



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

---

**Progettazione di un supporto statico di  
pretensionamento per l'esecuzione di test  
dinamici sui materiali**

**Design of a static pretensioning support  
for dynamic material testing**

Candidato:  
**Vincenzo Calvaresi**

Relatore:  
**Prof. Marco Rossi**

Correlatore:  
**Ing. Emanuele Farotti**

Anno Accademico 2019-2020



# Ringraziamenti

Sono poche le occasioni in cui si ha la possibilità di dire “grazie” a una lunga serie di persone che in modo più o meno decisivo mi hanno aiutato a conseguire questo importante traguardo accademico culminato con la redazione di questa tesi.

*Ancona, Maggio 2021*

Vincenzo Calvaresi



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>La barra di Hopkinson</b>	<b>3</b>
2.1	Esigenze costruttive del sistema di pretensionamento . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Progetto del sistema di pretensionamento</b>	<b>9</b>
3.1	Requisiti progettuali . . . . .	9
3.2	Progettazione CAD 3D: CATIA V5® . . . . .	11
3.2.1	Progettazione del componente . . . . .	12
3.2.2	Tavole tecniche . . . . .	23
3.3	Calcolo e verifica del serraggio putrella-piastra base . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Verifica Sperimentale attraverso l'analisi FEM</b>	<b>33</b>
4.1	Metodo FEM . . . . .	33
4.2	Valutazioni preliminari . . . . .	36
4.3	Definizione della Geometria . . . . .	37
4.4	Verifica dei contatti . . . . .	39
4.5	Generazione mesh . . . . .	40
4.5.1	Scelta delle mesh . . . . .	40
4.6	Applicazione Carichi e Precarichi . . . . .	44
4.7	Analisi ed Interpretazione dei risultati . . . . .	45
4.8	Correzione dell'assieme . . . . .	48
4.9	Analisi ed Interpretazioni dei risultati finali . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>51</b>



## Elenco delle figure

2.1	Schema complessivo della split Hopkinson pressure bar (SHPB). . . . .	3
2.2	Interfaccia tra input bar e output bar della SHPB attualmente in uso nei laboratori dell'UNIVPM. . . . .	4
2.3	Input bar e output bar installate nei laboratori dell'UNIVPM. . . . .	6
3.1	Vista prospettica modello 3D del prototipo del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	10
3.2	Rappresentazione in CAD 3D della barra di Hopkinson assemblata nei laboratori UNIVPM. . . . .	11
3.3	Schizzo preliminare del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	12
3.4	Comparazione dei punti di applicazione del precarico tra il prototipo e l'attuale sistema di pretensionamento. . . . .	13
3.5	Rappresentazione dello sviluppo della parete centrale del sistema di pretensionamento. . . . .	13
3.6	Rappresentazione spessori quotati del supporto Laterale (marrone) e della parete centrale (gialla). . . . .	14
3.7	Vista laterale e vista Frontale in sezione del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	15
3.8	Norma UNI 5730 - ISO 4017 M16X70. . . . .	15
3.9	Vista frontale in sezione del serraggio tra supporto laterale e parete centrale nel nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	16
3.10	Rappresentazione 3D del supporto Laterale nel nuovo sistema di riferimento. . . . .	17
3.11	Diagramma Norma UNI 5739 - ISO 4017 M16 10.9. . . . .	18
3.12	Diagramma Norma UNI EN 24032 - ISO 4032 M16. . . . .	18
3.13	Dettaglio della vista prospettica del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	19

