



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA  
**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

## **Relazione per la prova finale**

*Analisi FEM di componente strutturale soggetto a flessione,  
su impianto per la produzione di sigilli di sicurezza*

Tutor Universitario: Nicola Petrone

Tutor Aziendale: Roberto Spagnolo

Michela Lezuo  
1217265

Anno Accademico 2021/2022

# INDICE

Presentazione Azienda .....	2
Introduzione .....	2
Schema Impianto .....	3
Problema .....	5
Scopo Dello Studio .....	7
Procedura D'analisi .....	7
Nuova Proposta .....	19
Analisi Rigidezza.....	24
Conclusioni .....	25
Appendice.....	27
Fonti bibliografiche e sitografia.....	30

## ABSTRACT

A partire da un impianto per la produzione di sigilli di sicurezza, il quale presenta un problema di flessione su parte della struttura (la quale compromette non solo l'estetica dei sigilli ma anche la resistenza stessa dell'impianto di produzione), si effettua un'analisi FEM per capire come migliorare la rigidità del particolare.

Pertanto, l'obiettivo dello studio è individuare una configurazione della struttura, che permetta di minimizzare la freccia di inflessione.

In primo luogo, si propone di irrigidire la struttura congruamente con gli ingombri messi a disposizione dall'impianto su cui è montata; lo studio dimostra che rispettando gli spazi disponibili non risulta possibile ridurre la freccia di inflessione ulteriormente.

Dunque, si propone una nuova configurazione a prescindere dagli ingombri ad ora disponibili, nell'ottica della realizzazione di un nuovo impianto.

In questo modo è possibile raggiungere una freccia di inflessione notevolmente minore rispetto alla situazione iniziale.

Nel corso dello studio è stato utilizzato il software di simulazione FEM *SolidWorks Simulation* e *Matlab*. Per ciascuna prova effettuata vengono modificate le features del particolare facendo riferimento ai fondamenti di Costruzione di Macchine quali: principio di *De Saint Venant* e formula di *Navier*.

Dunque, per minimizzare la freccia di inflessione si agisce principalmente in due modi: diminuendo il momento flettente e aumentando la sezione resistente.

Il particolare in questione è la struttura di sostegno su cui viene montata la pressa per la ripiegatura dei bordi dei sigilli.

## Presentazione Azienda

Il tirocinio si è svolto presso *Rend Srl*: studio tecnico di progettazione meccanica, modellazione 2D e 3D, design e sviluppo prodotto per conto terzi.

L'azienda si occupa di studi di fattibilità, industrializzazione del prodotto attraverso progettazione meccanica e modellazione di superfici in svariati ambiti tra cui: attrezzature per l'industria, alle macchine agricole, utensili, per la ristorazione e a impianti per il packaging nonché settore medicale e trattamento dell'aria.

Lo studio di seguito presentato fa riferimento a un impianto per la produzione di un prodotto dell'azienda partner *Oniloc Srl* produttrice italiana di sigilli, buste di sicurezza e altri prodotti complementari.

## Introduzione

I sigilli di sicurezza sono dispositivi progettati come indicatori visivi di manomissione per evitare il furto e la contraffazione. Trovano impiego negli ambiti più svariati: dai contatori elettrici alle spedizioni e-commerce.



Di seguito si riportano gli step per la realizzazione dei sigilli di sicurezza:

1. Pressofusione di dieci sigilli collegati fra loro tramite pressa a iniezione;
2. Un robot sposta i semilavorati dall'uscita dello stampo alla linea di avanzamento;
3. Dei vibratori allineano delle placchette metalliche da inserire all'interno dei sigilli per bloccare lo scorrimento una volta chiusi;
4. Inserimento della copertura in plastica;
5. Tramite saldatura a ultrasuoni la copertura viene unita al sigillo per contenere la placchetta metallica;
6. Una pressa idraulica ripiega i bordi dei sigilli;
7. Stampa iscrizioni (loghi o codici a barre);
8. Confezionamento;

