizzati, oppure disegnare una prima bozza tramite lo sketcher, un sistema tipico dei software CAD, e raffinare poi manualmente punto per punto la geometria.

Nei modelli riguardanti il serraggio di tubi si è preferito il primo metodo, grazie ad un sistema di coordinate polari che ha reso la realizzazione della geometria più agevole, mentre per quanto riguarda i modelli riguardanti la lamiera si è scelto di realizzare un primo schizzo con lo sketcher e poi si sono raffinate le posizioni dei punti di interesse:

*Geometry -> Sketcher 2D context*

In figura 43 viene mostrato un primo schizzo dove si vedono i due stampi, la lamiera e quattro cave per ciascuno stampo. Sono visibili i punti che caratterizzano la geometria: a ciascun punto vengono assegnate le coordinate x,y del sistema principale XY1.

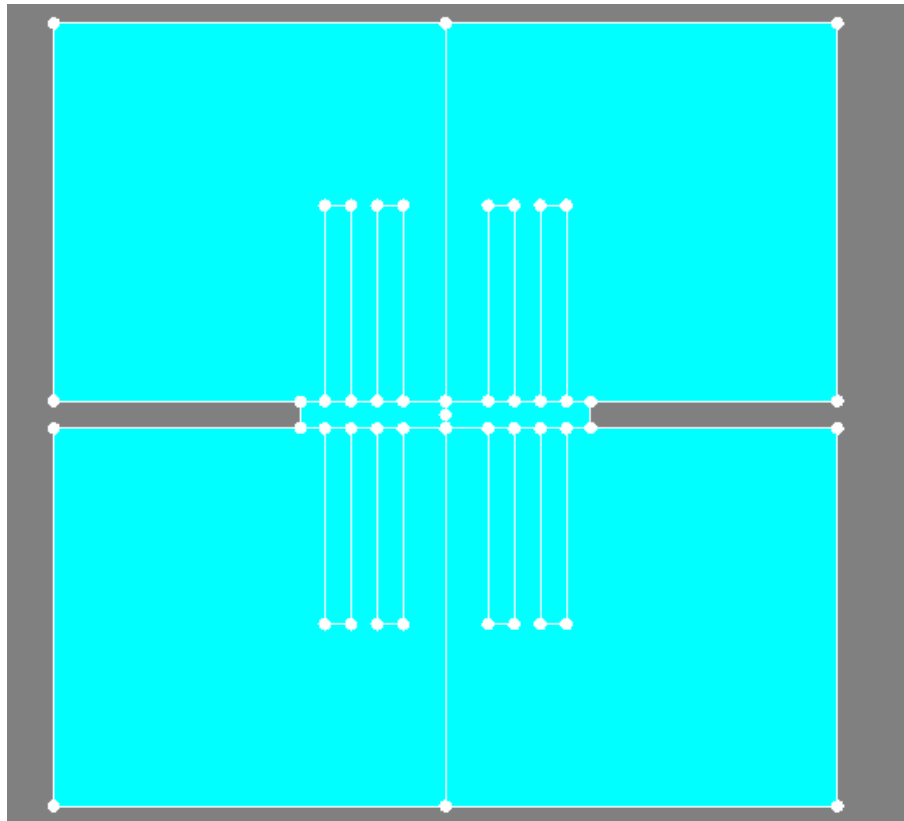


Figura 43: Schizzo iniziale geometria.

Per favorire la simulazione, si sono scelti dei parametri geometrici il cui valore viene assegnato alle coordinate dei punti che compongono il modello:

*Geometry -> Geometric tools -> Geometric parameter -> Name of the parameter / Comment / Algebraic expression of the parameter*

I parametri geometrici, evidenziati in figura 44, sono:

- H: altezza dello stampo
- B: semi-larghezza della lamiera
- SPESS: spessore della lamiera
- T: traferro
- L: larghezza della singola cava
- TS: altezza singola cava
- APE: distanza tra cave accoppiate
- D: distanza tra cava e asse di simmetria dello stampo

Ai punti che compongono il modello vengono forniti questi valori allo scopo di generare la geometria corretta:

*Select points -> Edit Array -> Local Coordinates -> First coordinate / Second coordinate*

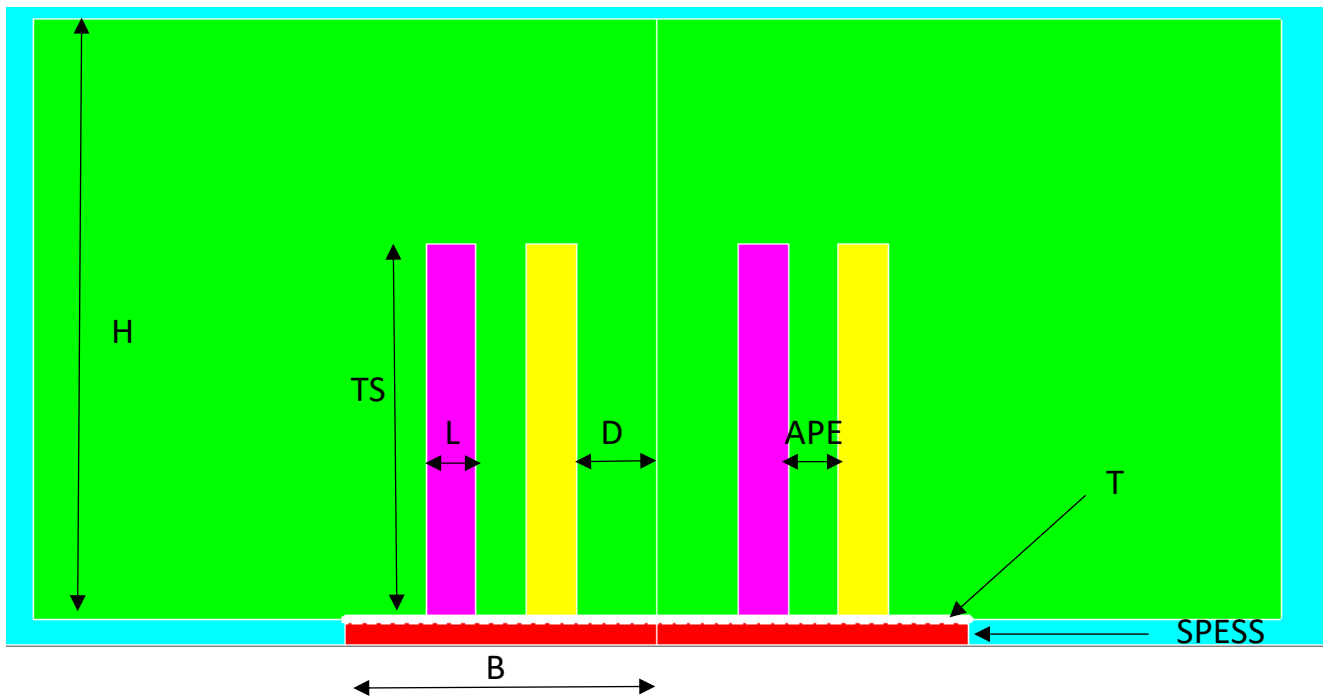


Figura 44: Parametri geometrici.

Una volta impostata la geometria, si è definita la fisica del modello.

Tramite l'opzione "Physics", si sono importati i materiali da considerare tramite un database presente nel software:

*Physics -> Material -> Import from material manager*

I materiali scelti sono:

- FLU\_STEEL\_1010\_XC10: acciaio C10, il basso contenuto di carbonio ne favorisce la magnetizzazione. Questo materiale viene utilizzato per stampi e lamiera.
- FLU\_COPPER: per simulare il materiale delle selle elettromagnetiche, è necessario avere un buon conduttore elettrico.
- FLU\_ALUMINUM: alluminio, per verificare i comportamenti delle selle in presenza di materiale diamagnetico.
- ARMCO\_M22\_DC: ferro puro, ad elevata permeabilità magnetica, per verificare i comportamenti delle selle in presenza di materiale altamente magnetico.

In tabella 1 vengono mostrati i valori di permeabilità magnetica relativa e di magnetizzazione di saturazione dei materiali.

Materiali	Permeabilità magnetica relativa iniziale $\mu_0$	Magnetizzazione di saturazione $J_s$ [T]
ARMCO_M22_DC	19911	1.989
FLU_STEEL_1010_XC10	2023	1.9
FLU_COPPER	1	-
FLU_ALUMINUM	1	-

Tabella 1: Parametri magnetici materiali.

In figura 45 e 46 vengono mostrate le curve di prima magnetizzazione dei due materiali magnetici, presenti nel software già plottati per punti:

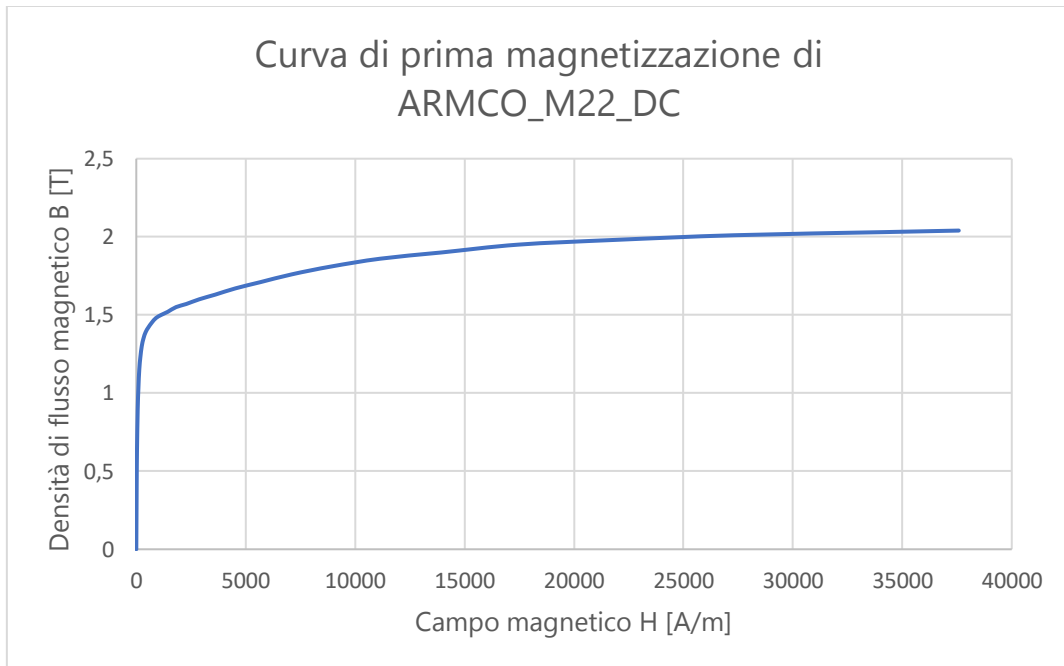


Figura 45: Curva di prima magnetizzazione di ARMCO\_M22\_DC.

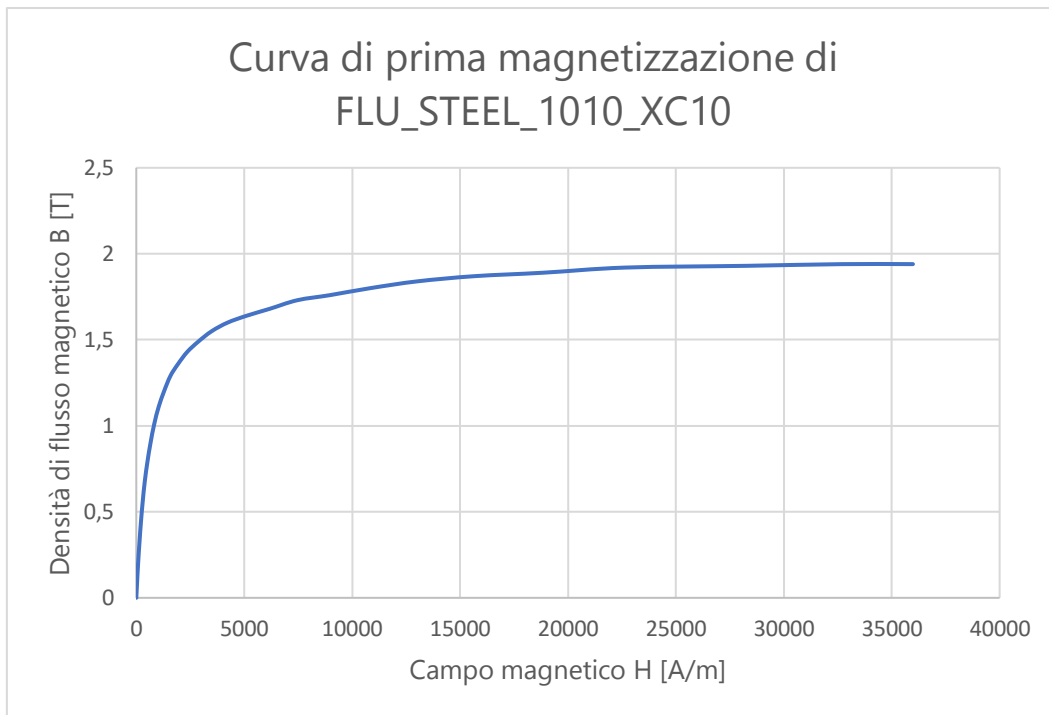


Figura 46: Curva di prima magnetizzazione di FLU\_STEEL\_1010\_XC10.

Definiti i materiali, si è impostato il parametro di scenario CORRENTE, il valore di corrente immesso per singola spira:

*Parameter / Quantity -> Parameter I/O -> Name of the parameter / Type of the physical parameter / Reference value*

Nell' opzione "Type of the physical parameter" si è scelto "parameter controlled by a scenario".

Nell' opzione "Reference value" si è scelto il valore 100.

Avendo come tipo di parametro fisico un parametro controllato da uno scenario, è stato possibile farlo variare a piacimento per vederne gli effetti sul sistema. Più elevata l'intensità di corrente, più elevata la forza di attrazione magnetica esercitata dalle selle elettromagnetiche, essendo la densità di flusso magnetico generato in un solenoide direttamente proporzionale all'intensità di corrente "i" secondo la formula:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot i$$

Dove:

- $\mu_0$  è la permeabilità magnetica nel vuoto
- N è il numero di avvolgimenti nel solenoide
- l è la lunghezza del solenoide

- $i$  è l'intensità di corrente

In questo caso, essendo presente un nucleo di materiale ferromagnetico, la formula diventa:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N}{l} \cdot i$$

Dove  $\mu_r$  è la permeabilità relativa del materiale scelto.

Avendo impostato un parametro riguardante il circuito elettrico, è stato possibile definire il parametro "stranded coil conductor" riguardante l'avvolgimento:

*Physics -> Electric circuit -> FE coupling components -> Stranded coil conductor -> Stranded coil conductor name / Stranded coil conductor type / Value (A)*

Selezionando il tipo "stranded coil conductor with imposed current" e assegnando al valore della corrente il parametro di scenario.

Impostato il circuito, si sono definite le regioni che compongono il modello:

*Physics -> Regions -> Face regions -> Name of the region / Type of region ...*

È possibile assegnare una regione ad un punto, una linea o una faccia. La definizione di regione attribuisce alla geometria selezionata il ruolo che essa deve avere nella simulazione, il materiale di cui è composta ed eventuali parametri di scenario da cui dipende.

Le regioni, mostrate in figura 47, vengono elencate di seguito:

- ARIA -> Type of region: Air or vacuum region
- LAMIERA -> Type of region: Magnetic non conducting region; Material of the region: FLU\_STEEL\_1010\_XC10
- STAMPO -> Type of region: Magnetic non conducting region; Material of the region: FLU\_STEEL\_1010\_XC10
- COIL IN -> Type of region: Coil conductor region; Material of the region: FLU\_COPPER; Positive orientation of current; Number of turns of the conductor: 1; Fill Factor: 1
- COIL OUT -> Type of region: Coil conductor region; Material of the region: FLU\_COPPER; Negative orientation of current; Number of turns of the conductor: 1; Fill Factor: 1

Per quanto riguarda gli avvolgimenti, si è scelto di simulare il modello come se fosse un unico conduttore, nella realtà saranno tanti singoli conduttori messi in serie di modo da ottenere la stessa quantità di corrente del singolo conduttore. I motivi sono per semplicità di esposizione e per dare l'idea delle correnti totali in gioco. A livello di simulazione, inserire nel modello un numero maggiore di conduttori con un livello minore di corrente non comporta variazioni nei risultati in quanto nel modello magneto-statico non c'è un vero circuito che alimenta il modello, non viene calcolata la tensione ma solamente la corrente

imposta, la densità di corrente applicata è sempre la stessa. Lo stesso ragionamento viene applicato al Fill Factor: anche inserendo valori minori per quanto riguarda il riempimento della cava, non tenendo conto della tensione e imponendo una corrente, per il software non ci sono variazioni effettive ed il risultato è il medesimo. Con la presenza di un circuito, ad un aumento del numero di conduttori o ad un abbassamento del fattore di riempimento sarebbe corrisposto un aumento della tensione necessaria a garantire il livello di corrente imposto, poiché la resistenza del circuito sarebbe aumentata. Questi ragionamenti verranno ripresi nella parte riguardante il dimensionamento del numero di conduttori necessari.

*Physics -> Regions -> Face Regions -> COIL IN -> Symmetries and periodicities: All the symmetrical and periodical conductors are in series*

Con il comando "Assign region to faces" si è completata la costruzione del modello geometrico e fisico:

*Physics -> Assign region to geometric entities -> Assign region to faces (completion mode)*

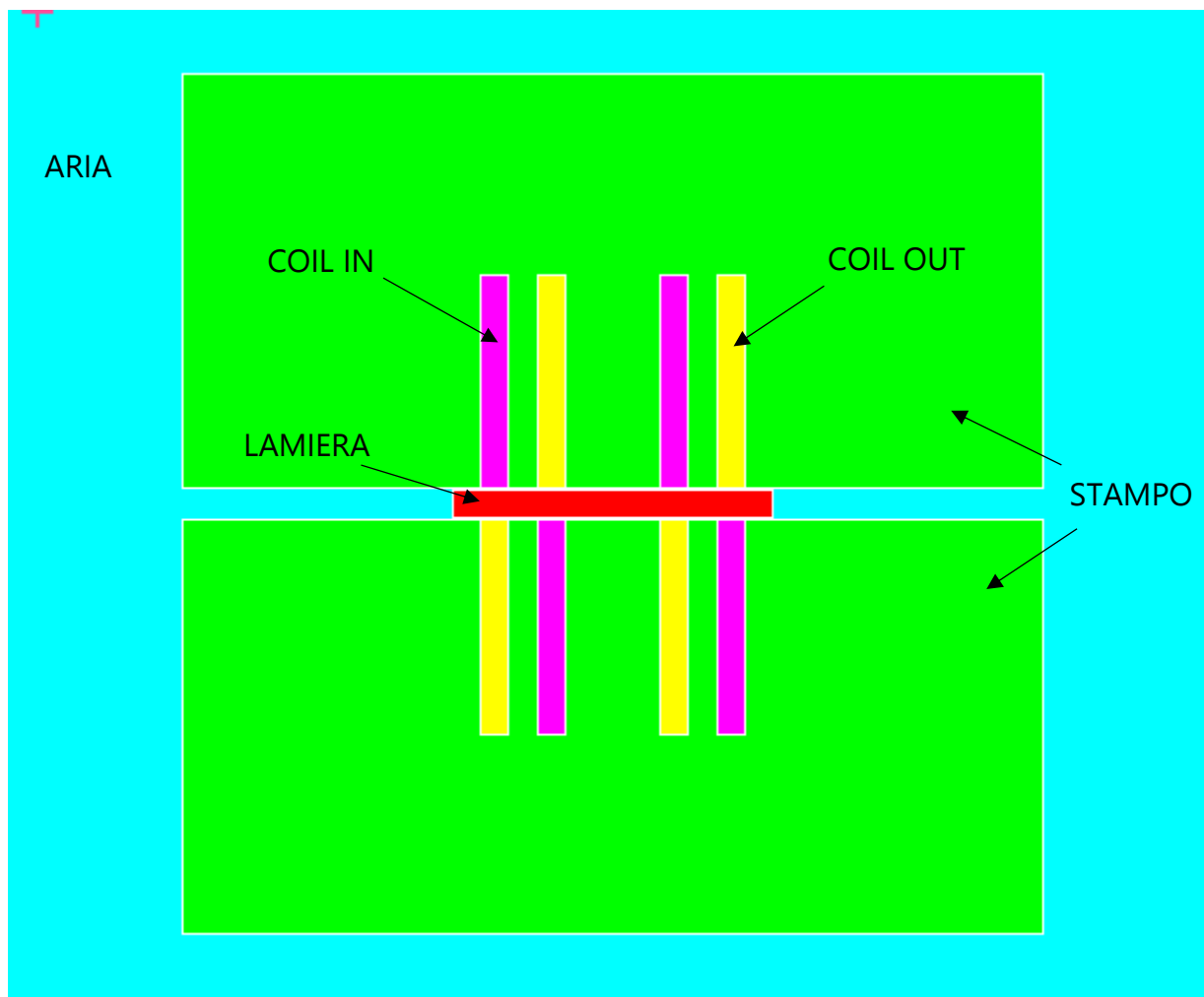


Figura 47: Regioni che compongono il modello.



## 2.2.2 Impostazione simulazione

Una volta ottenuto il modello geometrico e fisico, si è impostata la mesh. Per passare alla fase di mesh è necessario passare dai comandi dedicati alla geometria ai comandi dedicati alla mesh (figura 48).

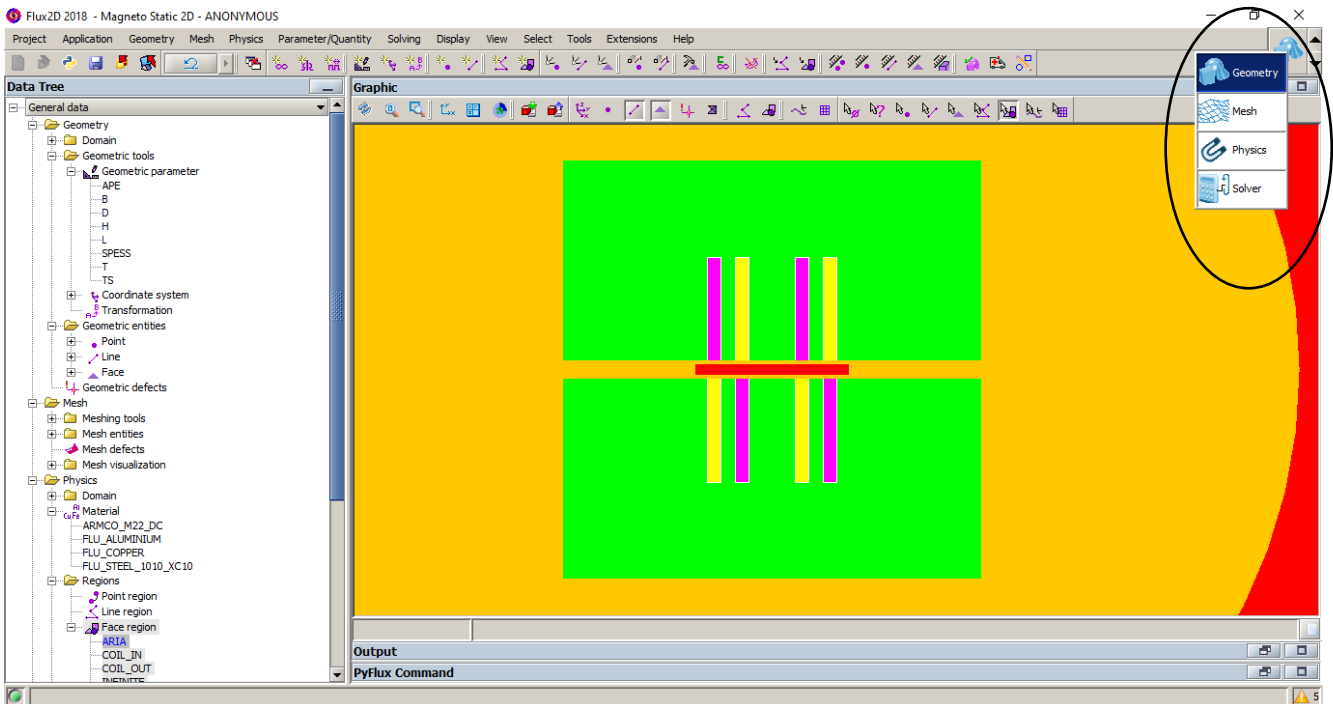


Figura 48: Opzione per passare dalle impostazioni geometriche alle impostazioni della mesh.

Il software permette di scegliere un primo meshing guidato tramite l'attivazione del comando "Aided mesh":

*Mesh -> Aided Mesh -> Edit -> Activate*

Il vantaggio della mesh guidata è che interviene solamente sulle entità geometriche libere, ossia non personalizzate dall'utente.

La mesh guidata interviene su 3 parametri, tutti personalizzabili:

- Mesh point: Assegnando la mesh guidata sui punti in modo dinamico, si permette al software di dare un peso a ciascun punto in relazione alla distanza con il punto successivo; più breve è la distanza, più folla è la mesh in quell'intorno.
- Deviation: Assegnata escludendo la regione INFINITE; individuata dal parametro  $d$ , compreso tra 0 e 1. Più elevato è  $d$  e più la mesh si infittisce. Utilizzata la deviazione relativa poiché si adatta alle dimensioni della geometria

- Relaxation: Assegnabile sia a linee che a facce; individuata dal parametro  $r$ , compreso tra 0 e 1. Più elevato è  $r$ , più la mesh si dirada a causa dell'elevato rilassamento tra gli elementi

In figura 48 viene mostrato un esempio di "Aided mesh":

*Mesh -> Mesh the domain*

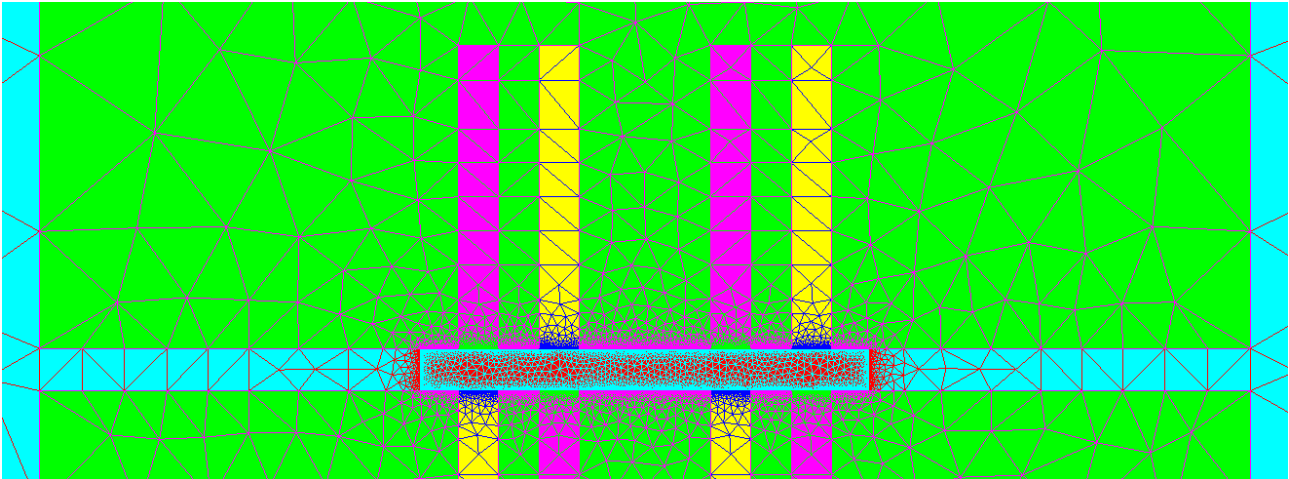


Figura 49: Aided mesh.

Dai risultati del meshing guidato, il software concentra la maggior parte degli elementi nei bordi della lamiera e nella zona del traferro, dove le linee di campo tendono ad attraversare la zona d'aria per andare verso il materiale a permeabilità magnetica più elevata, ossia la lamiera.

Per ottenere risultati più attendibili sul comportamento della zona interna della lamiera, si è scelto di affinare la mesh riducendo il rilassamento  $r$  e imponendo un valore pari a  $r = 0.25$ :

*Mesh -> Relaxation -> Relaxation face -> New -> RELAXFACE\_1; Mesh relaxation on face: Low ( $r = 0.25$ )*

Una volta creata l'opzione sul rilassamento, la si è assegnata alla faccia della lamiera:

*Select face -> Edit array -> Relaxation: RELAXFACE\_1*

Inoltre, si è infittita la mesh nelle zone delle cave, creando una nuova "meshline" di tipo aritmetico, ossia imponendo un determinato numero di elementi su ciascuna linea che componeva il profilo delle cave:

*Mesh -> Meshing tools -> Mesh line -> New -> MESHLINE\_1; Type of the mesh line: Arithmetic; Number of segments: 25*

Si sono scelti 25 elementi in quanto ritenuti un buon compromesso tra l'accuratezza del modello ed il tempo di elaborazione dei dati richiesto dal software.

Una volta definita la mesh, si è avviata l'operazione di meshing del dominio:

*Mesh -> Mesh the domain*

Al termine dell'operazione, il software ha fornito i seguenti risultati:

- *Number of elements not evaluated: 0 %*
- *Number of excellent quality elements: 97.24 %*
- *Number of good quality elements: 1.64 %*
- *Number of average quality elements: 0.76 %*
- *Number of poor-quality elements: 0.36 %*

In figura 49 viene mostrato il modello con la mesh modificata, in figura 50 viene mostrato un dettaglio nell'intorno della lamiera e delle cave; come si vede, la mesh è più fitta nella zona della lamiera e in particolare nel traferro, e tende a diradarsi man mano che ci si allontana dalle cave.

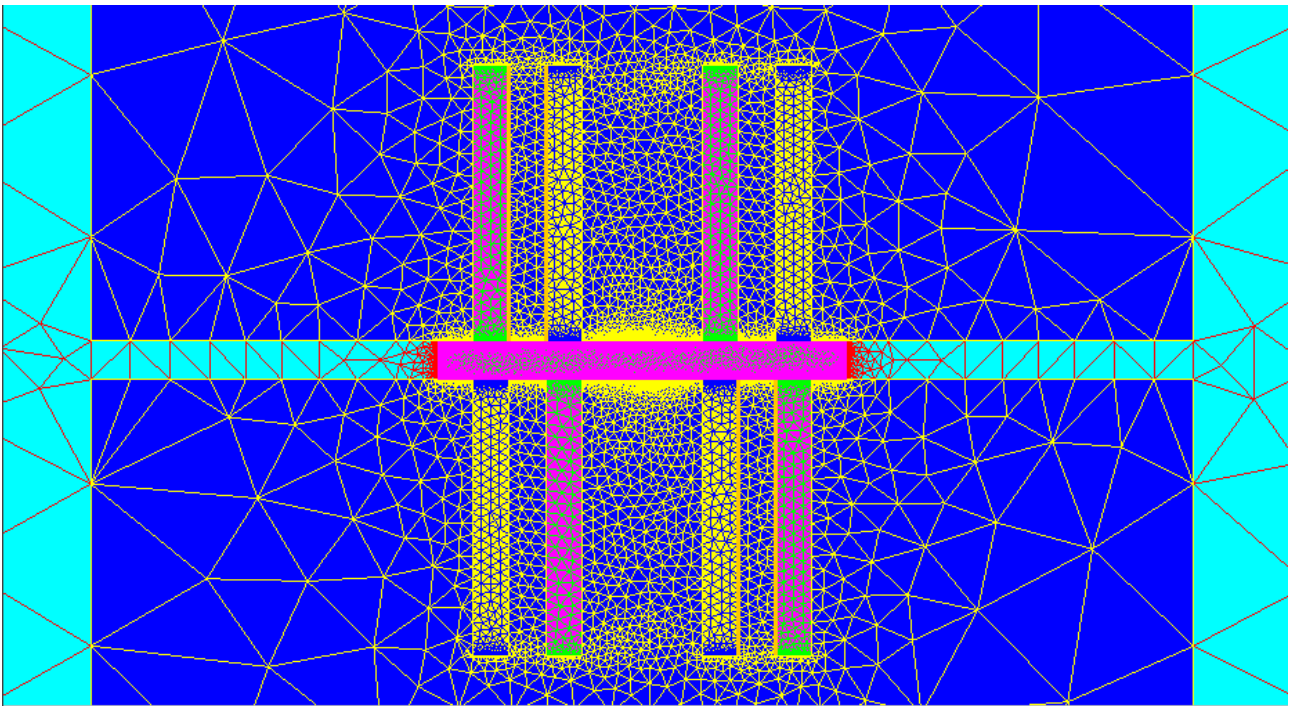


Figura 50: Mesh modificata.

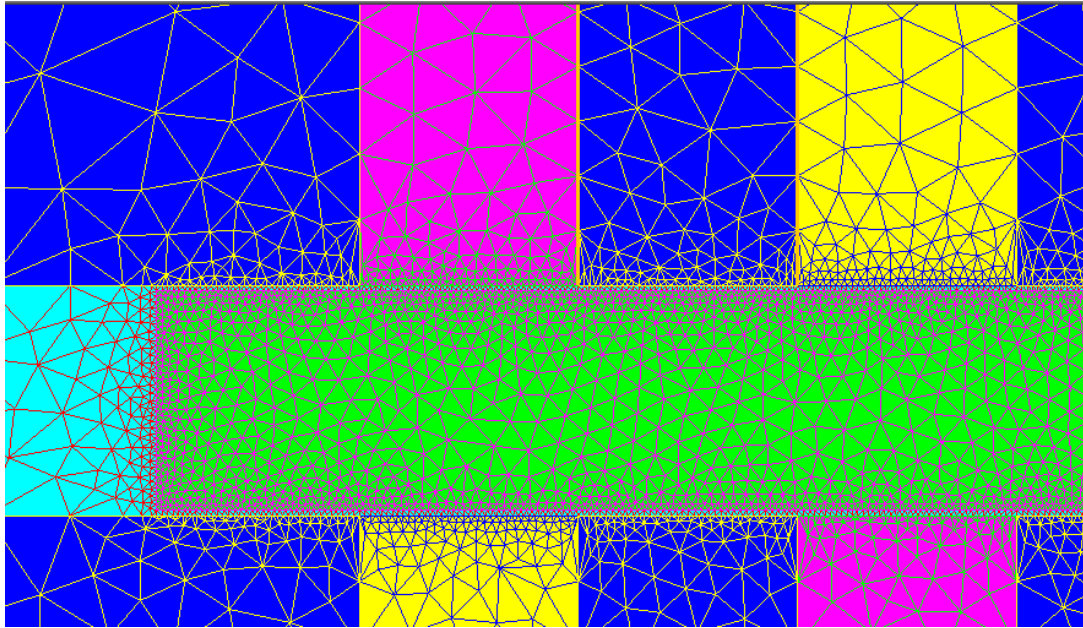


Figura 51: Dettaglio mesh nella zona della lamiera e delle cave.

Una volta impostata la mesh desiderata, si è impostata la simulazione vera e propria.

L'opzione "Solving" permette di creare degli scenari di risoluzione; in questi scenari è possibile far variare i parametri geometrici e fisici precedentemente definiti in un intervallo di valori prescelto. Nell'intervallo vanno inseriti il valore più basso ed il valore più alto del parametro, scegliendo come regolare i valori intermedi (a step costanti, per numero di step, scegliendo una lista di step specifici).

In figura 51 viene mostrata l'interfaccia per impostare un nuovo scenario:

*Solving -> Scenario -> New*

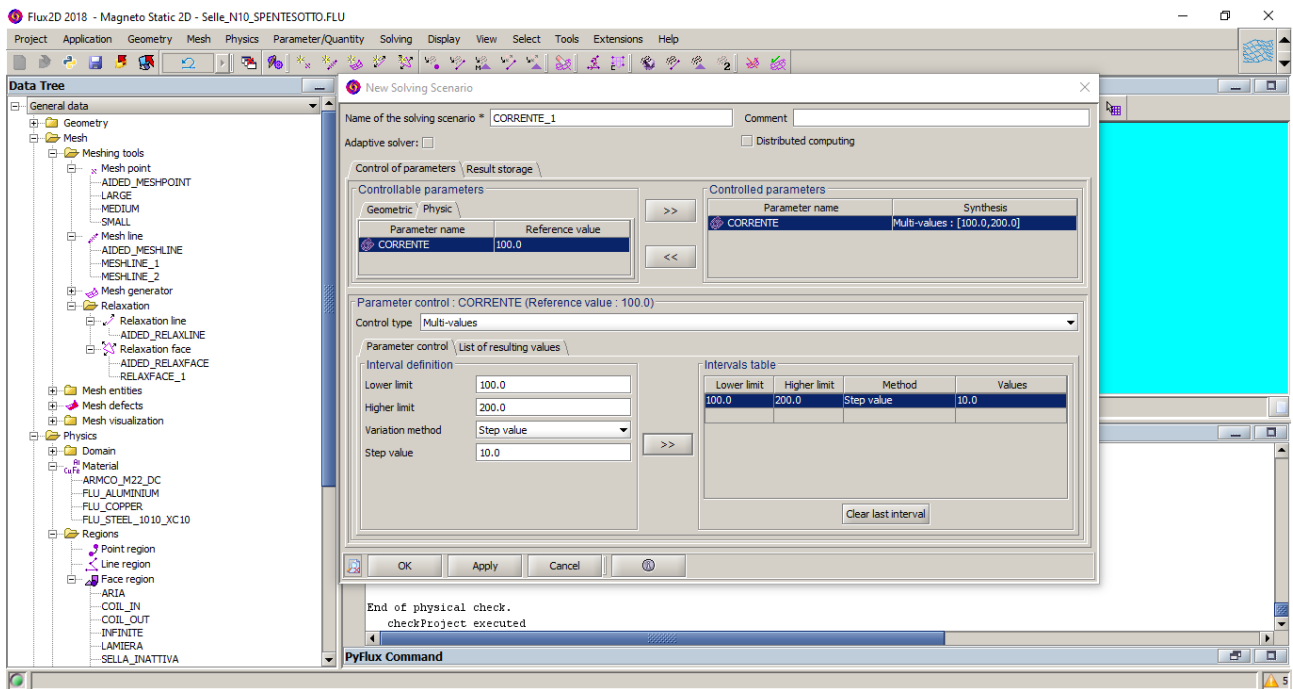


Figura 52: Impostazione nuovo scenario.

## 2.3 Ottimizzazione parametri

Costruendo una serie di scenari che permettano di variare i parametri geometrici e fisici in gioco, è stato possibile ricavare un modello che ottimizzi le prestazioni delle selle elettromagnetiche in relazione a:

- Forza e pressione esercitata sulla lamiera
- Fenomeno della saturazione magnetica, il massimo valore di magnetizzazione che un materiale può raggiungere quando viene sottoposto ad un campo magnetico esterno, oltre il quale l'attrazione magnetica non aumenta più.
- Possibili relazioni geometriche che possano facilitare la futura progettazione rendendola più snella dal punto di vista computazionale

La prima simulazione si è svolta come prova per testare se il sistema potesse fornire valori di pressione accettabili nella pratica.

Viene riproposta la figura 44 per visualizzare i parametri geometrici in gioco, i cui valori sono riportati in tabella 2:

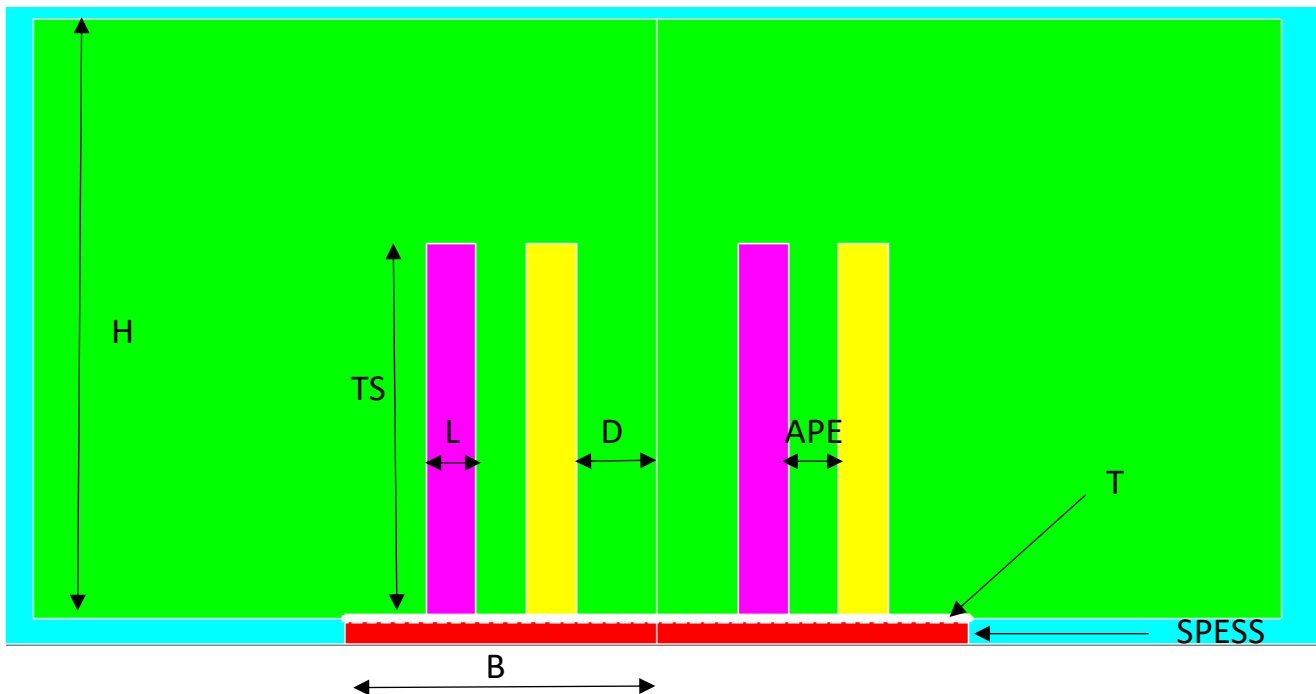


Figura 53: Parametri geometrici.

Parametro geometrico	Dimensione [mm]
H	60
B	25
L	4
APE	4
D	6.5
SPESS	2
T	0.1
TS	40

Tabella 2: Parametri geometrici iniziali.