## Schema Impianto

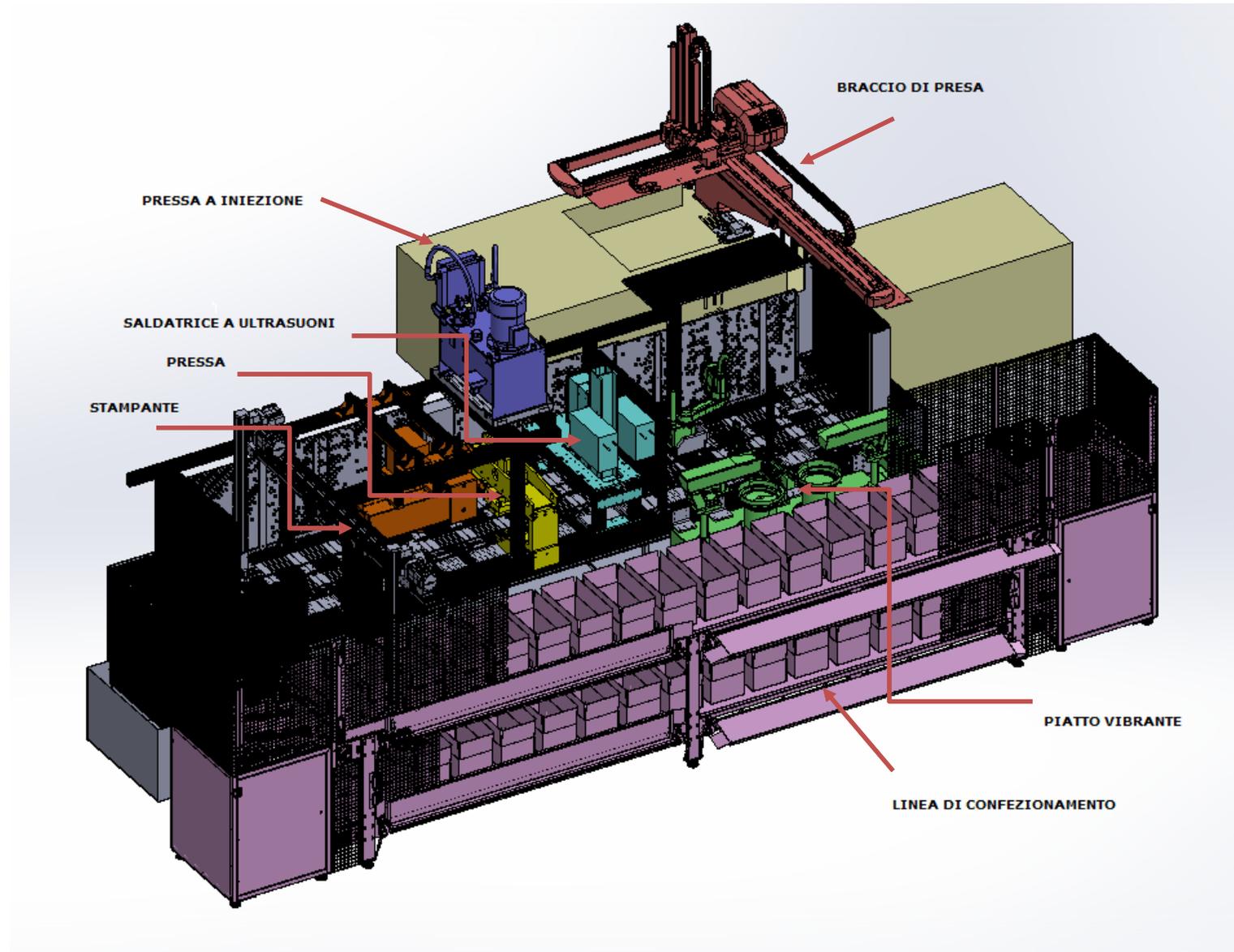


Fig. 1 Impianto completo

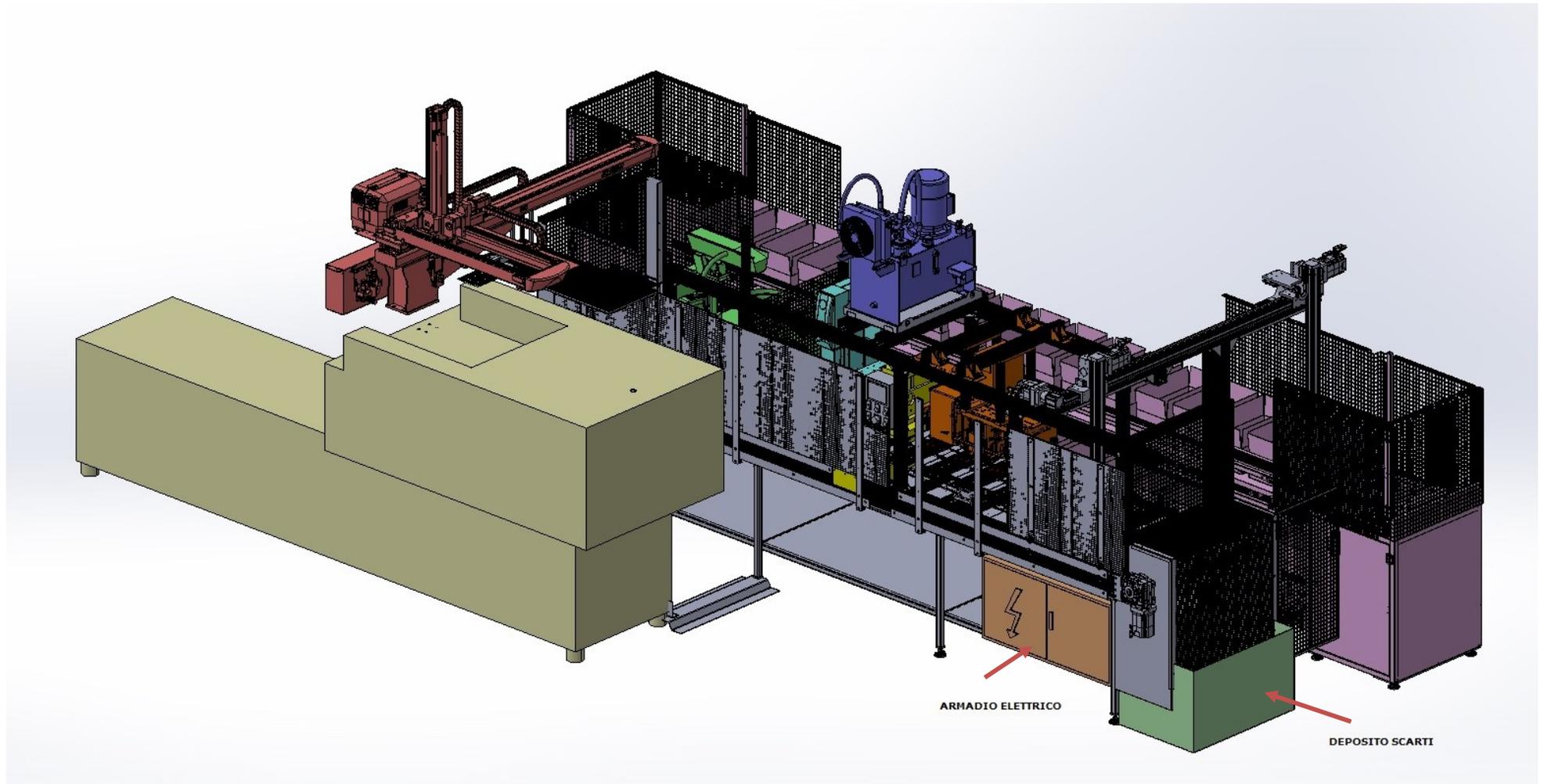
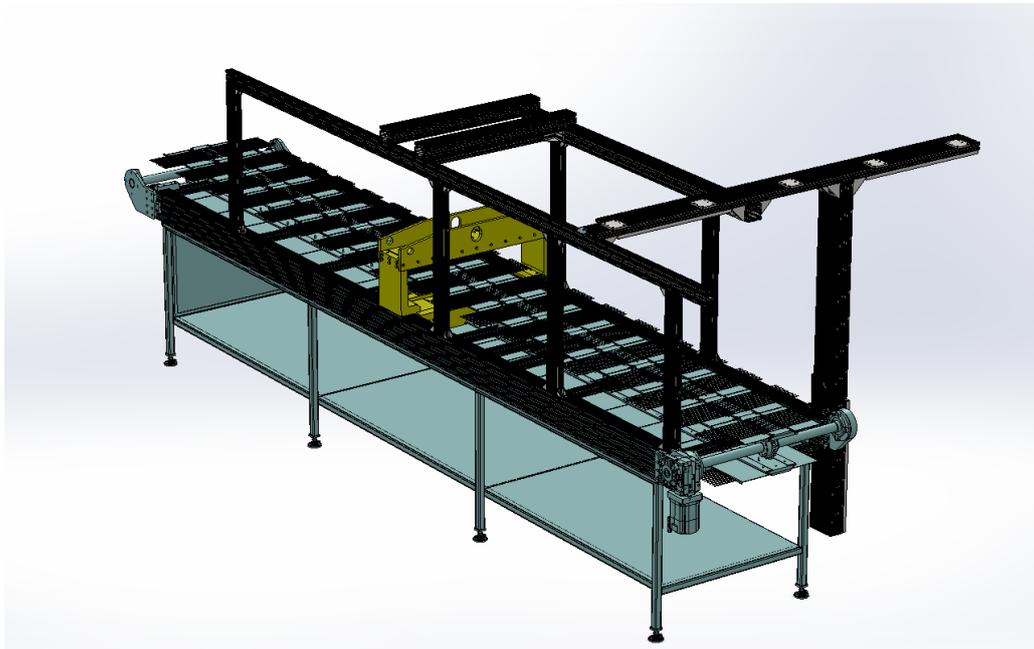
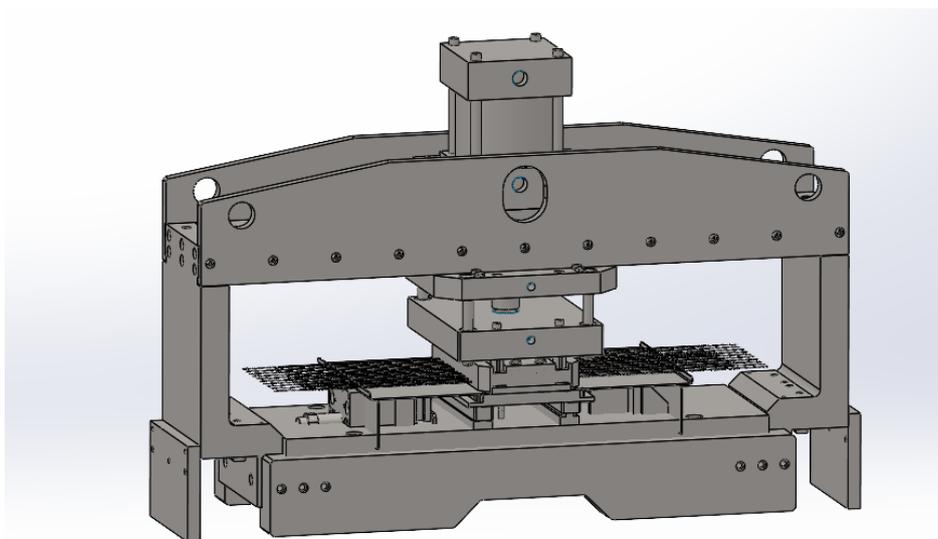


Fig. 2 Impianto completo



*Fig. 3 Layout semplificato*



*Fig. 4 Struttura pressa*

## **Problema**

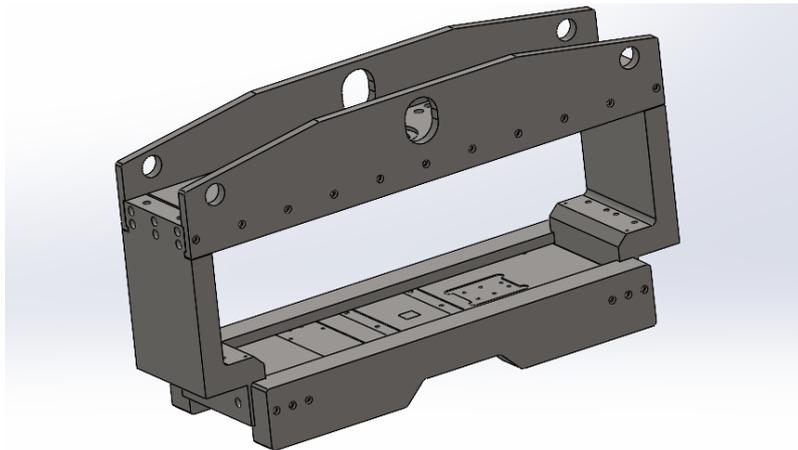
La pressa in questione sviluppa una forza di circa 12 t (122656 N).

Come visibile anche dalla figura sottostante si osserva che in produzione i sigilli centrali presentano una chiusura peggiore rispetto a quelli laterali. Misurando la freccia di inflessione di evince che la struttura si deforma di circa 5 mm complessivamente (trave superiore e inferiore) lungo l'asse verticale.

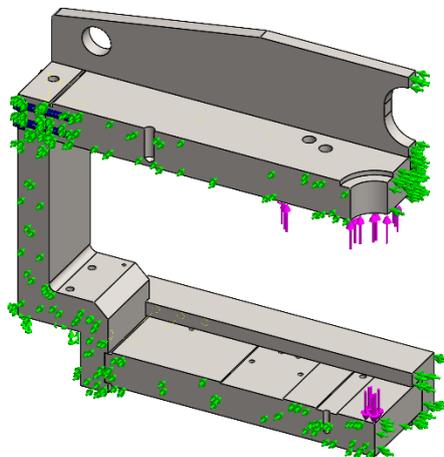


*Fig. 5 Sigilli di sicurezza con ingrandimento difetti*

Di seguito la rappresentazione della struttura in esame e dello schema di analisi completo di carichi agenti e vincoli:



*Fig. 6 Struttura in analisi a seguito del defeaturing, la deformazione a flessione avviene lungo l'asse y*



*Fig. 7 Struttura "tagliata", per semplificare l'analisi si sfrutta la simmetria del componente analizzandone un quarto*

## Scopo Dello Studio

Si effettuano varie analisi per individuare il compromesso migliore in termini di miglioramento resistenziale e ingombri disponibili nell'impianto. Come scopo ultimo si intende trovare la geometria che permette di evitare completamente flessione, a prescindere dagli spazi ad ora messi a disposizione dall'impianto.

## Procedura D'analisi

Per replicare il modello della struttura si fanno le seguenti ipotesi:

- Si concentra l'analisi in particolare sullo spostamento verticale lungo l'asse y;
- La struttura viene assunta come isolata dal resto dell'impianto su cui è montata, si applica quindi vincolo alle tre traslazioni solo sulla superficie di appoggio (vedi Fig.7);
- La forza esercitata dal pistone della pressa agisce solo sulle due piastre superiore e inferiore (vedi Fig.7);

Inoltre, per ogni analisi si verifica che siano correttamente interpretati masse e volumi.

FASI:

1. Defeaturing di tutti i componenti trascurabili ai fini dell'analisi i quali "appesantiscono" l'analisi del calcolatore (non vengono per esempio incluse le piastrine su cui si appoggiano i sigilli);
2. Preparazione dell'analisi: da ambiente parte si definiscono le superfici su cui applicare i carichi tramite *divisione delle facce*;
3. Assegnazione del materiale (S235JR);
4. Assegnazione delle connessioni tra i corpi (vengono definite le interazioni fra le superfici adiacenti del particolare);
5. Assegnazione dei vincoli;
6. Creazione mesh;
7. Avvio dell'analisi;
8. Visualizzazione animazione e risultati

## DEFEATURING

Per alleggerire la fase di calcolo si semplifica il componente da analizzare compatibilmente con le analisi da effettuare. Per esempio, in un'analisi a fatica non è opportuno trascurare eventuali raggi di raccordo presenti in quanto questi influenzano in modo importante le concentrazioni di tensioni e quindi il comportamento a fatica.

Rispetto alla struttura originale presentata in Fig.7 sono stati eliminati per esempio, i blocchetti di collegamento tra le piastre laterali e la piastra inferiore una volta inserite le traverse inferiori, essendo già garantito il collegamento. La struttura presa in considerazione è presentata in Fig.6;

## CARICHI AGENTI

La macchina attualmente in funzione si deforma sotto l'azione di un pistone idraulico che esercita una forza di 122656 N (12 t) sulla piastra inferiore; tuttavia, si ha reazione vincolare agente anche sulla piastra superiore. La flessione si manifesta con una freccia totale di 2,6 mm, (precedentemente 5mm)<sup>1</sup>.

La forza viene applicata idealmente in modo concentrato, ma per avvicinarsi maggiormente alla realtà si presuppone una distribuzione su superficie 20x20 sulla piastra inferiore e su superficie 300x180 sulla piastra superiore. Non essendo il carico puntiforme ci si pone dunque in una situazione peggiorativa.

## VINCOLI

Vengono vincolate solo le tre traslazioni sulle due facce inferiori delle piastre laterali, per considerare la macchina come isolata dall'ambiente.

Si attiva inoltre l'opzione "*molle morbide*" al fine di evitare instabilità; tale opzione aumenta la rigidità globale agendo sulla matrice di rigidità garantendo quindi che il modello sia completamente vincolato i vincoli vengano correttamente interpretati senza incorrere in casi di singolarità attivando la stabilità numerica. Tutti i carichi vengono quindi assorbiti dalla struttura senza essere scaricati sui profilati in alluminio sottostanti.