Come primo parametro di scenario si è scelta la corrente, in quanto la sua variazione influenza in maniera importante il comportamento del sistema, sia in termini di pressione che di saturazione magnetica. Come primo tentativo, si è scelto di far variare la corrente tra 100 e 1000 Amperespire, con uno Step value di 100.

Per valutare i risultati ottenuti, si sono utilizzati diversi metodi:

- Creazione di un path e di un sensore per la valutazione di forze e pressioni
- Creazione di un sistema di isovalori per la valutazione della saturazione magnetica
- Creazione di un sistema di isolinee per la valutazione dell'andamento delle linee di campo

Creazione del path:

*Support -> Path -> New -> Path\_Pressione\_Totale -> Section list -> Add ...*

Si è scelto di applicare il path sui bordi della lamiera rivolti verso le cave, poiché è dove ci si aspetta di avere il contributo maggiore da parte delle selle elettromagnetiche. Si sono dunque selezionate le due linee corrispondenti e si è impostato un numero di intervalli pari a 2000, selezionando LAMIERA come regione di appartenenza.

*Type of section: Line -> Region: LAMIERA -> Discretization: Defined by a number of interval -> Value: 2000*

Si è scelto un numero elevato di intervalli per avere una buona accuratezza dei risultati.

In figura viene mostrato il path creato:

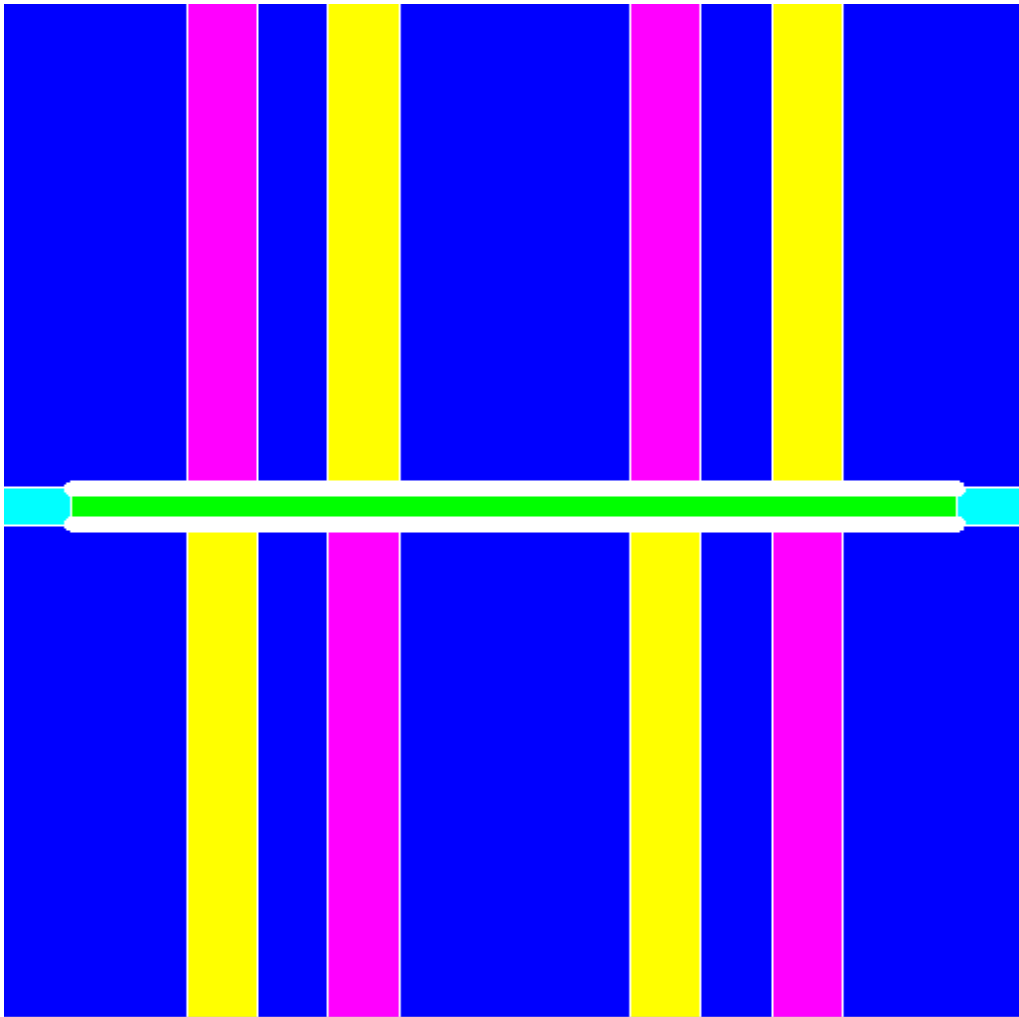


Figura 54: Creazione path.

Assegnato il path, si sono visualizzati i valori di pressione per un valore totale della corrente pari a 1000 A (figura 55):

*Graphic -> Arrows Path -> New -> ARR\_PATH\_1 -> Path for computation:  
Path\_Pressione\_Totale -> Quantity:  $dF_{mag}/dS$*



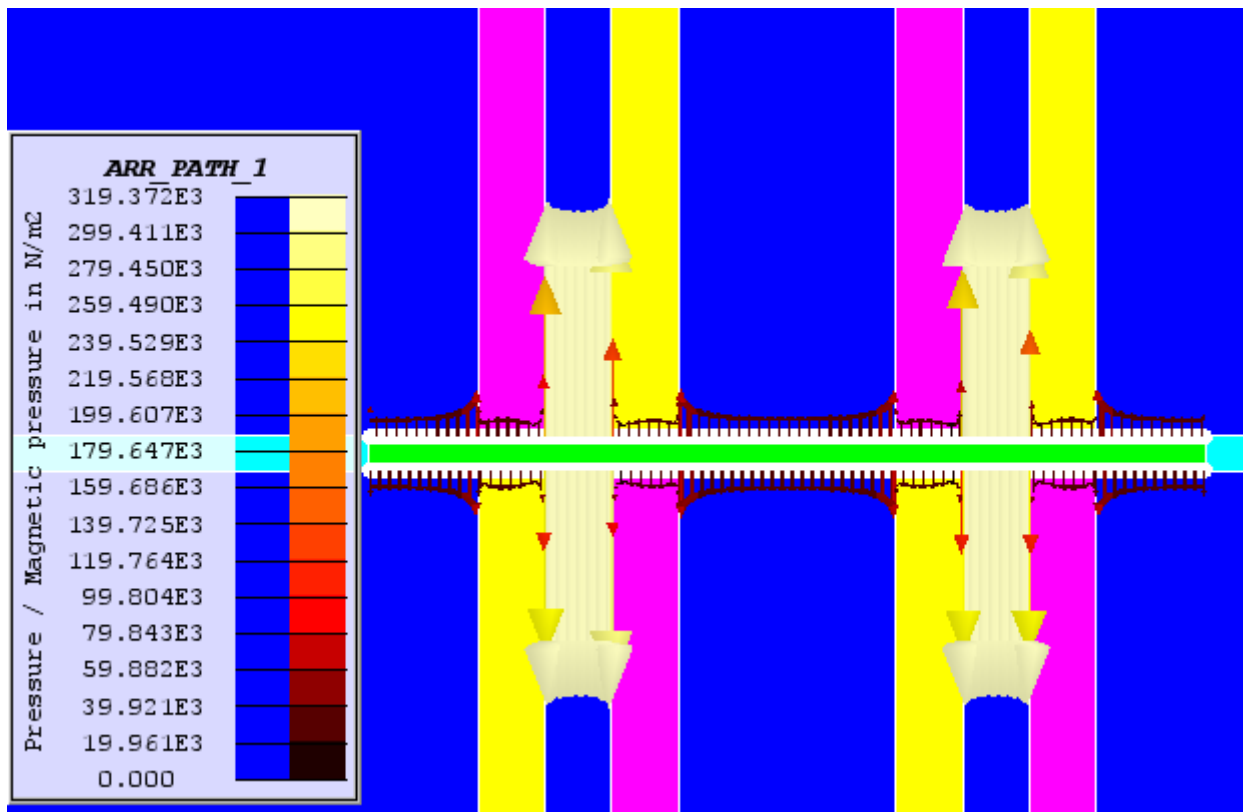


Figura 55: Path pressione totale.

L'andamento della pressione ha un massimo nella zona compresa tra due cave accoppiate, e tende a decrescere rapidamente all'aumentare della distanza dalle cave. Il valore del massimo corrisponde a 0.319 MPa.

Creazione degli isovalori:

*Grafic -> Isovalues -> New -> ISOVAL\_LAMIERA -> Groups of computation: LAMIERA -> Quantity: Magnetic flux density*

In questo modo si è potuto controllare il livello di saturazione magnetica raggiunto dalla lamiera, conoscendo la magnetizzazione di saturazione del materiale. Avendo scelto come materiale FLU\_STEEL\_1010\_XC10, con una magnetizzazione di saturazione  $B = 1.9 \text{ T}$ , se i risultati mostrati dal software sono nell'intorno di quel valore, significa che la lamiera sta saturando, pertanto non sarà più possibile imprimere una forza di attrazione maggiore pur aumentando il valore di corrente.

In figura 55 viene mostrato l'andamento degli isovalori per il massimo valore di corrente:

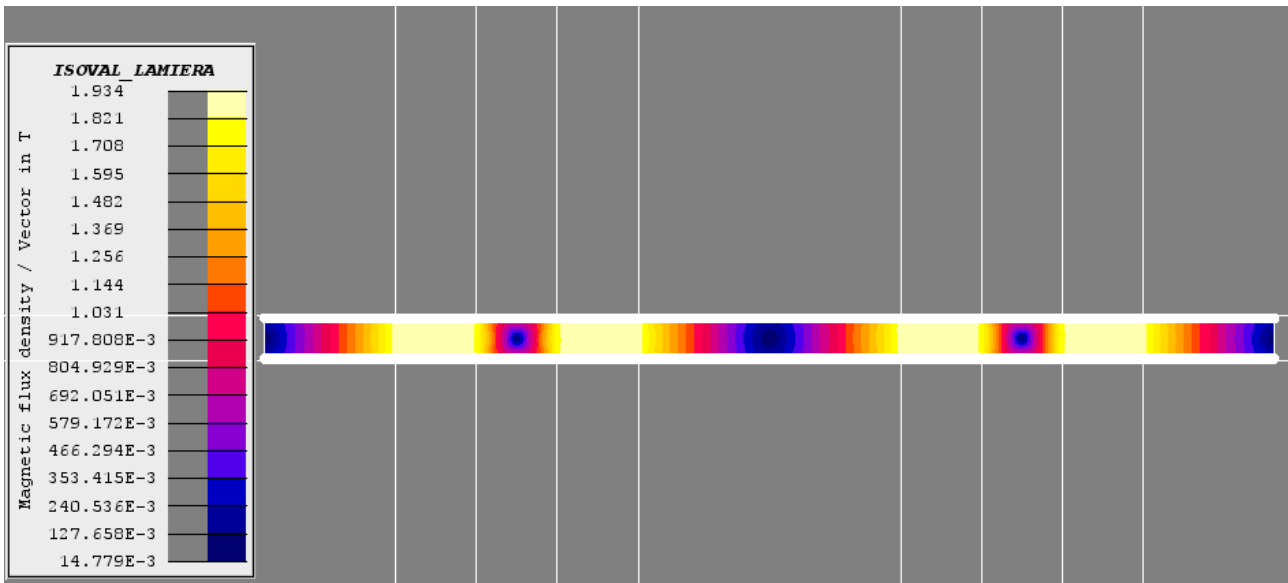


Figura 56: Distribuzione isovalori dell'induzione magnetica B.

Il valore raggiunto è nell'intorno dell'indice di saturazione del materiale della lamiera, ciò significa che l'ulteriore aumento di corrente non produrrebbe vantaggi dal punto di vista del serraggio.

A dimostrazione di ciò, si è implementato un sensore di pressione sulla lamiera, che indicasse il valore massimo di pressione registrato al variare della corrente:

*Physics -> Parameter/Quantity -> Sensor -> New -> PRESSIONE -> Type of sensor: Operation -> Applied operator: Maximum -> Spatial formula: dFmag/dS -> Computation support: Compute on a face support -> Defined by a set of face regions: LAMIERA*

I risultati sono stati riportati su un foglio excel:

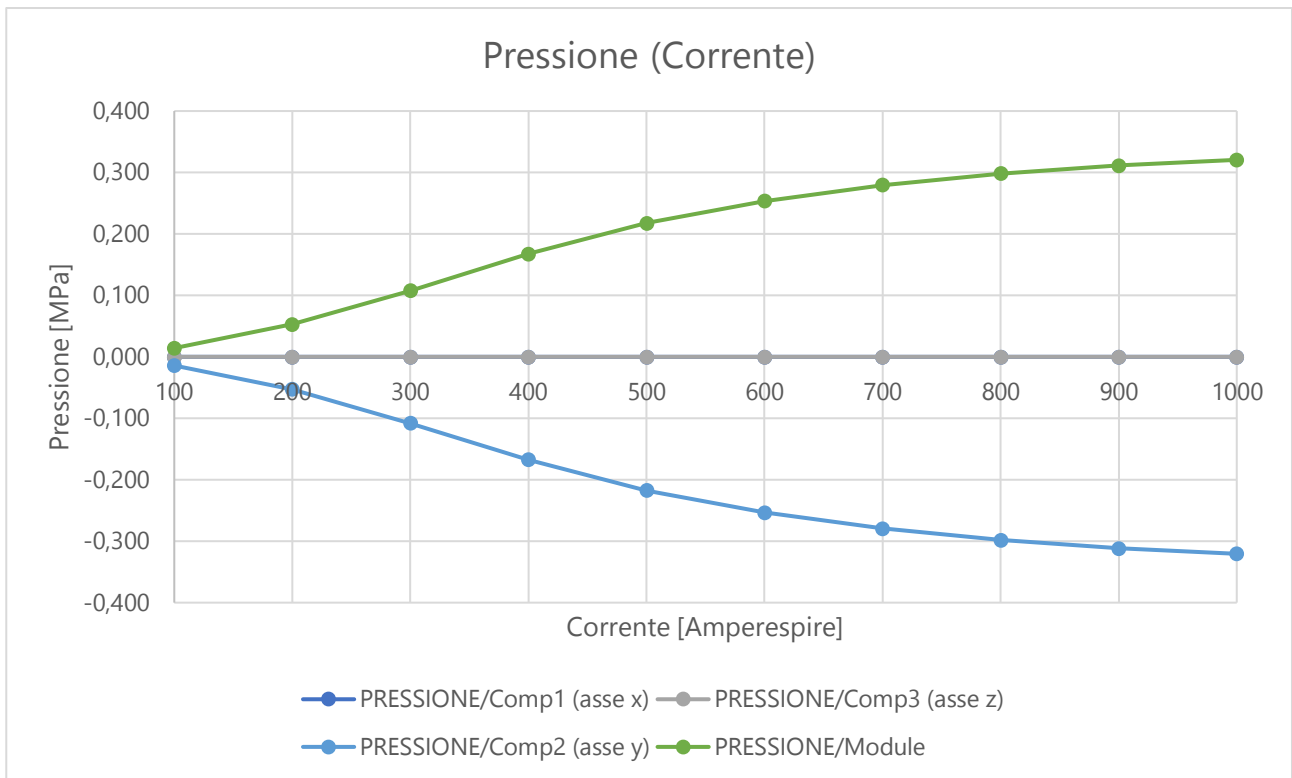


Figura 57: Grafico delle pressioni al variare della corrente.

Vengono visualizzate le tre componenti della pressione, e come ci si attende l'attrazione magnetica delle selle genera una pressione negativa sulla cava lungo l'asse y, attirando il materiale verso lo stampo. Per chiarezza di esposizione viene riportato l'andamento del modulo della pressione, che viene adottato per le successive valutazioni.

All'aumentare della corrente genera un aumento del campo magnetico che attraversa la lamiera fino a raggiungere la saturazione. Per valori di corrente superiori a 700 Amperespire la pressione tende a stabilizzarsi su valori prossimi a 0.300 MPa.

Per valutare l'andamento delle zone dove si raggiungono i valori più elevati di saturazione si è creato un sensore di induzione magnetica B:

*Physics -> Parameter/Quantity -> Sensor -> New -> SATURAZIONE -> Type of sensor: Operation -> Applied operator: Maximum -> Spatial formula: B -> Computation support: Compute on a face support -> Defined by a set of face regions: LAMIERA*

Valutato al variare della corrente ha dato i seguenti risultati:

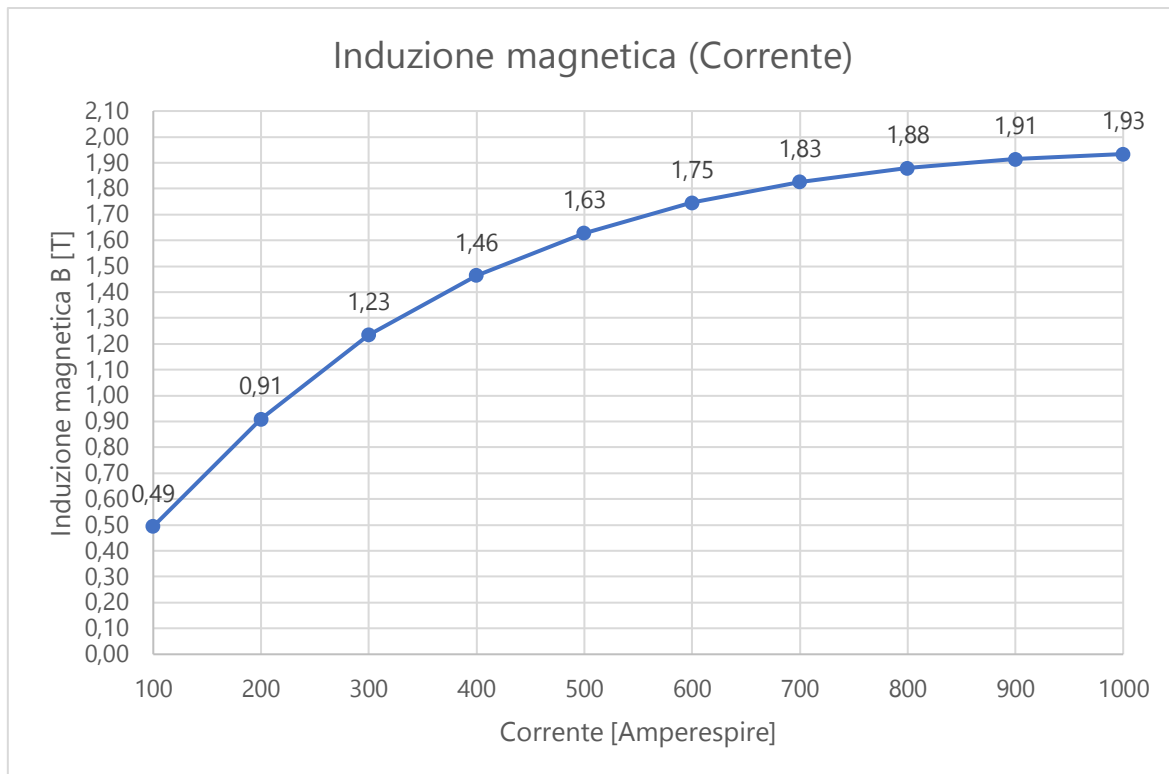


Figura 58: Grafico induzione magnetica al variare della corrente.

Come si vede dal grafico, l'indice di saturazione  $J_s = 1.9 \text{ T}$  viene raggiunto per una corrente pari a circa 800 A, a cui corrisponde una stabilizzazione della pressione.

Creazione isolinee:

*Graphic -> Isolines -> New -> ISOLIN\_1 -> Support for isolines: SPATIAL GROUP -> Groups of computation: DOMAIN -> Quantity: Vector potential An*

Per visualizzare l'andamento delle linee di campo si utilizza il potenziale magnetico A, legato all'induzione magnetica B secondo alla formula:

$$B = \nabla \times A$$

Pertanto, l'induzione magnetica B è il rotore del potenziale magnetico A.

In figura 59 viene mostrato l'andamento delle linee di campo nel dominio, mentre in figura 60 viene mostrato in dettaglio il comportamento nella zona della lamiera: le linee tendono ad addensarsi alle estremità delle cave generando le zone di saturazione magnetica viste nelle immagini precedenti.

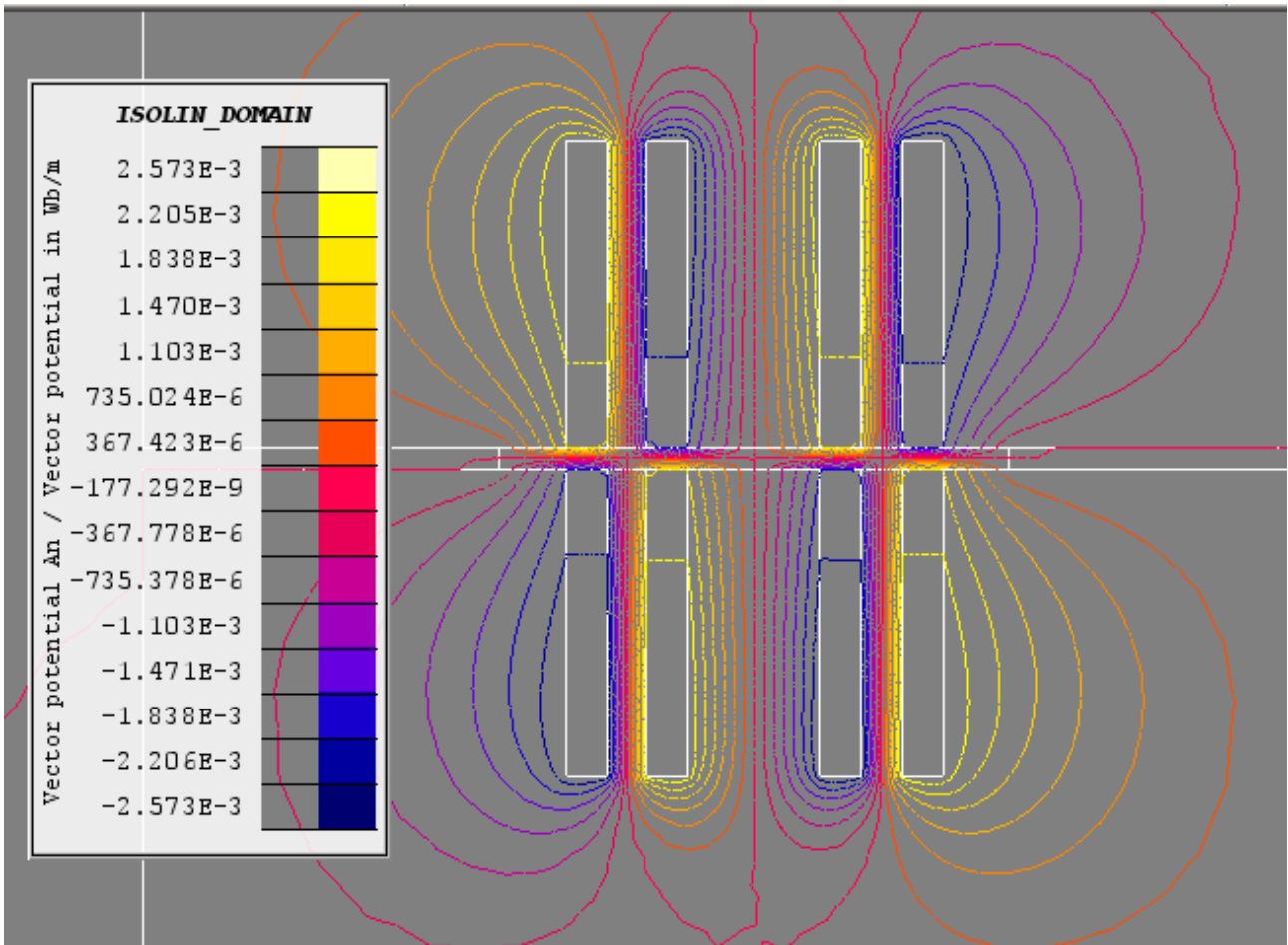


Figura 59: Andamento isolinee nel dominio.

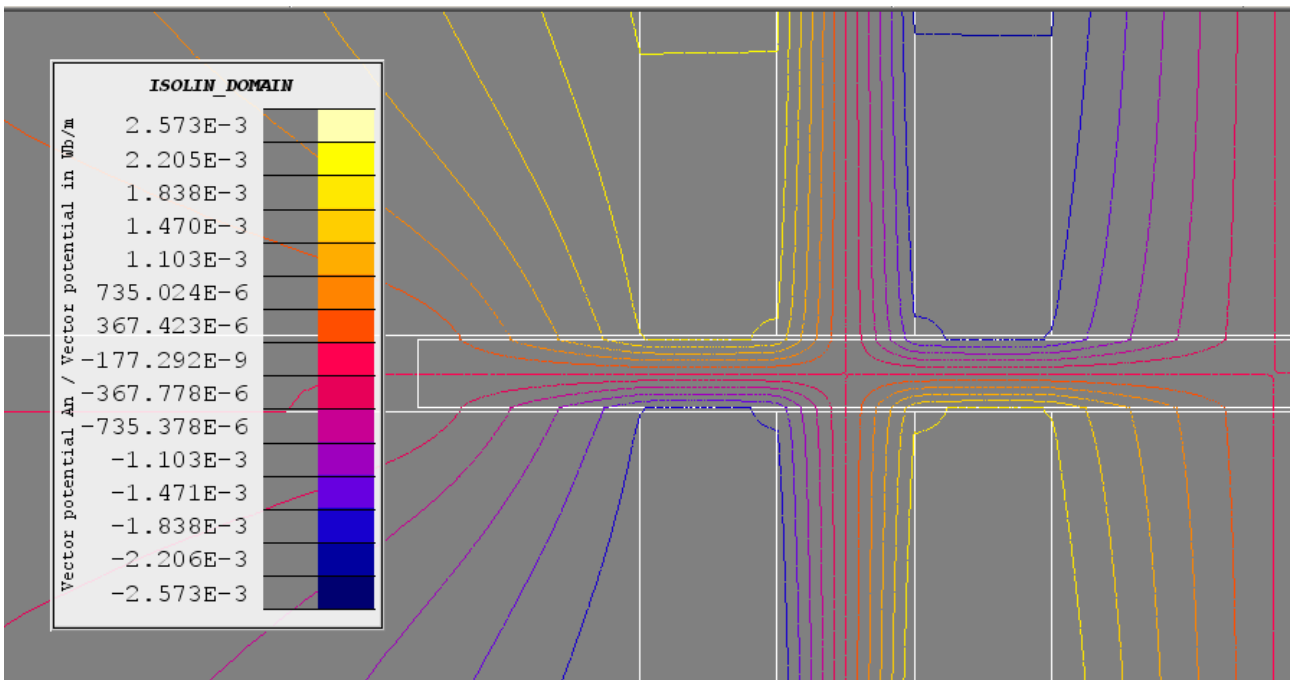


Figura 60: Dettaglio isolinee nella zona della lamiera.

Dopo una simulazione di primo tentativo, variando solamente la corrente impressa, si sono impostati degli scenari riguardanti la variazione dei parametri geometrici delle selle, di modo da trovare la geometria adeguata ai tre fattori citati all'inizio del paragrafo.

### 2.3.1 Materiale

Sulla base dei materiali selezionati precedentemente, si sono creati degli scenari di risoluzione in funzione della corrente simili a quella di primo tentativo, quindi con un valore minimo pari a 100 Amperespire, un valore massimo pari a 1000 Amperespire ed un valore del passo pari a 100 Amperespire. Dai risultati si deduce che per materiali ferromagnetici l'andamento della pressione non subisce variazioni rilevanti, e la saturazione viene raggiunta per lo stesso livello di corrente (circa 800 Amperespire). Nel caso dell'alluminio, materiale diamagnetico, non si è registrata alcuna pressione esercitata, e questo era prevedibile poiché il campo magnetico tende ad agire nel mezzo con permeabilità magnetica maggiore, perciò se lo stampo è di materiale ferromagnetico il campo magnetico esercitato dalle selle tende a ristagnarvi all'interno. In figura si vedono le isolinee nel caso di materiale ferromagnetico (FLU\_STEEL\_1010\_XC10) e materiale diamagnetico (FLU\_ALUMINUM). Di conseguenza, questa applicazione si presta solamente per materiali ferromagnetici, per un valore di permeabilità magnetica relativa minima stimata intorno a 2000. Per quanto riguarda la simulazione, si è preferito continuare con il materiale in acciaio, essendo molto più comune nelle applicazioni industriali.

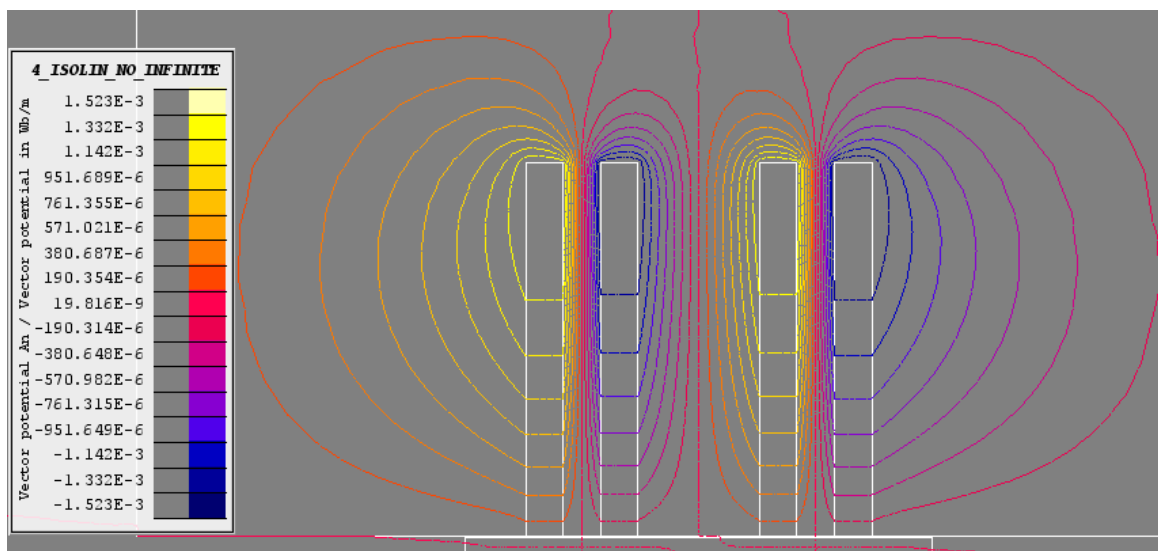


Figura 61: Isolinee lamiera in alluminio.

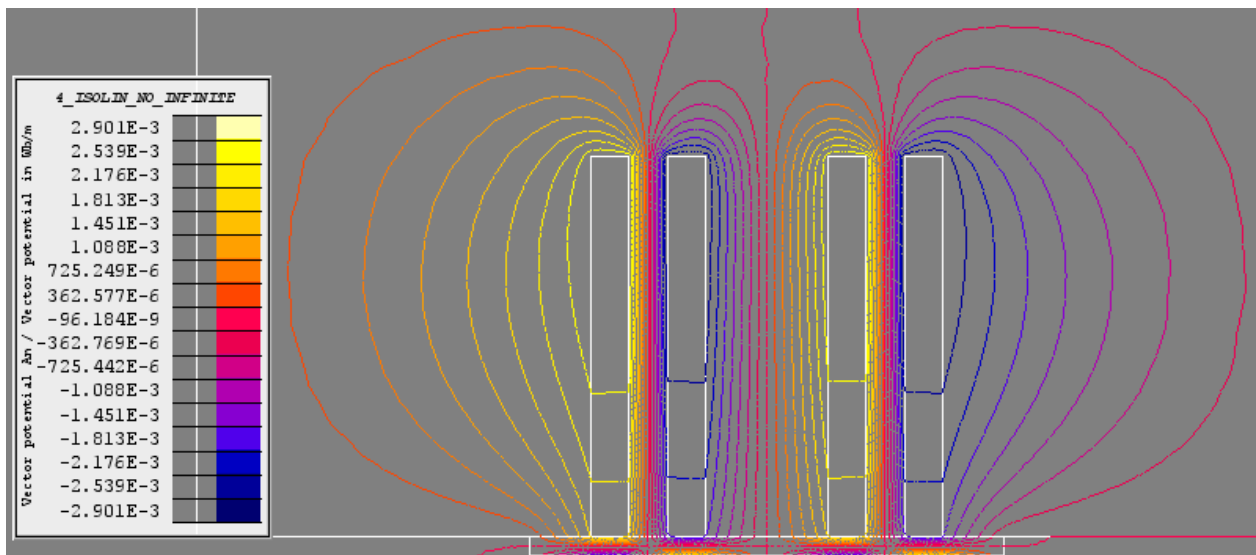


Figura 62: Isolinee lamiera in acciaio C10.

I grafici mostrano l'andamento delle pressioni massime calcolate con il sensore di pressione al variare della corrente:

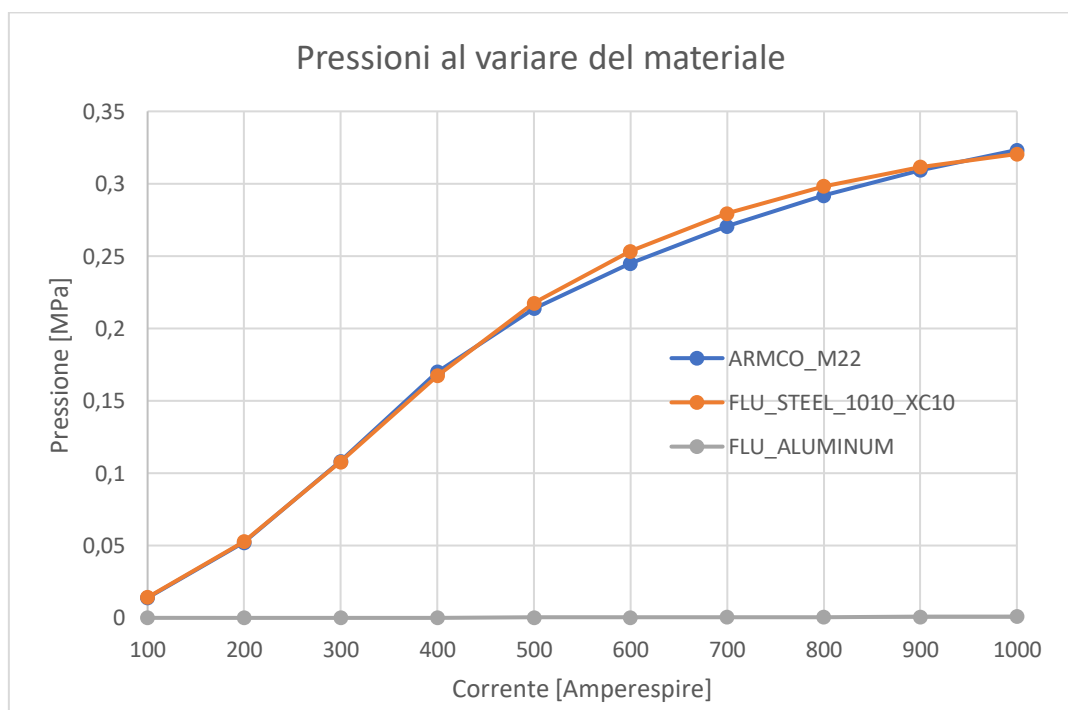


Figura 63: Pressioni al variare del materiale della lamiera.

### 2.3.2 Distribuzione delle selle

Il primo parametro considerato è stata la distribuzione delle selle lungo la lamiera. Nella simulazione di primo tentativo si è notato che la pressione tende a concentrarsi nella zona compresa tra due cave accoppiate, mentre nelle zone più esterne e nella zona centrale i valori calano repentinamente, diventando trascurabili. Uno dei motivi ipotizzati è che la distanza tra le selle fosse troppo elevata, pertanto si è creato uno scenario riguardante il parametro D:

*Solving -> Scenario -> New -> D -> Lower value: 2; higher value: 6.5; step value: 0.5*

I risultati della simulazione hanno confermato l'ipotesi riguardante la distanza troppo elevata tra le selle.

I grafici in figura mostrano l'andamento della pressione calcolata sul path della lamiera per una corrente pari a 1000 Amperespire. Poiché in precedenti simulazioni si sono riscontrati valori anomali sui bordi laterali della lamiera, si è creato un path apposito che raccogliesse i risultati ad una distanza D/4 dalle estremità laterali della lamiera:

*Support -> Path -> New -> PATH\_FILTRO*

Il path percorre solamente il bordo superiore della lamiera, poiché si è visto che la distribuzione di pressioni è esattamente la stessa nel bordo inferiore.

Si nota che al diminuire della distanza tra le selle la pressione nella zona centrale tende ad aumentare a discapito di un lieve abbassamento nella zona tra le cave accoppiate, il vantaggio che ne deriva è evidenziato dalla differenza di pressione media esercitata nel caso con D = 2 mm ed i casi con D = 4 mm e D = 6.5 mm, riassunta in tabella.

D	P <sub>media</sub> [MPa]	P <sub>max</sub> [MPa]
2	0.271	0.287
4	0.175	0.304
6.5	0.130	0.312

Tabella 3: Andamento pressione media e massima al variare di D.

Inoltre, la scelta di imporre un valore di D pari a 2 mm garantisce una distribuzione con cave equidistanti lungo la lamiera, facilitando di molto il lavoro di simulazione in quanto i parametri L, APE e D diventano dipendenti tra loro secondo la relazione:

$$L = APE = 2D$$

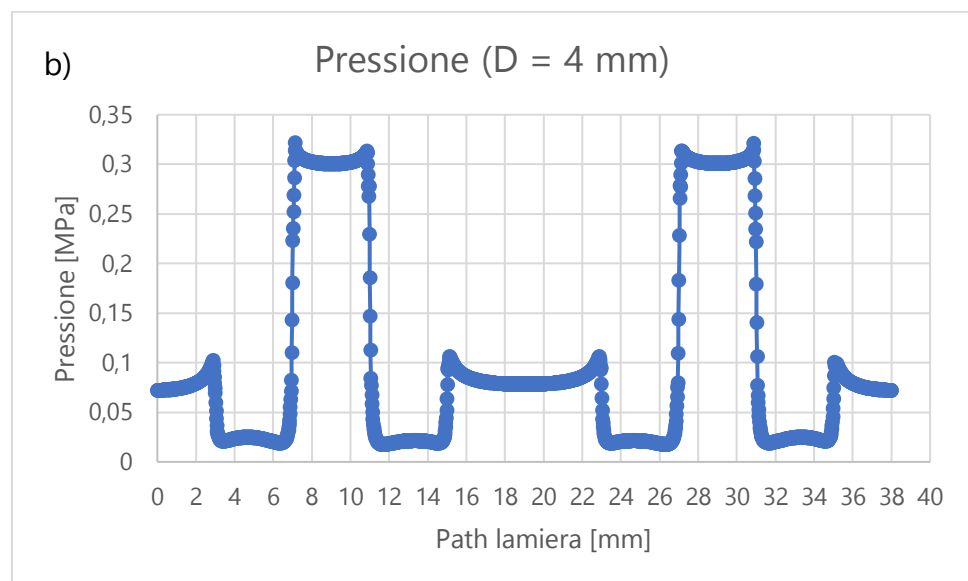
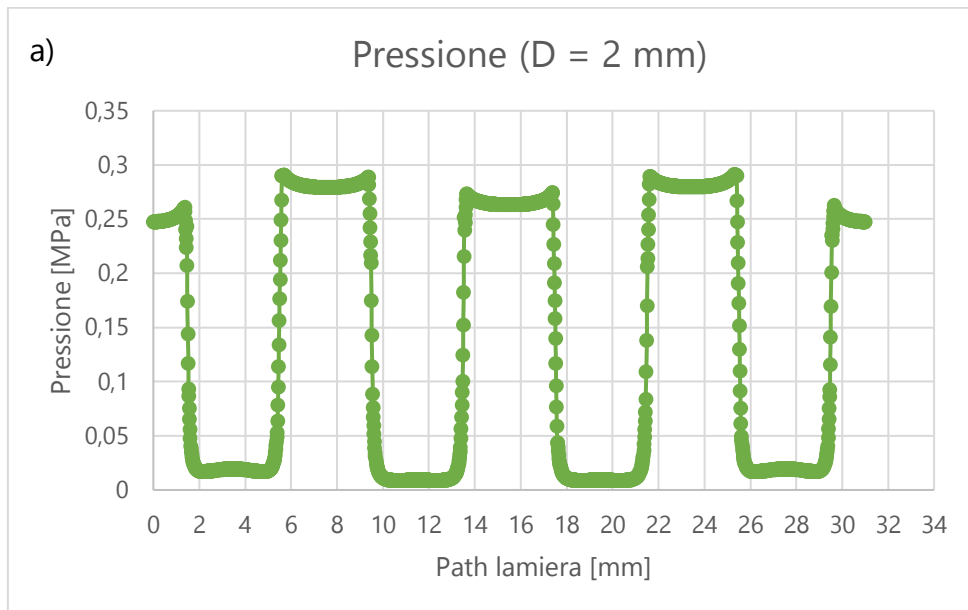


La stessa larghezza della lamiera B, per garantire una spaziatura omogenea delle cave, diventa funzione dei tre parametri secondo la relazione:

$$B = 2 \cdot L + APE + 2 \cdot D = 4 \cdot L$$

Infine, anche l'altezza delle cave TS, non producendo effetti in termini di pressione esercitata sulla lamiera, è stata parametrizzata sull'andamento della larghezza delle cave L:

$$TS = 10 \cdot L$$



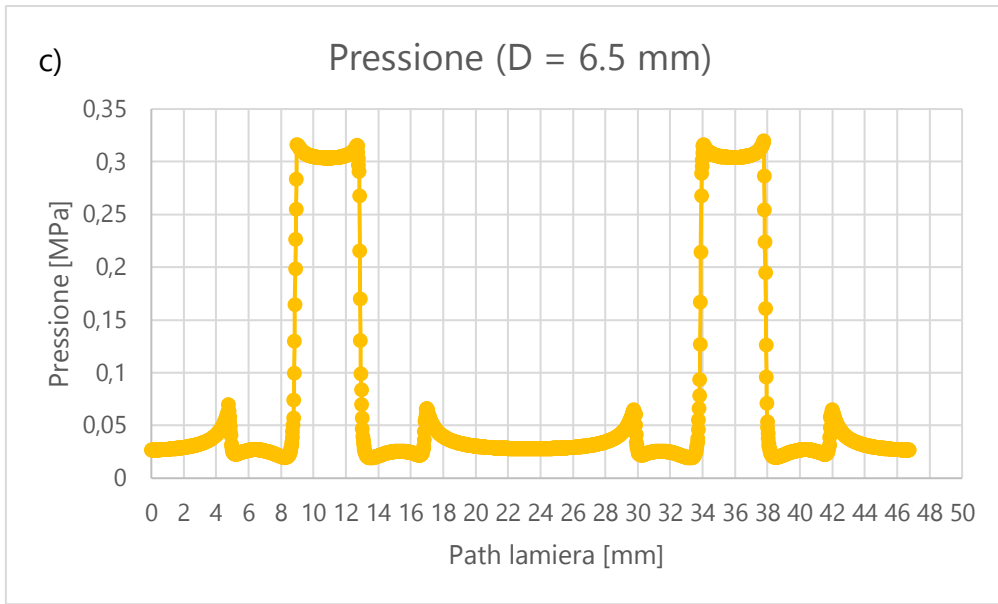


Figura 64: Grafici andamento pressioni al variare di D: a) D = 2 mm, b) D = 4 mm, c) D = 6.5 mm.

Per quanto riguarda il livello di saturazione, non si sono rilevati cambiamenti al variare della distanza tra le selle, la lamiera raggiunge la saturazione in ogni caso, pertanto è necessario l'approfondimento di ulteriori parametri.

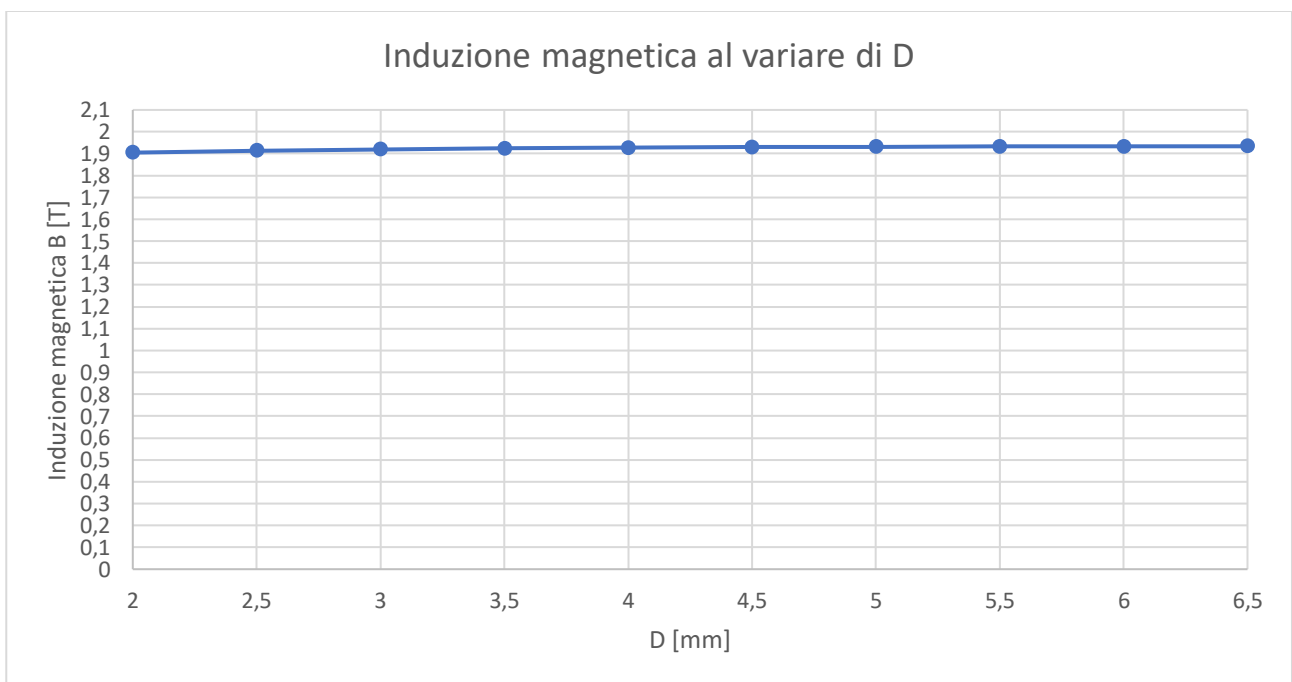


Figura 65: Induzione magnetica al variare di D.

### 2.3.3 Spessore della lamiera

La saturazione della lamiera impedisce un ulteriore aumento di pressione esercitata aumentando la corrente immessa negli avvolgimenti poiché il materiale non risente più del conseguente aumento delle linee di campo che lo attraversano. Si è scelto di far variare lo spessore della lamiera per valutare i cambiamenti che questo avrebbe comportato sulle pressioni esercitate ed il livello di saturazione raggiunta:

*Solving -> Scenario -> New -> Spessore; Lower Value: 1; Higher Value: 4; Step Value:1*

Con il sensore di pressione si è valutato l'andamento delle pressioni massime al variare dello spessore per una corrente pari a 1000 Ampere (figura 66):

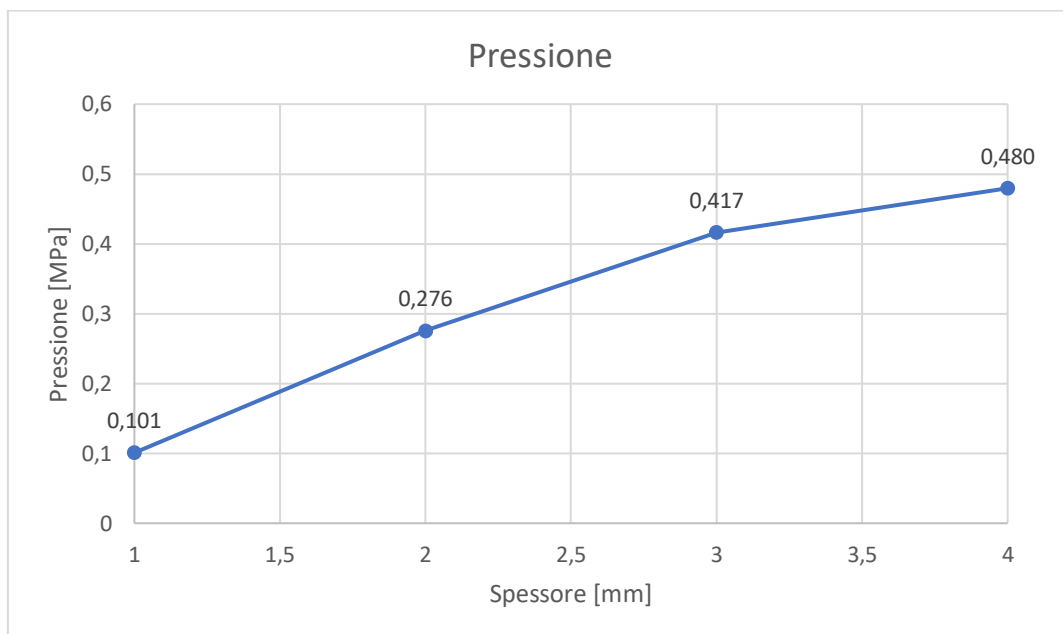


Figura 66: Pressione massima al variare dello spessore.

Dal grafico si evidenzia il notevole impatto dello spessore sul valore di pressione massima a parità di corrente immessa. Raddoppiando lo spessore si ottiene un aumento pari a circa il 75%.

Per quanto riguarda la saturazione, ci si aspetta che aumentando il materiale a disposizione le linee di campo possano distribuirsi meglio diminuendo il livello di saturazione. La simulazione ha confermato l'ipotesi, come si può apprezzare in figura 67:

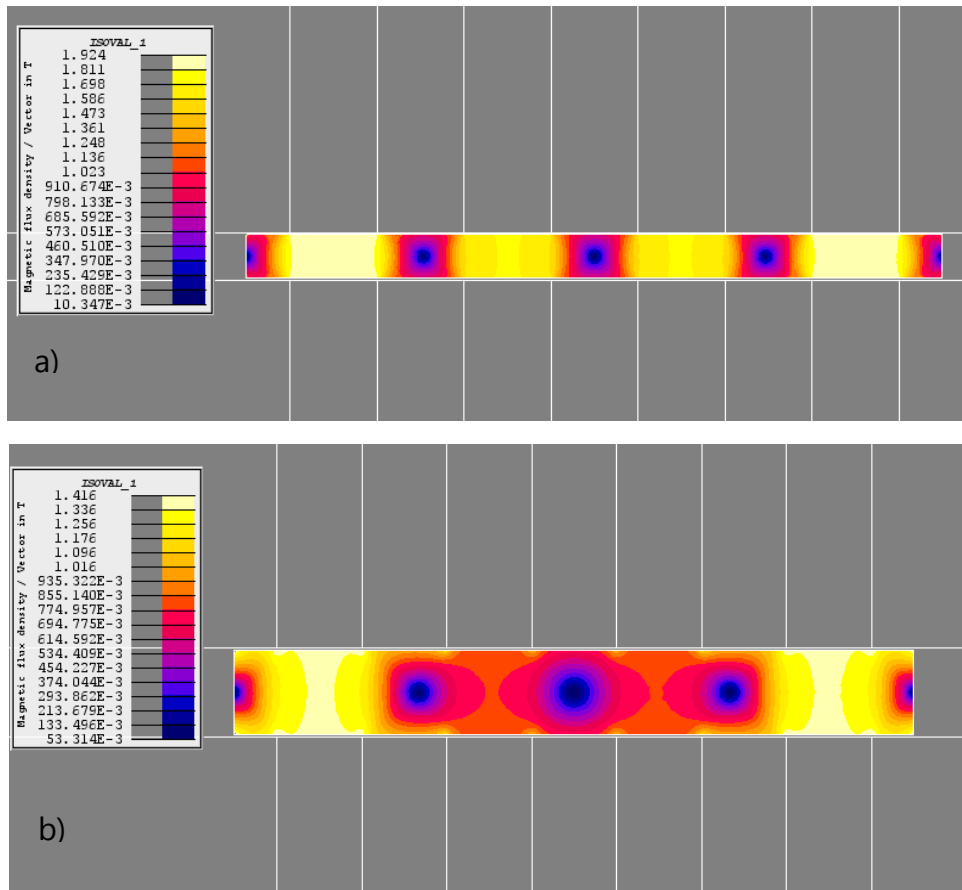


Figura 67: Confronto isovalori: a) Spess = 2 mm, b) Spess = 4 mm.

Si è quindi alzato il livello di corrente passante per gli avvolgimenti per capire che valore la lamiera fosse in grado di raggiungere prima di saturare. I risultati hanno indicato un valore di corrente pari a 2000 Amperespire, ossia esattamente il doppio del livello di corrente che era consentito immettere in una lamiera di metà spessore. La pressione non presenta andamento lineare, ma comunque si registra un aumento del valore massimo pari a circa il 60%. In figura viene messo a confronto l'andamento della pressione della lamiera lungo il path PATH\_FILTRO per una corrente pari a 1000 Amperespire ed una corrente pari a 2000 Amperespire, con uno spessore pari a 4 mm:

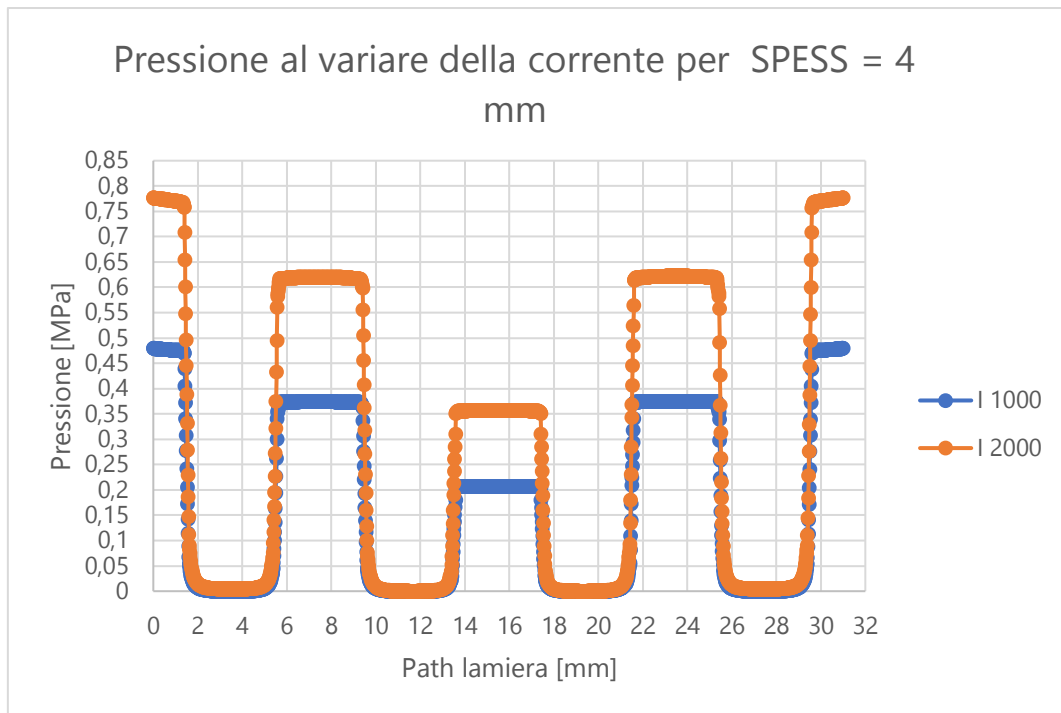


Figura 68: Andamento pressione sul path al variare della corrente.

Di contro, come è già visibile nel grafico riferito ad uno spessore della lamiera di 4 mm, l'andamento della pressione non risulta più uniforme ed equilibrato come nel caso precedente, tende a concentrarsi nelle zone più esterne della lamiera, con una perdita di pressione nella zona centrale. Si sono messe a confronto le pressioni sul PATH\_FILTRO al variare dello spessore della lamiera per una corrente pari a 1000 Amperespire:

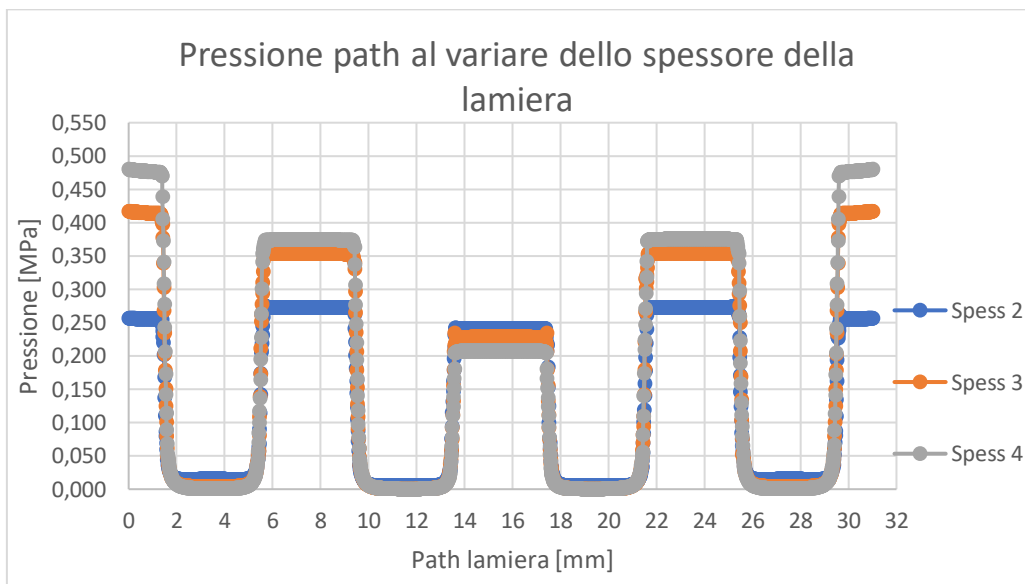


Figura 69: Pressione sul path al variare dello spessore.

### 2.3.4 Correlazione larghezza cava e spessore lamiera

Con l'obiettivo di individuare un parametro che renda la progettazione più snella, si è cercata una correlazione tra la larghezza delle cave L, parametro che definisce l'intera distribuzione geometrica delle cave lungo la lamiera, e lo spessore SPESS della lamiera. Si è impostato uno scenario basato sulla variazione dei parametri L e SPESS:

*Solving -> Scenario -> New -> L\_S; Lower Value: 1; Higher Value: 6; Step Value:1*

Dai risultati si è ricavata un'effettiva correlazione: la pressione massima ricavabile dal sistema è ottenibile quando il rapporto  $L/SPESS = 1$ , ossia quando la larghezza delle cave e la loro distanza risultano uguali allo spessore della lamiera su cui agisce il campo magnetico. In sede di progettazione questo può risultare un indicatore vantaggioso, poiché consente sin da subito di avere un'idea della geometria da adottare per posizionare le cave lungo la lamiera in base allo spessore di quest'ultima. Questo rapporto è valido per spessori fino a 4 mm, per spessori di 5 e 6 mm (valori raramente utilizzati nella pratica e per cui si inizia a parlare di "piatto" e non più di "lamiera") la pressione rimane stabile, leggermente inferiore al valore di pressione massima raggiunta per  $SPESS = 4$  mm.

Il grafico in figura è stato realizzato plottando una curva 3D che calcola la pressione massima registrata sul path PATH\_FILTRO tramite un sensore di pressione al variare dei parametri L e SPESS. Si è creato un nuovo sensore:

*Physics -> Parameter/Quantity -> Sensor -> New -> Pressione\_Path -> Type of sensor: Operation -> Applied operator: maximum -> Spatial formula: dFmag/dS -> Computation support: Compute on a line -> Defined by a compound path: PATH\_FILTRO*

Si è plottata la curva:

*Curve -> 3D curve (2 I/O parameters) -> New -> SENSORE\_PATH -> ...*

New 3D curve (2 I/O parameters) ×

Name of 3D curve (2 I/O parameters) \*

Comment

Evolute path parameters

X choice	Y choice	Parameter name	Current value	Limit min	Limit max
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	L		✓ 1.0	✓ 4.0
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	SPESS		✓ 1.0	✓ 4.0
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CORRENTE	✓ 1000.0		

Formula on the third axis

Region    Circuit    Mechanical set

Tabella 4: Impostazioni curva 3D.

E si è scelta l'opzione di rappresentazione della curva 2D e si sono riportati i risultati nel foglio excel in figura:

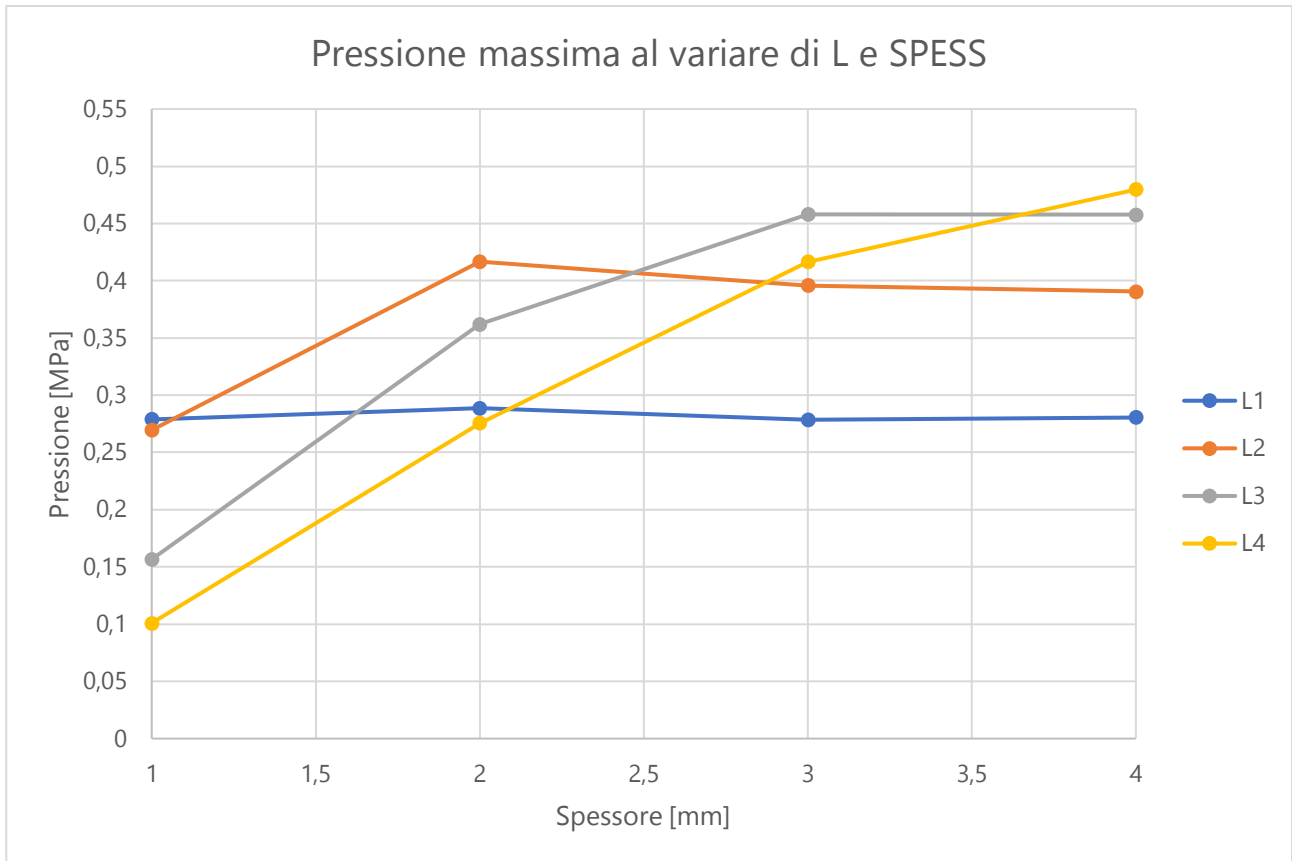


Figura 70: Grafico andamento pressione massima al variare dei parametri L e SPESS.

Ogni linea rappresenta l'andamento della pressione massima al variare dello spessore SPESS per una larghezza di cava L costante. I punti che stanno sulla stessa verticale hanno spessore costante e indicano l'andamento della pressione massima al variare della larghezza delle cave L. Se si fa riferimento alla verticale riguardante lo spessore SPESS = 2 mm, si nota che il valore massimo di pressione appartiene alla curva L2, quindi per  $L/SPESS = 1$ . Lo stesso ragionamento si applica agli altri valori dello spessore con i medesimi risultati: la pressione massima risulta quando la larghezza di cava L è uguale allo spessore della lamiera.

Poiché uno spessore maggiore della lamiera garantisce una pressione massima maggiore ed un minore tendenza a saturare della lamiera, si è scelto di proseguire la progettazione per un valore di  $L = SPESS = 4$  mm, mostrata in figura:



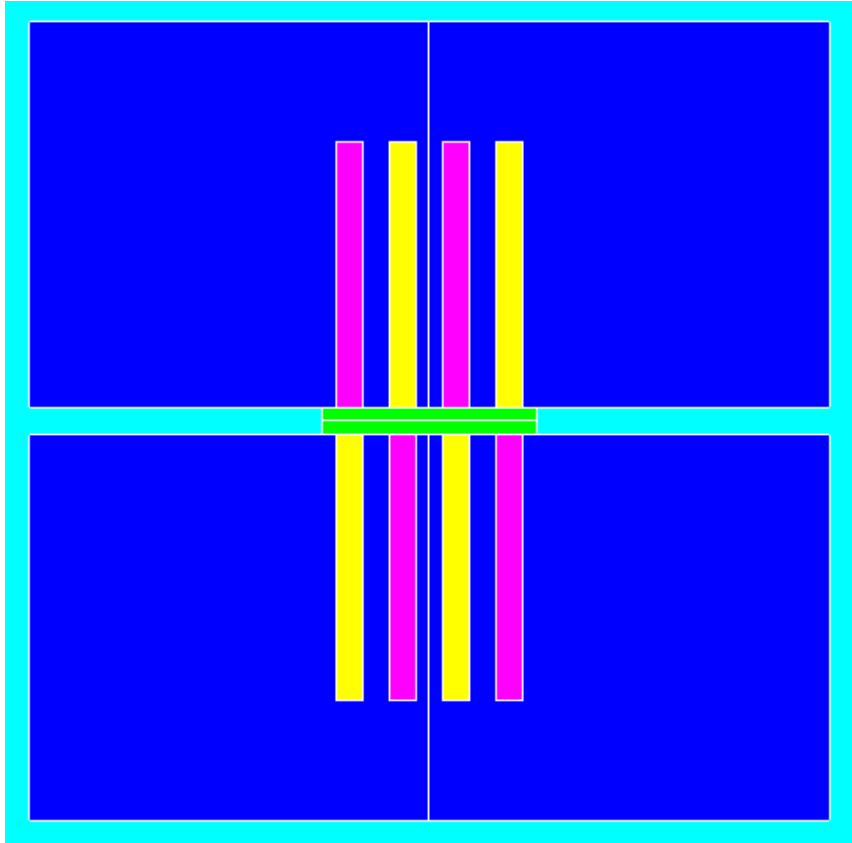
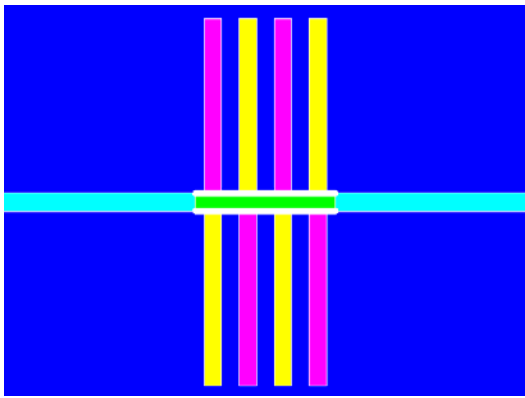


Figura 71: Geometria modello,  $L = \text{SPSS} = 4 \text{ mm}$ .

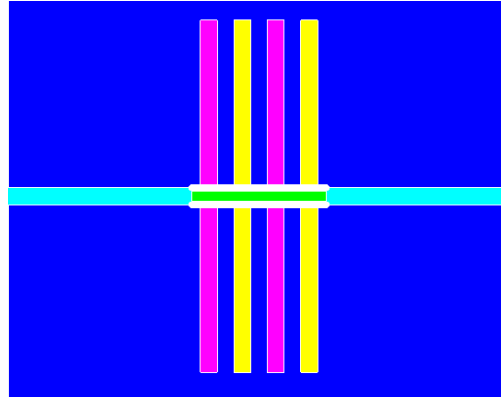
### 2.3.5 Distribuzione della corrente nelle cave

Indicata la geometria e lo spessore, si è scelta la configurazione del verso della corrente più idoneo al modello. Questo parametro può essere facilmente modificabile in fase sperimentale pertanto è molto flessibile, ma per la simulazione è utile individuare la configurazione migliore e proseguire l'ottimizzazione tenendo fissi i versi della corrente.

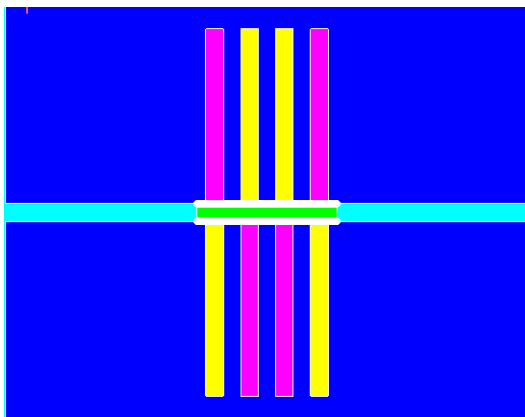
In figura vengono mostrate le quattro diverse configurazioni testate, ricordando che le cave di colore magenta indicano il verso della corrente entrante, le cave di colore giallo indicano il verso della corrente uscente:



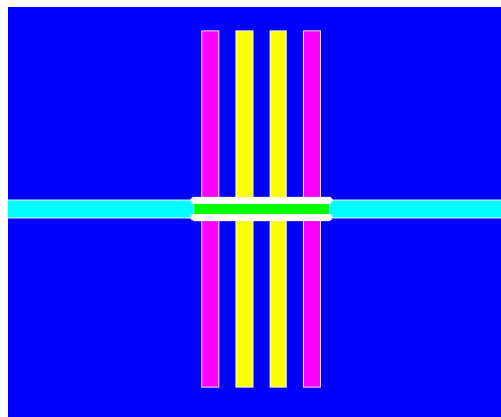
a)



b)



c)



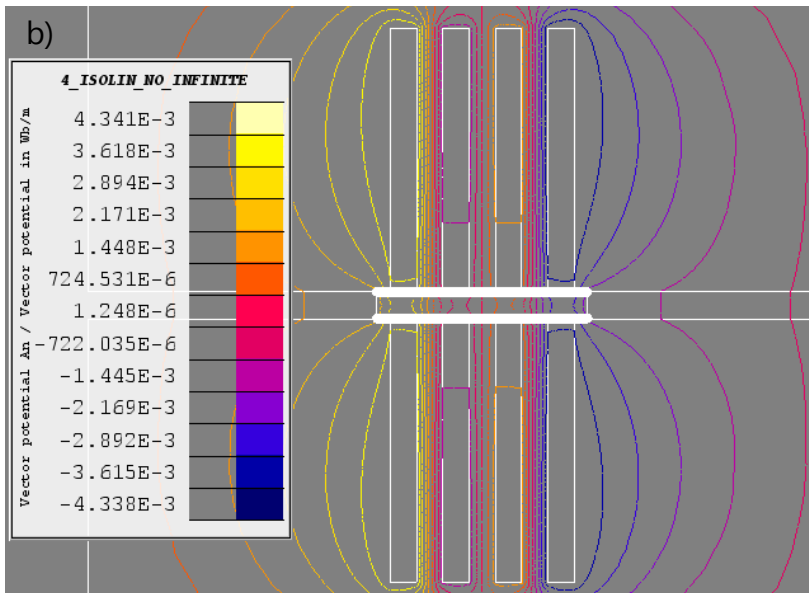
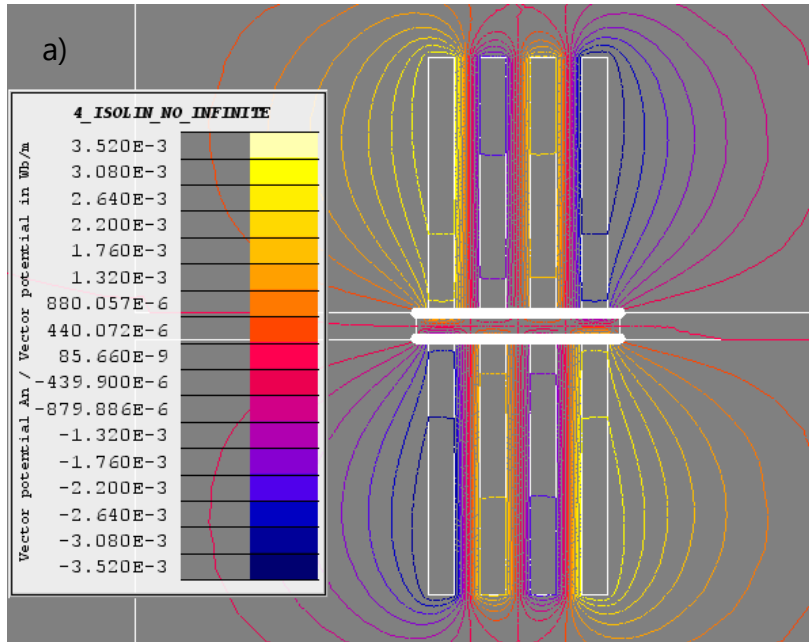
d)

Figura 72: a) Configurazione 1 b) Configurazione 2 c) Configurazione 3 d) Configurazione 4

Il confronto si è basato su tre fattori:

- Andamento delle pressioni
- Livello di saturazione della lamiera
- Andamento isolinee di campo

Riguardo l'andamento delle isolinee del potenziale magnetico  $A$ , in figura si può apprezzare come a seconda della disposizione del verso della corrente nelle cave gli accoppiamenti tra le selle cambino radicalmente:



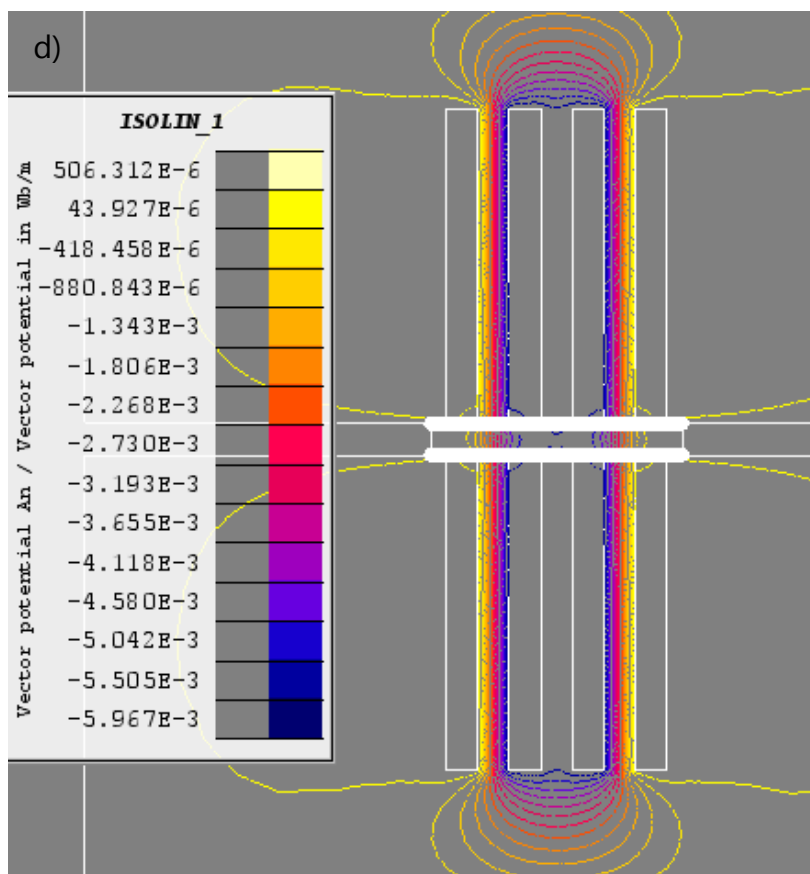
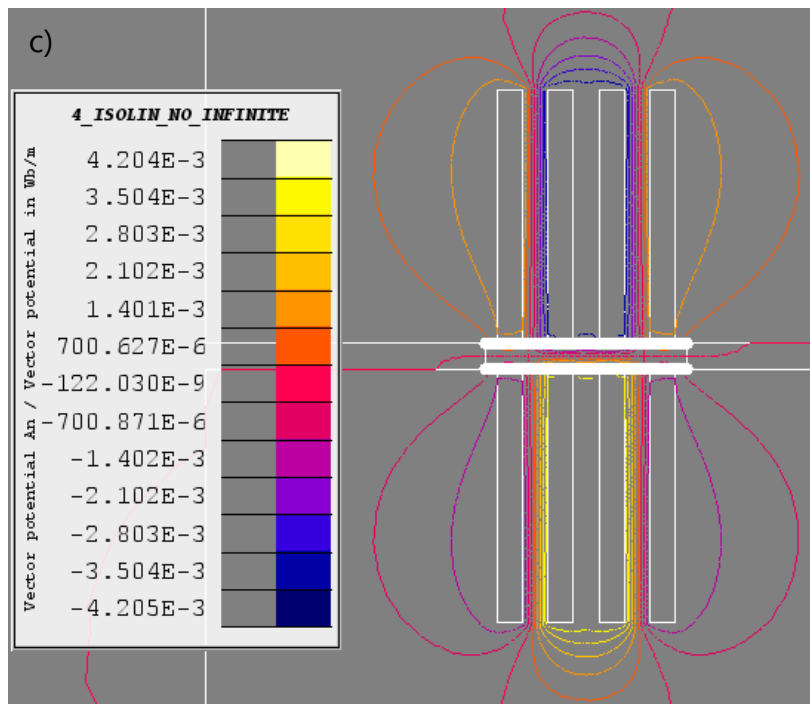


Figura 73: Andamento isolinee al variare della configurazione dei versi della corrente: a) Config. 1, b) Config 2, c) Config 3, d) Config 4.

Nella configurazione 1, usata finora, si vede che ciascuna sella genera il proprio campo magnetico solenoidale, pertanto si vanno a formare quattro diversi accoppiamenti che permettono una distribuzione più uniforme delle linee sulla lamiera.

Nella configurazione 2 e 4, simili perché la corrente che attraversa la cava situata nello stampo superiore ha stesso verso di quella relativa alla cava situata nello stampo inferiore, il campo magnetico non si richiude sulla lamiera, prosegue attraversando lo stampo inferiore e si richiude sull'estremità delle cave inferiori. Nella configurazione 2, l'alternanza nel verso della corrente rende il verso di rotazione del campo magnetico sempre in opposizione, pertanto le linee di campo, in misura minore, passano per la zona centrale dello stampo. Nella configurazione 4, al contrario, c'è la vicinanza di due cave con corrente dello stesso verso, pertanto il campo magnetico generato ha verso concorde e si concentra nella zona dove c'è un'opposizione del verso della corrente.

La configurazione 3, simile alla configurazione 1 poiché la corrente nella cava dello stampo superiore ha verso contrario a quello della corrente situata nella relativa cava inferiore, presenta una chiusura delle linee di campo nella zona centrale della lamiera.

Per quanto riguarda l'andamento delle pressioni, in figura viene riportato il grafico contenente i risultati ottenuti calcolando la pressione magnetica sul path filtrato da effetti di bordo PATH\_FILTRO\_TOTALE:

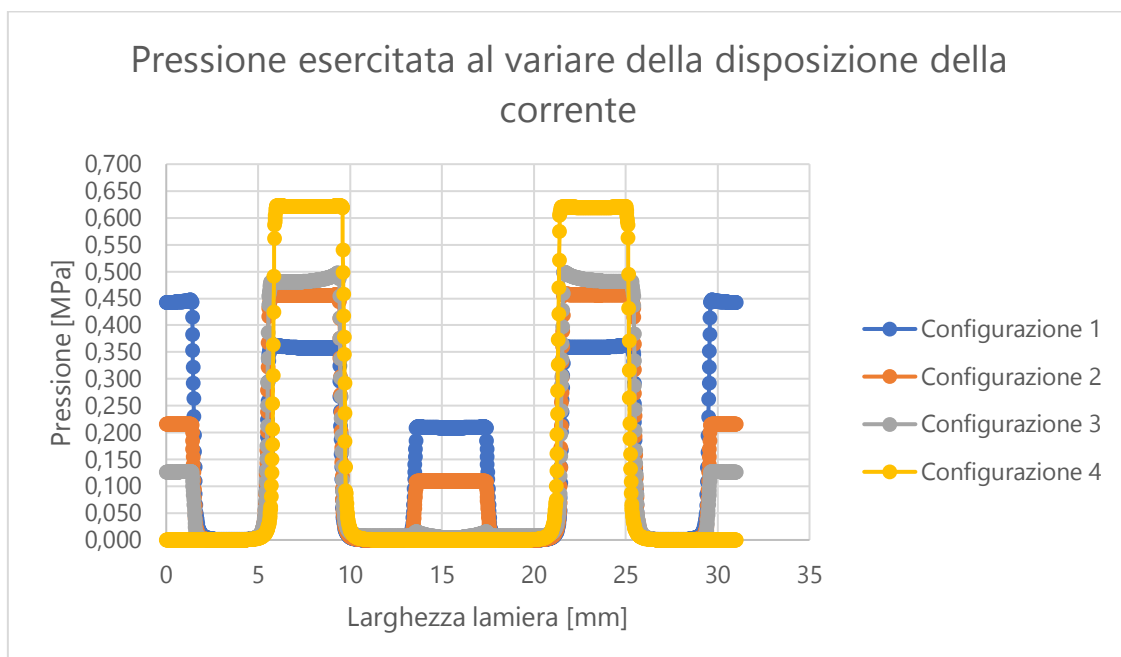
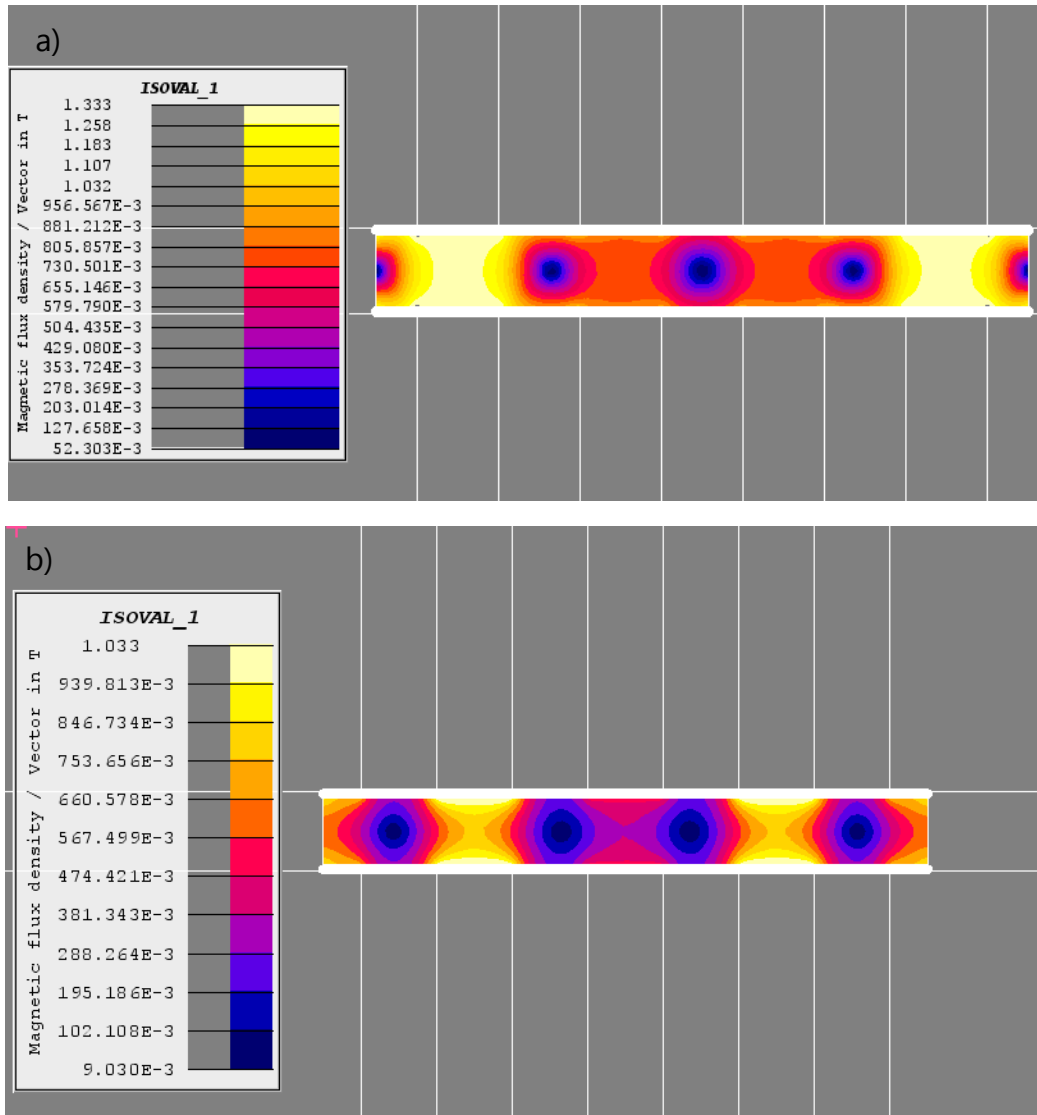


Figura 74: grafico andamento pressioni al variare della disposizione di corrente nelle cave.