I vincoli sono la principale causa di errore all'interno dell'analisi perché da un punto di vista pratico sono difficilmente identificabili.

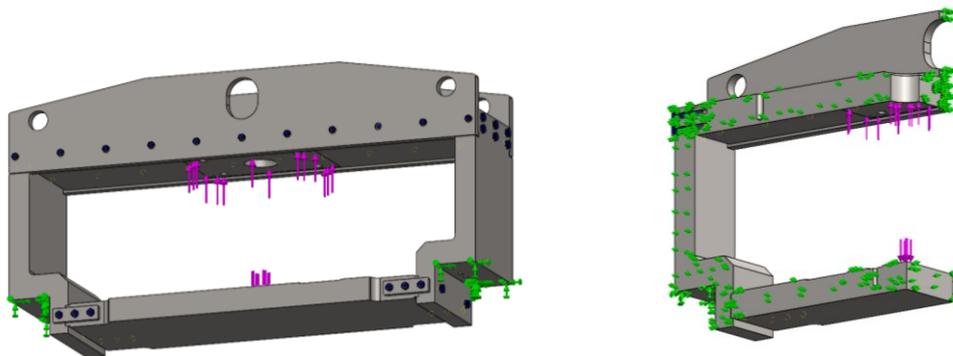


Fig. 8 Disposizione carichi e vincoli

## CONNESSIONI

In prima approssimazione si utilizza connessione "*unito*" per tutte le superfici in contatto per velocizzare la procedura di calcolo, ma si osserva che la freccia ottenuta è notevolmente ridotta rispetto a quella reale, di un fattore circa x2 (x1,896).

Pertanto, nelle analisi successive si utilizzano connessioni "*bullone*" per il collegamento tra le parti come nel modello reale; per tutte le altre superfici si definiscono "*gruppi di contatto*" senza compenetrazione.

Prima di lanciare la simulazione si definiscono le coppie di serraggio facendo riferimento a viti di classe 8,8 e fattore d'attrito 0,10.

<sup>1</sup> Internamente l'azienda ha già eseguito una prima analisi portando una vecchia versione della struttura, la quale presentava inflessione di 5 mm alla struttura di partenza di questo studio con inflessione di 2.5 mm. I risultati finora ottenuti permettono il funzionamento della macchina ma si intende migliorare ancor di più la situazione.

## MESH

Si utilizza la mesh standard di Solid-works ad elementi tetraedrici di 10 mm con tolleranza 0.5 mm.

Attraverso la meshatura è possibile scomporre il problema portandolo da soluzione di equazioni differenziali a soluzione di equazioni lineari (risolvibili dal pc). Per alleggerire inoltre la fase di calcolo si sfrutta la doppia simmetria del modello ritagliandone un quarto ed eseguendo l'analisi solo su questo, specificando un vincolo di simmetria.

L'errore commesso in fase di analisi è trascurabile (2,5%).

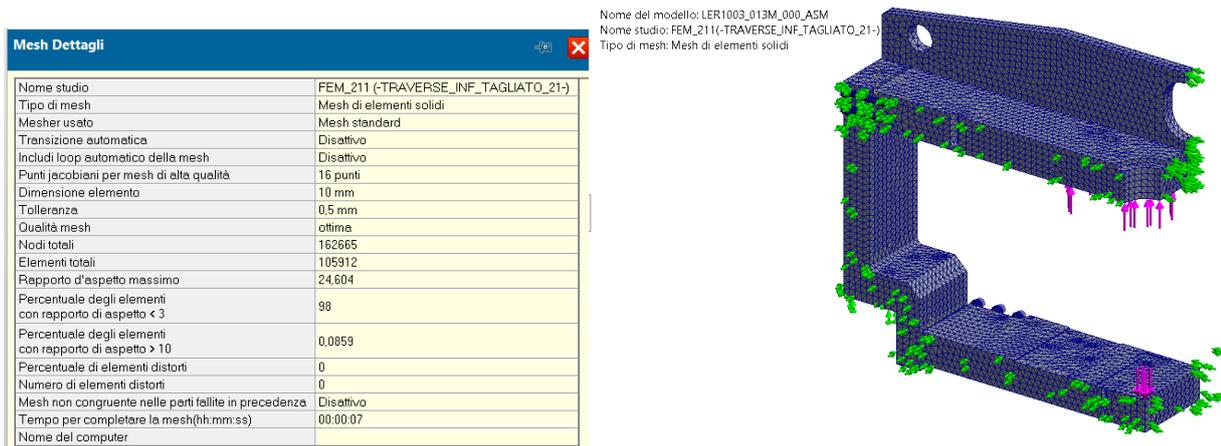


Fig. 9 Mesh e proprietà

## MATERIALE

Snervamento:	235 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza alla trazione:	360 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico:	210000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson:	0,28
Densità di massa:	7.800 kg/m <sup>3</sup>
Modulo di taglio:	79000 N/mm <sup>2</sup>

## ANALISI DI SENSIBILITA' MESH

Si effettuano dunque una serie di prove per vedere come cambiano i risultati in funzione della mesh utilizzata.

### [FEM 111]

Si esegue nuovamente la prima prova con tessitura più fine della mesh (0,5 mm e tolleranza 0.25)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Prima prova descritta nel paragrafo "Prima analisi [FEM 101 E FEM 111]" a pagina 11.

Nome del modello: LER1003\_013M\_000\_ASM  
 Nome studio: FEM\_111(-BASE\_TAGLIATO\_11-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 10

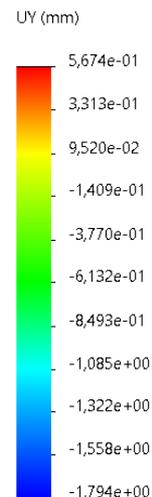
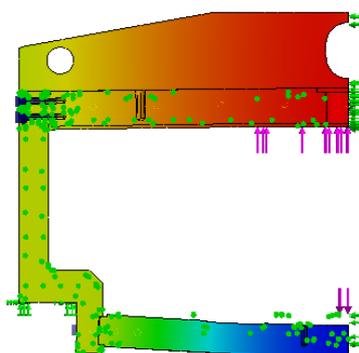


Fig. 10 Risultati con mesh 5 mm

Si hanno risultati discordi per fattori di circa il 5,7 %

Usando una mesh ancor più fine, 2mm con tolleranza 0.1 si ottiene (errore rispetto a FEM\_111 di 8,6 %).

Nome del modello: LER1003\_013M\_000\_ASM  
 Nome studio: FEM\_111(-BASE\_TAGLIATO\_11-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 10

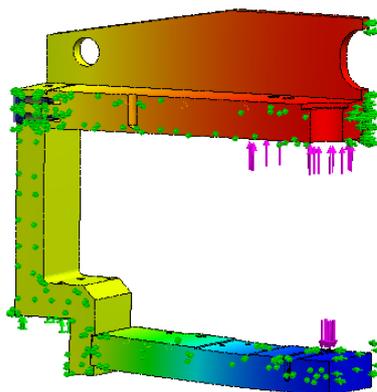


Fig. 11 Risultati con mesh 2 mm

Ebbene, dimezzando la dimensione della mesh si ottiene un incremento di freccia di inflessione totale di 5,7% mentre prendendo una mesh rimpicciolita di fattore 5 si ottiene incremento di freccia pari a 8,6 %.

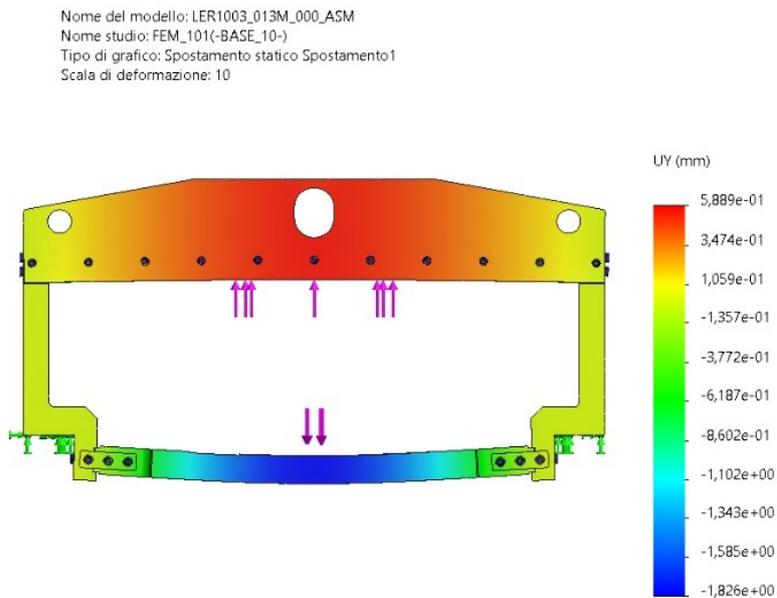
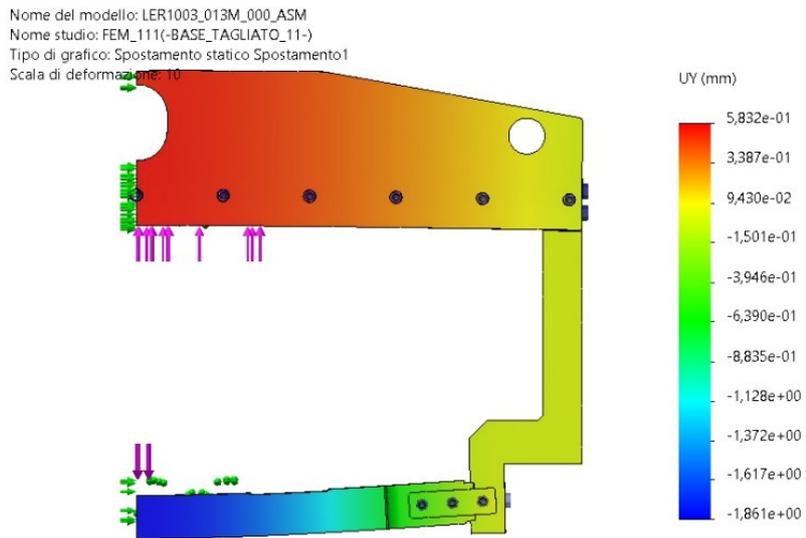
FEM_111 mm	FEM_111_mesh5mm mm	errore mm	FEM_111_mesh2mm mm	errore mm
0,5832	0,5674	-0,02785	0,5794	-0,00656
1,861	1,794	-0,03735	1,859	-0,00108
<b>2,4442</b>	<b>2,3614</b>	-0,03506	2,4384	-0,00238