Dal grafico è possibile visualizzare come nella configurazione 1 la pressione si distribuisce in maniera più omogenea rispetto alle altre configurazioni, per questo motivo risulta una pressione media esercitata maggiore. Il caso più estremo viene rappresentato dalla

configurazione 4, dove la pressione si concentra solamente nella zona compresa tra le cave più esterne, facendo registrare il picco di pressione ottenibile.

Per quanto riguarda il livello di saturazione magnetica raggiunto, vengono riportate in figura gli isovalori di induzione magnetica B che attraversano la lamiera:



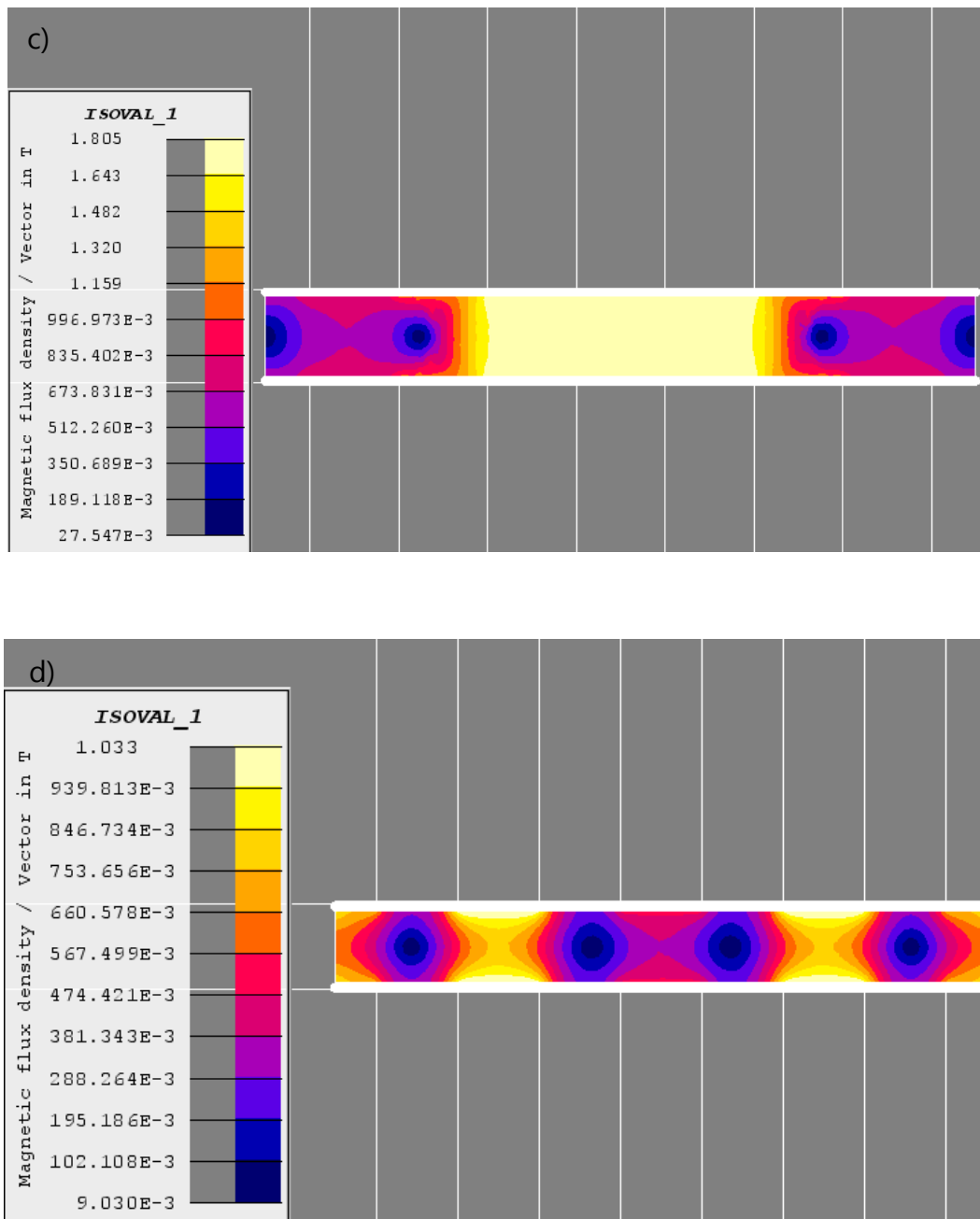


Figura 75: Distribuzione isovalori induzione magnetica B al variare della configurazione: a) Config. 1, b) Config 2, c) Config 3, d) Config 4.

Gli isovalori mostrano che la situazione più svantaggiosa si riscontra nella configurazione 3, dove si è molto vicini all'indice di saturazione del materiale, mentre nelle altre configurazioni i valori sono distanti dai valori limite, pertanto ci si aspetta che all'aumentare della corrente immessa nel circuito la pressione possa aumentare in modo significativo.

In conclusione, viene riportata una tabella riassuntiva dei valori di pressione massima, pressione media e livello di saturazione del materiale per ciascuna configurazione. Si è scelto

di proseguire con la configurazione 1 poiché in grado di garantire un livello di pressione media più elevato, una distribuzione più omogenea di pressione lungo la lamiera ed un livello di saturazione accettabile.

Configurazione	$P_{\max}$ [MPa]	$P_{\text{media}}$ [MPa]	Livello di saturazione massimo [T]
1	0.444	0.335	1.333
2	0.455	0.315	1.033
3	0.555	0.286	1.805
4	0.62	0.311	1.033

Tabella 5: Tabella riassuntiva dei parametri riguardanti la scelta della distribuzione dei versi della corrente.

### 2.3.6 Traferro

Il traferro è la zona d'aria presente tra gli avvolgimenti inseriti nelle cave e la lamiera. Nel software si è dovuto separare l'intera struttura degli stampi contenenti le cave per esigenze geometriche e di simulazione, nella realtà gli stampi sono in contatto con la lamiera per garantire il serraggio meccanico, mentre nella cava c'è un traferro che separa i primi fili di rame dell'avvolgimento dalla lamiera. Minore è il valore del traferro, e maggiore l'effetto di attrazione magnetica che risulta dal contributo delle selle. Si è creato uno scenario per il traferro T per valutare la sua influenza sull'andamento delle pressioni:

*Solving -> Scenario -> New -> T; Lower value: 0.02; Higher Value: 0.5; List of Steps: 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5*

Per la valutazione dei risultati si è seguito lo stesso procedimento del paragrafo 2.3.4, plottando una curva 3D in cui si è misurato l'andamento della pressione massima con il sensore di pressione `PRESSIONE_PATH` al variare del traferro T e della corrente I, scelta con 3 valori di riferimento:  $I_1 = 1000$  Amperespire,  $I_2 = 1500$  Amperespire,  $I_3 = 2000$  Amperespire.



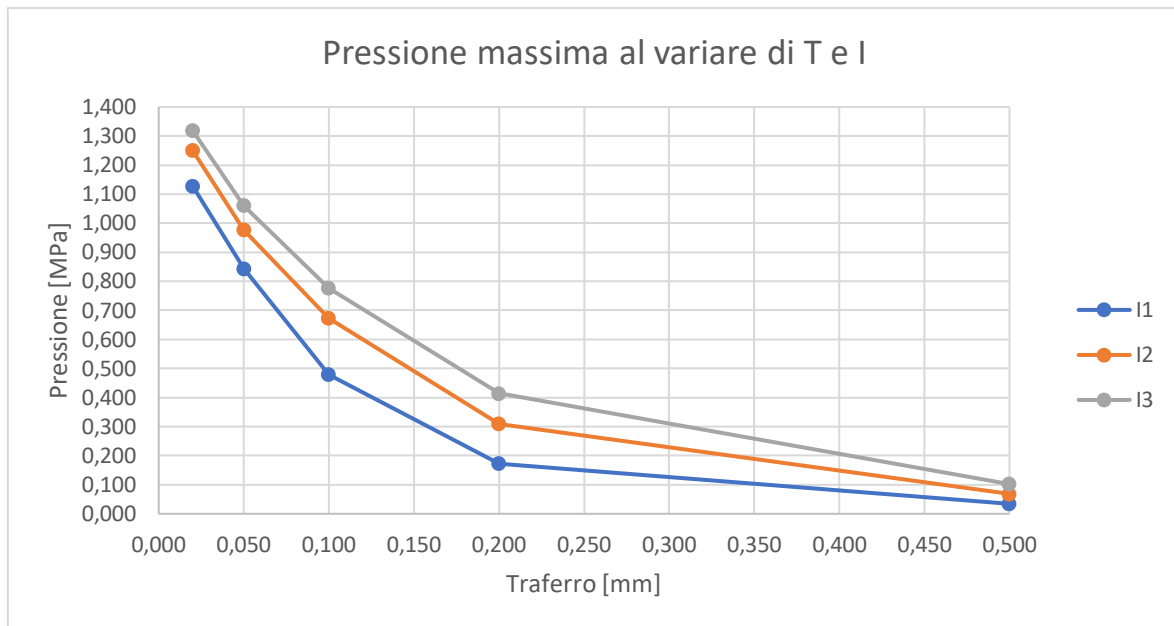


Figura 76: Andamento pressione massima al variare di T e I.

Dal grafico è visibile l'aumento di pressione massima al diminuire del traferro. Per un valore di T pari a 0.05 mm, ossia metà del valore impostato finora nelle simulazioni, si registra un aumento pari al 75% immettendo nel circuito la corrente  $I_1$ . Di contro, al diminuire del traferro aumenta la tendenza a saturare della lamiera, pertanto le differenze di pressione massima al variare della corrente e a parità di traferro si assottigliano, sintomo che la lamiera sta raggiungendo l'indice di saturazione. Allo stesso tempo, un valore eccessivamente elevato del traferro fa calare drasticamente la pressione massima esercitata, pertanto è necessario tenere gli avvolgimenti più vicini possibile alla superficie della lamiera, compatibilmente allo strato di isolante di cui vengono ricoperti i fili di rame. Si è ritenuto di proseguire con un valore del traferro T pari a 0.1 mm, poiché nella pratica si tratta di un valore di difficile controllo essendo distanze molto contenute. Per quanto riguarda l'andamento della pressione lungo la lamiera, viene mostrato in figura 75 per un valore di corrente  $I_1$  e per valori del traferro T pari rispettivamente a 0.05 mm e 0.1 mm. Si può notare come l'andamento sia lo stesso, quello che cambia sono i livelli di pressione raggiunti, e di conseguenza la pressione media esercitata sulla lamiera.

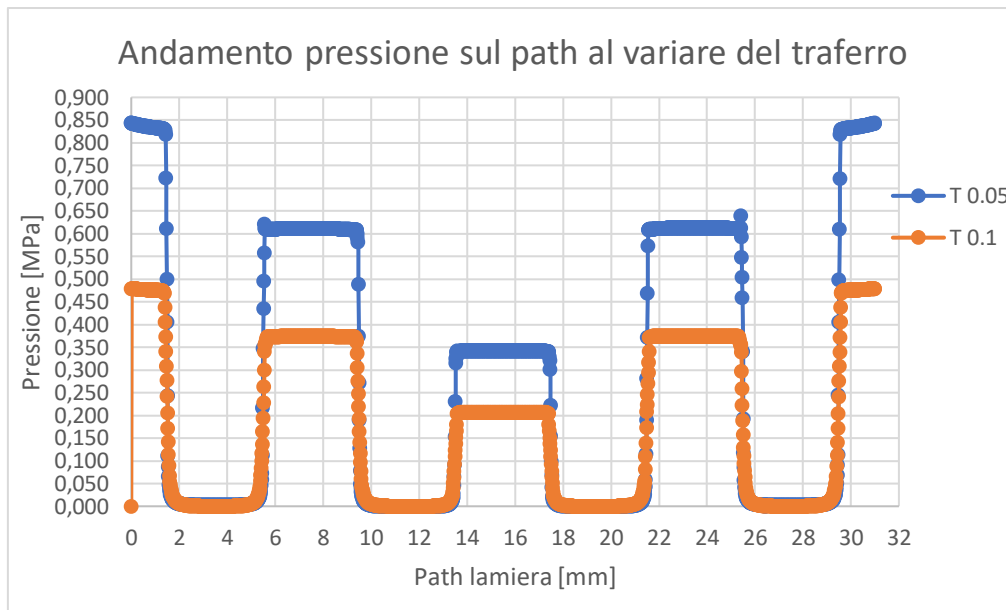


Figura 77: Andamento pressione lungo la lamiera al variare del traferro.

### 2.3.7 Numero delle selle

La scelta del numero delle selle è stata vincolata dalle dimensioni della macchina di prova e dal numero di moduli in parallelo presenti nel generatore di corrente, poiché ciascuna sella richiede un modulo differente per essere alimentata. Essendo disponibili 6 moduli, si è fatto un confronto per un numero di selle pari a 4 ed un numero di selle pari a 6.

In figura vengono mostrati gli andamenti delle pressioni lungo il path PATH\_FILTRO per valori di corrente pari a  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  già visti nel paragrafo 2.3.6.

In termini di pressione media e massima, la soluzione con  $N = 4$  risulta migliore, ma se si vanno a confrontare i valori di forza magnetica risultante sulla superficie della lamiera, all'aumentare della corrente la soluzione con  $N = 6$  diventa leggermente più vantaggiosa. Ciò avviene perché una disposizione a 6 cave permette di avere più materiale su cui agire, pertanto la perdita di pressione viene compensata dall'aumento dell'area disponibile. In figura viene mostrato lo schema di rappresentazione usato nel software:

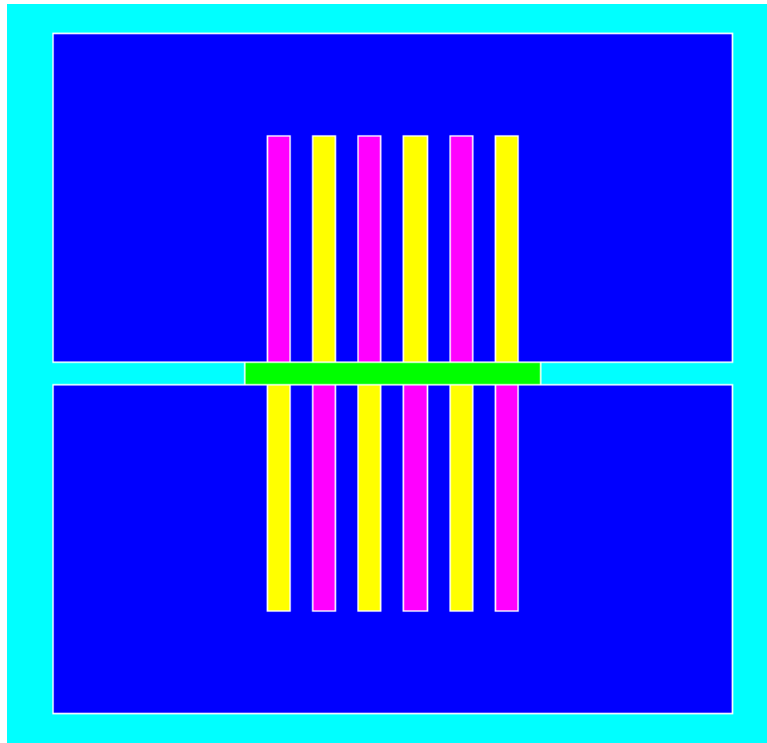


Figura 78: Schema per  $N = 6$ .

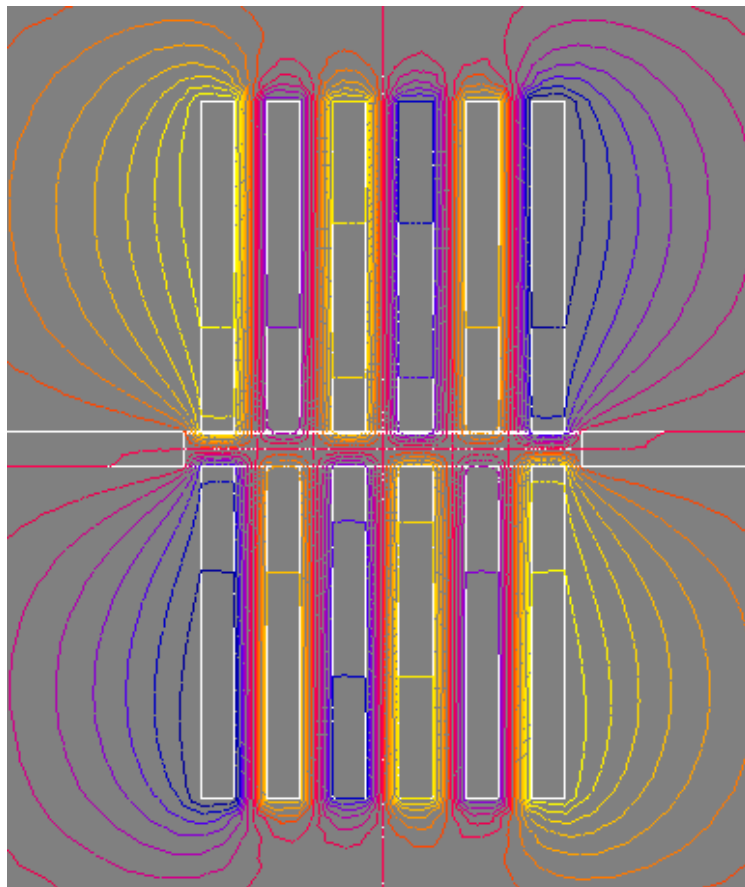
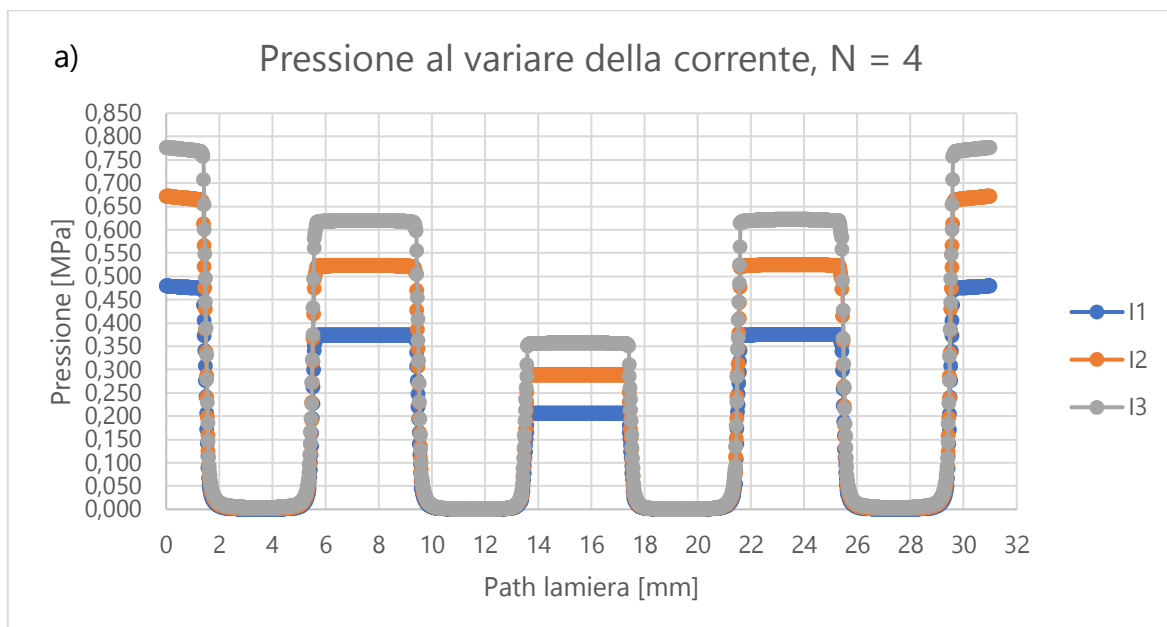


Figura 79: Andamento isolinee per  $N = 6$

Per il calcolo della forza agente, il software non ho fornito indicazioni in quanto se si vanno ad analizzare le direzioni delle forze, risulta che sulla lamiera agiscono due forze di verso opposto. Quello che agisce sulla lamiera sono le forze di reazione degli stampi, che tendono a chiudersi su di essa. Pertanto, per avere un'idea delle forze in gioco, si è moltiplicato il valore della pressione agente sulle zone della lamiera per l'area utile su cui agiscono. L'area utile è pari a metà della superficie della lamiera, poiché nella zona sotto la singola cava non agisce pressione e la disposizione è a cave equidistanti. La forza esercitata risulta:

$$F = 2 \cdot l_{lamiera} \sum_{i=1}^n p_i \cdot a_i$$

Dove  $p_i$  rappresenta la pressione esercitata e  $a_i$  la dimensione della zona  $i$ -esima. Poiché l'andamento delle pressioni è simmetrico, si moltiplica per 2 e successivamente per la lunghezza della lamiera impostata su 100 mm.



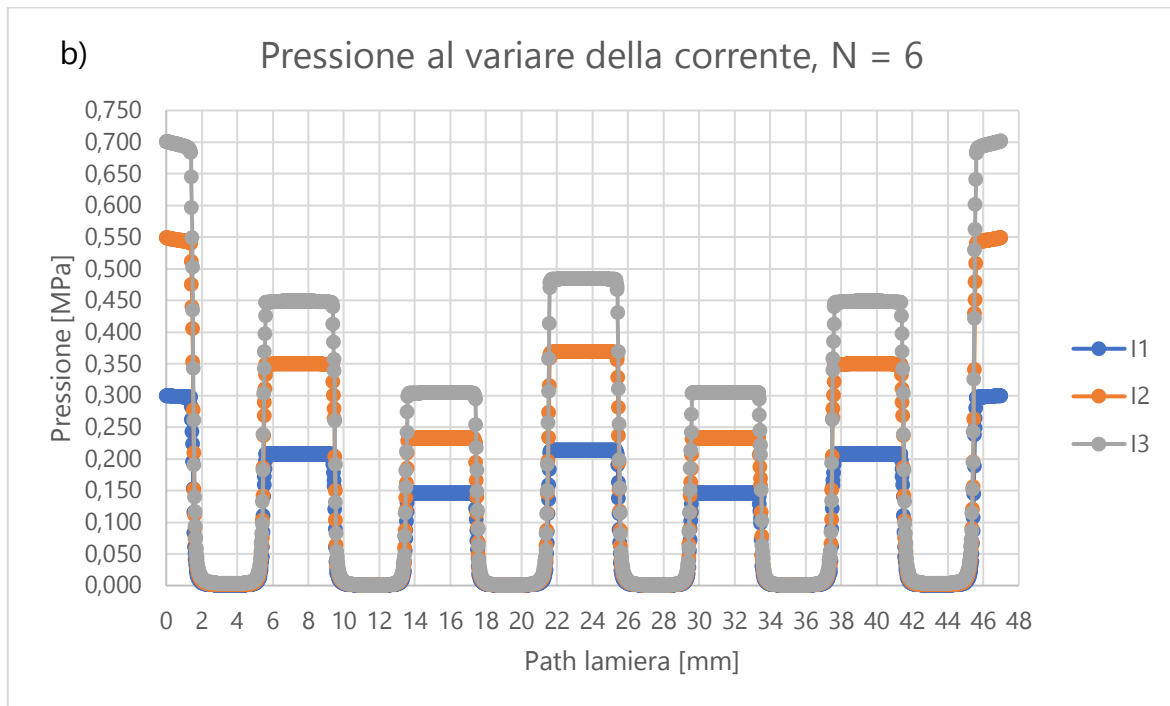


Figura 80: Confronto path lamiera al variare della corrente: a) N = 4, b) eN = 6

In tabella è possibile vedere il confronto tra le due configurazioni in termini di pressione massima, media e forza esercitata.

I [Amperes pire]	$P_{media}$ [MPa] N = 4	$P_{media}$ [MPa] N = 6	$P_{max}$ [MPa] N = 4	$P_{max}$ [MPa] N = 6	Forza [N] N = 4	Forza [N] N = 6
1000	0.348	0.195	0.480	0.299	568	492
1500	0.486	0.332	0.673	0.549	804	828
2000	0.576	0.431	0.776	0.701	948	1072

Tabella 6: Confronto N = 4 e N = 6.

Essendo i risultati confrontabili in termini di forze, è stata fatta una considerazione pratica: la configurazione a 6 selle non preclude il fatto di poterne utilizzare solamente 4, poiché per attivare il funzionamento della sella è necessario farvi passare corrente. Se si desidera utilizzare un numero di selle N pari a 4, è sufficiente scollegare due selle dal generatore e posizionare la lamiera di modo che sulla superficie agiscano delle selle "attive", ossia delle selle in cui passa della corrente, mentre se si fosse scelto di eseguire un numero di cave tale

da ospitare solamente 4 selle, ciò avrebbe precluso la possibilità di eseguire delle prove con un numero di selle maggiore. In figura viene riportato ciò che si è svolto sul software. Si è creata una regione definita "SELLA INATTIVA":

*Physics -> Region -> Face region -> New -> SELLA\_INATTIVA; Type of region: Magnetic non conducting region; Material of the region: FLU\_COPPER*

In questo modo, nelle cave selezionate (di colore nero in figura) non vi è più passaggio di corrente, è un materiale trattato al pari di stampi e lamiera, ed essendo il rame un materiale diamagnetico non interagisce con il campo magnetico generato dal passaggio di corrente nelle selle attive.

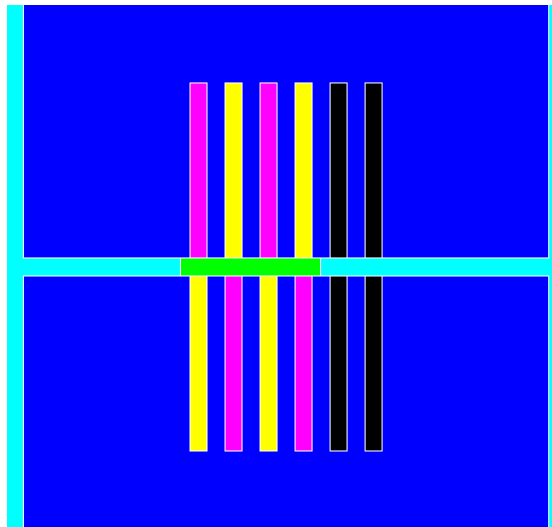


Figura 81: Simulazione selle inattive.

# Capitolo 3

## Risultati





In questo capitolo vengono riassunti e illustrati i principali risultati ottenuti nella simulazione, descritti in dettaglio nel capitolo 2, riguardanti:

- Materiale
- Geometria
- Avvolgimenti

### 3.1 Materiale

Il materiale scelto per gli stampi e per la lamiera è l'acciaio C10, un acciaio non legato per impieghi generali disponibile nel software come FLU\_STEEL\_1010\_XC10. La scelta è stata dettata dal fatto che rispetto ad un materiale magnetico (ARMCO\_M22\_DC) l'andamento della pressione presenta variazioni trascurabili, così come il livello di saturazione raggiunto, ed in campo industriale l'acciaio risulta molto più diffuso. Per quanto riguarda i conduttori, il materiale scelto è il rame, disponibile nel software come FLU\_COPPER, per le sue proprietà di conduttore elettrico e per la sua bassa permeabilità magnetica, paragonabile a quella dell'aria, che lo rende un materiale diamagnetico. In tabella 7 vengono descritte le proprietà magnetiche dell'acciaio C10. In tabella 8 viene riportata la composizione chimica.

Materiale	Permeabilità magnetica relativa iniziale $\mu_r$	Magnetizzazione di saturazione [T]	GINOCCHIO della curva
FLU_STEEL_1010_XC10	2022.68	1.90	0.9336

Tabella 7: Caratteristiche magnetiche dei materiali utilizzati.

	C %	Si %	Mn %	P %	S %
DA	0,07	-	0,30	-	-
A	0,13	0,40	0,60	0,045	0,045

Tabella 8: composizione chimica acciaio C10.

Di seguito viene riportata la curva di prima magnetizzazione dell'acciaio C10, utile per capire il livello di saturazione raggiunto al variare delle caratteristiche geometriche e fisiche.

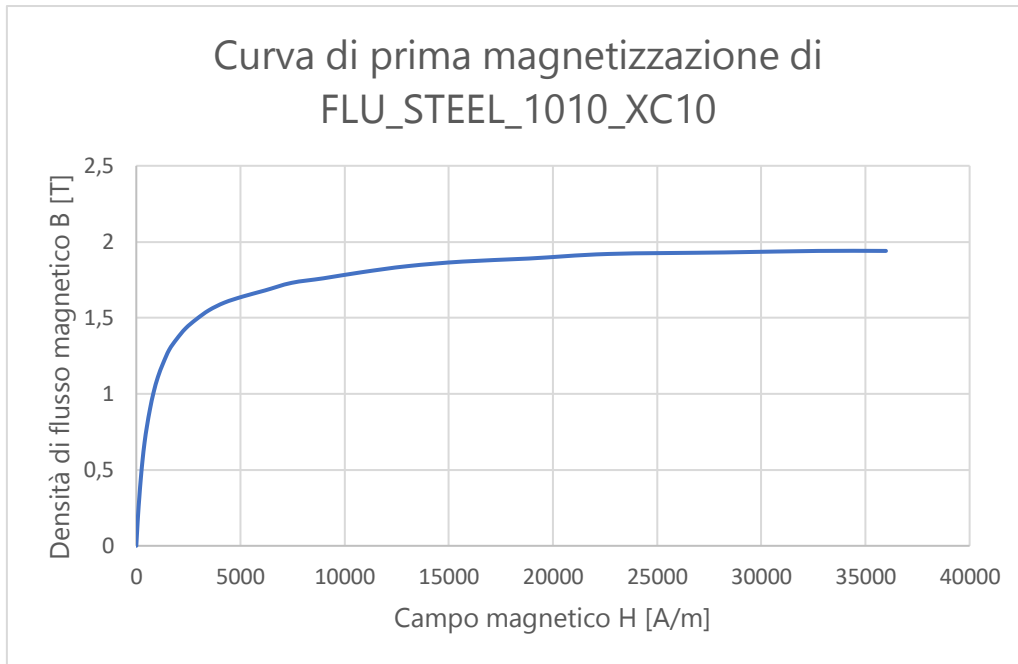


Figura 82: Curva di prima magnetizzazione di FLU\_STEEL\_1010\_XC10.

### 3.2 Geometrie

In figura vengono mostrati i parametri geometrici utilizzati nel modello:

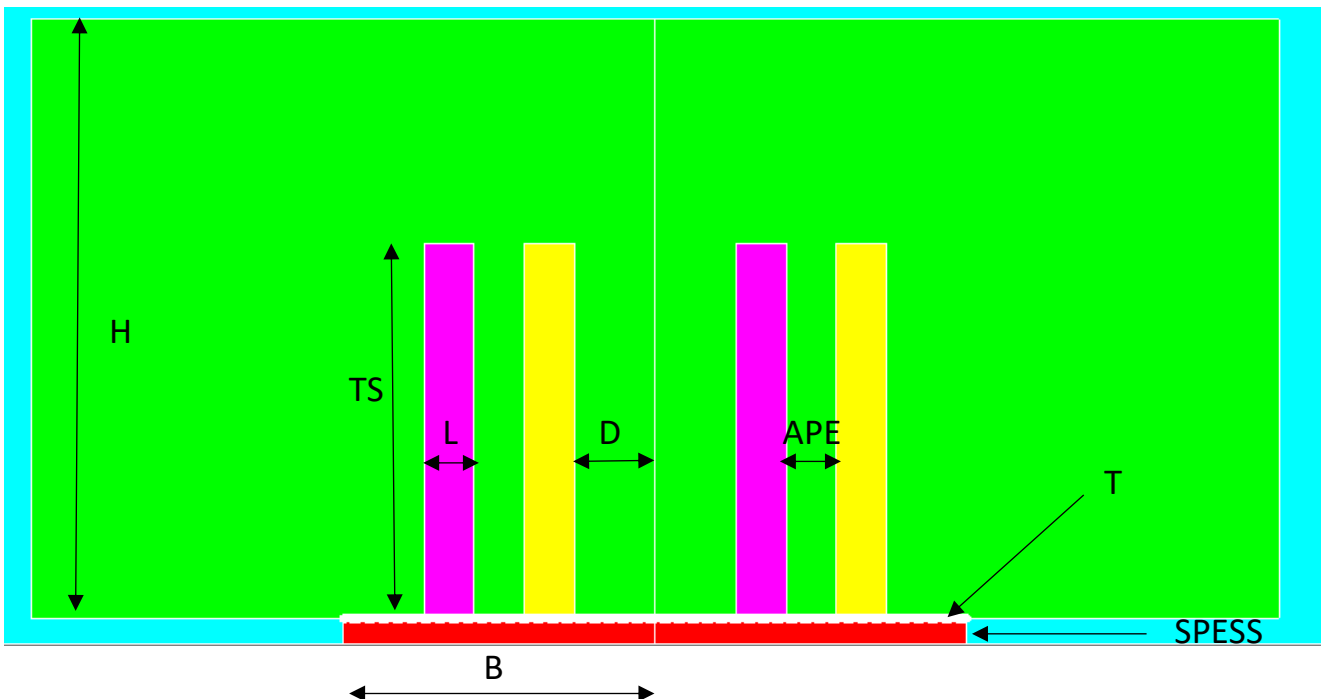


Figura 83: parametri geometrici.

Dal lavoro di simulazione svolto è emerso che la configurazione più efficace si ottiene quando le cave sono equidistanti tra loro, pertanto è stato possibile impostare la geometria sul singolo parametro L, che indica la larghezza della cava, con le seguenti relazioni:

$$APE = L$$

$$D = L/2$$

$$TS = 10 \cdot L$$

$$B = D + L + APE + L + D = 4 \cdot L$$

Inoltre, per questa configurazione, è stata individuata una correlazione tra la larghezza di cava L e lo spessore della lamiera SPESS: la pressione esercitata dalle selle elettromagnetiche risulta massima quando  $L = \text{SPESS}$ ; si riporta il grafico dell'andamento della pressione massima calcolata con il sensore PRESSIONE\_PATH al variare di spessore SPESS e larghezza di cava L): ogni linea rappresenta l'andamento della pressione massima al variare dello spessore SPESS per una larghezza di cava L costante. I punti che stanno sulla stessa verticale hanno spessore costante e indicano l'andamento della pressione massima al variare della larghezza delle cave L. Se si fa riferimento alla verticale riguardante lo spessore SPESS = 2 mm, si nota che il valore massimo di pressione appartiene alla curva L2, quindi per  $L/\text{SPESS} = 1$ . Lo stesso ragionamento si applica agli altri valori dello spessore con i medesimi risultati.

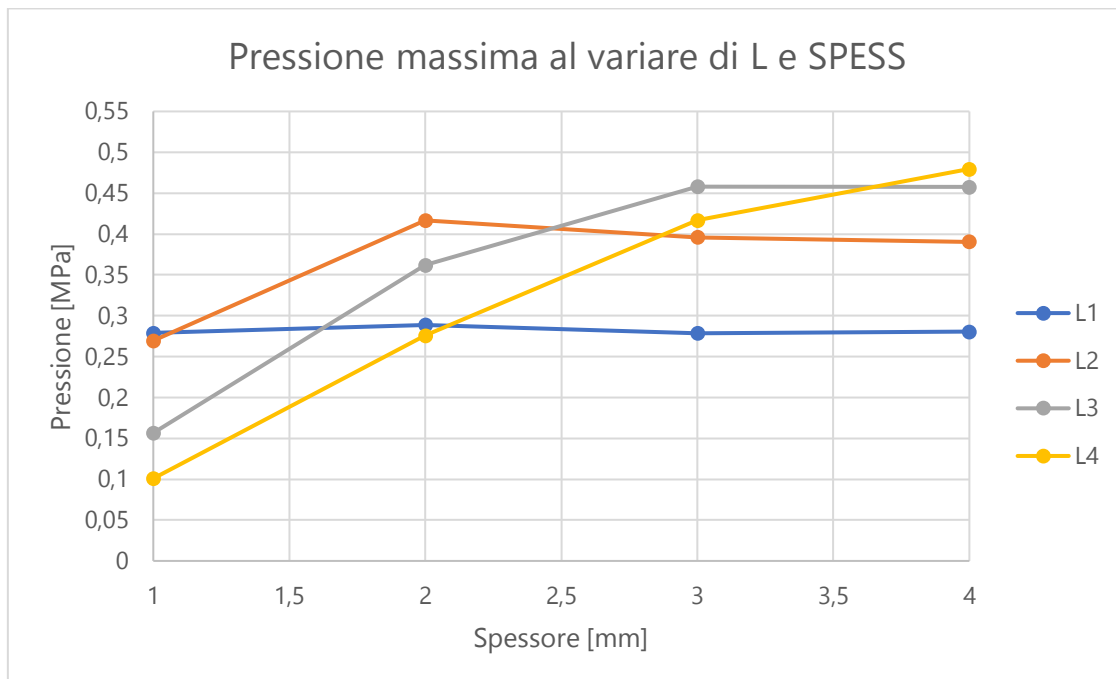


Figura 84: Grafico andamento pressione massima al variare dei parametri L e SPESS.

Di seguito viene mostrata la geometria generata nel software e l'andamento delle pressioni sul path lineare costruito sul bordo superiore della lamiera (lo stesso andamento è

simmetrico sul bordo inferiore) per una corrente pari a 1000 Amperespire, una profondità del dominio (lunghezza della lamiera) pari a 100 mm e con i seguenti parametri geometrici:

Parametro	Dimensione [mm]
L	4
APE	4
D	4
B	16
TS	40
SPESS	4
T	0.1
H	60

Tabella 9: Elenco parametri geometrici simulazione.

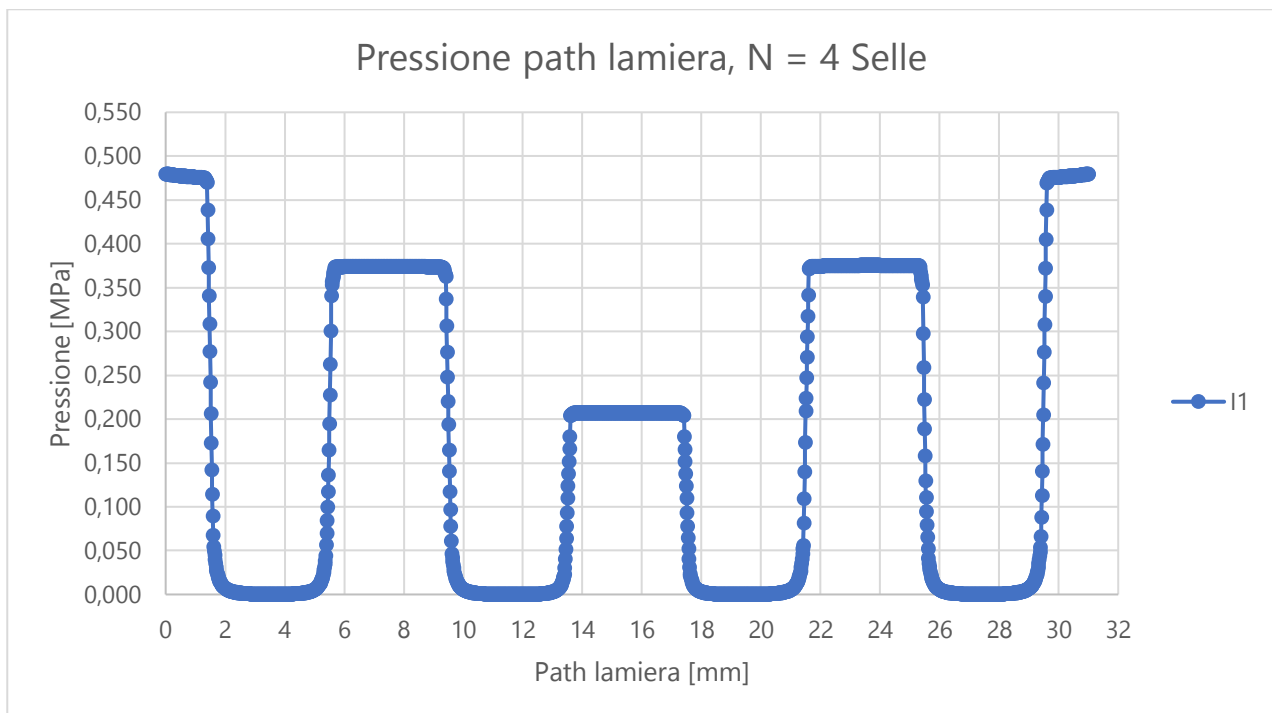


Figura 85: Andamento pressioni path lamiera per una corrente  $I_1 = 1000$  Amperespire.