# CONFRONTO ANALISI FINORA EFFETTUATE

## LEGENDA

FEM XYZ  
X=configurazione  
Y=0 unito  
Y=1 tagliato  
Z=0 connessione unito  
Z=1 connessione bulloni

### Prima analisi (macchina base) [FEM 101 e FEM 111]



\

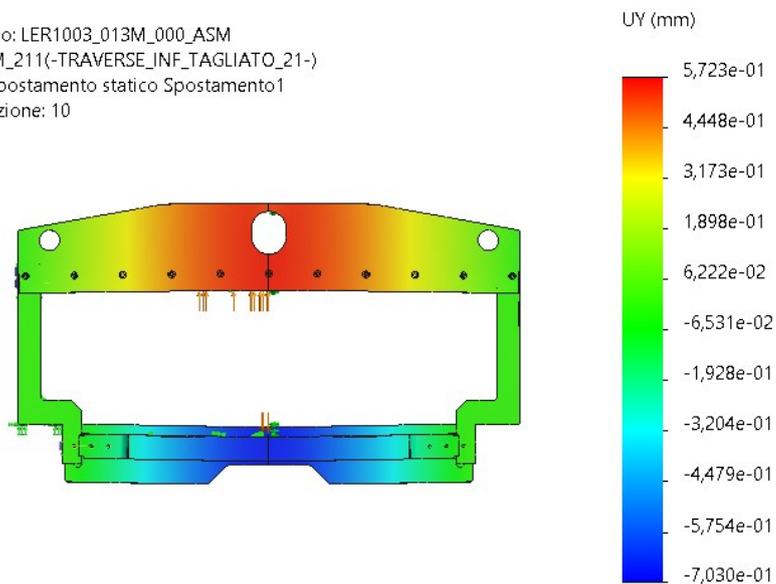
[1] MACCHINA BASE	FEM_100 (unito)	FEM_101	FEM_111
	mm	mm	mm
$\Delta y$ sup	0,4058	0,5889	0,5832
$\Delta y$ inf	0,8817	1,826	1,861
$\Delta y$ totale	1,2875	2,4149	<b>2,4442</b>

Come anticipato l'errore commesso nella semplificazione da modello completo a modello "tagliato" è circa del 2,5 %.

Seconda analisi (macchina attuale) [FEM\_20 e FEM\_21]

NOTA in prima istanza vengono mantenute le piastrine che collegano la piastra inferiore alle piastre laterali per non modificare la macchina preesistente; successivamente si è deciso di eliminarle in quanto il collegamento è assicurato dall'aggiunta dei traversi.

Nome del modello: LER1003\_013M\_000\_ASM  
 Nome studio: FEM\_211(-TRAVERSE\_INF\_TAGLIATO\_21-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 10



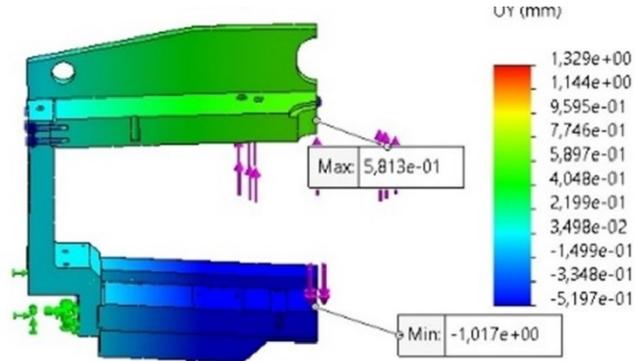
Dai risultati ottenuti si nota come la macchina presenti una rigidità maggiore nella parte superiore e si deforma di più nella parte inferiore.

Da qui l'idea di togliere le due traverse superiori per osservare come si comporta la struttura.

[2] MACCHINA ATTUALE	FEM_211
	mm
$\Delta y$ sup	0,552
$\Delta y$ inf	2,119
$\Delta y$ totale	<b>2,671</b>

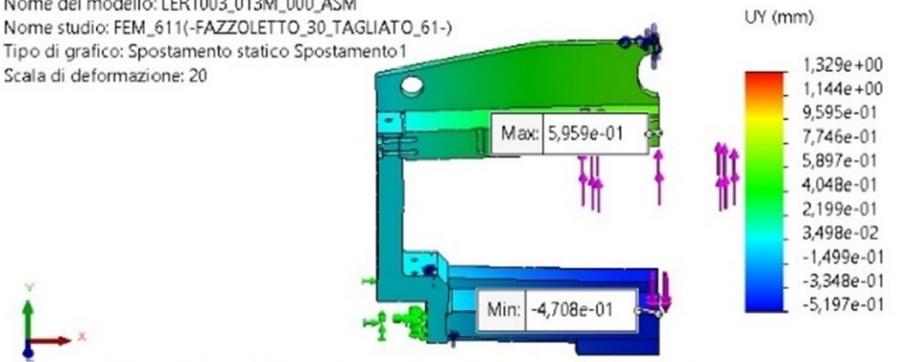
# CONFRONTO RISULTATI FEM\_411, FEM\_511, FEM\_611

Nome del modello: LER1003\_013M\_000\_ASM  
 Nome studio: FEM\_411(-PIASTRA\_INF\_TAGLIATA\_41-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 20



SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.

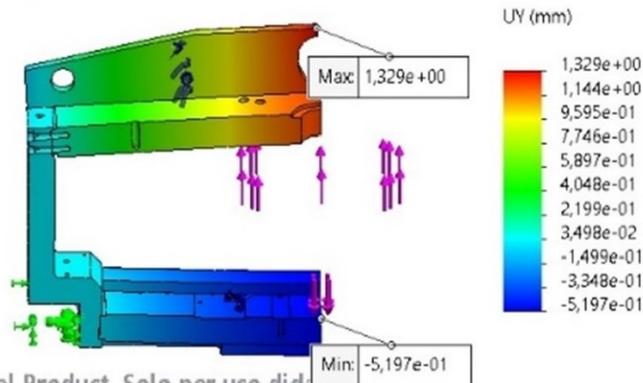
Nome del modello: LER1003\_013M\_000\_ASM  
 Nome studio: FEM\_611(-FAZZOLETTO\_30\_TAGLIATO\_61-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 20



SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.



Nome del modello: LER1003\_013M\_000\_ASM  
 Nome studio: FEM\_511(-FAZZOLETTO\_tagliato\_51-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 20



SOLIDWORKS Educational Product. Solo per uso didattico.

[2] MACCHINA ATTUALE	FEM_211
	mm
$\Delta y$ sup	0,552
$\Delta y$ inf	2,119
$\Delta y$ totale	<b>2,671</b>

[4] PIASTRA INFERIORE	FEM_411
	mm
$\Delta y$ sup	1,429
$\Delta y$ inf	0,5273
$\Delta y$ totale	<b>1,9563</b>

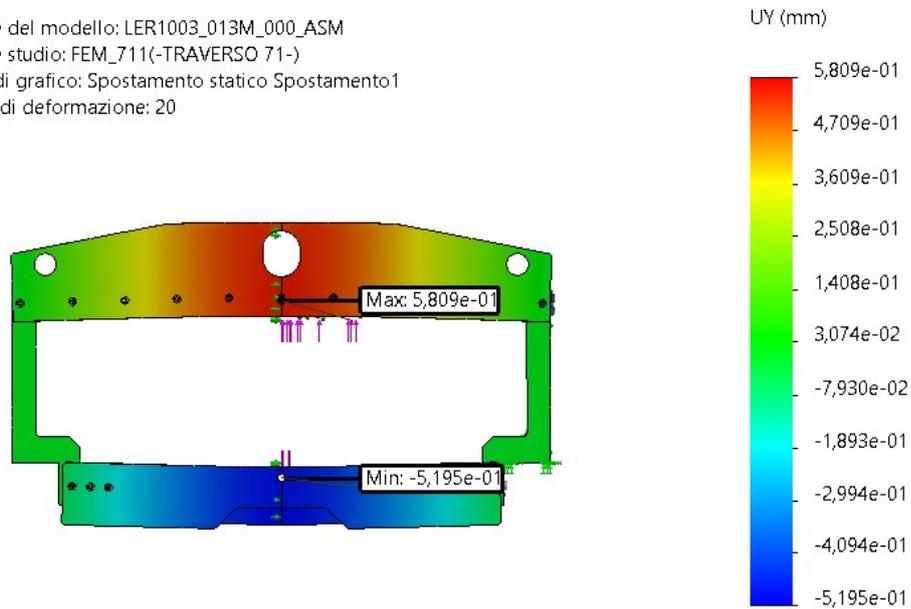
[5] FAZZOLETTO_RINFORZO_20mm	FEM_511
	mm
$\Delta y$ sup	1,3290
$\Delta y$ inf	0,5197
$\Delta y$ totale	<b>1,8487</b>

[6] FAZZOLETTO_RINFORZO_30mm	FEM_611
	mm
$\Delta y$ sup	0,5959
$\Delta y$ inf	0,4708
$\Delta y$ totale	<b>1,0667</b>

Settima analisi [FEM 711]

Anche tramite l'inserimento di un traverso la freccia di flessione non è minimizzata, da qui si pensa di migliorare i collegamenti della macchina, modificando gli organi di collegamento delle parti.

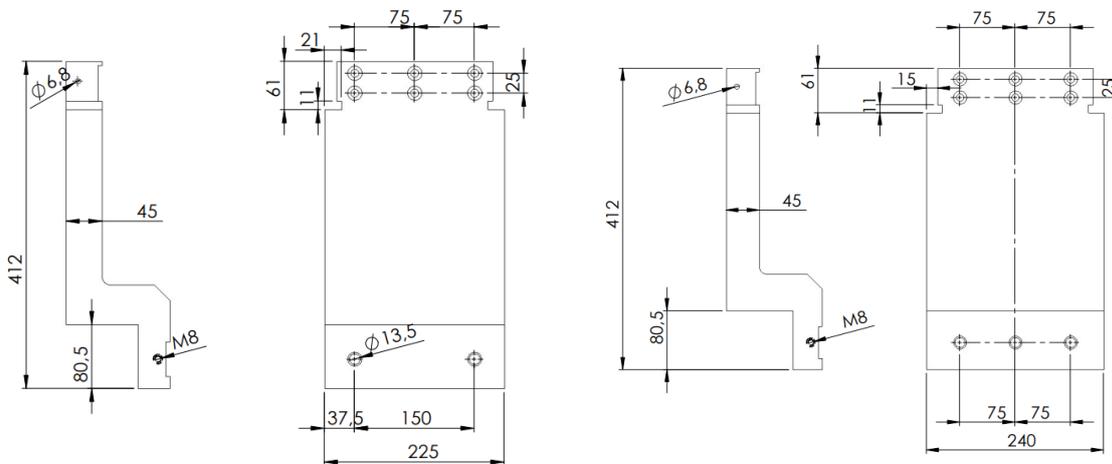
Nome del modello: LER1003\_013M\_000\_ASM  
 Nome studio: FEM\_711(-TRAVERSO 71-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 20