Al diminuire del traferro T presente tra avvolgimenti e lamiera consegue un aumento della pressione esercitata dal sistema elettromagnetico, compatibilmente con lo strato di isolante da applicare ai fili di rame. Nel modello viene mantenuto un valore del traferro pari a 0.1 mm. In figura viene riportato il grafico riguardante l'andamento dei massimi di pressione rivelati dal sensore PRESSIONE\_PATH al variare del traferro T e della corrente I. Si noti che se si riuscisse ad ottenere un traferro pari alla metà del traferro impostato nel software, si assisterebbe ad un aumento di pressione pari a circa il 75% con un corrente immessa  $I_1 =$

1000 Amperespire. Questa amplificazione viene ridotta all'aumentare della corrente poiché al diminuire del traferro aumenta anche il livello di saturazione nella lamiera.

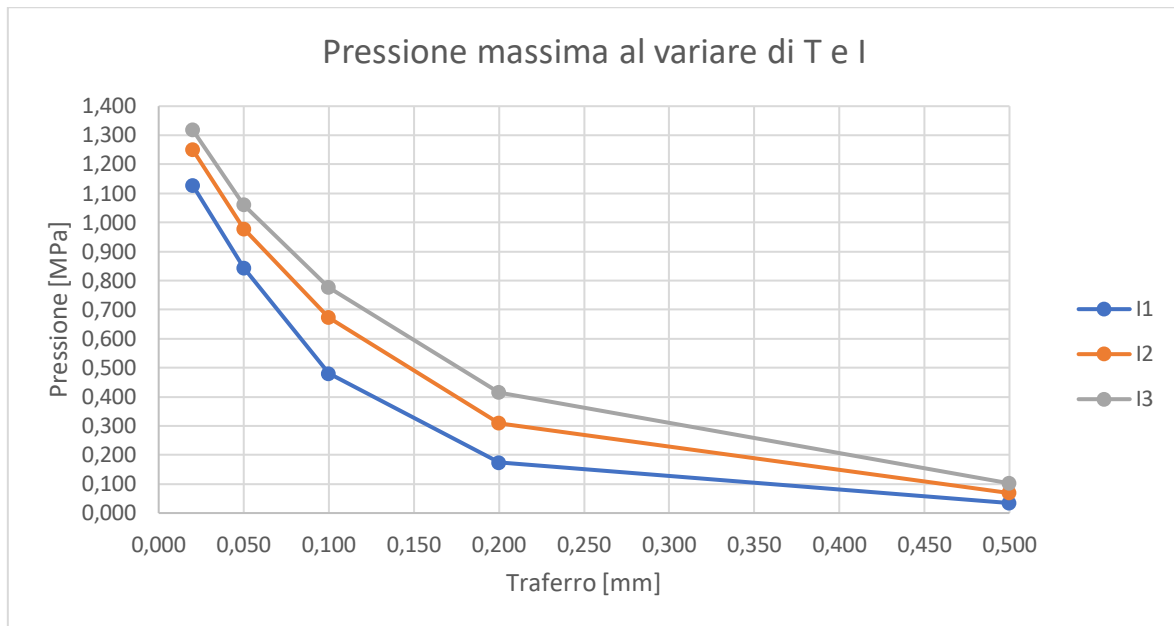


Figura 86: Andamento pressione massima al variare di T e I.

Per quanto riguarda il numero delle selle da immettere nel circuito, avendo a disposizione 6 moduli nel generatore di corrente presente in laboratorio, si è scelto di eseguire sul singolo stampo 6 cave, che corrispondono a 3 selle elettromagnetiche per stampo, mantenendo le relazioni geometriche ricavate precedentemente. Questo permette di essere più flessibili in fase sperimentale, in quanto si può approssimare il comportamento della lamiera con un numero N di selle pari a 4 facendo passare corrente solo negli avvolgimenti desiderati, lasciando gli altri inattivi. In figura viene mostrato lo schema a 6 selle e l'andamento delle pressioni per una corrente pari a 1000 Amperespire con i seguenti parametri geometrici:

Parametro	Dimensione [mm]
L	4
APE	4
D	4
B	24
TS	40
SPESS	4
T	0.1
H	60

Tabella 10: Parametri geometrici per N = 6.

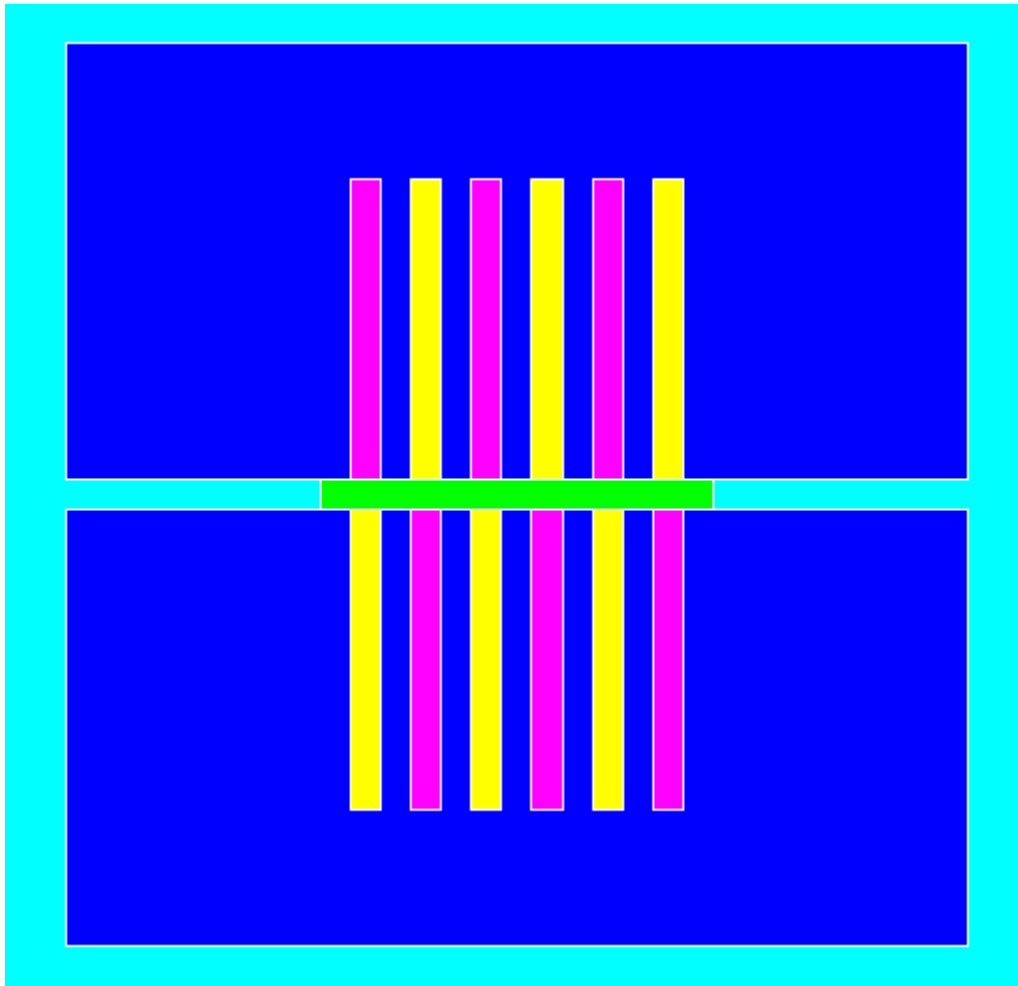


Figura 87: Schema per  $N = 6$ .

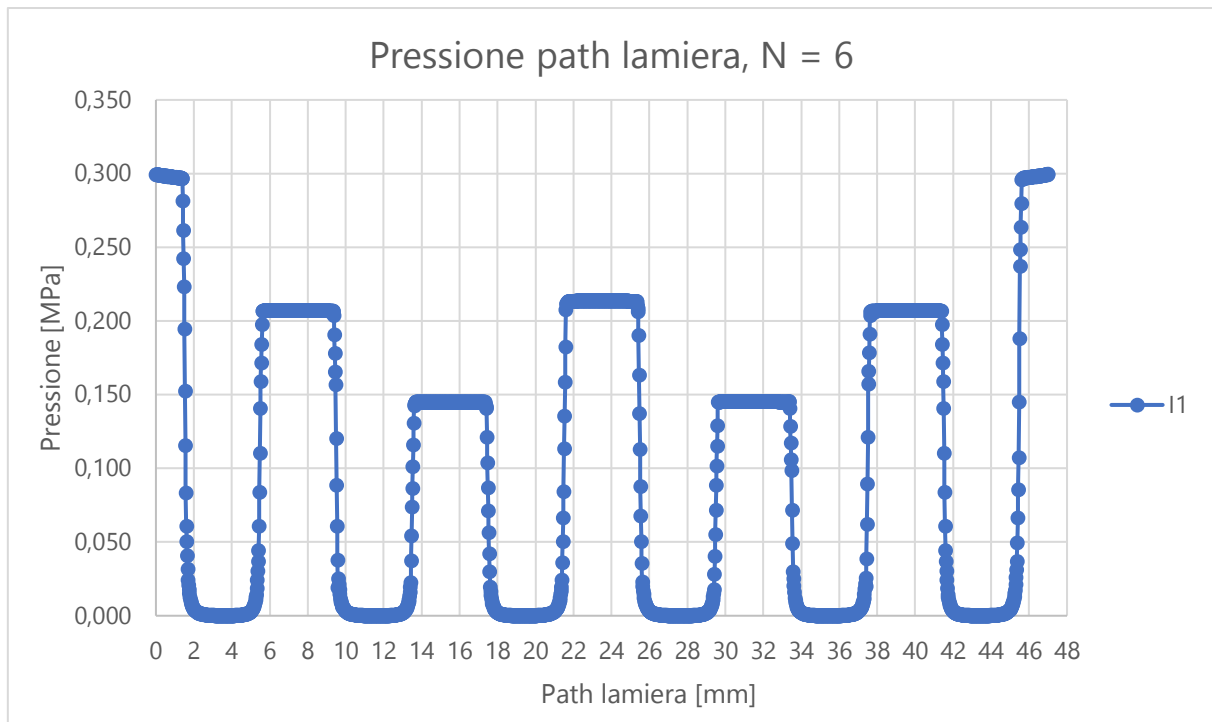


Figura 88: Andamento path pressioni lamiera per una corrente  $I_1 = 1000$  Amperespire.

La diminuzione dei valori di pressione media e massima viene compensata in termini di forza, in particolare per intensità di corrente elevata, a causa dell'aumento di superficie disponibile della lamiera. I valori di forza sono riferiti al singolo stampo, poiché le selle sono presenti in entrambi gli stampi, la forza totale agente viene raddoppiata. Viene ripresa la tabella 6 per evidenziare il confronto in termini di forze e pressioni al variare del numero delle selle attive.

$I$ [Amperes pire]	$P_{media}$ [MPa] N = 4	$P_{media}$ [MPa] N = 6	$P_{max}$ [MPa] N = 4	$P_{max}$ [MPa] N = 6	Forza [N] N = 4	Forza [N] N = 6
1000	0.348	0.195	0.480	0.299	568	492
1500	0.486	0.332	0.673	0.549	804	828
2000	0.576	0.431	0.776	0.701	948	1072

Tabella 11: Confronto N = 4 e N = 6.

### 3.2.1 Allargamento lamiera

Definita la soluzione ritenuta migliore in termini di forze e pressioni esercitate, livello di saturazione raggiunta e flessibilità in fase sperimentale, si sono fatte delle considerazioni di carattere pratico: l'attuale disposizione delle cave lungo la lamiera prevede che la distanza tra la cava più esterna e l'estremità laterale della laterale della lamiera sia pari a  $D$ , che a sua

volta è un parametro dipendente dalla larghezza della cava L. Con l'attuale configurazione,  $D = L/2 = 2 \text{ mm}$ ; si è ritenuto che in fase sperimentale questa distanza sia troppo piccola, con il rischio che la lamiera, trascinata dal motore elettrico presente nell'apparato sperimentale, esca dalla zona di influenza delle selle perdendo così parte del contributo elettromagnetico fornito. È stato verificato al software che, nel caso in cui una cava si trova fuori dai bordi della lamiera, l'andamento della pressione viene penalizzato fortemente (figura 78):

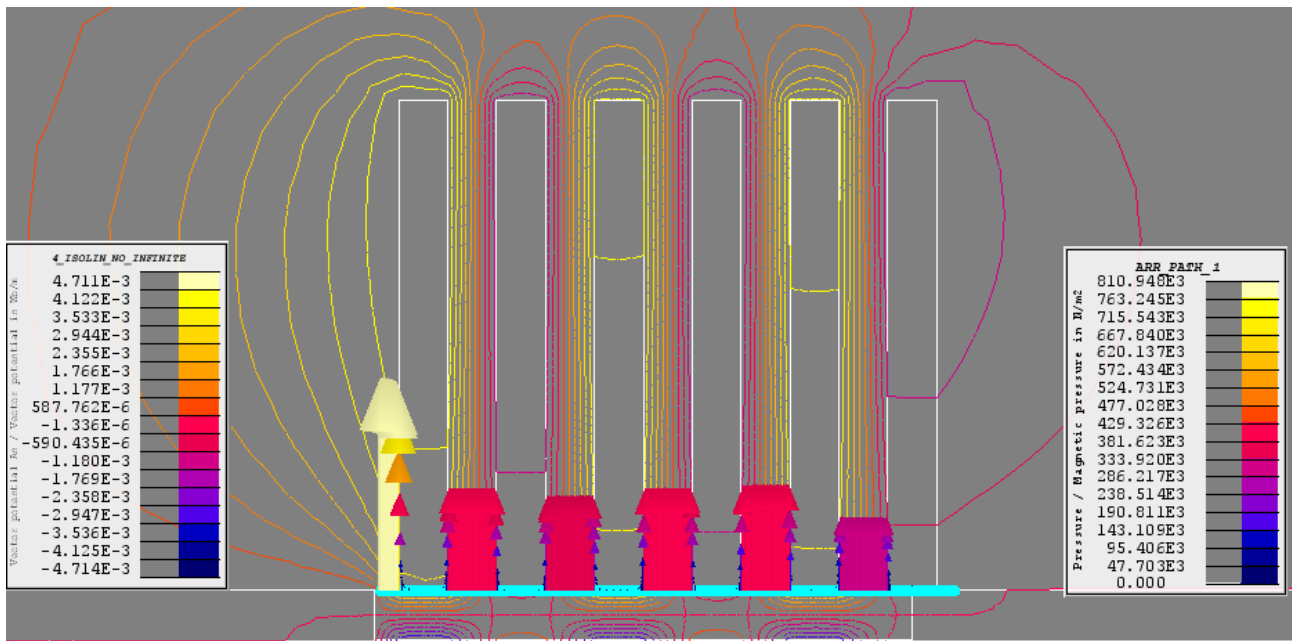


Figura 89: Andamento isolinee e path di pressione in caso di lamiera sbilanciata.

Per scongiurare questa eventualità, che non è possibile prevedere al software ma è frutto dell'esperienza, si è scelto di allargare la zona più esterna della lamiera, di modo che se si dovesse presentare un disallineamento durante la prova, si garantirebbe che le cave siano sempre comprese all'interno della larghezza della lamiera.

Per mantenere una distribuzione uniforme delle cave lungo la lamiera, si è scelto di allargare la lamiera di altri 2 mm, di modo da avere una distanza totale tra l'estremità della cava esterna ed il bordo della lamiera pari a 4 mm, lo stesso valore del parametro larghezza della cava L che ha guidato tutta la progettazione.

I risultati in termini di andamento di pressione vengono riportati in figura:



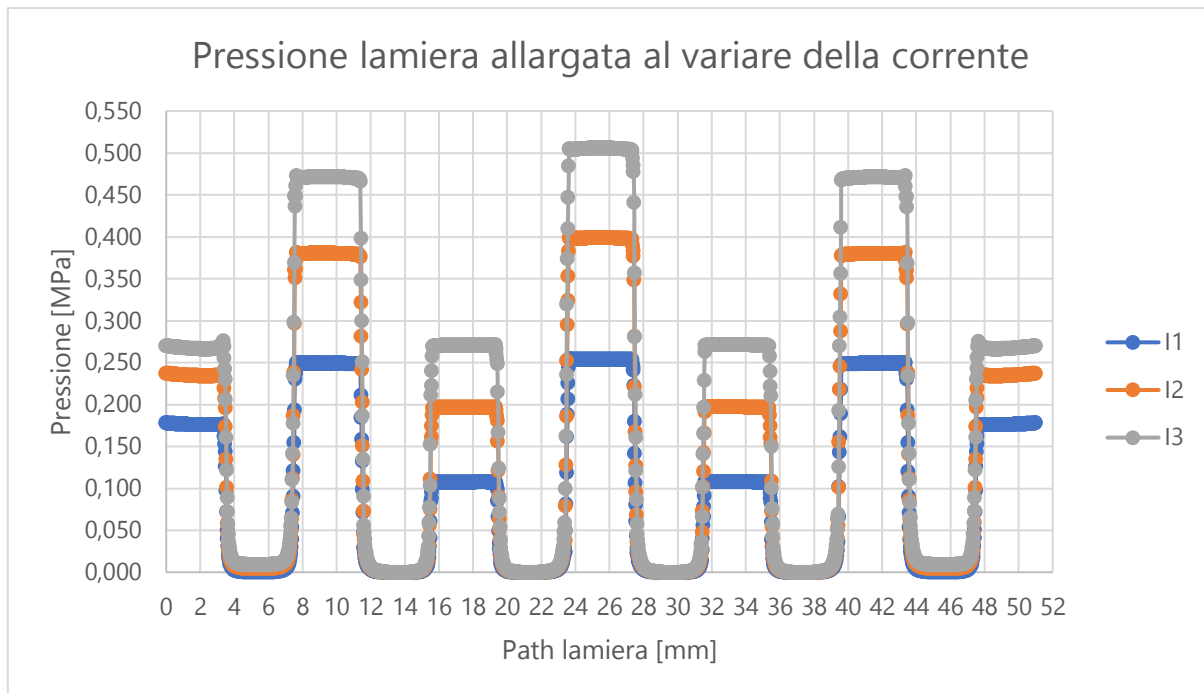


Figura 90: Andamento pressione path lamiera allargata al variare della corrente I.

In figura 80 viene mostrato il confronto tra la soluzione ottimizzata e la soluzione adottata con l'allargamento della zona esterna della lamiera per una corrente pari a 1000 Amperespire: il picco si sposta nuovamente nella zona compresa tra due cave accoppiate (la zona centrale della sella), nelle restanti aree c'è una generale diminuzione della pressione. Se si vanno a confrontare le forze in gioco, l'aumento dell'area disponibile della lamiera allargata compensa la perdita di pressione e fa sì che le soluzioni siano equiparabili.

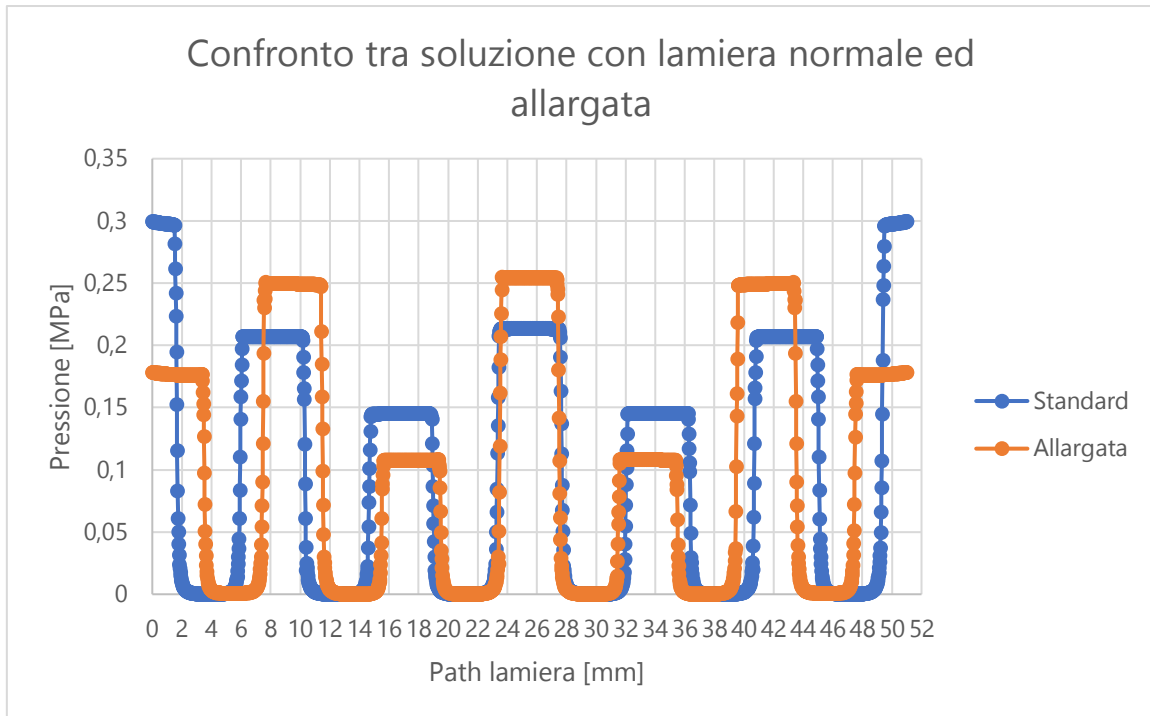


Figura 91: Confronto andamento path pressioni.

In tabella viene mostrato il confronto tra le due configurazioni: in termini di pressioni massime la lamiera standard presenta un vantaggio dovuto al fatto che l'area su cui agisce è più piccola, in termini di forza e pressioni medie i valori sono molto vicini.

Corrente I [Amperespire]	Lamiera standard			Lamiera Allargata		
	$P_{media}$ [MPa]	$P_{max}$ [MPa]	Forza [N]	$P_{media}$ [MPa]	$P_{max}$ [MPa]	Forza [N]
1000	0.196	0.299	492	0.230	0.250	524
1500	0.332	0.549	828	0.330	0.390	816
2000	0.431	0.701	1072	0.402	0.510	1012

Tabella 12: Confronto forze e pressioni tra lamiera standard e lamiera allargata.

In conclusione, i parametri geometrici finali sono elencati in tabella:

Parametro	Dimensione
N	6
L	4 mm
APE	4 mm
D	4 mm
B	26 mm
TS	40 mm
SPESS	4 mm
T	0.1 mm
H	60 mm

Tabella 13: Parametri geometrici finali.

### 3.3 Avvolgimenti

In figura viene mostrata la disposizione dei versi della corrente scelta, sulla base delle considerazioni fatte nel paragrafo 2.3.5 in merito all'andamento della pressione, le isolinee del potenziale magnetico A ed il livello di saturazione raggiunto dalla lamiera:

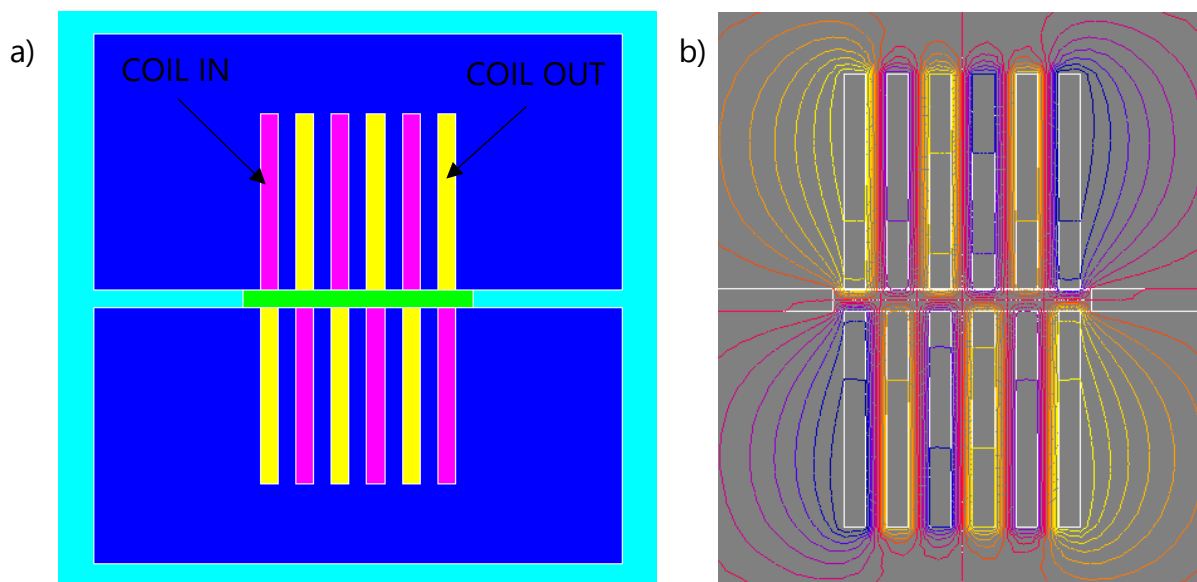


Figura 92: a) Configurazione versi corrente scelta, b) Andamento isolinee configurazione scelta.

Nella scelta della configurazione dei fili che compongono gli avvolgimenti l'obiettivo è stato quello di garantire un elevato valore di corrente senza provocare un eccessivo surriscaldamento dei fili, mantenendo un livello di tensione che rispetti i limiti imposti dal generatore, ossia 10 V in corrente continua, con una tensione minima consigliata dall'esperienza di circa 2-3 V.

La tensione  $V$  dipende dalla corrente  $I$  e dalla resistenza  $R$  del filo, secondo la legge di Ohm:

$$V = R \cdot I$$

La resistenza  $R$  si calcola come:

$$R = \rho \cdot \frac{N \cdot l}{A}$$

Dove  $\rho$  è la resistività del materiale,  $l$  la lunghezza del filo,  $N$  il numero degli avvolgimenti e  $A$  l'area della sezione del filo.

Avendo scelto il rame come materiale per gli avvolgimenti, la sua resistività elettrica a temperatura ambiente è pari a  $\rho = 1.68 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

La lunghezza del singolo avvolgimento, considerando che deve percorrere due volte la lunghezza dello stampo e la presenza delle testate, è tra i 215 e i 225 mm in base al diametro del filo considerato.

L'area dipende dal diametro del filo selezionato, più è elevata minore è la resistenza offerta dall'avvolgimento al passaggio di corrente, e minore è di conseguenza la tensione necessaria a garantire il passaggio di corrente desiderato.

Per avere un'idea del valore limite di corrente da imporre a seconda del diametro del filo, si è fatto uso di un tool presente in rete, AWG Wire Current Ratings, che sulla base del diametro del singolo filo ha fornito i tipici valori di corrente massima sostenuta con un delta di temperatura inferiore a 30°C.

Successivamente, avendo a disposizione la geometria della singola cava ricavata nei paragrafi precedenti, si è stimato il numero di spire  $N$  dell'avvolgimento, e di conseguenza la resistenza  $R$  dell'intero avvolgimento. Ottenuta la resistenza  $R$  e imponendo il valore di corrente limite suggerito dal tool, si è ricavata la tensione  $V$  richiesta.

Per avere una stima del riscaldamento atteso del filo per effetto Joule, si è calcolata la potenza  $P$  secondo la formula:

$$P = R \cdot I^2$$

Si è stimato un intervallo di tempo  $\Delta t$  pari a 10 secondi, considerando il tempo della prova ed il tempo necessario al generatore per arrivare a regime, che aumenta all'aumentare del numero di spire. Si è calcolato il calore  $Q$  con la formula:

$$Q = P \cdot \Delta t$$

Ed infine si è stimato il delta di temperatura  $\Delta T$  dalla legge fondamentale di calorimetria:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c}$$

Dove  $m$  è la massa totale dell'avvolgimento e  $c$  il calore specifico del rame, pari a 385 J/(kg°C).

In tabella vengono mostrate varie configurazioni possibili degli avvolgimenti:

<b>Proposta 1</b>		
$L_{\text{filo}}$	216	<i>mm</i>
$D_{\text{int}}$	1	<i>mm</i>
$N_{\text{spire}}$	160	-
$i_{\text{singola}}$ AWG limite	10	<i>Amperespire</i>
$i/A$	12.73	<i>A/mm<sup>2</sup></i>
$i_{\text{tot}}$	1600	<i>A</i>
$R$	0.747	$\Omega$
$V$	7.5	<i>V</i>
$\Delta t$	10	<i>s</i>
$P$	74.70	<i>W</i>
$Q$	747.04	<i>J</i>
$\Delta T$	7.99	$^{\circ}\text{C}$

<b>Soluzione migliore</b>		
$L_{\text{filo}}$	217	<i>Mm</i>
$D_{\text{int}}$	1.3	<i>Mm</i>
$N_{\text{spire}}$	90	-
$i_{\text{singola}}$ AWG limite	15	<i>Amperespire</i>
$i/A$	11.30	<i>A/mm<sup>2</sup></i>
$i_{\text{tot}}$	1350	<i>A</i>
$R$	0.250	$\Omega$
$V$	3.7	<i>V</i>
$\Delta t$	10	<i>S</i>
$P$	56.19	<i>W</i>
$Q$	561.90	<i>J</i>
$\Delta T$	6.29	$^{\circ}\text{C}$

<b>Proposta 3</b>		
$L_{\text{filo}}$	218	<i>mm</i>
$D_{\text{int}}$	1.6	<i>mm</i>
$N_{\text{spire}}$	50	-
$i_{\text{singola}}$ AWG limite	25	<i>Amperespire</i>
$i/A$	12.43	<i>A/mm<sup>2</sup></i>
$i_{\text{tot}}$	1250	<i>A</i>
$R$	0.092	$\Omega$
$V$	2.3	<i>V</i>
$\Delta t$	10	<i>s</i>
$P$	57.49	<i>W</i>
$Q$	574.93	<i>J</i>
$\Delta T$	7.62	$^{\circ}\text{C}$

<b>Proposta 4</b>		
$L_{\text{filo}}$	226	<i>mm</i>
$D_{\text{int}}$	4.1	<i>mm</i>
$N_{\text{spire}}$	10	-
$i_{\text{singola}}$ AWG limite	100	<i>Amperespire</i>
$i/A$	7.57	<i>A/mm<sup>2</sup></i>
$i_{\text{tot}}$	1000	<i>A</i>
$R$	0.003	$\Omega$
$V$	0.3	<i>V</i>
$\Delta t$	10	<i>S</i>
$P$	29.11	<i>W</i>
$Q$	291.10	<i>J</i>
$\Delta T$	2.83	$^{\circ}\text{C}$

Tabella 14: Soluzione proposte configurazione avvolgimenti.

Delle quattro proposte, è stata considerata migliore la soluzione con il diametro del singolo filo pari a 1.3 mm e 90 avvolgimenti, considerato un buon compromesso per la tensione richiesta, sufficientemente elevata da stare sopra il valore minimo consigliato, permettendo comunque di testare il sistema per livelli di corrente più elevata senza sovraccaricare il generatore.

Nella pratica, bisogna tenere conto dello strato di isolante che circonda ciascun filo di rame, pertanto dopo un confronto con il costruttore, si è scelta una configurazione con fili di diametro 1.12 mm e 90 avvolgimenti, che garantiscono in ogni caso il livello minimo di corrente desiderato pari a 1000 Amperespire senza surriscaldarsi in maniera importante, tenendo conto anche della presenza di canali di raffreddamento nel caso si dovessero rilevare innalzamenti di temperatura importanti.

Con l'inserimento di canali di raffreddamento all'interno degli stampi e visto il tempo di prova relativamente breve, si stima di poter raggiungere una corrente pari a  $I_3 = 2000$  Amperespire, consentita dal generatore in quanto la tensione raggiunta è al di sotto dei limiti massimi imposti dai dati di targa.

# **Capitolo 4**

## **Apparato sperimentale**

## 4.1 Macchina Strip Drawing test

Utilizzata per eseguire i test di attrito, la macchina di Strip Drawing Test in figura 93 permette di misurare con precisione la forza normale e tangenziale applicate al sistema stampo – provino [17].



Figura 93: Macchina Strip Drawing Test.

In macchina sono presenti due celle di carico che misurano la forza normale e tangenziale applicate rispettivamente a punzone e provino. Viene utilizzato un carro dove si fissa il provino, si porta in posizione iniziale e vi si applica la forza normale desiderata facendo scendere il punzone tramite un accoppiamento a vite. Settato il valore di forza, si indicano i dati di corsa e velocità nel terminale della macchina, che muove il carro misurando contemporaneamente la forza tangenziale richiesta. In figura viene mostrato il dettaglio del punzone e del carro, montato su un sistema pattino – guida a ricircolo di sfere.



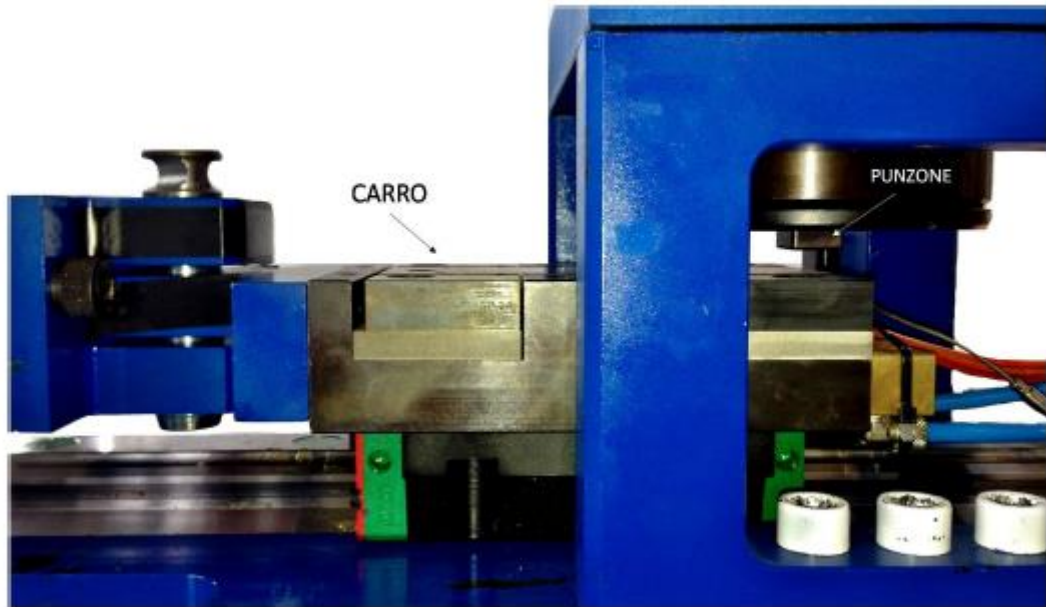


Figura 94: Dettaglio carro – punzone.

Per il punzone, sono disponibili due tipologie di geometrie, mostrate in figura 96:

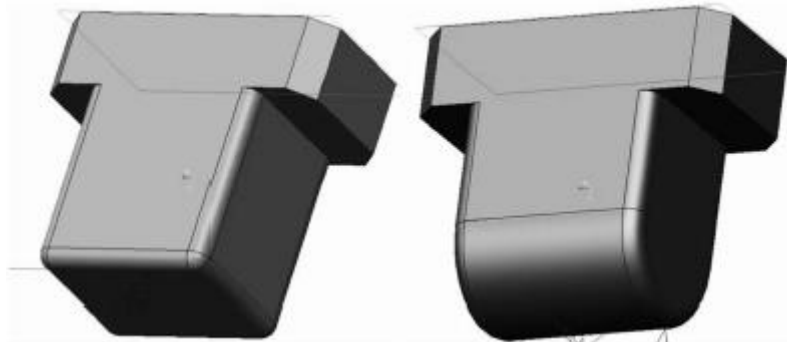


Figura 95: Punzone a geometria piana e cilindrica.

Per quanto riguarda la geometria piana, la pressione si calcola secondo la formula:

$$\sigma_N = \frac{F}{A}$$

Dove l'area di contatto è pari a 336 mm<sup>2</sup>.

Per la geometria cilindrica invece gli sforzi sono maggiori a parità di forza e materiale perché la superficie di contatto risulta inferiore rispetto alla geometria piana.

La superficie di contatto teorica sarebbe rappresentata da una linea, ma la deformazione del campione modifica la condizione di contatto da lineare a superficiale, come mostrato in figura 96. Le equazioni che regolano l'equilibrio delle forze di un punzone semisferico su una superficie deformabile sono le seguenti:

$$\sigma_{N \max} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a \cdot L} = \frac{4}{\pi} \cdot \sigma_{N \text{ med}}$$

$$\sigma_{N \text{ med}} = \frac{F}{2 \cdot a \cdot L}$$

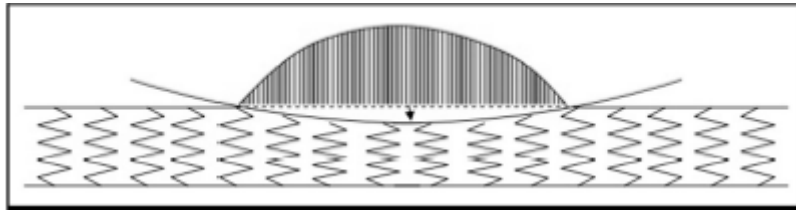


Figura 96: Contatto provino punzone semicilindrico.

Le variabili inserite rappresentano:

- L lunghezza dello stampo [mm]
- a semi-larghezza del contatto tra i due corpi [mm]
- $\sigma_N$  pressione normale di contatto tra i due corpi [MPa]

La variabile "a" dipende dal materiale e dalla pressione, perciò va valutata di volta in volta:

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot F(m_1 + m_2)}{\pi \cdot L \cdot B}}$$

Dove:

$$m_1 = m_2 = \frac{1 - \nu^2}{E}$$

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Con:

- $R_1$  raggio di curvatura del cilindro 1 [mm]
- $R_2$  raggio di curvatura del cilindro 2 (in caso di geometria piana si pone questo valore pari ad infinito) [mm]
- $\nu$  modulo di Poisson
- E modulo di Young [GPa]

In figura 97 viene mostrato uno schema di funzionamento della macchina, principalmente utilizzata per test di attrito di lamiera a caldo, in figura 99 vengono mostrate in sezione le componenti principali della macchina:

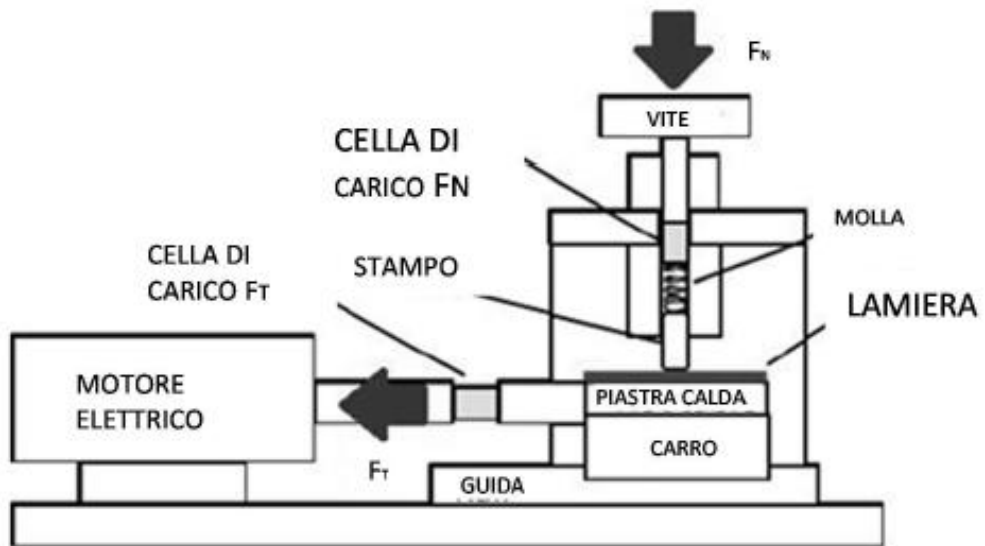


Figura 97: Schema di funzionamento della macchina.

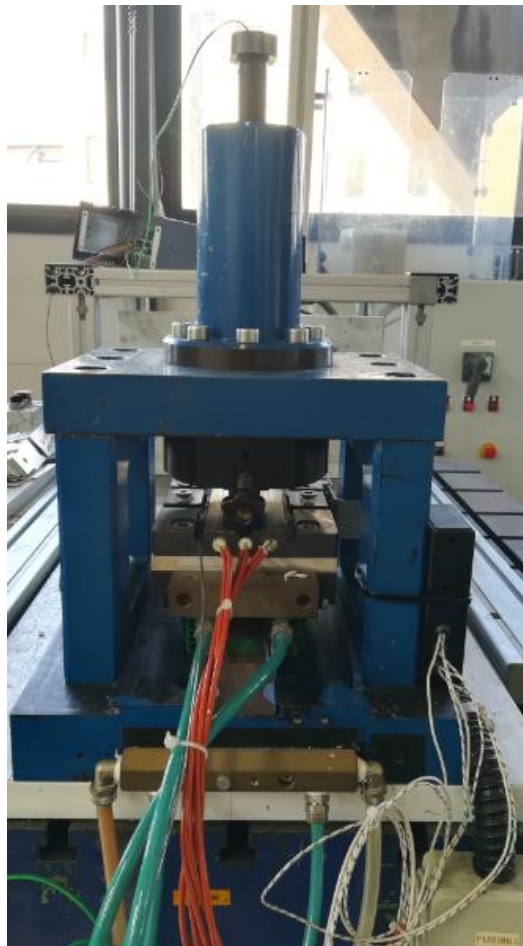


Figura 98: Vista frontale macchina di prova.