[7] TRAVERSO INFERIORE_30mm	FEM_711
	mm
$\Delta y$ sup	0,5809
$\Delta y$ inf	0,5195
$\Delta y$ totale	<b>1,1004</b>

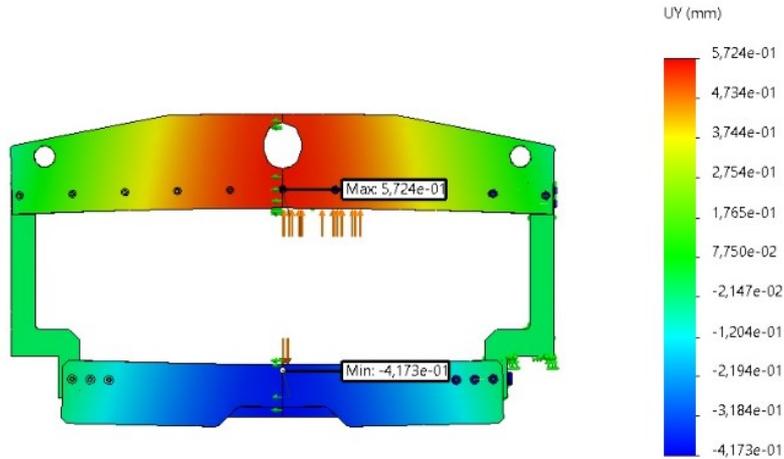
Nona Analisi [FEM 911]

A questo punto, si osserva il comportamento dopo aver aumentato la sezione trasversale delle piastre della struttura portandole da larghezza 225 mm a 240 mm, (vedi disegno).<sup>3</sup>



<sup>3</sup> L'ottava analisi non viene qui riportata non avendo prodotto risultati utili ai fini della trattazione;

Nome del modello: Assieme1  
 Nome studio: FEM\_911(-ALLARGATA\_TAGLIATA\_911-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Geometria di riferimento: Piano frontale  
 Scala di deformazione: 20

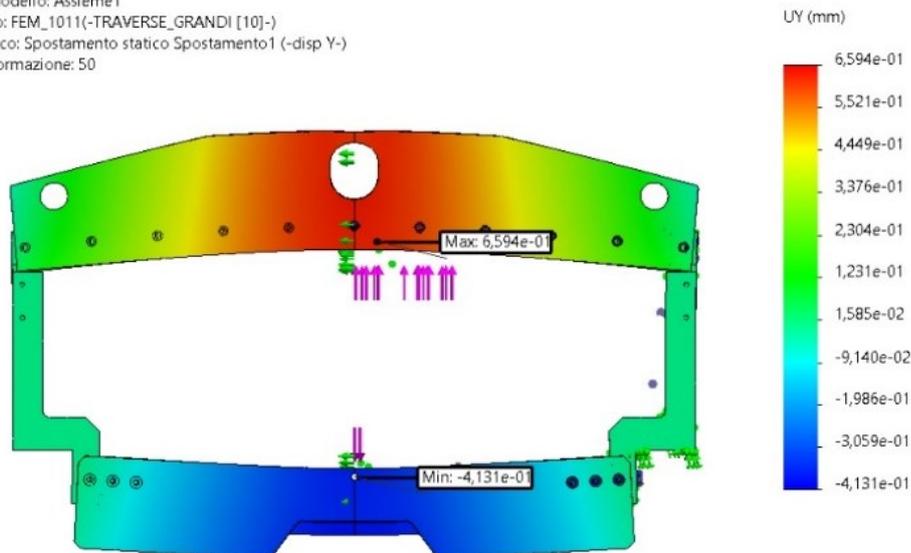


[9] PIASTRE LATERALI ALLARGATE	FEM_911
	mm
$\Delta y$ sup	0,5724
$\Delta y$ inf	0,4173
$\Delta y$ totale	<b>0,9897</b>

### Decima Analisi [FEM 1011]

Si riportano le modifiche già proposte sulla struttura base anche sulla macchina con piastre laterali allargate. Si aggiungono dunque traverse inferiori di altezza maggiore.

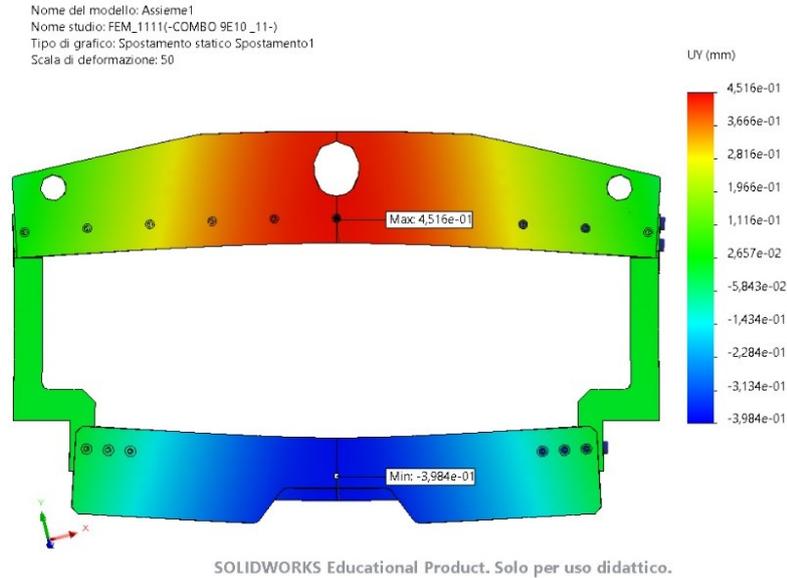
Nome del modello: Assieme1  
 Nome studio: FEM\_1011(-TRAVERSE GRANDI [10]-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1 (-disp Y-)  
 Scala di deformazione: 50



[10] TRAVERSE GRANDI	FEM_1011
	mm
$\Delta y$ sup	0,6549
$\Delta y$ inf	0,4131
$\Delta y$ totale	<b>1,068</b>

### Undicesima Analisi [FEM 1011]

Si ipotizza che il millimetro restante di freccia di inflessione possa essere dovuto proprio alla tipologia di viti utilizzate, si introducono quindi viti di diametro e lunghezza maggiore. Si mantengono anche le modifiche delle due simulazioni precedenti.

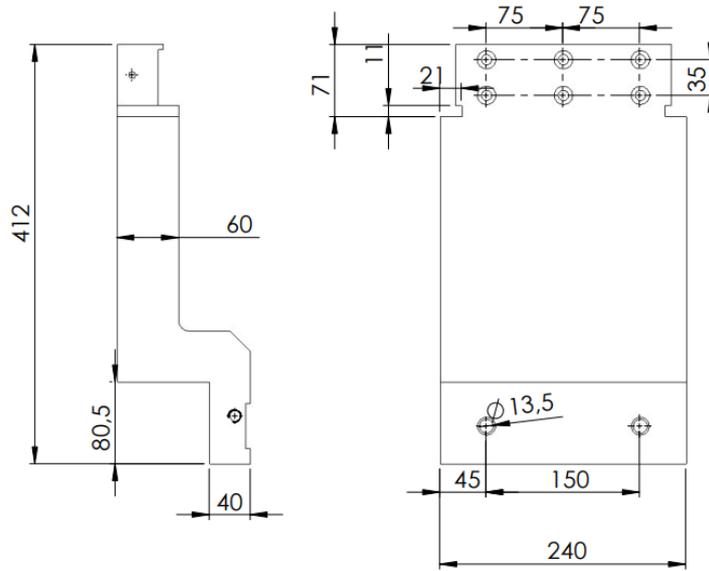


Dalla decima all'undicesima prova si ha un miglioramento del 20.63 % in termini di freccia di inflessione.

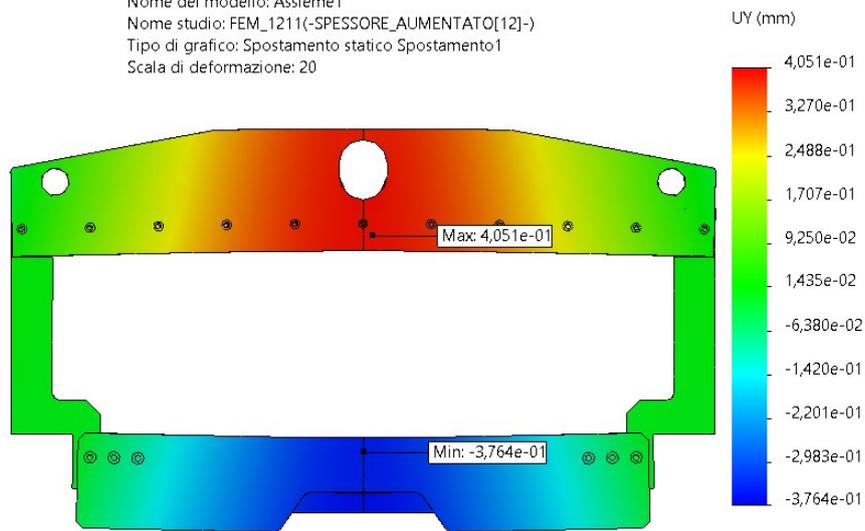
[11] PIASTRE ALLARGATE, TRAVERSE GRANDI, FORI MODIFICATI	FEM_1111
	mm
$\Delta y$ sup	0,4467
$\Delta y$ inf	0,4009
$\Delta y$ totale	<b>0,8476</b>

### Dodicesima analisi [FEM1211]

A questo punto si procede aumentando lo spessore delle piastre laterali da 40 mm a 60 mm (il che comporterebbe da un lato una riduzione degli sprechi di materiale in fase di realizzazione delle piastre, ma di contro una riduzione dello spazio di lavoro della macchina di 40mm).



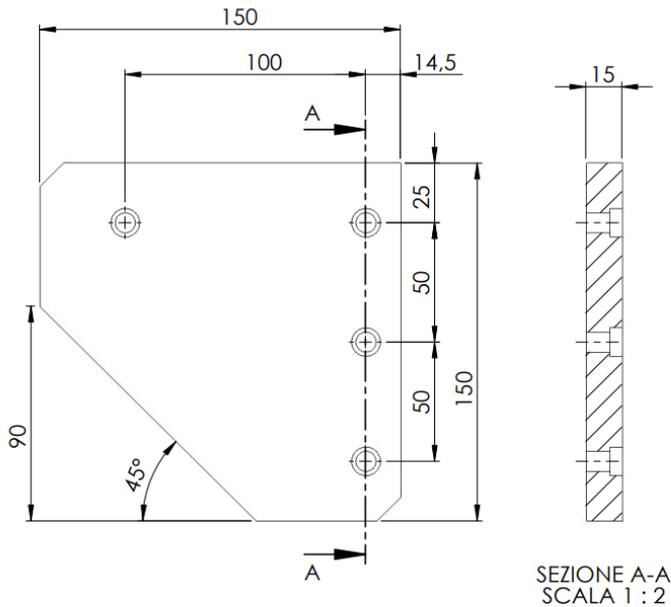
Nome del modello: Assieme1  
 Nome studio: FEM\_1211(-SPESSORE\_AUMENTATO[12]-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 20



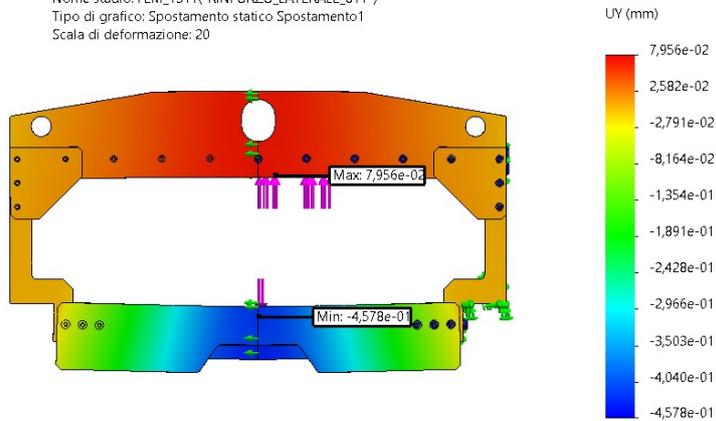
[12] SPESSORE PIASTRE LATERALI	
	FEM_1111
	mm
$\Delta y$ sup	0,4051
$\Delta y$ inf	0,3764
$\Delta y$ totale	<b>0,7815</b>

Tredicesima Analisi [FEM 1311]

Si procede inserendo ulteriori rinforzi laterali. La finestra di lavoro è parzialmente compromessa ma sono comunque garantiti gli spazi necessari alla movimentazione e alla lavorazione dei pezzi.



Nome del modello: Assieme1  
Nome studio: FEM\_1311(-RINFORZO\_LATERALE\_811-)  
Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
Scala di deformazione: 20



[13] RINFORZI LATERALI	FEM_1311
	mm
$\Delta y$ sup	0,07956
$\Delta y$ inf	0,4578
$\Delta y$ totale	<b>0,53736</b>

massa: 53,158 kg

A questo punto si interrompono le modifiche sulla struttura esistente e si prosegue nella progettazione di una nuova macchina in grado di minimizzare la flessione presente.

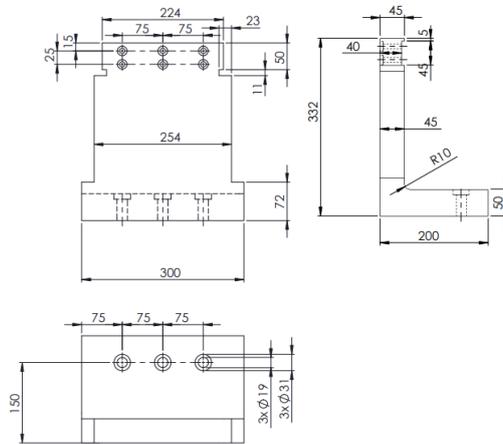
Le seguenti analisi riguardano dunque una nuova macchina (oltre all'inserimento di nuovi componenti vengono modificate le dimensioni della macchina attuale).

# Nuova Proposta

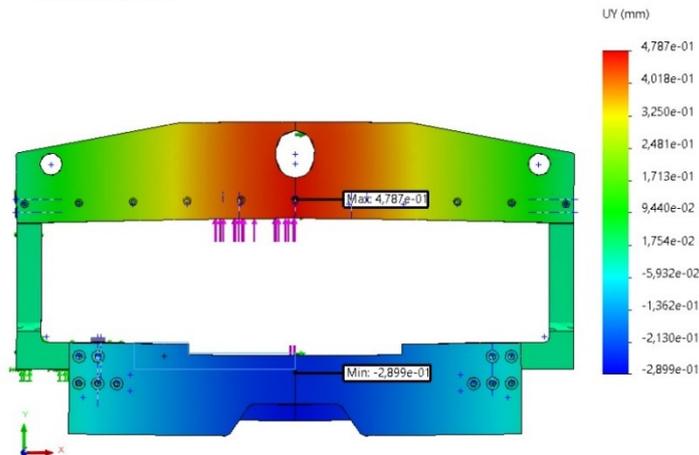
Dopo aver osservato che la minima freccia di flessione raggiungibile senza stravolgere la geometria della macchina esistente e compatibilmente con gli spazi presenti è di circa 5 decimi (0,5373 mm), si prosegue lo studio proponendo una nuova macchina la cui geometria consenta di minimizzare tale freccia di inflessione.

## [FEM 30]

La macchina è così vincolata. Si pensa a una configurazione che riduca il braccio del momento flettente agente sulla piastra inferiore e sfrutti il lavoro a trazione delle viti. Mantenendo tutte le precedenti modifiche apportate. Le piastre laterali, dunque, non sono più sagomate come precedentemente ma presentano una geometria a "L". Si prevede collegamento alla piastra inferiore tramite viti M16.



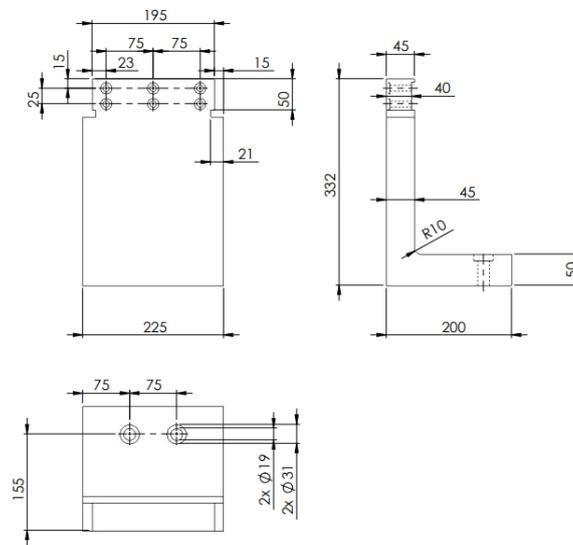
Nome del modello: Assieme2  
 Nome studio: FEM\_30(-Default-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 20



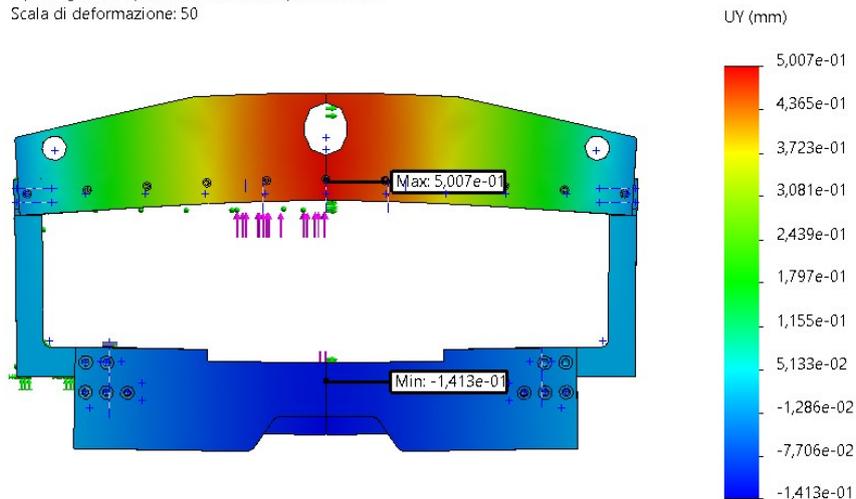
[30] PIASTRE LATERALI L	
	FEM_30
	mm
$\Delta y$ sup	0,4787
$\Delta y$ inf	0,2899
$\Delta y$ totale	<b>0,7686</b>

[FEM 40]

Si prova ora a ridurre la dimensione delle piastre laterali per vedere se i benefici apportati dalla forma della struttura si mantengono anche in una macchina di dimensioni ridotte.



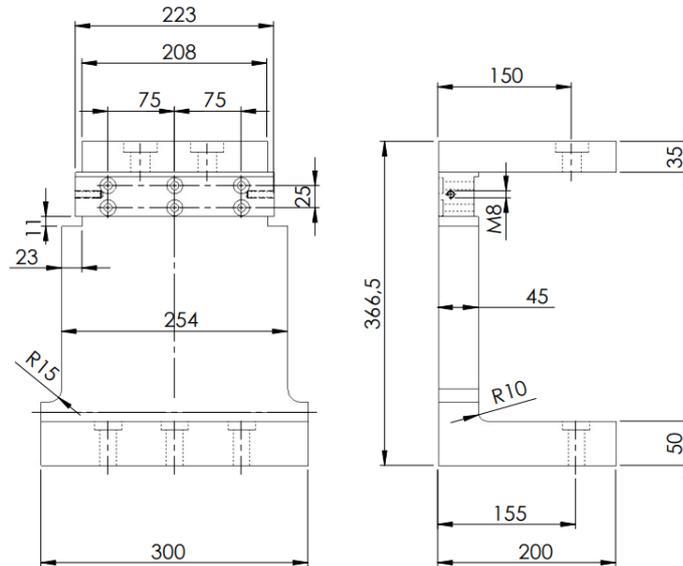
Nome del modello: Assieme2  
 Nome studio: FEM\_40(-PIASTRE LATERALI 225\_40-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 50



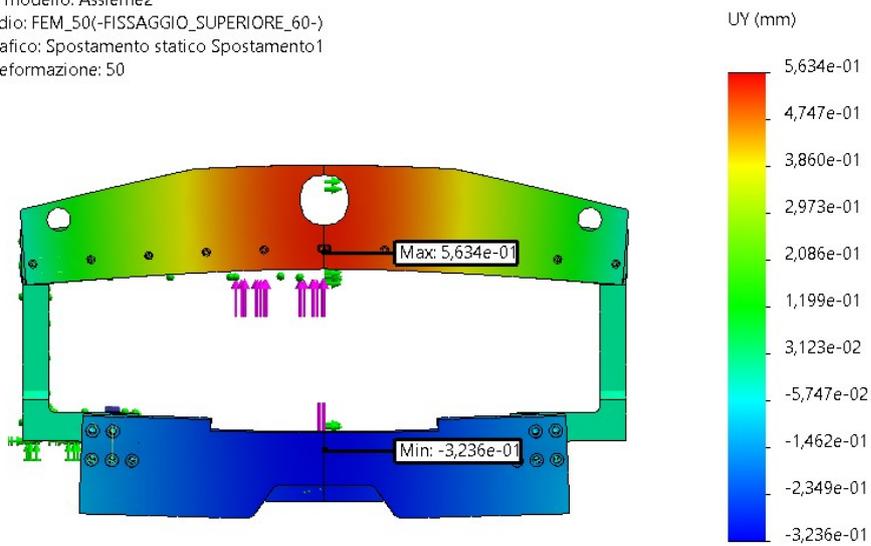
[40] PIASTRE L_225mm	
	FEM_40
	mm
$\Delta y$ sup	0,5007
Y inf	0,1413
$\Delta y$ totale	<b>0,642</b>

**[FEM 50]**

Si inseriscono ora piastre laterali a C. Tale configurazione risulta però svantaggiosa sia dal punto di vista realizzativo, comportando ingenti sprechi di materiale, sia dal punto di vista del montaggio assai complicato.