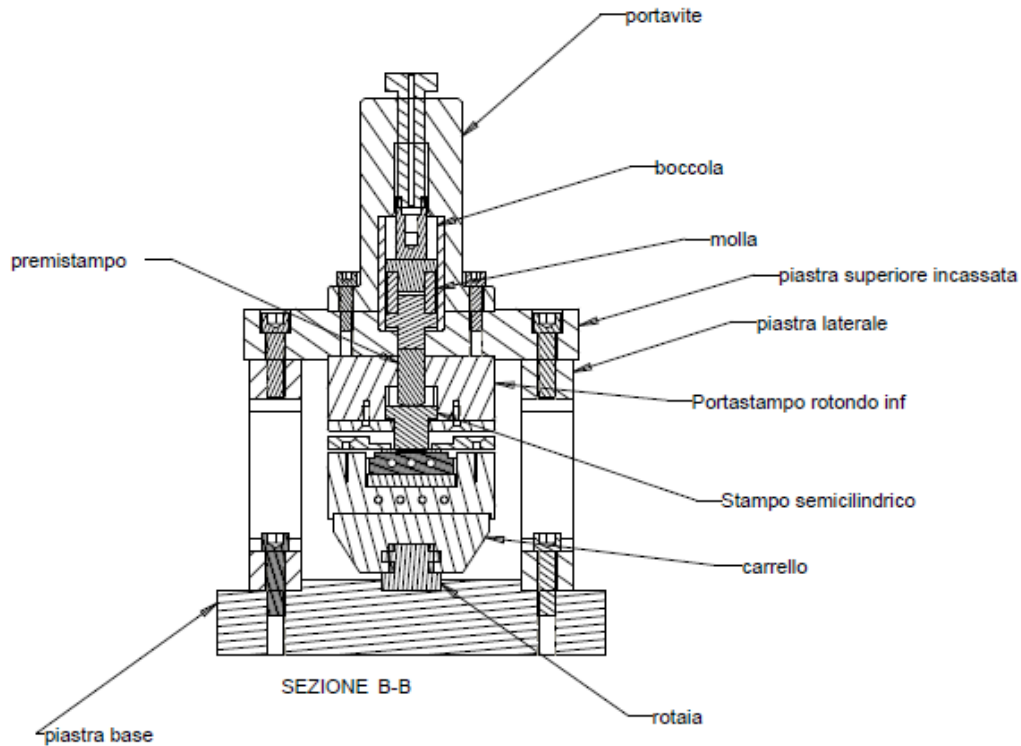


Figura 99: Vista in sezione della macchina, con indicate le componenti principali.

Le celle di carico per il rilevamento della forza normale  $F_n$  e tangenziale  $F_t$  sono di produzione della Kistler. Se ne sono installate due: una monitora  $F_n$  mediante un accoppiamento a vite, l'altra monitora  $F_t$  dettata dal motore elettrico.



Figura 100: Cella di carico per la misura di  $F_n$  e  $F_t$ .

L'accoppiamento tra motore e carro avviene con l'inserimento di un cilindro passante per l'aggancio snodato collegato al motore e l'aggancio snodato collegato al carrello.

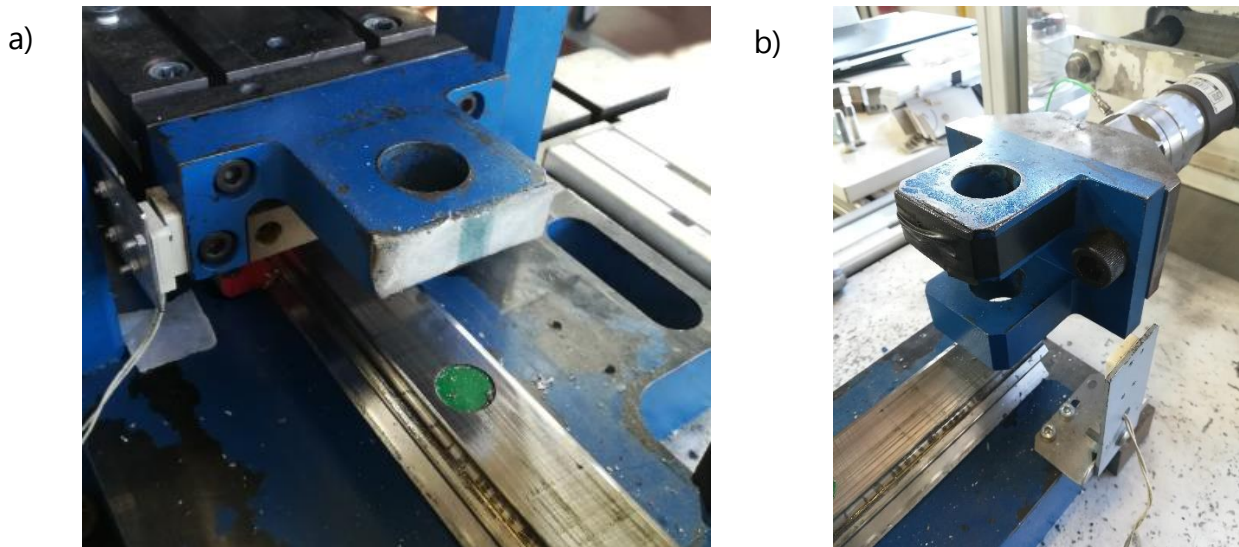


Figura 101: a) Aggancio snodato carrello, b) Aggancio snodato motore elettrico.

## 4.2 Generatore di corrente Powerel

Generatore dotato di raddrizzatore: il raddrizzatore è un elemento che serve a trasformare un segnale alternato in uno unidirezionale.

In particolare, questa macchina permette di erogare corrente e tensione continua stabilizzata e regolabile di grazie alla tecnologia switching ad alta frequenza, più efficace dei tradizionali sistemi SCR.

Le uscite sono completamente isolate sia dal lato alimentazione che dal lato segnali permettendo qualsiasi tipologia di collegamento tra macchine diverse.

È possibile collegare il pannello di controllo remoto anche a distanza, rendendo questa macchina molto versatile in funzione delle esigenze.

Generalmente, si fa utilizzo di questi raddrizzatori nel settore galvanico, per il grassaggio anodico e catodico, per l'elettro – deposizione, in processi di depurazione e trattamento acque.

Sono disponibili in diverse configurazioni: quella presente in laboratorio è della serie RM con sei moduli posti in parallelo.

In figura è possibile vedere la configurazione del raddrizzatore presente in laboratorio: sono presenti due barre di rame, una caricata positiva ed una caricata negativamente, dove si vanno a collegare i capi di ciascuna sella a seconda di come si vuole disporre la corrente lungo la lamiera.

Dai dati di targa della macchina la macchina è in grado di erogare una tensione massima continua di 10 Volt ed una corrente massima continua di 6000 A, con un rendimento medio pari all'88% ed una potenza massima erogata pari a 60000 W.



Figura 102: a) Vista frontale, b) Vista posteriore con sbarre di rame.

# **Capitolo 5**

## **Progettazione sistema di prova**





I disegni tecnici riguardanti la progettazione del sistema sono consultabili in Appendice A.

Dovendo eseguire dei test riguardanti il sistema di serraggio, si è dovuto intervenire sul setup della macchina di prova. Nella configurazione tradizionale, il carro viene tirato dal motore elettrico, mentre il provino è fissato sul carro e si muove solidale ad esso; in questo caso, per simulare un effettivo processo di stampaggio, il provino è stato accoppiato direttamente con l'aggancio del motore elettrico, mentre il sistema di serraggio si è mantenuto fisso. Pertanto, il sistema di guida a pattino con il relativo carrello è stato rimosso, permettendo di inserire gli stampi. In figura viene mostrato il modello dell'apparato sperimentale una volta rimossi il sistema di guida a rotaia ed il carrello.

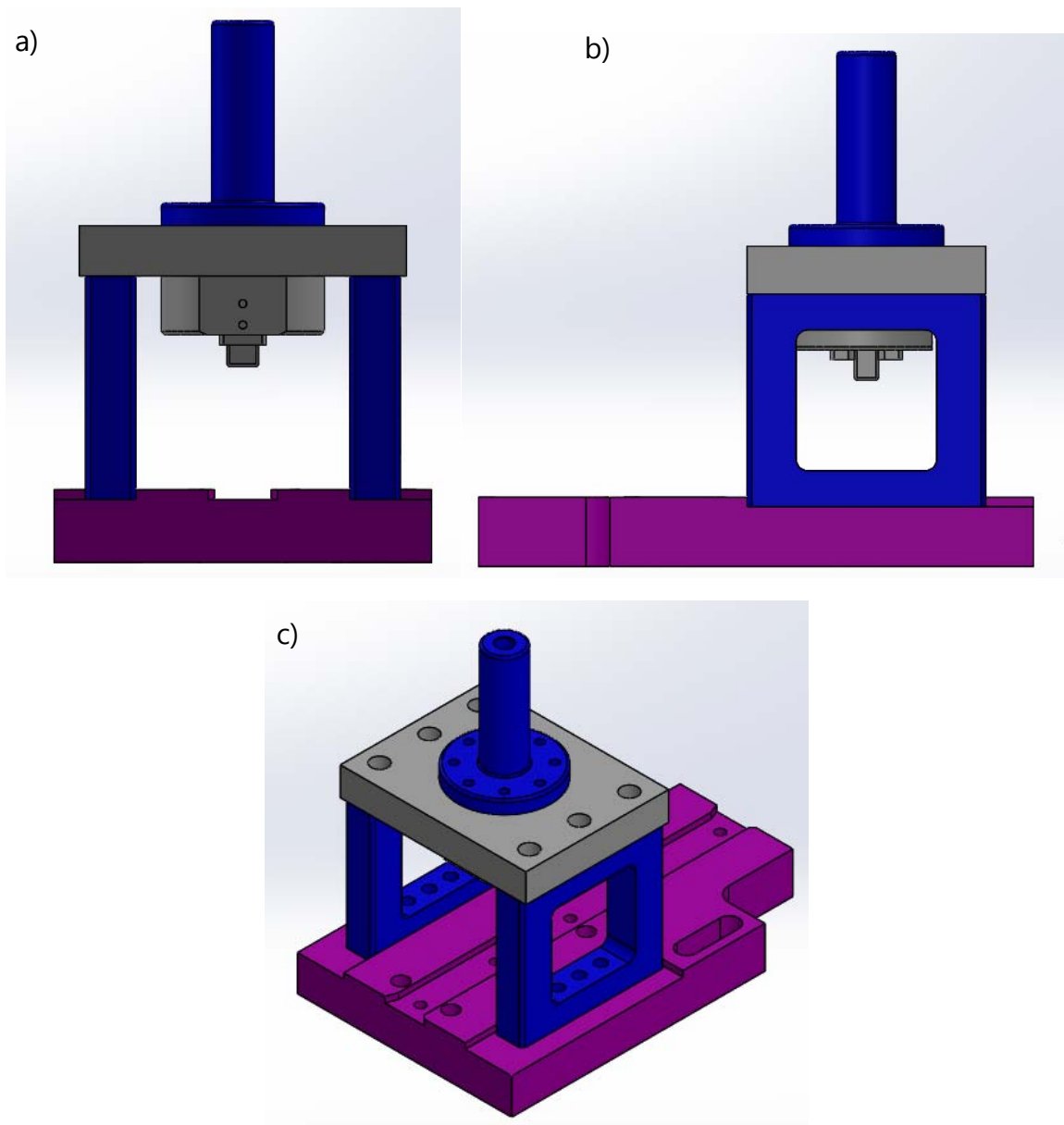


Figura 103: a) Vista frontale, b) Vista laterale, c) Vista isometrica.

Per fissare la lamiera alla piastra base della macchina si è inserito un piatto di aggancio, sfruttando i fori filettati realizzati sulla piastra base per accogliere il sistema a rotaia. Inoltre, poiché lo spazio disponibile tra lo stampo piano e la piastra base non era sufficiente a contenere entrambi gli stampi, il piatto d'aggancio e la lamiera, si sono dovuti inserire due spessori tra le piastre laterali e la piastra superiore incassata, visibili in figura.

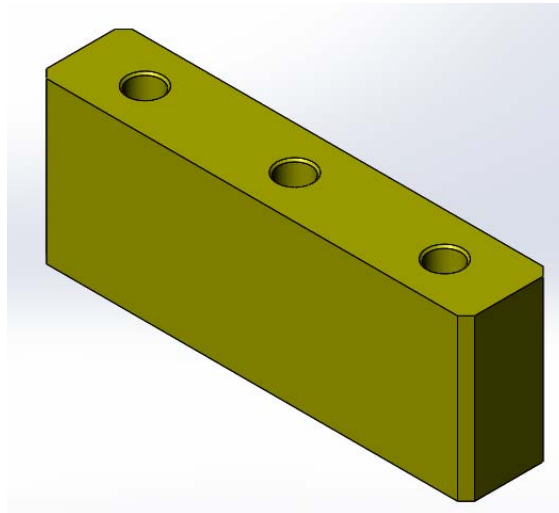


Figura 104: Spessore accoppiato con piastra superiore.

Infine, per garantire un corretto serraggio della lamiera nella zona del motore elettrico, si è riprogettato il sistema di aggancio al motore.

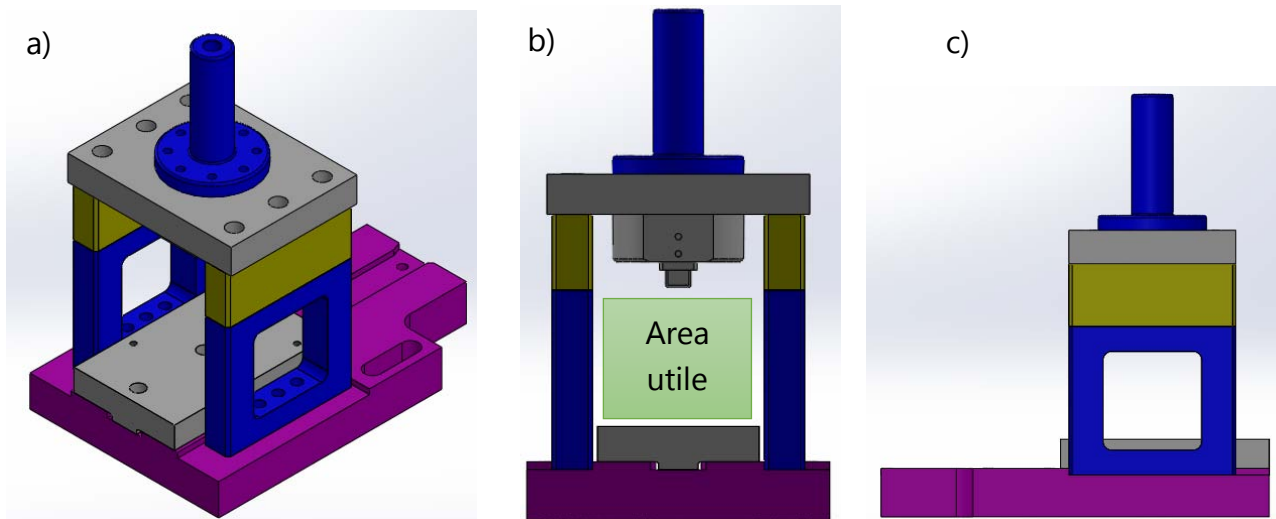


Figura 105: Modifiche sistema a) Vista isometrica, b) Vista frontale, c) Vista laterale.

Si individuate tre modalità per trasmettere la forza normale  $F_n$  agli stampi:

- Utilizzo di un peso puro, come per esempio dei dischi di acciaio accuratamente pesati e caricati sopra lo stampo superiore
- Utilizzo di un sistema a viti con cella di carico a rondella
- Utilizzo dello stampo piano della macchina

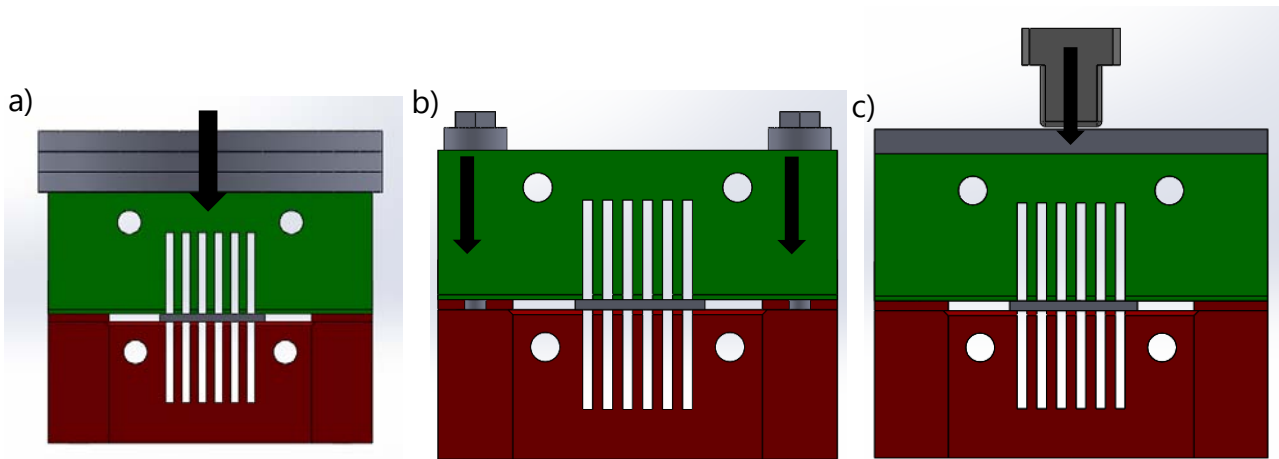


Figura 106: Tipologie di applicazione di carico: a) Peso proprio, b) Viti, c) Stampo.

Si è scelta la terza opzione, poiché permette di controllare la quantità di forza normale grazie al sensore già presente in macchina e permette di applicare una pressione uniforme tramite l'inserimento di un piatto delle stesse dimensioni degli stampi, al contrario del sistema a vite che applica la pressione solamente nelle zone più esterne. Il peso scelto ha le stesse dimensioni superficiali degli stampi (160 mm x 100 mm) ed uno spessore di 10 mm, che vanno tenute in conto quando si decide l'altezza degli spessori aggiuntivi da inserire tra piastra laterale e piastra superiore.

## 5.1 Stampi

Per quanto riguarda la progettazione degli stampi, le geometrie sono dettate dalle scelte fatte negli scorsi capitoli. In tabella vengono riportati i parametri geometrici finali ricavati dalle simulazioni:

Parametro	Dimensione
N	6
L	4 mm
APE	4 mm
D	4 mm
B	26 mm
TS	40 mm
SPESS	4 mm
T	0.1 mm
H	60 mm

Tabella 15: Parametri geometrici finali.

Per garantire il corretto svolgimento della prova e con gli stampi fissi mentre la lamiera viene tirata dalla macchina tramite il motore elettrico, è stato necessario bloccare il moto relativo tra stampi e lamiera indotto dall'attrito che si genera al contatto tra le due superfici.

Per quanto riguarda lo stampo inferiore, si è fissato il componente alla piastra base della macchina tramite un piatto di aggancio che verrà visto nei paragrafi successivi. Per quanto riguarda lo stampo superiore, si è scelto di non inserire accoppiamenti ad interferenza tramite spine cilindriche o linguette poiché questi generano delle forze normali che avrebbero influenzato il risultato della prova, aggiungendosi alla forza normale  $F_n$  già imposta dalla macchina. Inoltre, lasciare libero lo stampo superiore permette di non vincolare eccessivamente il sistema una volta settato, permettendo aggiustamenti più rapidi.

Per impedire il moto dello stampo superiore è scelto dunque di modificare la geometria dello stampo inferiore come mostrato in figura:

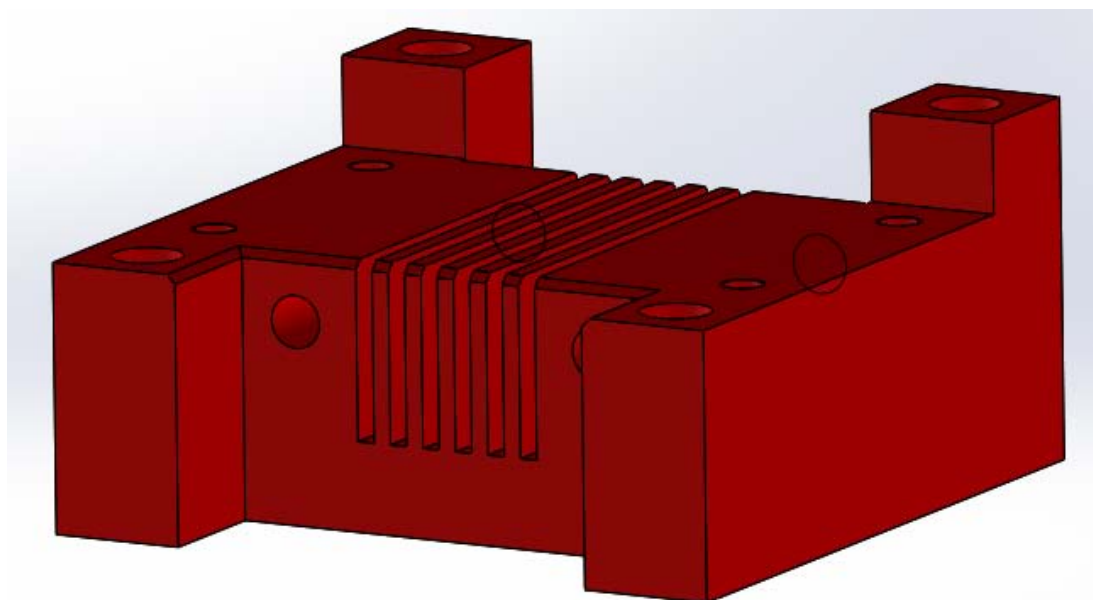


Figura 107: Modello stampo inferiore.

Grazie alla presenza dei due elementi bloccanti "a scalino" viene impedito lo scorrimento dello stampo superiore a causa dell'attrito con la superficie del provino, posizionando lo stampo in battuta come mostrato in figura. Questo consente anche di impostare correttamente l'allineamento tra i due stampi, permettendo alle selle superiori ed inferiori di lavorare sulla stessa lunghezza del provino.

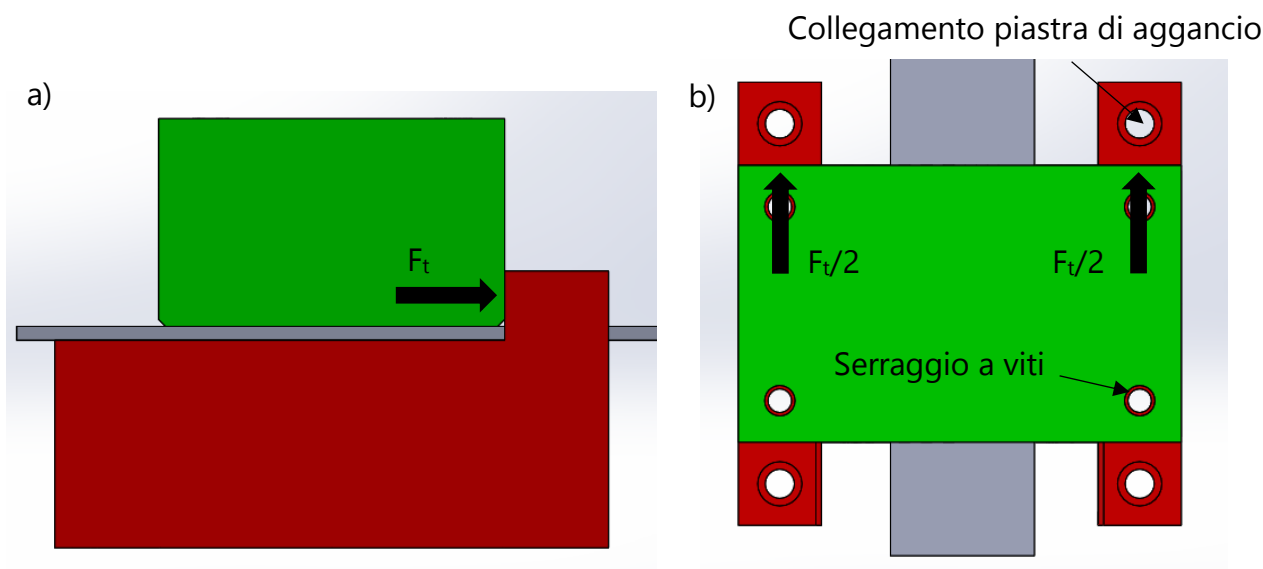


Figura 108: Accoppiamento stampi: a) Vista laterale, b) Vista superiore.

In figura viene mostrata la geometria dei blocchi con relativi fori per viti M10 a testa cilindrica con cava esagonale, per il collegamento con il piatto di aggancio. In figura sono visibili anche i fori per un eventuale serraggio a vite, nello stampo superiore sono passanti mentre nello stampo inferiore sono filettati. Inoltre, per permettere un ingresso più dolce del provino nel momento in cui viene a contatto con il sistema di serraggio, si sono realizzati degli smussi di 2 mm a 45° sulle zone di contatto tra stampi e provino, visibili in figura sullo stampo superiore.

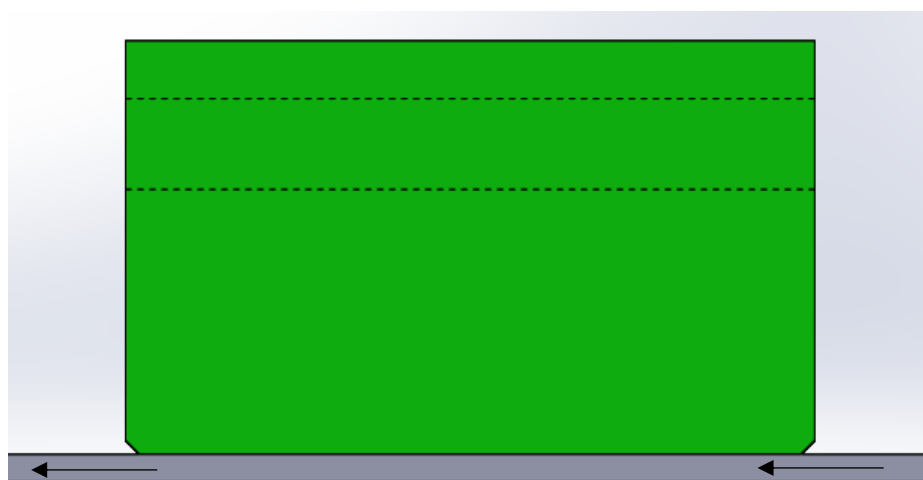


Figura 109: Smussi 2x45° stampo superiore.

### 5.1.1 Verifica a taglio dei blocchi

Si è eseguita una verifica a taglio della struttura, considerando una forza normale  $F_n$  impressa di 5000 N ed un coefficiente di attrito statico  $\mu = 1$ .

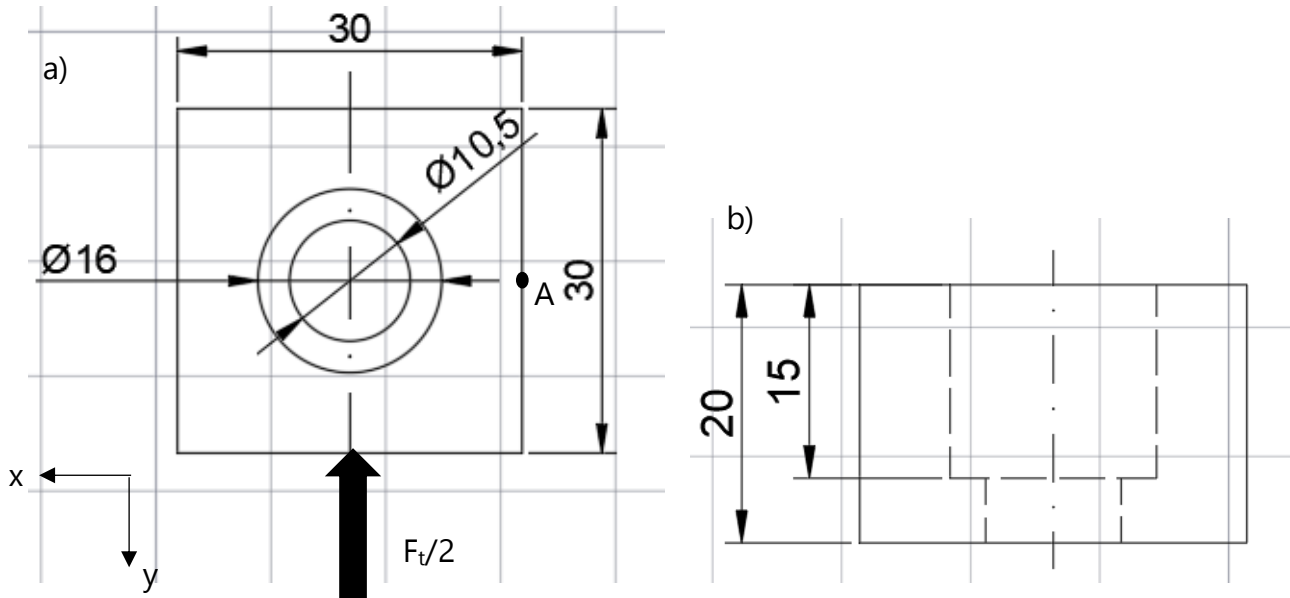


Figura 110: Geometria blocchi: a) Vista superiore, b) Vista frontale.

La forza tangenziale  $F_t$  risultante, secondo la legge di attrito radente, è pari a:

$$F_t = \mu \cdot F_n$$

Avendo posto, in margine di sicurezza,  $\mu = 1$ ,  $F_t$  risulta pari a 5000 N, di conseguenza su ciascun blocco agisce una forza di taglio pari a  $F_t/2 = 2500$  N.

Si è considerato il caso in cui il foro passante sia interamente di 16 mm, condizione peggiore in quanto è presente meno materiale rispetto al caso in cui il foro si restringe per accogliere la vite M10.

Il punto più sollecitato a taglio è quello appartenente all'asse di simmetria orizzontale, il punto A in figura 107, dove l'andamento parabolico delle tensioni tangenziali  $\tau_{zy}$  di taglio raggiunge il massimo.

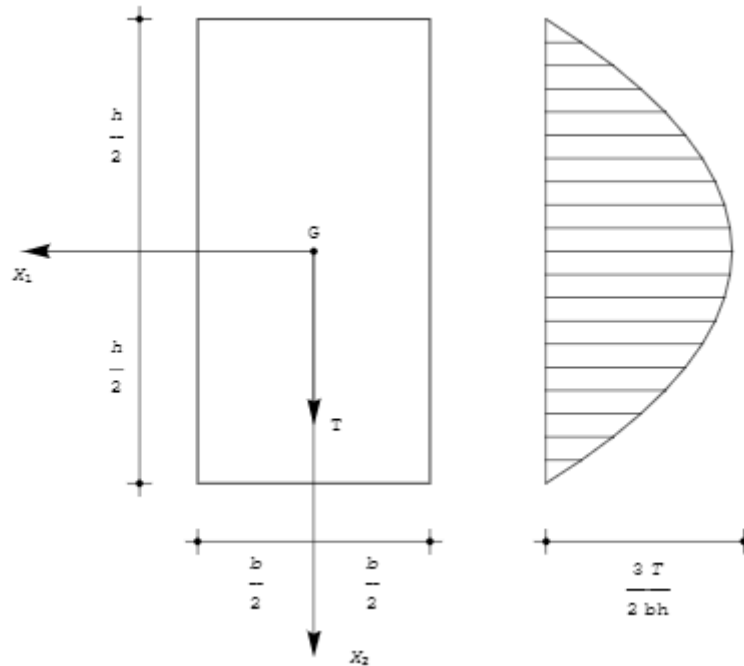


Figura 111: Esempio andamento tensioni di taglio in sezione rettangolare.

Utilizzando la teoria di Jourawski, secondo cui la sezione dove si applica la forza di taglio è soggetta ad uno scorrimento trasversale, le tensioni tangenziali  $\tau_{zy}$  generate si calcolano come:

$$\tau_{zy} = \frac{T \cdot S_{xx}}{J_{xx} \cdot b}$$

Dove:

- $T$  è la forza di taglio applicata, in questo caso pari a  $F_T/2$
- $S_{xx}$  è il momento statico della generica area  $A$  considerata nella sezione
- $J_{xx}$  è il momento d'inerzia dell'intera sezione
- $b$  è la larghezza del tratto di sezione considerato

Per il calcolo del momento statico  $S_{xx}$  si è considerata la semisezione del blocco:

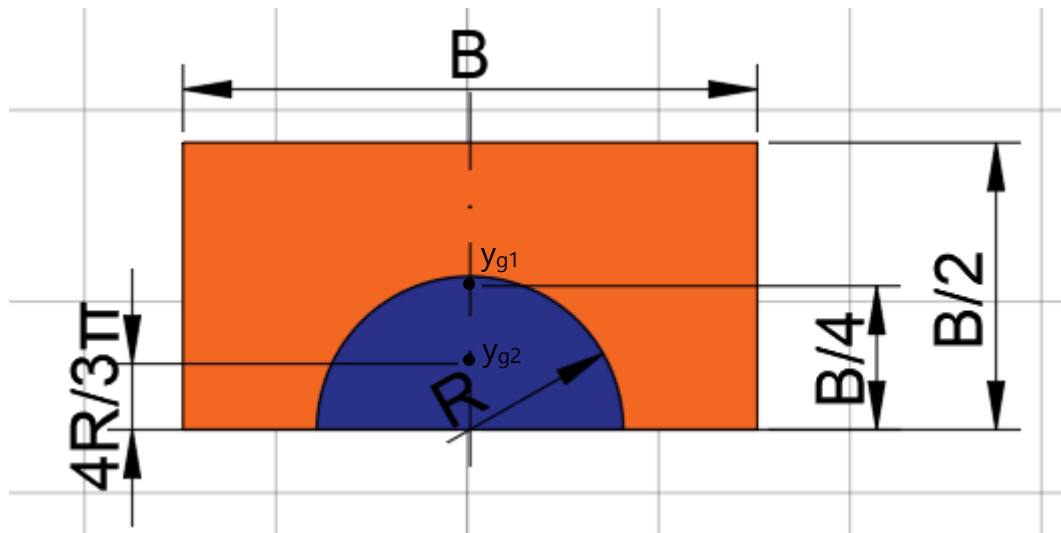


Figura 112: Sezione con relative altezze  $y_{g1}$   $y_{g2}$  dei baricentri rispetto all'origine.

Sottraendo il momento statico dell'intera sezione ed il momento statico della regione occupata dal foro di colore blu si ottiene il momento statico della regione di materiale sottoposto alla sollecitazione di colore arancione.

$$S_{xx} = S_{xx,tot} - S_{xx,foro} = B \cdot \frac{B}{2} \cdot \frac{B}{4} - \frac{1}{2} \pi R^2 \cdot \frac{4R}{3\pi}$$

Risulta  $S_{xx}$  pari a 3033 mm<sup>3</sup>.

Per quanto riguarda il momento d'inerzia, si è sottratto al momento d'inerzia dell'intera sezione il momento d'inerzia appartenente al foro circolare.

$$J_{xx} = J_{xx,tot} - J_{xx,foro} = \frac{1}{12} H^4 - \frac{\pi}{4} R^4$$

Risulta  $J_{xx}$  pari a 64283 mm<sup>4</sup>.

La larghezza del tratto di sezione considerata è pari a:

$$b = B - 2R$$

Risulta  $b$  pari a 14 mm.

Pertanto, per la formula di Jourawski il calcolo della tensione tangenziale di taglio  $\tau_{zy}$  risulta pari a 8.44 MPa.

Considerando una tensione di snervamento dell'acciaio C10  $\sigma_0$  pari a 250 MPa ed utilizzando il criterio di resistenza di Von Mises:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3 \cdot \tau_{zy}^2}$$

$$v = \frac{\sigma_0}{\sigma_{eq}}$$



$\sigma_{eq}$  è la tensione equivalente e risulta pari a 14.61 MPa,  $v$  è il coefficiente di sicurezza ed è pari a 17.1. Si conclude che la verifica di resistenza a taglio della sezione nel punto A è superata.

### 5.1.2 Canali di raffreddamento

Vista l'elevata intensità di corrente richiesta al generatore, e per evitare rischi di eccessivo surriscaldamento delle spire, si sono aggiunti nello stampo dei fori passanti per permettere l'inserimento di canali di raffreddamento ad acqua; in questo modo, per conduzione vengono raffreddati prima gli stampi e successivamente gli avvolgimenti. Questa soluzione permette di aumentare il livello di corrente oltre il massimo suggerito dal tool trovato in rete, compatibilmente con il livello di saturazione raggiunto dalla lamiera.

I canali di raffreddamento sono visibili in figura ed hanno un diametro pari a G ¼.

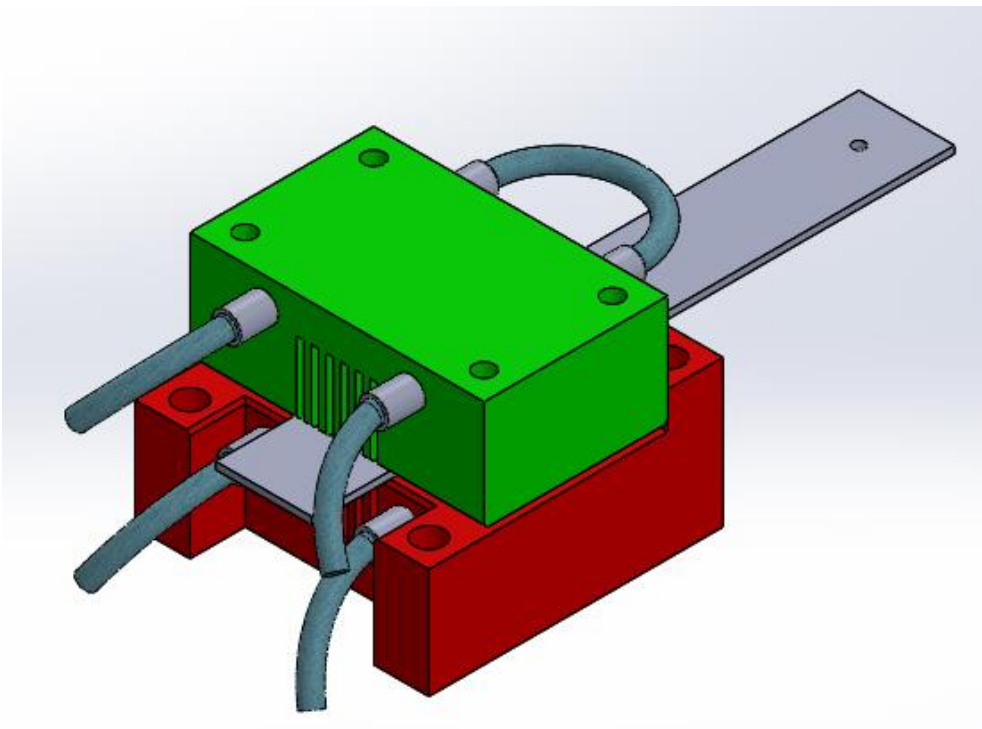


Figura 113: Canali di raffreddamento con attacchi, diametro G ¼.

Per permettere l'ingresso di questi canali di raffreddamento, gli stampi sono stati allargati da 120 mm a 160 mm, consentiti dallo stampo disponibile tra le due piastre laterali pari a 170 mm.

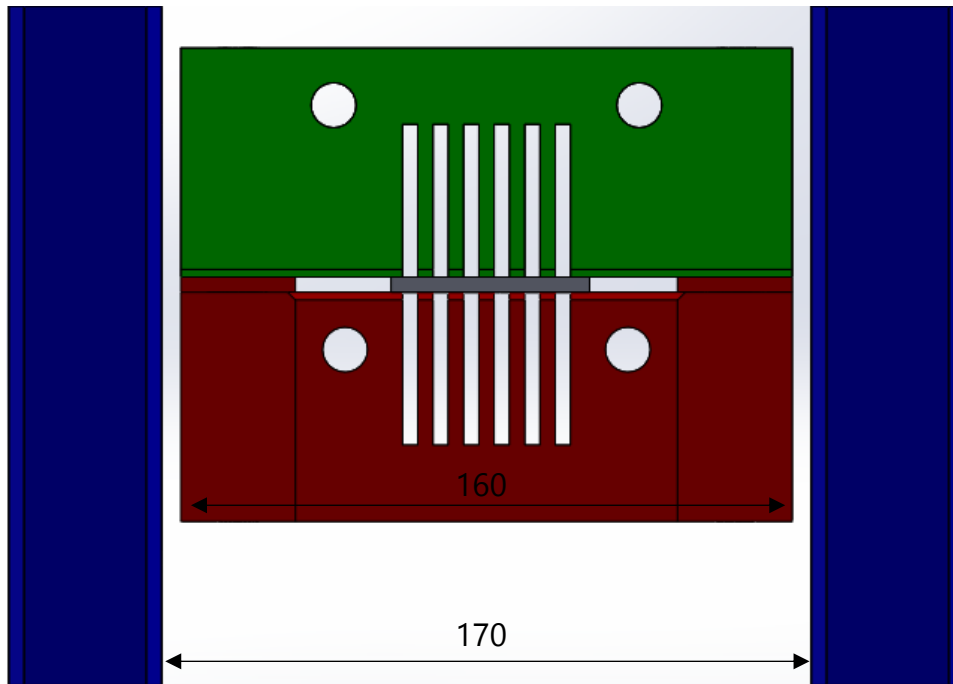


Figura 114: Spazio disponibile all'interno dell'area di lavoro della macchina.

## 5.2 Piatto di aggancio

La presenza del piatto di aggancio è necessaria per due motivi:

- Vincolare lo stampo inferiore alla piastra base della macchina, impedendo il movimento relativo tra stampo e provino a causa dell'attrito tra le superfici.
- Garantire un corretto allineamento tra il provino ed il sistema di aggancio al motore elettrico, poiché il braccio del motore è ad altezza prefissata.



Figura 115: Braccio motore elettrico ad altezza fissa.

Si è scelto di utilizzare i fori filettati presenti sulla piastra base per fissare il sistema rotaia – carrello nella configurazione standard della macchina. Sul piatto di aggancio sono presenti tre fori M12 posizionati in modo da coincidere con i fori della piastra base; è presente anche una tasca di diametro pari a 20 mm per permettere l’inserimento delle viti a testa cilindrica con cava esagonale, garantendo un corretto accoppiamento con lo stampo inferiore.