Nome del modello: Assieme2  
 Nome studio: FEM\_50(-FISSAGGIO\_SUPERIORE\_60-)  
 Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1  
 Scala di deformazione: 50

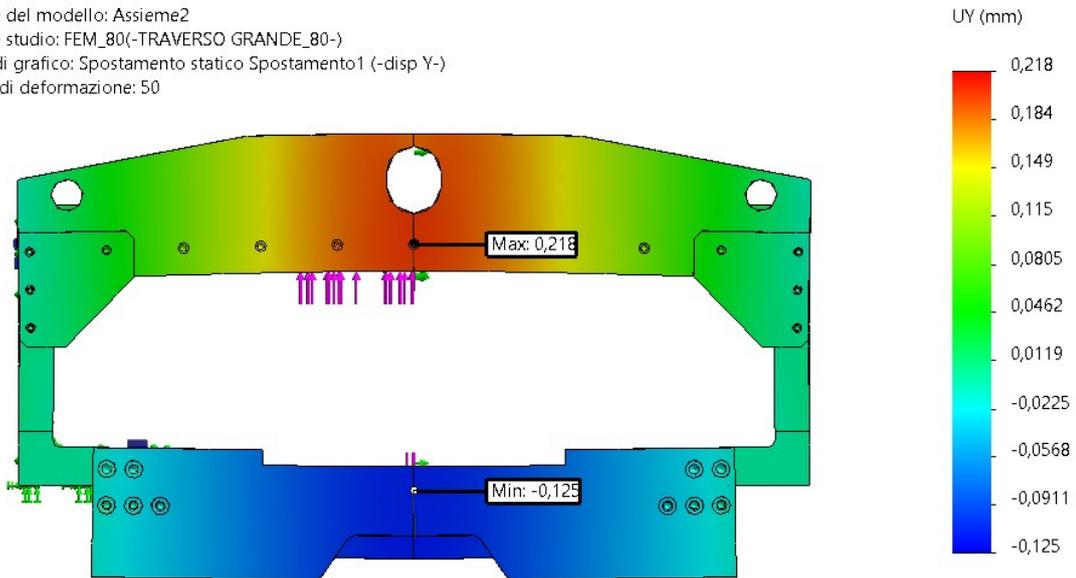


[50] FISSAGGIO SUPERIORE	
	FEM_50
	mm
$\Delta y$ sup	0,5634
$\Delta y$ inf	0,3236
$\Delta y$ totale	<b>0,887</b>

## [FEM\_80]

La configurazione migliore raggiunta è la seguente:

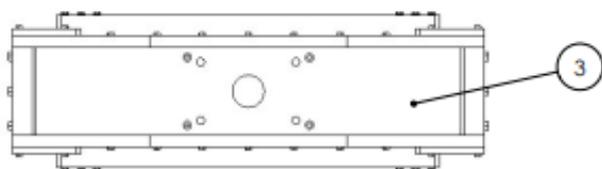
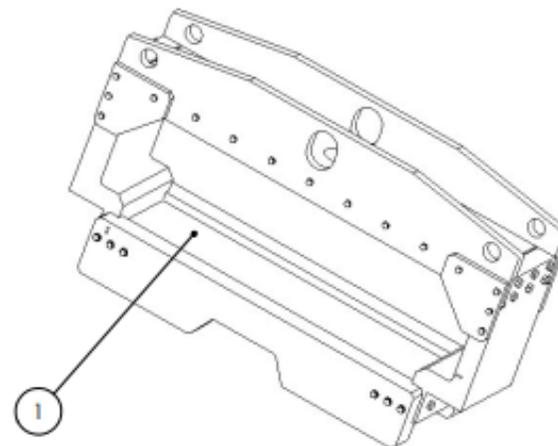
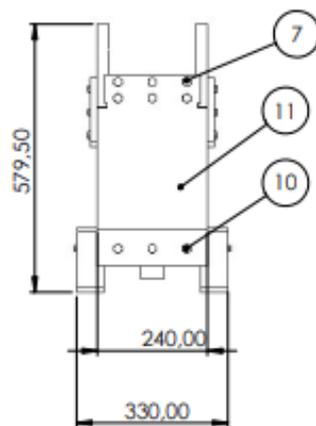
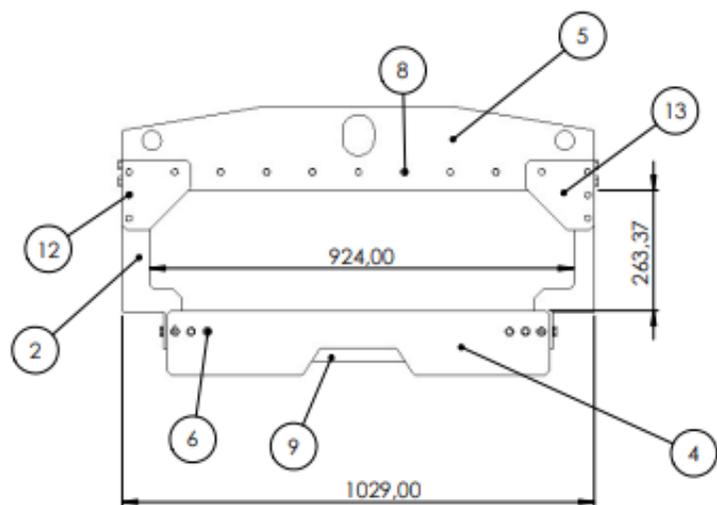
Nome del modello: Assieme2  
Nome studio: FEM\_80(-TRAVERSO GRANDE\_80-)  
Tipo di grafico: Spostamento statico Spostamento1 (-disp Y-)  
Scala di deformazione: 50



[80] fissaggio superiore, piastre rinforzo e traverso grande	
	FEM_80
	mm
$\Delta y$ sup	0,218
$\Delta y$ inf	0,125
$\Delta y$ totale	<b>0,343</b>

Ripetendo lo studio con la stessa geometria ma imponendo connessione unito si ottiene freccia totale 0.33 mm.

massa 62,210 kg



Num. articolo	Num. parte	Descrizione	Quantità
1	PIASTRA_INFERIORE		1
2	PIASTRA_LATERALE		1
3	PIASTRA_SUPERIORE		1
4	TRAVERSA_INFERIORE		2
5	TRAVERSA_SUPERIORE		2
6	ISO 4018 - M8 x 60-WN		12
7	ISO 4018 - M12 x 70-WN		12
8	ISO 4018 - M8 x 40-WN		16
9	TRAVERSO_SOTTO		1
10	ISO 4018 - M12 x 60-WN		6
11	PIASTRA_LATERALE		1
12	ISO 4018 - M8 x 50-NN		16
13	PIASTRINA_RINFORZO_8		4

## Analisi Rigidezza

Si esegue a questo punto un'analisi di rigidezza per confrontare le varie soluzioni proposte a prescindere dalla geometria e dalla mesh utilizzate.

ANALISI RIGIDEZZA MACCHINA ATTUALE															
	FEM_101	FEM_111	FEM_201	FEM_211	FEM_311	FEM_411	FEM_511	FEM_611	FEM_711	FEM_911	FEM_1011	FEM_1111	FEM_1211	FEM_1311	FEM_1411
carico (N)	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656	122656
$\Delta y$ tot (mm)	2,4149	2,4442	2,671	2,671	3,2767	1,9563	1,8487	1,0667	1,1004	0,9897	1,0977	0,8476	0,8385	0,53736	0,8923
k (N/mm)	5079134	50182,47	45921,38	45921,38	37432,78	62697,95	66347,16	114986,4	111464,9	123932,5	111739,1	144709,8	146280,3	228256,7	137460,5

ANALISI RIGIDEZZA MACCHINA NUOVA						
	FEM_30	FEM_40	FEM_50	FEM_60	FEM_70	FEM_80
carico (N)	122656	122656	122656	122656	122656	122656
$\Delta y$ tot (mm)	0,8241	1,0786	0,887	0,8823	0,551	0,343
k (N/mm)	148836,3	113717,8	138281,8	139018,5	222606,2	357597,7

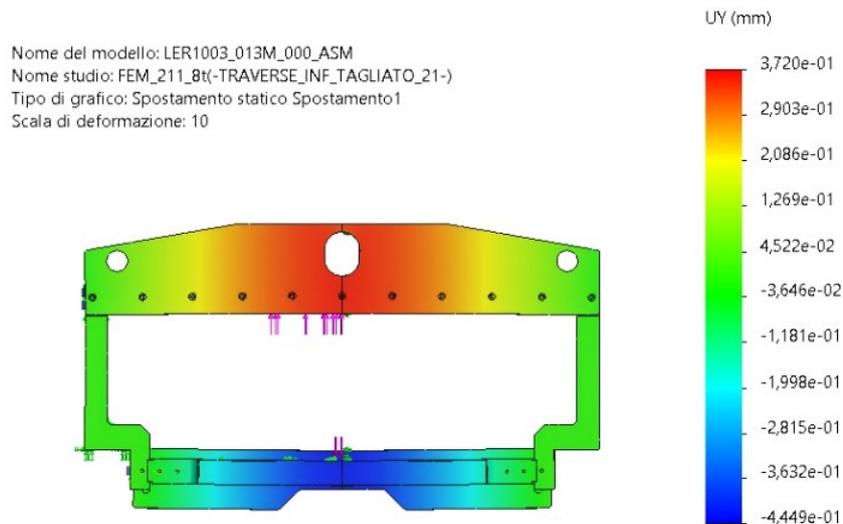
Si evince che le soluzioni migliori in termini di rigidezza sono la FEM\_1311 e la FEM\_80.

In particolare, la FEM\_1311 porta a un miglioramento di rigidezza rispetto alla FEM\_211 del 397% (circa quattro volte maggiore) la FEM\_80 del 697% (sette volte maggiore).

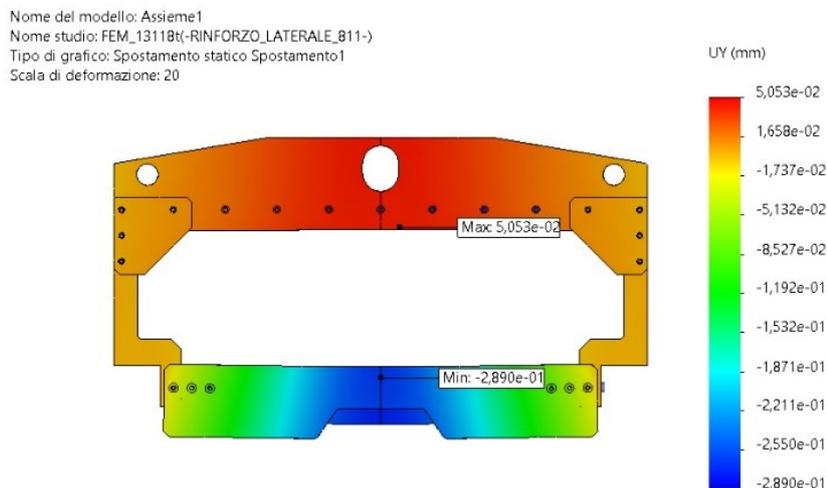
## Conclusioni

A seguito delle prove effettuate, si giunge al punto in cui non è possibile portare la freccia di inflessione a zero senza aggiungere importanti quantità di materiale. Una soluzione alternativa potrebbe essere studiare la macchina per carichi inferiori.

Per esempio, pensando di realizzare un impianto che monti una pressa da 8t anziché 12t, si otterrebbero i seguenti risultati per configurazione base e per la configurazione 1311 (la migliore raggiunta sulla macchina attuale):



Si ottiene freccia totale 0,8169 mm contro i 2,2671 mm della prova con 12t.



Si ottiene freccia totale 0,33 mm contro i 0,537 mm della prova con 12t.

Pertanto, dallo studio si ricava che: rispettando gli ingombri dell'impianto in funzione ad oggi e aggiungendo le parti prescritte nella configurazione **FEM\_1311** si raggiunge una freccia di **0,54 mm**; mentre per la nuova proposta, secondo quanto previsto nell'analisi **FEM\_80** si raggiunge una freccia di **0,34 mm**.

\

Giunti a questo punto dunque lo studio ha dimostrato che la realizzazione di un nuovo impianto con geometria completamente modificata porterebbe a un beneficio minimo raggiungibile allo stesso modo con la riduzione del tonnellaggio della pressa. Infatti, utilizzando pressa con tonnellaggio 8t anziché 12t si otterrebbe la medesima deformazione di 0,33 mm lungo l'asse y.

La realizzazione di tale specifico modello di sigilli giustificerebbe l'impiego di una pressa meno performante, si potrebbe dunque sostituire la pressa da 12t attualmente utilizzata con una per esempio da 8t.

Ciò non avviene per delle esigenze produttive in quanto lo stesso impianto viene utilizzato per la produzione di altri modelli di sigillo che necessitano di presse con tonnellaggi maggiori.

## APPENDICE

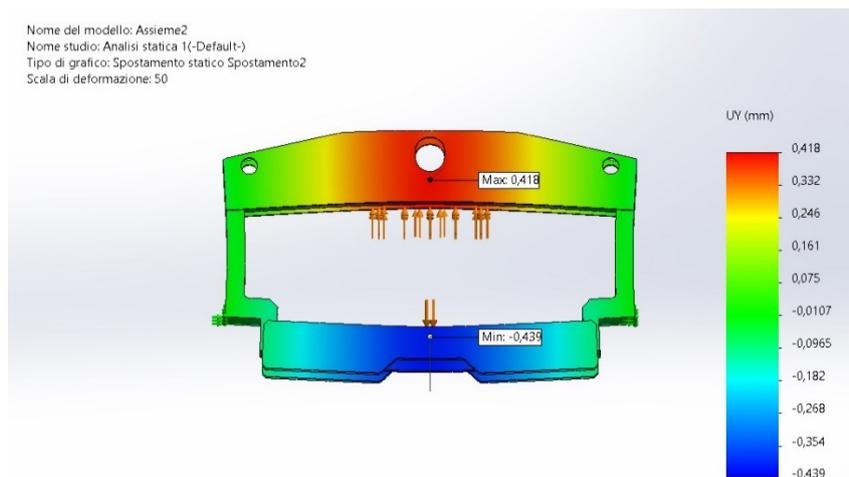
### **Analisi agli elementi finiti con Matlab**

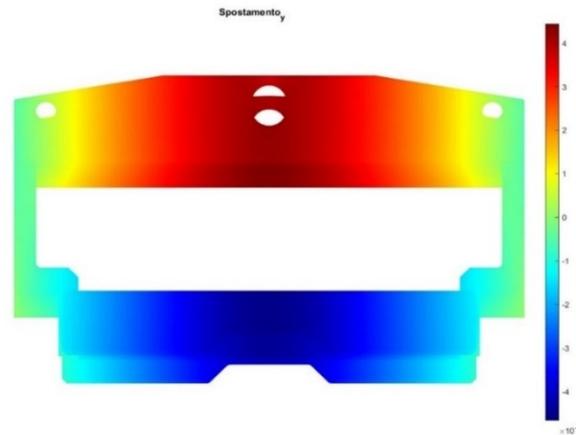
Si riporta di seguito un metodo alternativo per eseguire l'analisi FEM utilizzando MatLab. Si fa riferimento in particolare alla soluzione della configurazione 211.

MatLab non è in grado di interpretare connessioni *Bullone*, pertanto si confrontano i dati con modello SW semplificato e connessioni *Unito*.

#### FASI

- Conversione dell'assieme in file parte di Solid-Works (il software richiede in ingresso file STL);
- Abbinare i componenti e salvare come file STL;
- Importare geometria su MatLab tramite function;
- Definire equazioni differenziali parziali (PDE) in funzione di posizione come supporto a soluzione problemi non lineari → PDE toolbox
- Impostare i vincoli e i carichi facendo riferimento alla nomenclatura delle facce imposta dal programma, dopo aver plottato figura del componente si inseriscono a script le facce su cui applicare i carichi;
- Stabilire parametri Mesh (se troppo piccola il solutore potrebbe richiedere tempo eccessivo per la risoluzione); si utilizza sempre dimensione massima mesh 10 mm per confrontare dati con SW.
- Lanciare lo script;
- Plot dei risultati;
- Confronto risultati con quanto ottenuto su Solid-Works:





	risultati SW	risultati ML	errore
$\Delta_{sup}$	0,418	0,444	-0,0622
$\Delta_{inf}$	-0,439	-0,467	0,06378
$\Delta_{tot}$	-0,021	-0,023	0,09524

Rispetto all'analisi eseguita con SolidWorks i dati si discostano complessivamente del 9,52%. Si ipotizza che, nonostante in entrambi i casi si sia utilizzata mesh di dimensione 10 mm, ciò sia dovuto a una peggiore interpretazione della mesh e delle connessioni da parte di MatLab, si ricorda infatti che prima di lanciare l'analisi si è convertito l'assieme in parte; dunque, il software lo interpreta come se fosse un pezzo unico ottenuto per fusione.

```

clc
close all
model = createpde('structural','static-solid');
%importa geometria
importGeometry(model,"Assieme1intero.STL");
%geometryFromMesh(model,nodes,elements)
%plot geometria mostrando nomi facce
figure
pdegplot(model,"EdgeLabels","on")
view(0,90);
title('Vista Frontale')
figure
pdegplot(model,'FaceLabels','on')
view(0,45);
title('Vista Isometrica')
%specifica proprietà strutturali materiale
structuralProperties(model,'YoungsModulus',200e6, ...
    'PoissonsRatio',0.3,...
    'MassDensity',7800);
%impostare condizioni al contorno
%assieme intero
%structuralBC(model,'Edge',84,'XDisplacement',0,'YDisplacement',0,'ZDisplacement',0);
%structuralBC(model,'Edge',109,'XDisplacement',0,'YDisplacement',0,'ZDisplacement',0);
structuralBC(model,'Edge',84,'Constraint','fixed');
structuralBC(model,'Edge',109,'Constraint','fixed');
structuralBoundaryLoad (model,'Face',15,'SurfaceTraction',[0,2.4457,0]);
structuralBoundaryLoad (model,'Face',123,'SurfaceTraction',[0,-306.64,0]);

```

\

```
structuralBoundaryLoad (model,'Face',32,'SurfaceTraction',[0,-306.6400,0]);
%generare mesh
value=0.01;
generateMesh(model,"Hmax",10,"Hmin",0.5,"GeometricOrder","linear");
figure
pdeplot3D(model)
title('Mesh a elementi tetraedrici');
%%
% calcolo soluzione
result = solve(model);
% Risultati analisi statica con proprietà
% valutazione soluzione
    minUy = min (result.Displacement.y);
fprintf('Spostamento minimo in direzione y è %g millimetri', minUy*1000);
    maxUy = max (result.Displacement.y);
fprintf('Spostamento massimo in direzione y è %g millimetri', maxUy*1000);
    totUy=minUy+ maxUy;
fprintf('Spostamento totale in direzione y è %g millimetri', totUy*1000);
    minyy = min(result.VonMisesStress);
fprintf('sollecitazione minima è %g N/mm^2.', minyy)
    maxyy = max (result.VonMisesStress);
fprintf('sollecitazione massima è %g N/mm^2.', maxyy);
% plot Von Mises Stress
colormap('jet');
figure
pdeplot3D(model,'ColorMapData',result.VonMisesStress);
view(0,90);
title('Tensione Von Mises');
% plot componenti spostamento
colormap('jet');
figure
grid ("on")
pdeplot3D(model,"ColorMapData",result.Displacement.y,"DeformationScaleFactor",1000);
view(0,90);
title('Spostamento_y');
```

## Fonti bibliografiche e sitografia

**Atzori B.**, *Appunti di Costruzione di Macchine*, Padova, Cortina, 2001

**Caligaris L., Fava S., Tomasello C.**, Manuale di Meccanica, Hoepli, 2016

**MatLab Guide**, <https://it.mathworks.com/products/matlab.html>, (Ultimo accesso: 1° luglio 2022)

**Oniloc**, <https://www.oniloc.com> (Ultimo accesso: 13 luglio 2022)

**Rend**, <https://www.rendstudio.it/> (Ultimo accesso: 5 settembre 2022)

**SolidWorks Guide**,

[https://help.solidworks.com/2021/italian/SolidWorks/sldworks/r\\_welcome\\_sw\\_online\\_help.htm](https://help.solidworks.com/2021/italian/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm)

(Ultimo accesso: 1° luglio 2022)

**Usag**, [https://www.usag.it/documenti/coppie\\_serraggio\\_2013.pdf](https://www.usag.it/documenti/coppie_serraggio_2013.pdf) , (Ultimo accesso: 13 luglio 2022)