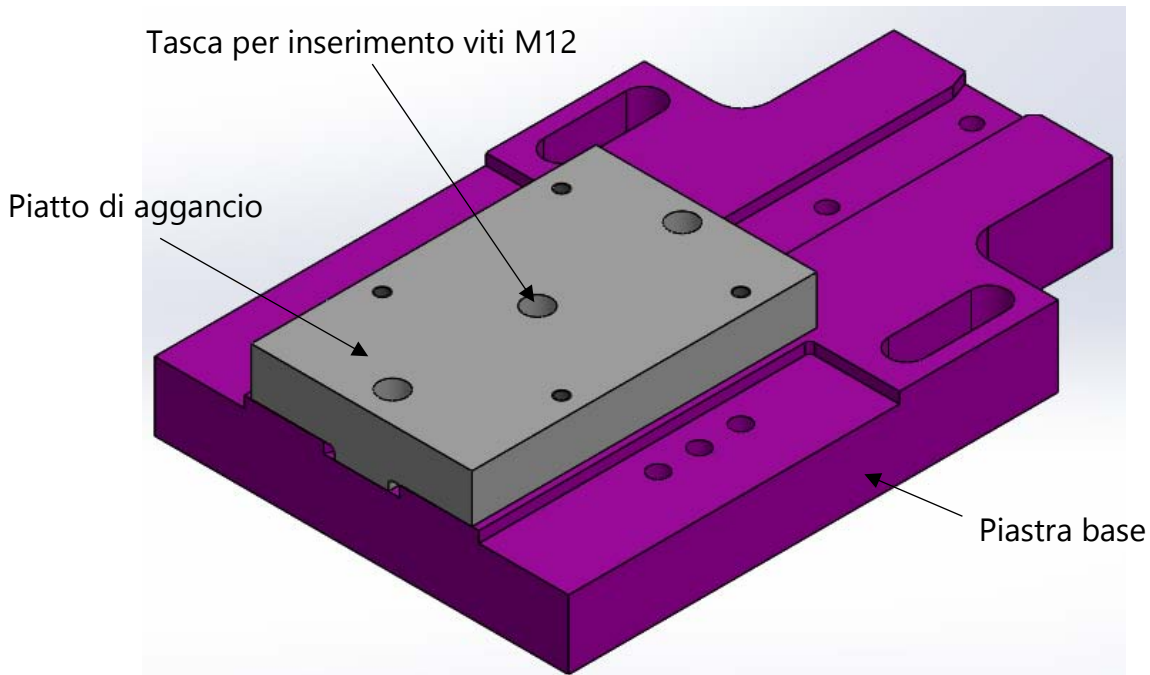


Figura 116: Piatto di aggancio posizionato su piastra base.

L'accoppiamento con lo stampo inferiore viene realizzato tramite viti M10 a testa cilindrica con cava esagonale, pertanto sono presenti dei fori filettati sul piatto di aggancio posizionati in maniera tale da coincidere con i fori passanti realizzati sullo stampo inferiore.

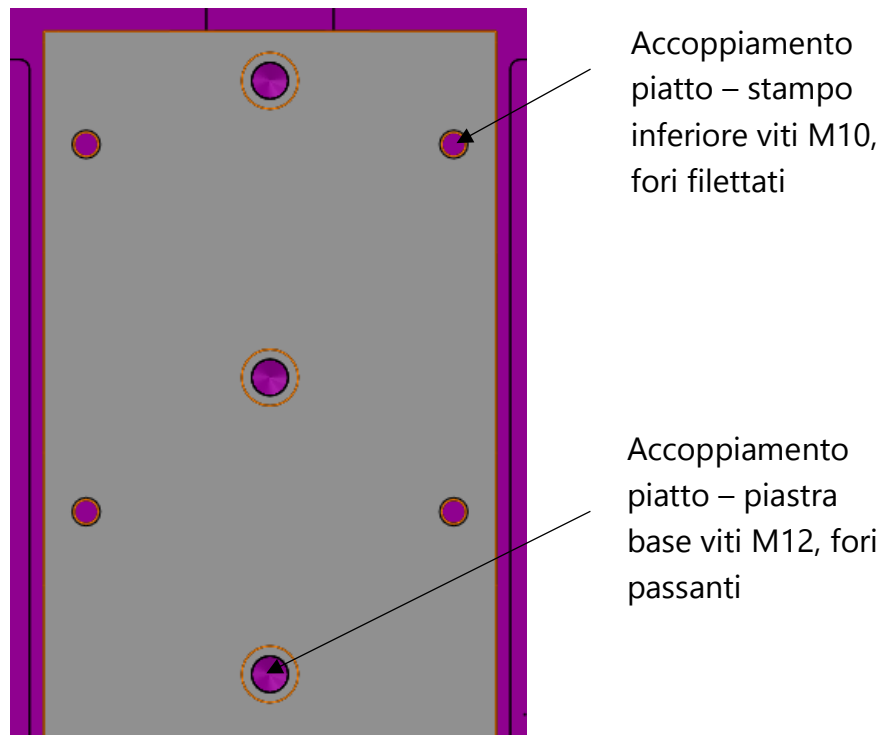


Figura 117: Vista superiore accoppiamento piatto di aggancio - piastra base.

Per garantire un ingresso più dolce all'interno della tasca di 8 mm presente nella piastra base, si sono realizzati due raggi di raccordo R3; infine, ricavando le misure dai disegni tecnici già presenti e misurando direttamente l'altezza di aggancio con il motore elettrico si è stimato un valore di 99 mm dalla piastra base, necessari per garantire il corretto allineamento del sistema. Avendo impostato l'altezza del singolo stampo pari a 60 mm ed uno spessore del provino pari a 4 mm, l'altezza risultante del piatto di aggancio misurata a partire dalla piastra base è pari a 35 mm.

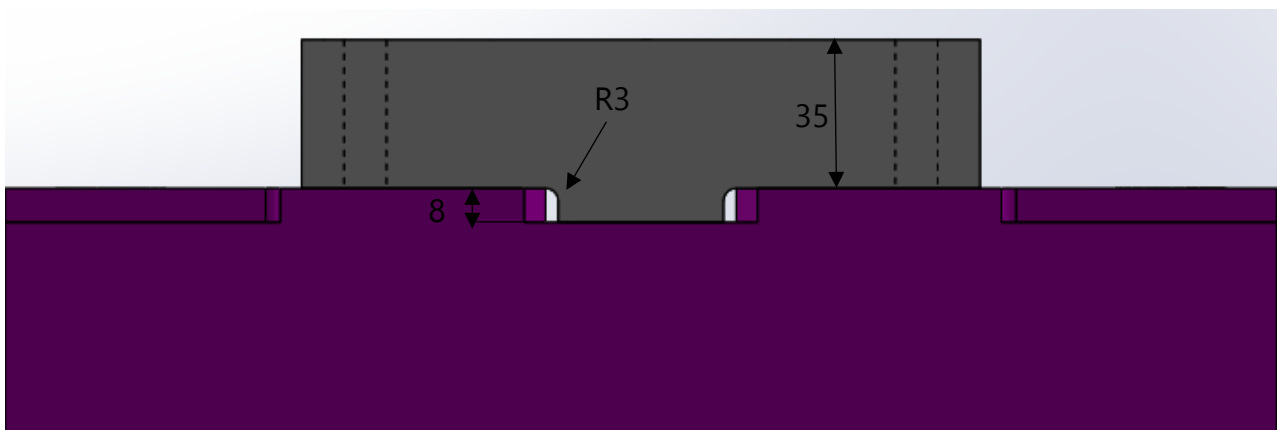


Figura 118: Raggi di raccordo e altezza piastra.

## 5.3 Aggancio motore elettrico

Poiché il sistema sperimentale richiede che il motore elettrico interagisca direttamente con il provino e non più con il carro su cui il provino viene fissato, è stato necessario riprogettare il sistema di aggancio per garantire il corretto serraggio della lamiera. Si è presa ispirazione da un sistema a morse già utilizzato nella macchina servoidraulica MTS per le prove di trazione, necessario quando lo spessore del provino è troppo piccolo e l'aggancio con i sistemi presenti in macchina non garantisce la stabilità richiesta.

Nella configurazione standard, al braccio del motore elettrico è collegato tramite viti M14 un aggancio snodato rappresentato in figura:

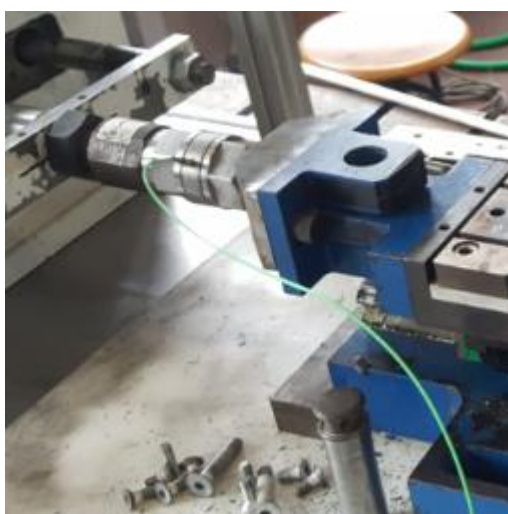


Figura 119: Braccio motore elettrico con aggancio al carrello.

Questa tipologia di sistema non è adatta al serraggio della lamiera.

Nella nuova configurazione l'aggancio al motore elettrico si compone di tre elementi:

- Aggancio base, dotato di guida per contenere le morse
- Morsa superiore, fissata all'aggancio base tramite viti
- Morsa inferiore, libera di muoversi lungo la guida presente nell'aggancio base

### 5.3.1 Aggancio base

L'aggancio base è l'elemento di collegamento tra le morse ed il motore elettrico, e che sostituisce l'aggancio snodato della configurazione standard. Sono presenti quattro asole, due che permettono di regolare il posizionamento del componente allineandolo correttamente con i fori presenti sul braccio del motore elettrico, due che permettono di

regolare l'altezza di fissaggio della morsa superiore rispetto alla lamiera. In questo modo ci si mantiene flessibili nel caso le lavorazioni dovessero presentare tolleranze dimensionali non rispettate, o nel caso si fosse necessario lo spessore della lamiera. Sulle asole si sono ricavate delle tasche per permettere l'ingresso delle viti. Sull'aggancio base è presente una guida scavata nel materiale per garantire un corretto allineamento delle morse, che possono scorrere parallelamente ad essa. La guida ha una larghezza pari a 60 mm, vincolata dalla presenza delle viti di collegamento con il braccio del motore elettrico.

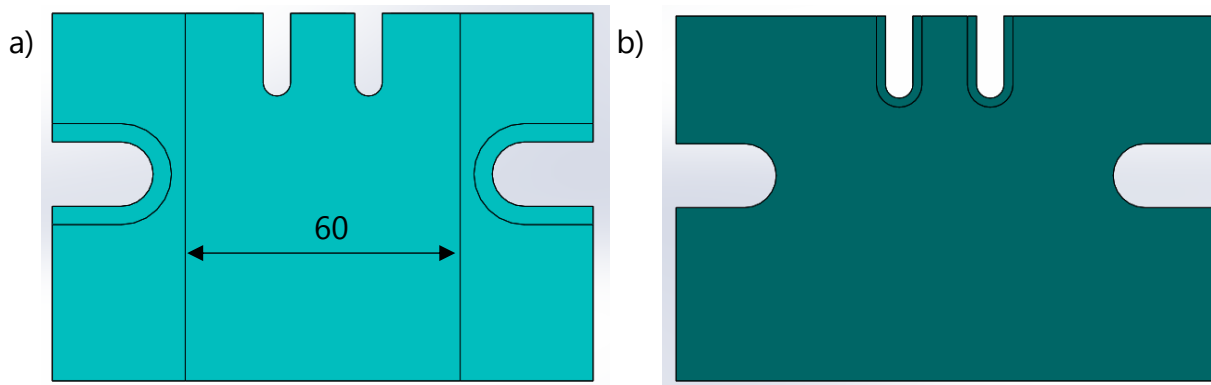


Figura 120: a) Vista frontale con tasca per collegamento al braccio del motore elettrico, b) Vista posteriore con tasca per collegamento a morsa superiore.

### 5.3.2 Morsa superiore

La morsa superiore viene collegata all'aggancio base tramite viti M6. Viene inserita nella guida tramite accoppiamento con gioco H7 g6, viene messa in contatto con la lamiera e fissata in posizione. Successivamente, vengono fatte passare delle viti M6 attraverso dei fori passanti per permettere il serraggio della lamiera. I fori devono essere posizionati in modo da non entrare in collisione con il provino, e poiché la larghezza della guida è vincolata dalla presenza dell'asola che accoglie le viti, questa condizione non viene garantita con una larghezza della morsa pari alla larghezza della guida. Si è dunque realizzata una morsa con due raggi di raccordo R2 che permettessero l'ingresso nella guida ed una larghezza della morsa tale da permettere il passaggio delle viti.

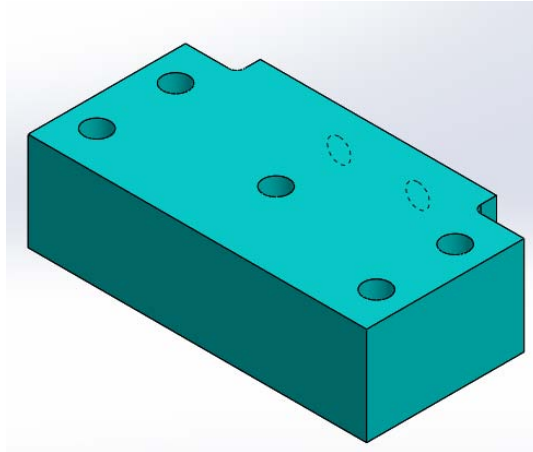


Figura 121: Morsa superiore vista isometrica.

In figura è visibile l'accoppiamento tra aggancio base e morsa superiore, dove sono presenti due fori filettati per viti M6. Inoltre, è presente un foro centrale che permette l'inserimento di un cilindro di acciaio passante per il provino e la morsa inferiore, nel caso il serraggio con viti non risulti sufficiente a tirare correttamente il provino.

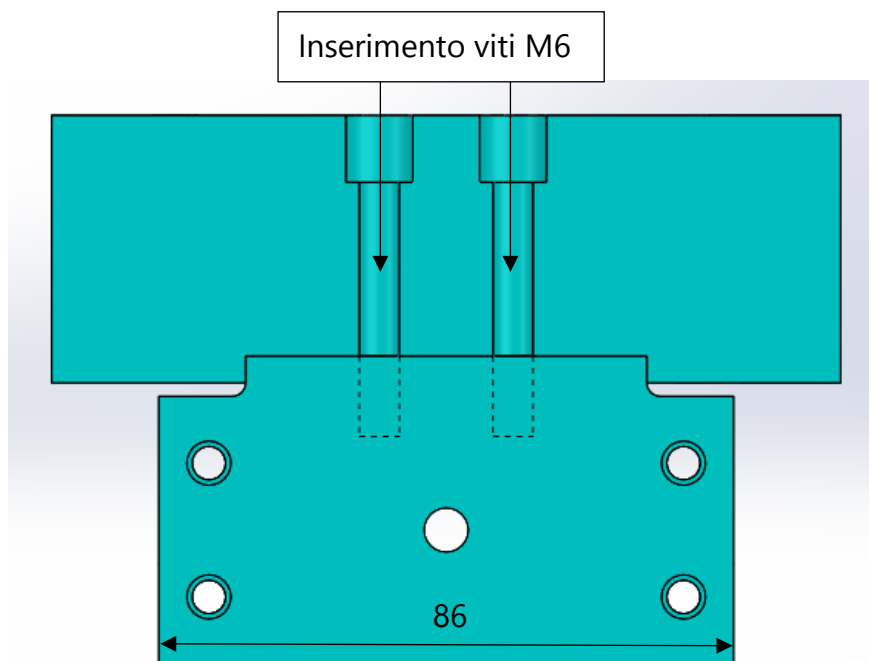


Figura 122: Accoppiamento morsa – aggancio.

### 5.3.3 Morsa inferiore

La geometria della morsa inferiore è simile a quella della morsa superiore, con uno spessore leggermente ridotto. La morsa inferiore non viene fissata sull'aggancio base, è libera di

scorrere lungo la guida ed una volta raggiunta la posizione desiderata in contatto con il provino, viene accoppiata alla morsa superiore tramite viti M6 ed eventualmente tramite cilindro di acciaio passante per il foro centrale.

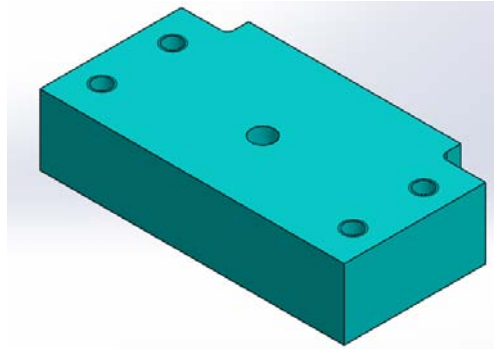


Figura 123: Morsa inferiore vista isometrica.

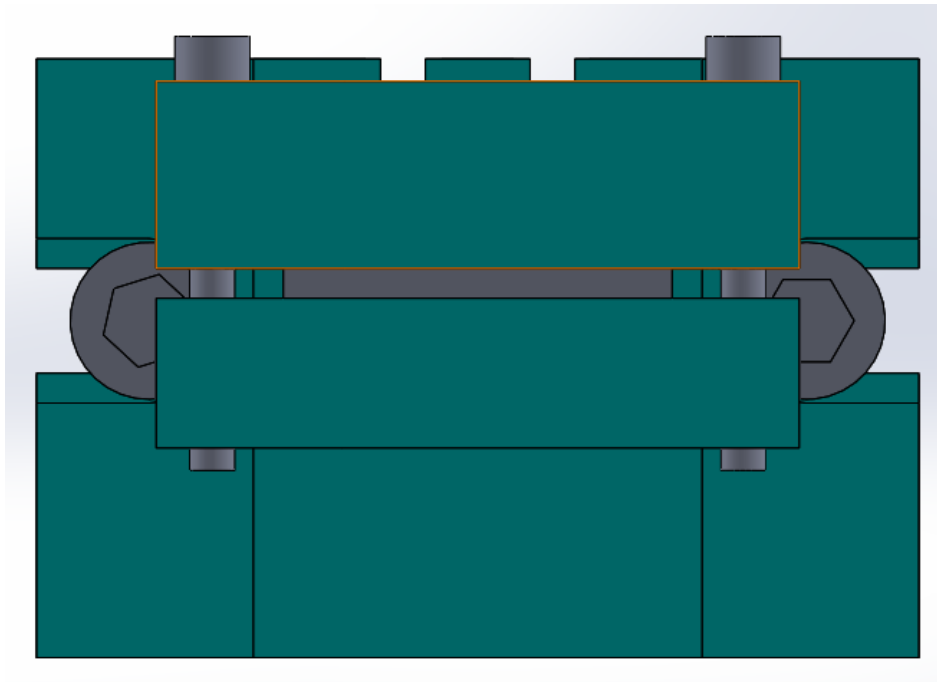


Figura 124: Sistema di aggancio, vista frontale.

Poiché le viti scelte per questo sistema di serraggio sono quelle di diametro minore, si è eseguita una verifica a taglio dei collegamenti.

In figura viene mostrato il sistema con relative forze di taglio agenti:



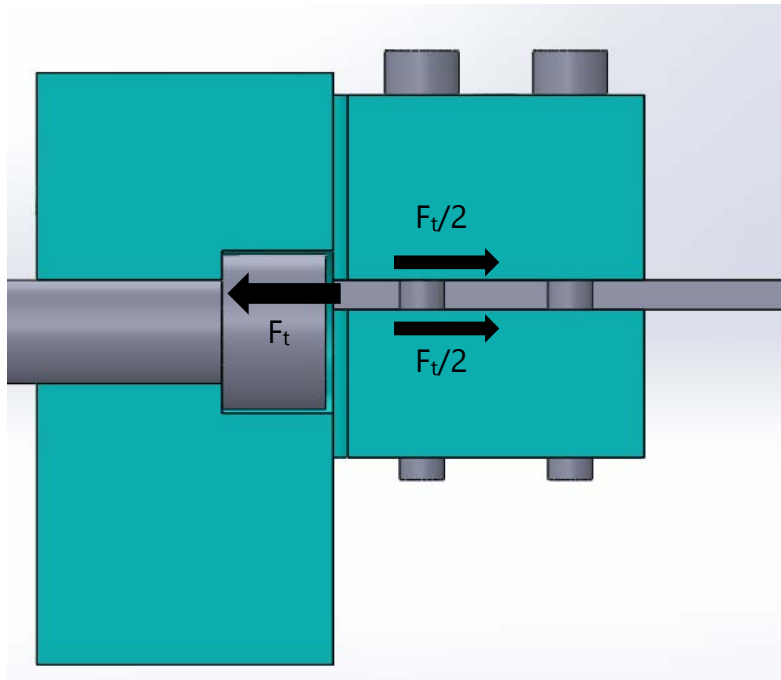


Figura 125: Sistema di aggancio con forze in gioco, vista laterale.

In tabella vengono mostrate le tensioni ammissibili per ciascuna classe di vite secondo CNR – UNI 10011 [18]:

Tensione ammissibile					
Classe vite	$f_t$ N/mm <sup>2</sup>	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	$f_{k,N}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{b,adm}$ N/mm <sup>2</sup>	$\tau_{b,adm}$ N/mm <sup>2</sup>
4.6	400	240	240	160	113
5.6	500	300	300	200	141
6.6	600	360	360	240	170
8.8	800	640	560	373	264
10.9	1 000	900	700	467	330

$f_{k,N}$  è assunto pari al minore dei due valori  $f_{k,N} = 0,7 f_t$ ,  $f_{k,N} = f_y$  essendo  $f_t$  ed  $f_y$  le tensioni di rottura e di snervamento secondo UNI 3740.  
 $\sigma_{b,adm}$ ,  $\tau_{b,adm}$  tensioni ammissibili a trazione ed a taglio.

Tabella 16: Tensioni ammissibili a seconda della classe di vite.

Per le viti M6 si è scelta la classe 5.6, con una tensione di taglio  $\tau_{b,adm}$  pari a 141 MPa.

Le tensioni agenti sulla singola vite risultano:

$$\tau = \frac{F_t}{n_b \cdot n_d \cdot \pi \frac{d_{res}^2}{4}}$$

Dove:

- $F_t$  è la forza tangenziale imposta dal motore elettrico
- $n_b$  è il numero di bulloni presenti
- $n_d$  è il numero di piani di taglio considerati
- $d_{res}$  è il diametro resistente della vite

Il diametro resistente viene considerato quando la sezione resistente è la parte filettata del gambo; per mantenere un certo margine di sicurezza, si è ipotizzato che la vite fosse interamente filettata.

In figura vengono mostrati i diametri caratteristici di un collegamento filettato:

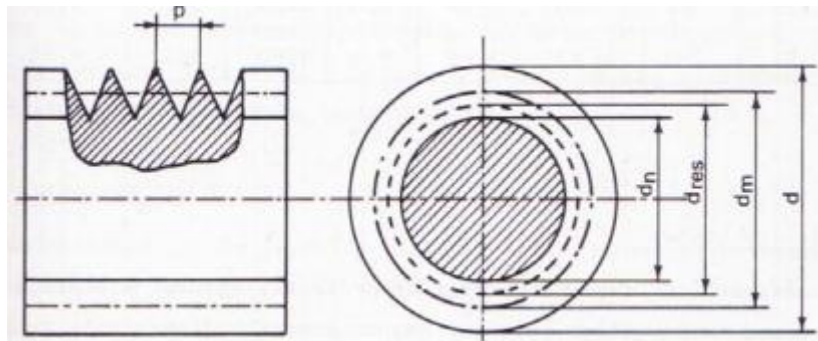


Figura 126: Diametri caratteristici collegamento filettato.

Il diametro resistente si calcola come:

$$d_{res} = (d_m + d_n)/2$$

Dove:

- $d_n$  è il diametro di nocciolo della vite
- $d_m$  è il diametro medio della vite

Da tabella vengono fornite direttamente le aree resistenti delle relative filettature; per una vite M6 l'area resistente  $A_{res}$  è pari a circa 20.1 mm<sup>2</sup>.

CARICHI DI PROVA (As x Sp),N (PASSO GROSSO)										
Filettatura	Sezione resistente nominale As nom. mm <sup>2</sup>	Classe di resistenza								
		4,6	4,8	5,6	5,8	6,8	8,8	9,8	10,9	12,9
M 3	5,03	1 130	1 560	1 410	1 910	2 210	2 920	3 270	4 180	4 880
M 3.5	6,78	1 530	2 100	1 900	2 580	2 980	3 940	4 410	5 630	6 580
M 4	8,78	1 980	2 720	2 460	3 340	3 860	5 100	5 710	7 290	8 520
M 5	14,2	3 200	4 400	3 980	5 400	6 250	8 230	9 230	11 800	13 800
M 6	20,1	4 520	6 230	5 630	7 640	8 840	11 600	13 100	16 700	19 500
M 7	28,9	6 500	8 960	8 090	11 000	12 700	16 800	18 800	24 000	28 000
M 8	36,6	8 240 c	11 400	10 200 c	13 900	16 100	21 200 c	23 800	30 400 c	35 500
M 10	58	13 000 c	18 000	16 200 c	22 000	25 500	33 700 c	37 700	48 100 c	56 300
M 12	84,3	19 000	26 100	23 600	32 000	37 100	48 900	54 800	70 000	81 800
M 14	115	25 900	35 600	32 200	43 700	50 600	66 700 d	74 800	95 500	112 000
M 16	157	35 300	48 700	44 000	59 700	69 100	91 000 d	102 000	130 000	152 000
M 18	192	43 200	59 500	53 800	73 000	84 500	115 000	-	159 000	186 000
M 20	245	55 100	76 000	68 600	93 100	108 000	147 000	-	203 000	238 000
M 22	303	68 200	93 900	84 800	115 000	133 000	182 000	-	252 000	294 000
M 24	353	79 400	109 000	98 800	134 000	155 000	212 000	-	293 000	342 000
M 27	459	103 000	142 000	128 000	174 000	202 000	275 000	-	381 000	445 000
M 30	561	126 000	174 000	157 000	213 000	247 000	337 000	-	466 000	544 000
M 33	694	156 000	215 000	194 000	264 000	305 000	416 000	-	570 000	673 000
M 36	817	184 000	253 000	229 000	310 000	359 000	490 000	-	678 000	792 000
M 39	976	220 000	303 000	273 000	371 000	429 000	586 000	-	810 000	947 000

Tabella 17: Aree e classi di resistenza in funzione della filettatura scelta.

Per  $F_t = 5000 \text{ N}$ ,  $n_b = 4$ ,  $n_d = 2$  e  $A_{res} = 20.1 \text{ mm}^2$ , la tensione  $\tau$  agente è pari a 31.09 MPa, di conseguenza si conclude che  $\tau < \tau_{b,adm}$ , le viti sono verificate.

## 5.4 Provino

La geometria del provino in termini di spessore e larghezza è stata discussa nei capitoli precedenti. Si è scelta una lunghezza pari a 350 mm, per garantire che il provino sia sempre in contatto con gli stampi per valori di corsa del braccio del motore elettrico pari a 60 mm. In questa sezione, a seguito del dimensionamento del sistema di aggancio al motore elettrico, viene considerato il caso in cui per tirare il provino venga utilizzato, oltre al sistema di serraggio a viti, un cilindro passante per le morse e per il provino, al fine di garantire più stabilità in fase di tiro.

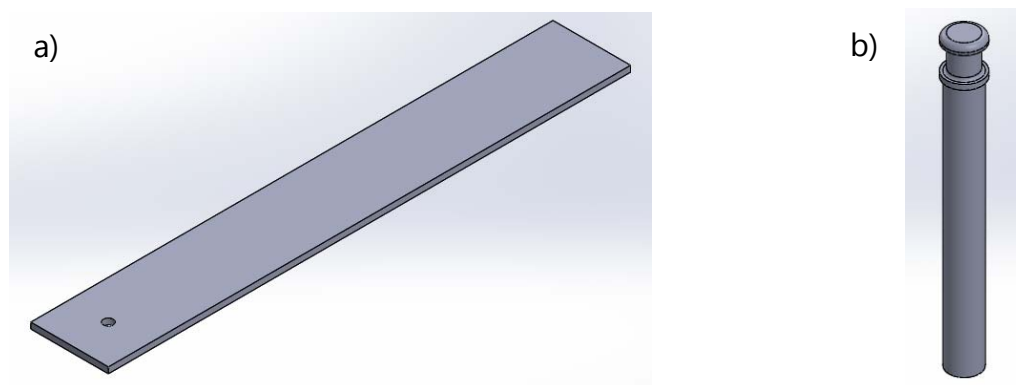


Figura 127: a) Vista isometrica provino, b) Cilindro passante.

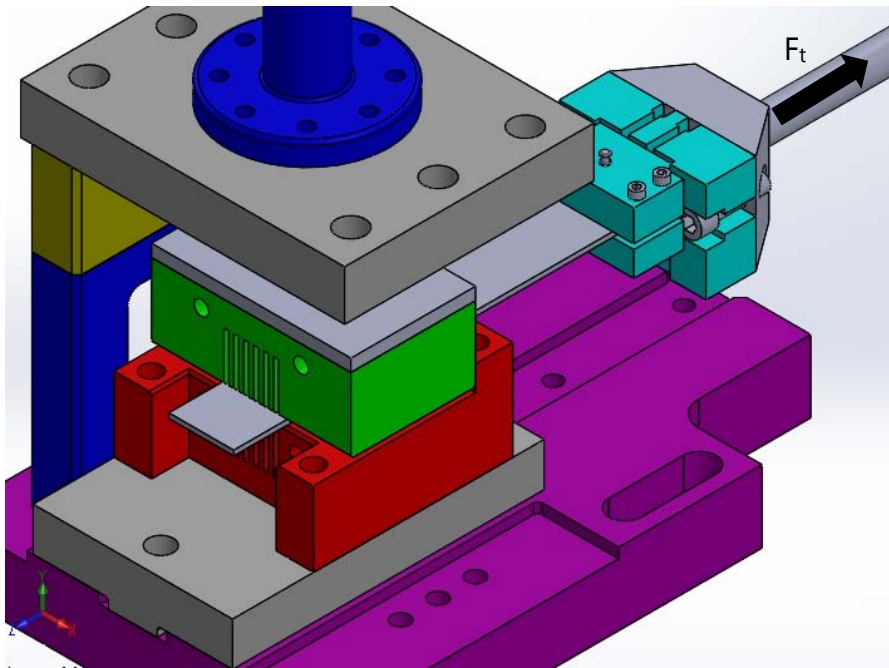


Figura 128: Schema della prova con tiro del motore elettrico.

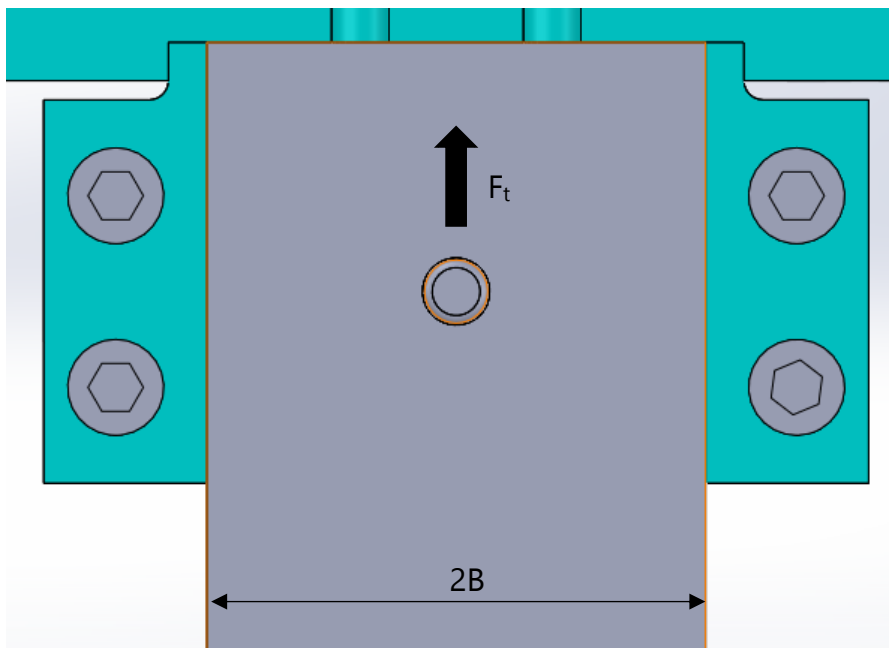


Figura 129: Forza agente sul provino.

#### 5.4.1 Verifica sezione netta

Per la verifica della sezione netta, si ipotizza una distribuzione uniforme delle tensioni sulla sezione come mostrato in figura:

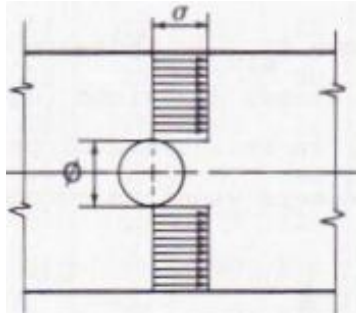


Figura 130: Andamento ipotizzato tensioni distribuite.

La tensione applicata si calcola come:

$$\sigma = \frac{F_t}{A_{net}}$$

Dove:

- $F_t$  è la forza tangenziale applicata al provino
- $A_{net}$  è la sezione netta considerata

La sezione netta risulta:

$$A_{net} = (2 \cdot B - \varnothing) \cdot t$$

Con  $t$  = spessore del provino e  $\varnothing = d + 1$  mm poiché siamo nel caso in cui il diametro nominale della vite è minore di 20 mm.

Avendo due configurazioni diverse del provino, una per l'attivazione di quattro selle ed una per l'attivazione di sei selle, viene scelta la geometria con la sezione netta minore, poiché a parità di materiale viene sottoposta ad una tensione più elevata.

Con una forza  $F_t = 5000$  N, un'area  $A_{net} = 116$  mm<sup>2</sup>, la tensione agente  $\sigma$  risulta pari a 43.1 MPa, che risulta minore della tensione di snervamento del materiale, perciò la sezione netta è verificata.

### 5.4.2 Verifica a rifollamento

Per la verifica a rifollamento, viene preso in considerazione il diametro nominale  $d$  della vite e lo spessore  $t$  del provino. Come nel caso precedente, la distribuzione di tensione viene considerata uniforme; in figura viene mostrata la distribuzione di tensione reale presente nel pezzo.

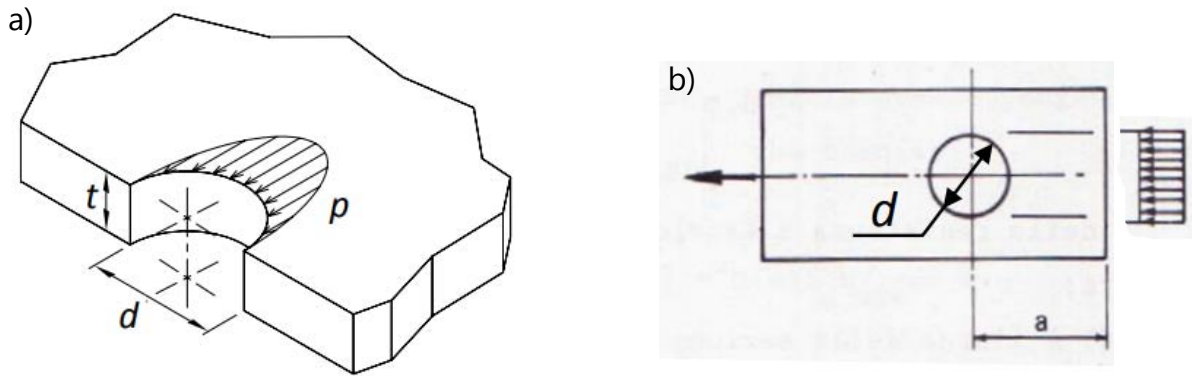


Figura 131: Distribuzione tensione: a) Tensione reale, b) Tensione uniforme.

Per la verifica si utilizza la seguente formula:

$$\sigma_{rif} = \frac{F_t}{d \cdot t} \leq \sigma_{rif,adm} = \alpha \cdot \sigma_{adm}$$

Con  $\alpha = a/d = 2$ .

Per i valori di forza, spessore e diametro citati precedentemente risulta una tensione di rifollamento  $\sigma_{rif} = 208.3 \text{ MPa} < \alpha \cdot \sigma_{adm} = 2 \cdot 250 = 500 \text{ MPa}$ , pertanto si può definire conclusa la verifica.



# Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è quello di sviluppare un sistema di serraggio elettromagnetico, integrabile all'interno di un sistema di serraggio meccanico già presente, per processi di deformazione di componenti metallici, in particolare per materiali magnetici. Tale sistema ha lo scopo di fungere da ausilio al sistema meccanico generando un campo magnetico in grado di interagire con il componente e imponendo una forza di attrazione verso gli stampi. In questo modo non solo è possibile ridurre le dimensioni del sistema di serraggio meccanico, ma è permessa una regolazione della forza impressa molto più rapida rispetto alle possibili regolazioni consentite nei classici sistemi meccanici, andando a variare la corrente passante per gli avvolgimenti che compongono il circuito elettrico.

Tramite un software di simulazione numerica preposto allo studio dei fenomeni elettromagnetici, si sono studiati ed ottimizzati vari aspetti del sistema elettromagnetico tra cui:

- Studio dei materiali adatti al sistema
- Studio della geometria dei componenti
- Studio delle pressioni e delle forze generate dal sistema
- Studio delle correnti necessarie a generare una forza apprezzabile e della loro distribuzione lungo il provino
- Studio dei livelli di saturazione magnetica raggiunta

Dalle simulazioni svolte si è ricavato il modello geometrico a cui associare la configurazione degli avvolgimenti per garantire il livello di corrente richiesto rimanendo all'interno dei limiti sulla tensione imponibile dal raddrizzatore Powerel presente in laboratorio, pari a 10 Volt. Una volta trovato il modello ottimale, si sono fatte alcune considerazioni di carattere pratico non valutabili dal software ma frutto dell'esperienza che hanno portato a delle modifiche del sistema. In figura viene mostrato l'andamento delle pressioni calcolate al software per la configurazione definitiva al variare della corrente impressa.



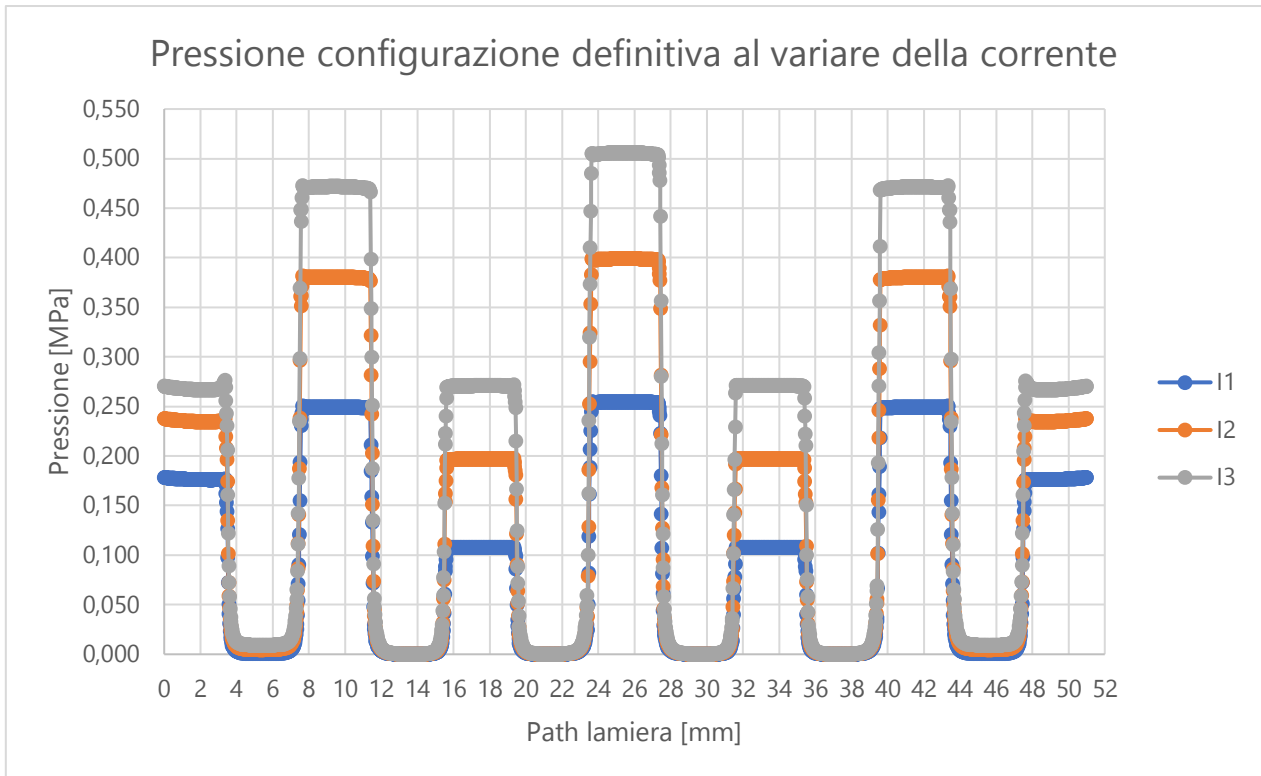


Figura 132: Pressioni configurazione definitiva:  $I_1 = 1000$  A,  $I_2 = 1500$  A,  $I_3 = 2000$  A.

In tabella vengono riportati i valori di forza e pressione riguardanti la configurazione con tutti gli avvolgimenti attivi e la configurazione con quattro avvolgimenti attivi. I valori di forza sono calcolati sul singolo stampo, pertanto il valore di forza totale risultante è doppio.

I [Amperes pire]	$P_{media}$ [MPa] N = 4	$P_{media}$ [MPa] N = 6	$P_{max}$ [MPa] N = 4	$P_{max}$ [MPa] N = 6	Forza [N] N = 4	Forza [N] N = 6
1000	0.348	0.195	0.480	0.299	568	492
1500	0.486	0.332	0.673	0.549	804	828
2000	0.576	0.431	0.776	0.701	948	1072

Successivamente, si è progettato il sistema di prova apportando delle modifiche alla macchina Strip Drawing Test già presente in laboratorio adattandola alle condizioni di prova desiderate. In appendice A si possono consultare i disegni tecnici riguardanti la progettazione del sistema di prova.

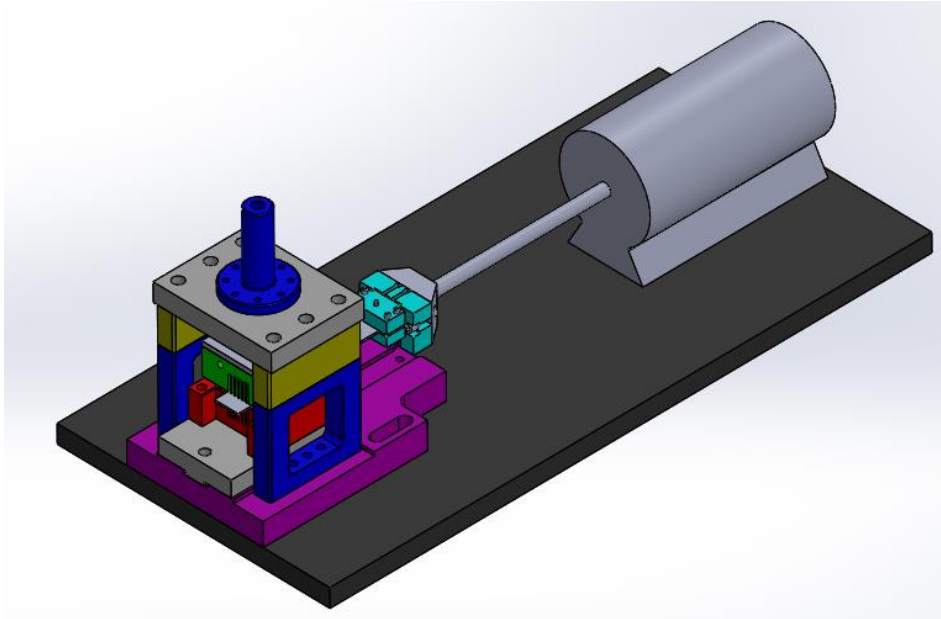


Figura 133: Modello integrale con motore elettrico schematizzato, vista isometrica.

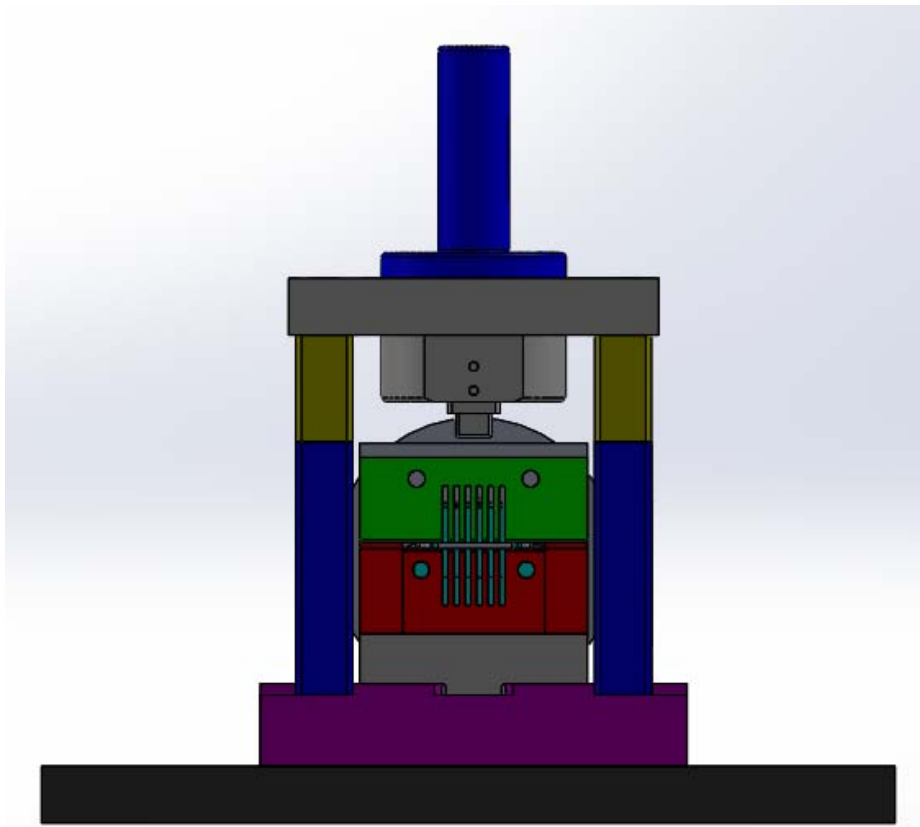


Figura 134: Modello integrale, vista frontale.



# Indice delle figure

Figura 1: Processi di lavorazione della lamiera.....	12
Figura 2: Diagramma tensione - deformazione prova di trazione.....	14
Figura 3: Strizione localizzata e diffusa.....	14
Figura 4: Anisotropia normale.....	15
Figura 5: Effetto "buccia d'arancia".....	16
Figura 6: Distribuzione tensioni residue nel processo di laminazione: a) Diametro rulli piccolo, plasticizzazione bordo con stato residuo di trazione in superficie, b) Diametro rulli grande, plasticizzazione cuore con stato residuo di compressione in superficie.....	17
Figura 7: Grafico tensione - deformazione ingegneristica al momento dello scarico del pezzo, con evidenziata la quota plastica rimanente.....	18
Figura 8: Ritorno elastico lamiera, posizione iniziale e finale.....	18
Figura 9: Schema processo di imbutitura.....	19
Figura 10: Stato tensionale processo di imbutitura.....	20
Figura 11: LDR e anisotropia.....	21
Figura 12: Stato tensionale processo di imbutitura.....	23
Figura 13: finestra di formatura.....	23
Figura 14: Processo di imbutitura con rompigrinza.....	24
Figura 15: Raggi di raccordo punzone e matrice: a) Rottura dovuta al raggio troppo ridotto della matrice, b) Rottura dovuta al raggio troppo ridotto del punzone.....	25
Figura 16: Imbutitura a 2 passaggi, il premilamiera dovrà essere inclinato di 45° nel secondo passaggio.....	26
Figura 17: Esempio imbutitura a passaggi multipli.....	27
Figura 18: Draw bending e componenti principali.....	28
Figura 19: Tipologie di mandrino.....	29
Figura 20: Wiper die.....	30
Figura 21: Componenti draw bending.....	30
Figura 22: Ritorno elastico lamiera, posizione iniziale e finale.....	31
Figura 23: Schema di funzionamento.....	33
Figura 24: Macchina per processi di imbutitura.....	34
Figura 25: Macchina clamp forming.....	35
Figura 26: Forze agenti nel processo.....	35
Figura 27: Esempio componente lavorato.....	36
Figura 28: Schematizzazione processo.....	37
Figura 29: Struttura sistema di serraggio.....	37

Figura 30: a) Setup prototipo verticale, b) Forza assiale e laterale misurate attivando solo un magnete per gruppo, c) Forza assiale e laterale misurate attivando tutti magneti.....	38
Figura 31: Scheda tecnica magnete permanente al neodimio.....	39
Figura 32: Schema sistema elettromagnetico con avvolgimento.....	39
Figura 33: Campo magnetico indotto dalla corrente.....	40
Figura 34: Elettromagneti con geometria a barra.....	40
Figura 35: Scheda tecnica elettromagnete a barra.....	41
Figura 36: Schema elettroformatura [15]. .....	42
Figura 37: Forze in gioco nel processo.....	42
Figura 38: Schema di funzionamento elettroformatura per attrazione.....	43
Figura 39: Andamento della corrente nei due circuiti, corrente combinata.....	43
Figura 40: Schema semplificato sella elettromagnetica.....	48
Figura 41: Impostare l'applicazione Magneto Static 2D.....	49
Figura 42: Creazione "Infinite Box". .....	50
Figura 43: Schizzo iniziale geometria.....	51
Figura 44: Parametri geometrici. ....	52
Figura 45: Curva di prima magnetizzazione di ARMCO_M22_DC.....	53
Figura 46: Curva di prima magnetizzazione di FLU_STEEL_1010_XC10.....	54
Figura 47: Regioni che compongono il modello.....	56
Figura 48: Opzione per passare dalle impostazioni geometriche alle impostazioni della mesh.....	57
Figura 49: Aided mesh.....	58
Figura 50: Mesh modificata.....	59
Figura 51: Dettaglio mesh nella zona della lamiera e delle cave.....	60
Figura 52: Impostazione nuovo scenario.....	61
Figura 53: Parametri geometrici.....	62
Figura 54: Creazione path.....	64
Figura 55: Path pressione totale.....	65
Figura 56: Distribuzione isovalori dell'induzione magnetica B.....	66
Figura 57: Grafico delle pressioni al variare della corrente.....	67
Figura 58: Grafico induzione magnetica al variare della corrente.....	68
Figura 59: Andamento isolinee nel dominio.....	69
Figura 60: Dettaglio isolinee nella zona della lamiera.....	69
Figura 61: Isolinee lamiera in alluminio.....	70
Figura 62: Isolinee lamiera in acciaio C10.....	71
Figura 63: Pressioni al variare del materiale della lamiera.....	71
Figura 64: Grafici andamento pressioni al variare di D: a) D = 2 mm, b) D = 4 mm, c) D = 6.5 mm.....	74
Figura 65: Induzione magnetica al variare di D.....	74
Figura 66: Pressione massima al variare dello spessore.....	75

Figura 67: Confronto isovalori: a) Spess = 2 mm, b) Spess = 4 mm. ....	76
Figura 68: Andamento pressione sul path al variare della corrente. ....	77
Figura 69: Pressione sul path al variare dello spessore. ....	77
Figura 70: Grafico andamento pressione massima al variare dei parametri L e SPESS. ....	80
Figura 71: Geometria modello, L = SPESS = 4 mm. ....	81
Figura 72: a) Configurazione 1 b) Configurazione 2 c) Configurazione 3 d) Configurazione 4 .....	82
Figura 73: Andamento isolinee al variare della configurazione dei versi della corrente: a) Config. 1, b) Config 2, c) Config 3, d) Config 4. ....	84
Figura 74: grafico andamento pressioni al variare della disposizione di corrente nelle cave. .....	85
Figura 75: Distribuzione isovalori induzione magnetica B al variare della configurazione: a) Config. 1, b) Config 2, c) Config 3, d) Config 4. ....	87
Figura 76: Andamento pressione massima al variare di T e I. ....	89
Figura 77: Andamento pressione lungo la lamiera al variare del traferro. ....	90
Figura 78: Schema per N = 6. ....	91
Figura 79: Andamento isolinee per N = 6. ....	91
Figura 80: Confronto path lamiera al variare della corrente: a) N = 4, b) eN = 6 ....	93
Figura 81: Simulazione selle inattive. ....	94
Figura 82: Curva di prima magnetizzazione di FLU_STEEL_1010_XC10. ....	98
Figura 83: parametri geometrici. ....	98
Figura 84: Grafico andamento pressione massima al variare dei parametri L e SPESS. ....	99
Figura 85: Andamento pressioni path lamiera per una corrente $I_1 = 1000$ Amperespire. ..	100
Figura 86: Andamento pressione massima al variare di T e I. ....	101
Figura 87: Schema per N = 6. ....	102
Figura 88: Andamento path pressioni lamiera per una corrente $I_1 = 1000$ Amperespire. ..	103
Figura 89: Andamento isolinee e path di pressione in caso di lamiera sbilanciata. ....	104
Figura 90: Andamento pressione path lamiera allargata al variare della corrente I. ....	105
Figura 91: Confronto andamento path pressioni. ....	106
Figura 92: a) Configurazione versi corrente scelta, b) Andamento isolinee configurazione scelta. ....	107
Figura 93: Macchina Strip Drawing Test. ....	112
Figura 94: Dettaglio carro – punzone. ....	113
Figura 95: Punzone a geometria piana e cilindrica. ....	113
Figura 96: Contatto provino punzone semicilindrico. ....	114
Figura 97: Schema di funzionamento della macchina. ....	115
Figura 98: Vista frontale macchina di prova. ....	115
Figura 99: Vista in sezione della macchina, con indicate le componenti principali. ....	116
Figura 100: Cella di carico per la misura di $F_n$ e $F_t$ . ....	116
Figura 101: a) Aggancio snodato carrello, b) Aggancio snodato motore elettrico. ....	117

Figura 102: a) Vista frontale, b) Vista posteriore con sbarre di rame.....	118
Figura 103: a) Vista frontale, b) Vista laterale, c) Vista isometrica.....	121
Figura 104: Spessore accoppiato con piastra superiore.....	122
Figura 105: Modifiche sistema a) Vista isometrica, b) Vista frontale, c) Vista laterale.....	122
Figura 106: Tipologie di applicazione di carico: a) Peso proprio, b) Viti, c) Stampo.....	123
Figura 107: Modello stampo inferiore.....	124
Figura 108: Accoppiamento stampi: a) Vista laterale, b) Vista superiore.....	125
Figura 109: Smussi 2x45° stampo superiore.....	125
Figura 110: Geometria blocchi: a) Vista superiore, b) Vista frontale.....	126
Figura 111: Esempio andamento tensioni di taglio in sezione rettangolare.....	127
Figura 112: Sezione con relative altezze $y_{g1}$ $y_{g2}$ dei baricentri rispetto all'origine.....	128
Figura 113: Canali di raffreddamento con attacchi, diametro $G \frac{1}{4}$ .....	129
Figura 114: Spazio disponibile all'interno dell'area di lavoro della macchina.....	130
Figura 115: Braccio motore elettrico ad altezza fissa.....	130
Figura 116: Piatto di aggancio posizionato su piastra base.....	131
Figura 117: Vista superiore accoppiamento piatto di aggancio - piastra base.....	132
Figura 118: Raggi di raccordo e altezza piastra.....	132
Figura 119: Braccio motore elettrico con aggancio al carrello.....	133
Figura 120: a) Vista frontale con tasca per collegamento al braccio del motore elettrico, b) Vista posteriore con tasca per collegamento a morsa superiore.....	134
Figura 121: Morsa superiore vista isometrica.....	135
Figura 122: Accoppiamento morsa – aggancio.....	135
Figura 123: Morsa inferiore vista isometrica.....	136
Figura 124: Sistema di aggancio, vista frontale.....	136
Figura 125: Sistema di aggancio con forze in gioco, vista laterale.....	137
Figura 126: Diametri caratteristici collegamento filettato.....	138
Figura 127: a) Vista isometrica provino, b) Cilindro passante.....	139
Figura 128: Schema della prova con tiro del motore elettrico.....	140
Figura 129: Forza agente sul provino.....	140
Figura 130: Andamento ipotizzato tensioni distribuite.....	141
Figura 131: Distribuzione tensione: a) Tensione reale, b) Tensione uniforme.....	142
Figura 132: Pressioni configurazione definitiva: $I_1 = 1000$ A, $I_2 = 1500$ A, $I_3 = 2000$ A.....	145
Figura 133: Modello integrale con motore elettrico schematizzato, vista isometrica.....	146
Figura 134: Modello integrale, vista frontale.....	146
Figura 135: Assieme 6 cave.....	156
Figura 136: Stampo inferiore.....	157
Figura 137: Stampo superiore.....	158
Figura 138: Piatto di aggancio.....	159
Figura 139: Base aggancio motore.....	160
Figura 140: Morsa inferiore.....	161

Figura 141: Morsa superiore.....	162
Figura 142: Alzata castello laterale.....	163
Figura 143: Provino lamiera 6 selle.....	164
Figura 144: Provino lamiera 4 selle.....	165



# Indice delle tabelle

Tabella 1: Parametri magnetici materiali. ....	53
Tabella 2: Parametri geometrici iniziali. ....	62
Tabella 3: Andamento pressione media e massima al variare di D. ....	72
Tabella 4: Impostazioni curva 3D. ....	79
Tabella 5: Tabella riassuntiva dei parametri riguardanti la scelta della distribuzione dei versi della corrente.....	88
Tabella 6: Confronto N = 4 e N = 6. ....	93
Tabella 8: Caratteristiche magnetiche dei materiali utilizzati.....	97
Tabella 9: composizione chimica acciaio C10.....	97
Tabella 10: Elenco parametri geometrici simulazione. ....	100
Tabella 11: Parametri geometrici per N = 6. ....	101
Tabella 12: Confronto N = 4 e N = 6. ....	103
Tabella 13: Confronto forze e pressioni tra lamiera standard e lamiera allargata. ....	106
Tabella 14: Parametri geometrici finali.....	107
Tabella 7: Soluzione proposte configurazione avvolgimenti. ....	109
Tabella 16: Parametri geometrici finali.....	124
Tabella 17: Tensioni ammissibili a seconda della classe di vite.....	137
Tabella 18: Aree e classi di resistenza in funzione della filettatura scelta. ....	139

# Bibliografia

- [1] *Formabilità a caldo di leghe di alluminio serie 6000 e 7000 di interesse automotive*, Elisa Daniela De Boni, Stefania Bruschi, Enrico Simonetto.
- [2] *Prediction of Crystallographic Texture Evolution and Anisotropic Stress-strain Response during Large Plastic Deformation in  $\alpha$ -Titanium Alloys*, Xianping Wu.
- [3] *Origine delle tensioni residue: deformazioni plastiche e lavorazioni meccaniche*, M. Boniardi, C. Tagliabue, R. Venturini.
- [4] *Sviluppo di una piattaforma giroscopica per la misura del ritorno elastico nel processo di deformazione di tubi metallici*, Enrico Simonetto, Andrea Ghiotti.
- [5] *Elastic-plastic analysis of tube bending*, H.A. Al-Qureshi.
- [6] *Formability and fracture in deep drawing sheet metals: Extended studies for pre-strained anisotropic thin sheets*, Shamik Basak, Sushanta Kumar Panda, Myoung-Gyu Lee.
- [7] *Stampaggio a freddo – imbutitura*, Marco Raimondi, Università Carlo Cattaneo.
- [8] *Utilization of Forming Tool with Variable Blankholder Force for Drawing of Al Alloys*, P. Solfronk, J.Sobotka.
- [9] *CNC Hydraulic Multipoint Blankholder System for Sheet Metal Forming Presses*, K. Siegert, E. Doege.
- [10] *Imbutitura e stampaggio lamiera*, Università di Cassino.
- [11] *A novel hybrid clamping system for sheet metals and thin walled structures*, Uwe Teichera, Sebastian Pirlb, Andreas Nestlerb, Arvid Hellmicha, Steffen Ihlenfeldt.
- [12] *The theoretical and experimental investigation of blank holder forces plate effect in deep drawing process of AL 1050 material*, H. Ibrahim Demircia, Mustafa Yasbara, Kemal Demirayb, Mehmet Karali.
- [13] *Clamp forming of local features on sheet metals*, Zhiheng Zhanga, Zhenye Lianga, Dayong Lia, Shichao Ding.
- [14] *Magnetic attraction forces between permanent magnet group arrays in a mobile magnetic clamp for pocket machining*, A.Mahmud, J.R.R.Mayer, L.Baron.
- [15] *Electromagnetic forming – A review*, V. Plisk, D. Risch, B.L. Kinsey, A.E. Tekkaya, M. Kleiner.

- [16] *Design and implementation of tube bulging by an attractive electromagnetic force*, Qi Xiong, Hongtao Tanga, Muxue Wang, Hao Huang, Li Qiu, Kun Yu, Qi Chen.
- [17] *Studio di sistemi di lubrificazione a base grafitica nello stampaggio a caldo di lamiere in lega di alluminio*, Marco Bellin, Università degli Studi di Padova.
- [18] *Calcolo delle unioni bullonate: verifiche al taglio*, Sergio Baragetti, Università degli studi di Bergamo.

# Appendice

Vengono riportati in appendice i disegni tecnici relativi alla progettazione del sistema prova. I disegni sono relativi solamente ai componenti aggiuntivi per garantire il corretto svolgimento della prova.

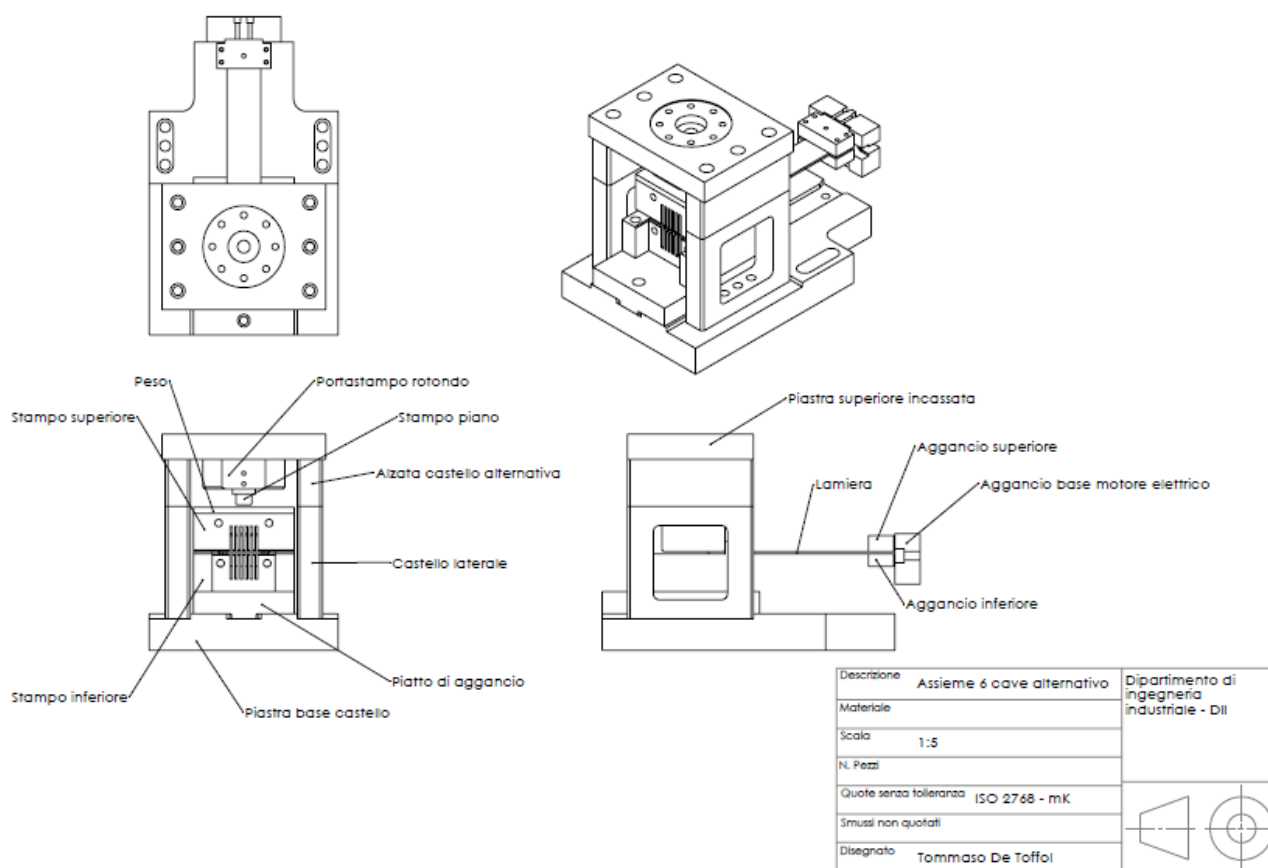
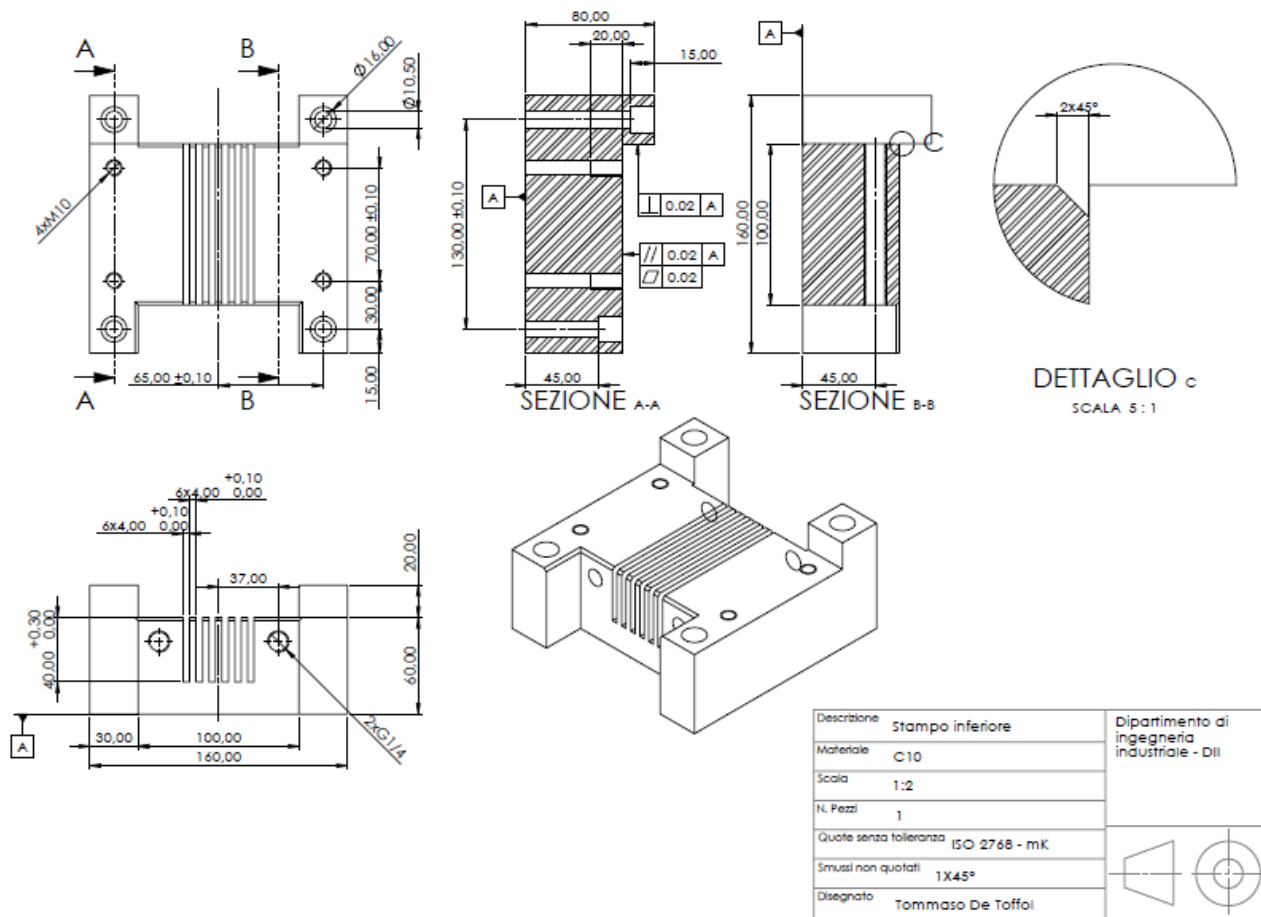
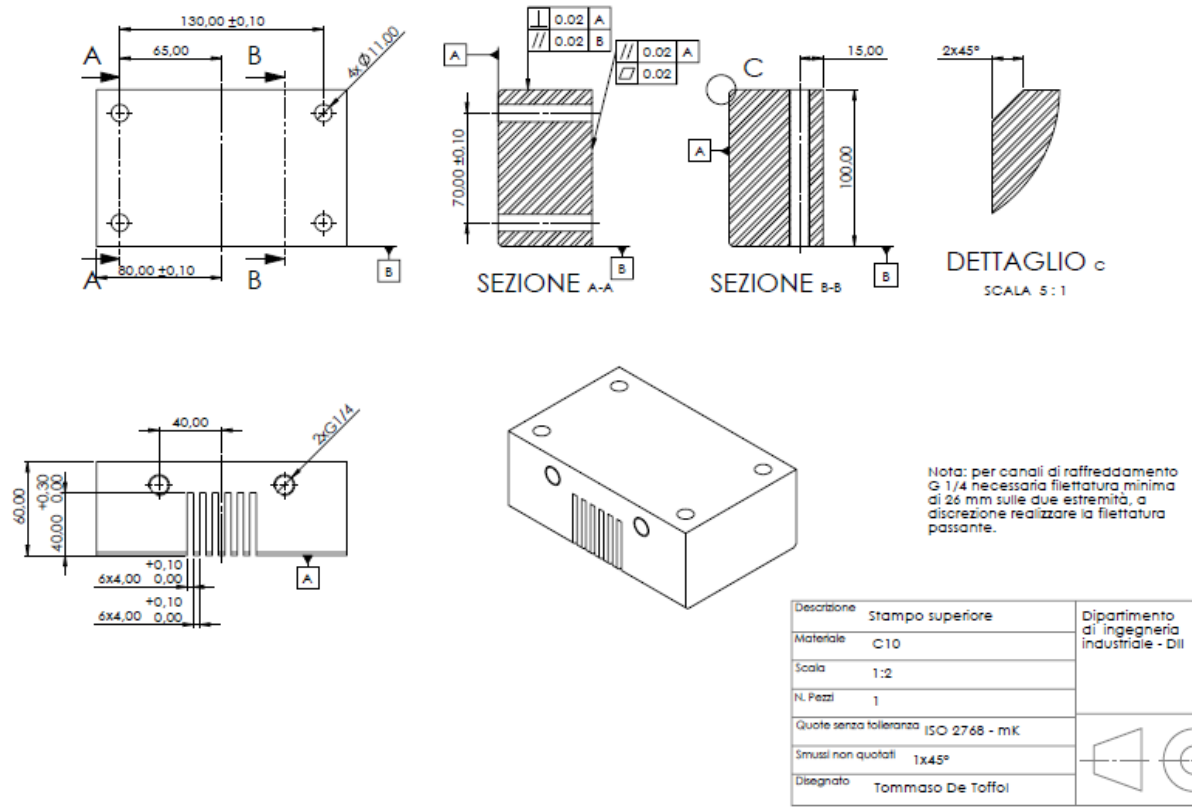


Figura 135: Asieme 6 cave.



Descrizione	Stampo inferiore	Dipartimento di ingegneria industriale - DII
Materiale	C10	
Scala	1:2	
N. Pezzi	1	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1X45°	
Disegnato	Tommaso De Toffoli	

Figura 136: Stampo inferiore.



Descrizione	Stampo superiore	Dipartimento di Ingegneria Industriale - DII
Materiale	C10	
Scala	1:2	
N. Pezzi	1	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1x45°	
Disegnato	Tommaso De Toffoli	

Figura 137: Stampo superiore.

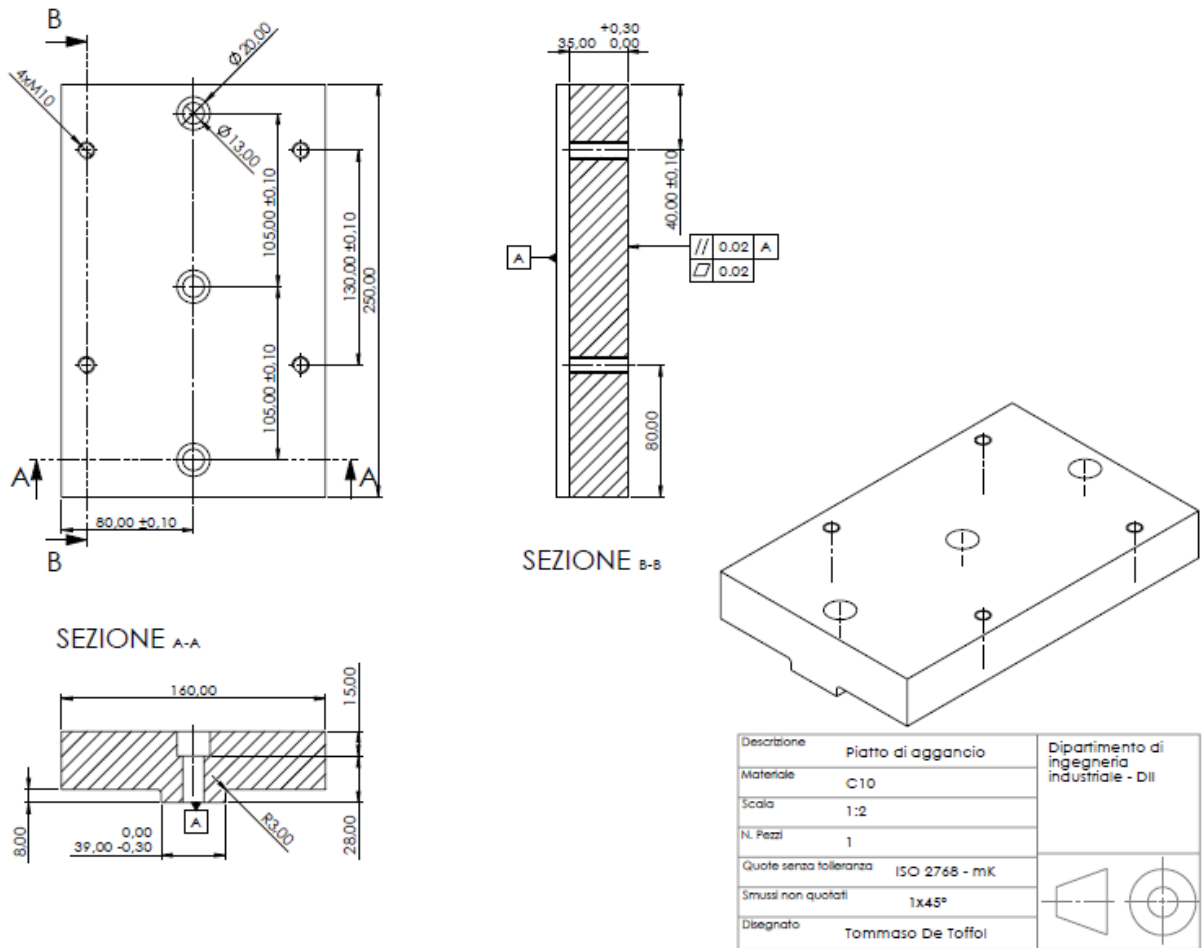
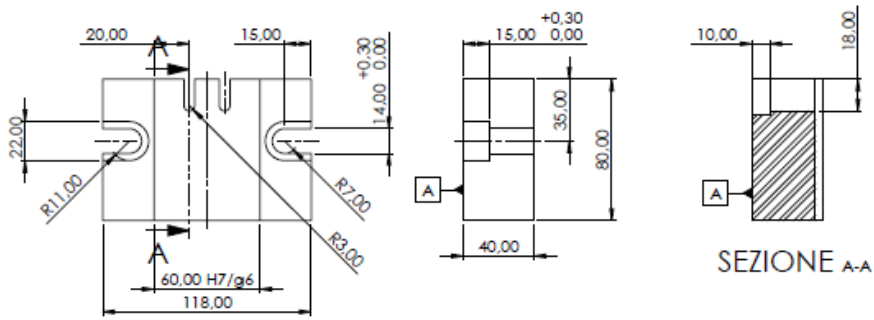
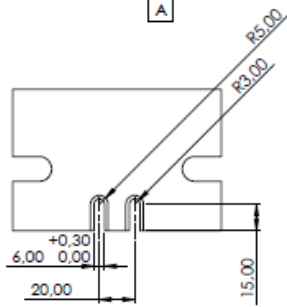
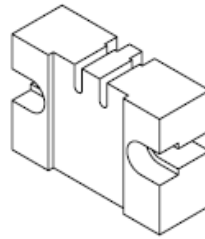
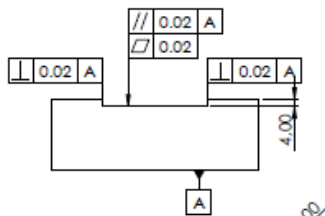


Figura 138: Piatto di aggancio.



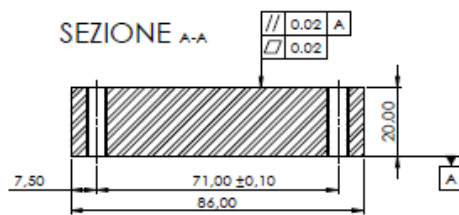
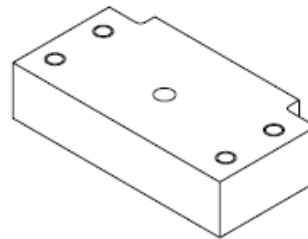
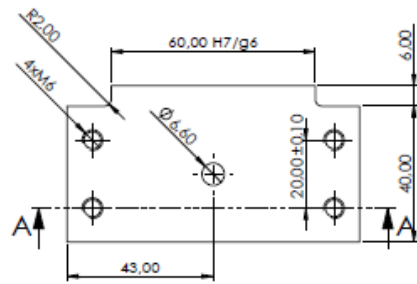
SEZIONE A-A



Descrizione	Base aggancio motore elettrico	Dipartimento di ingegneria industriale - DII
Materiale		
Scala	1:2	
N. Pezzi	1	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1x45°	
Disegnato	Tommaso De Toffol	

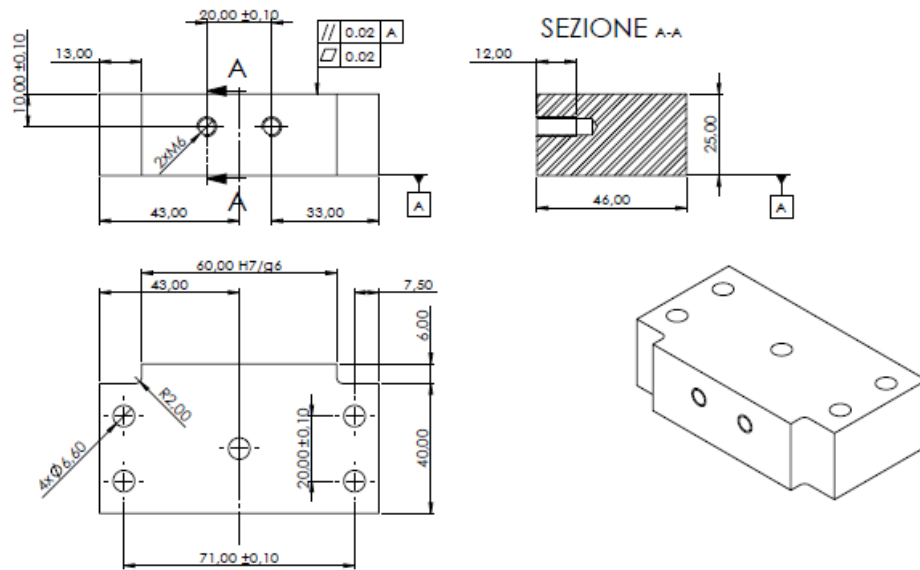
Figura 139: Base aggancio motore.





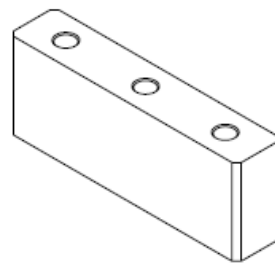
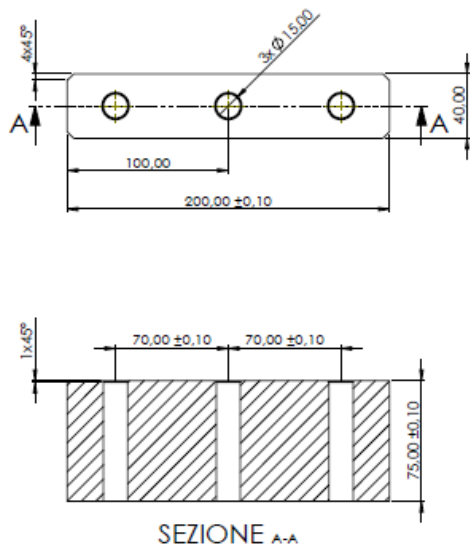
Descrizione	Aggancio inferiore	Dipartimento di ingegneria industriale - DII
Materiale		
Scala	1:1	
N. Pezzi	1	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1x45°	
Disegnato	Tommaso De Toffoli	

Figura 140: Morsa inferiore.



Descrizione	Aggancio superiore	Dipartimento di ingegneria industriale - DII
Materiale		
Scala	1:1	
N. Pezzi	1	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1x45°	
Disegnato	Tommaso De Toffoli	

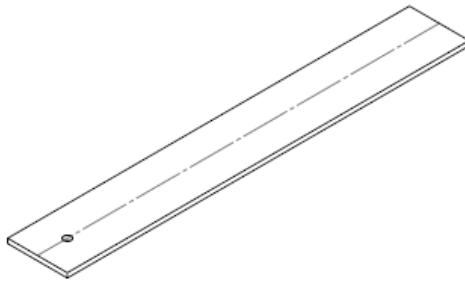
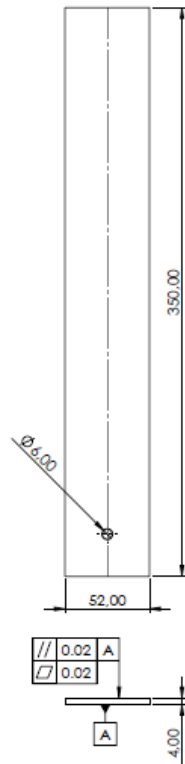
Figura 141: Morsa superiore.



Nota: con un'altezza pari a 75 mm, ed un peso di spessore stimato pari a 10 mm, tra il peso e lo stampo piano della strip intercorrono 4 mm, da valutare se sufficienti.

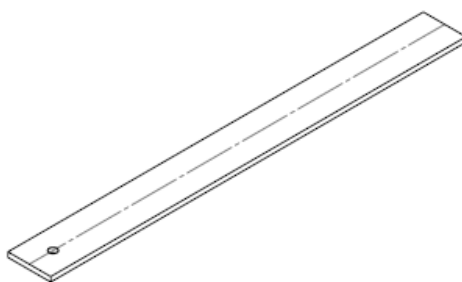
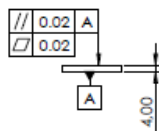
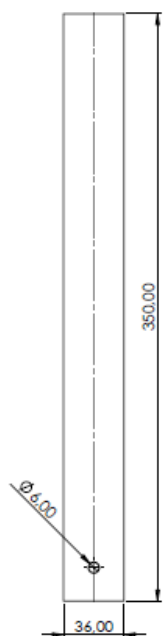
Descrizione	Alzata castello alternativa	Dipartimento di ingegneria industriale - DII
Materiale		
Scala	1:2	
N. Pezzi	2	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1x45°	
Disegnato	Tommaso De Toffoli	

Figura 142: Alzata castello laterale.



Descrizione	Lamiera 6 cave	Dipartimento di ingegneria industriale - DII
Materiale	C10	
Scala	1:2	
N. Pezzi	1	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1x45°	
Disegnato	Tommaso De Toffol	

Figura 143: Provino lamiera 6 selle.



Descrizione	Lamiera 4 cave	Dipartimento di ingegneria industriale - DII
Materiale	C10	
Scala	1:2	
N. Pezzi	1	
Quote senza tolleranza	ISO 2768 - mK	
Smussi non quotati	1x45°	
Disegnato	Tommaso De Toffol	

Figura 144: Provino lamiera 4 selle.