## Elenco delle figure

3.14	Dettaglio del foro nella parete centrale del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	20
3.15	Modello 3D del disco montato alla base meccanismo di pretensionamento. . . . .	21
3.16	Diagramma Norma UNI 5933 - ISO 10642 M8. . . . .	21
3.17	Vista in prospettiva del nuovo sistema di pretensionamento Esploso in CATIA. . . . .	22
3.18	Vista in prospettiva del nuovo sistema di pretensionamento ottenuto in CATIA. . . . .	22
3.19	Tavola tecnica del supporto laterale e della piastra base. . . . .	23
3.20	Tavola tecnica della piastra di supporto al meccanismo. . . . .	24
3.21	Tavola tecnica del sistema di pretensionamento assemblato. . . . .	25
3.22	Tavola Tecnica del dettaglio sui bulloni UNI 5730 - ISO 4017 M16X100. . . . .	26
3.23	Tavola Tecnica dei dettagli sui bulloni Laterali UNI 5730 - ISO 4017 M16X70. . . . .	27
3.24	Vista laterale dello schizzo preliminare del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	28
3.25	Vista superiore dello schizzo preliminare del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	28
3.26	Rappresentazione generica di una flangia rigida sottoposta ad un carico di separazione. . . . .	29
3.27	Distanze centro-bullone della piastra Base. . . . .	30
3.28	Schema di come poter ricavare la tensione di rottura ( $\sigma_r$ ) e la tensione di snervamento ( $\sigma_s$ ) dalla classe della vite. . . . .	31
3.29	Prospetto generico che mostra i valori dell'Area resistente ( $A_{res}$ ), forza normale ( $T_s$ ) e carico di serraggio ( $N_s$ ) delle viti. . . . .	31
4.1	Rappresentazione della funzione Static Structural nel menu <i>Analysis Systems</i> . . . . .	36
4.2	Caratteristiche del materiale impostate nella voce <i>Structural Steel</i> . . . . .	36
4.3	Viste in prospettiva del sistema di pretensionamento visualizzate in <i>SpaceClaim</i> . . . . .	37
4.4	Rappresentazione dell'ottimizzazione fatta sulle superfici del bullone tramite la funzione integrata nella sezione Geometry di Ansys . . . . .	38

4.5	Rappresentazione dell'ottimizzazione fatta sulle superfici del dado tramite la funzione integrata nella sezione Geometry di Ansys. . . .	38
4.6	Maglia della mesh del dado generata automaticamente su Ansys. . .	41
4.7	Rappresentazione della faccia dei bulloni soggetta al facesizing. . . .	41
4.8	Proprietà della mesh assegnate alla piastra base e ai supporti laterali.	42
4.9	Proprietà della mesh assegnate alla putrella e alla parete centrale. .	42
4.10	Proprietà della mesh assegnate ai bulloni. . . . .	42
4.11	Mesh del nuovo sistema di pretensionamento. . . . .	43
4.12	Dettagli delle impostazioni relative ad Analysis Settings. . . . .	44
4.13	Impostazioni relative al carico di serraggio delle viti (bolt pretension).	44
4.14	Impostazioni relative la forza di precarico (force) applicata al sistema di pretensionamento. . . . .	44
4.15	Risultati relativi alla massima distorsione (Equivalent Stress) del sistema di pretensionamento. . . . .	45
4.16	Risultati relativi ai valori massimi di spostamento lungo le direzioni X/Y/Z (Directional Deformations) del sistema di pretensionamento.	47
4.17	Viste in sezione del componente di rinforzo alla parete centrale del sistema di pretensionamento. . . . .	48
4.18	Impostazione relativa la superficie di simmetria (simmetry region) del sistema di pretensionamento in ANSYS. . . . .	48
4.19	Risultati finali delle tensioni e degli spostamenti riguardanti il sistema di pretensionamento dotato del componente di rinforzo. . . . .	49
4.20	Sistema di pretensionamento dotato del componente di rinforzo visua- lizzato in SpaceClaim. . . . .	50



# Capitolo 1

## Introduzione

Il lavoro presentato in questo manoscritto è parte di un progetto più ampio rivolto a superare delle limitazioni associate al funzionamento della barra di Hopkinson attualmente in uso nei laboratori dell'UNIVPM.

Il presente studio è incentrato sulla progettazione di una modifica del supporto di pretensionamento per test dinamici sui materiali.

In particolare, l'obiettivo di questo lavoro è di progettare un nuovo sistema per sostenere una forza di pretensionamento con asse di spinta piuttosto elevato rispetto al piano d'appoggio del supporto stesso.

Il lavoro proposto consta di due fasi principali:

**PH1:** Progettazione del sistema di pretensionamento. In particolare, si è dapprima realizzato un prototipo di riferimento del sistema che soddisfacesse i requisiti progettuali. Sulla base di questo è stato sviluppato il modello 3D ottimale dell'assieme tramite il software CATIA V5;

**PH2:** Verifica sperimentale tramite il metodo degli elementi finiti. In particolare, l'assieme è stato sottoposto ad una prima analisi FEM. Lo studio dei risultati ottenuti ha permesso di identificare due importanti criticità sia a livello di tensione che di deformazione. Per correggere tali criticità è stato necessario ridurre il carico di serraggio delle viti poste alla base e installare un componente di rinforzo nella parete centrale. Infine il sistema dotato del componente di rinforzo è stato sottoposto ad un'analisi FEM i cui risultati hanno confermato il superamento di tutte le criticità.

## *Capitolo 1 Introduzione*

Il resto della tesi è composto da tre parti principali: *(i)* contestualizzazione del sistema di pretensionamento nella barra di Hopkinson, *(ii)* progettazione del nuovo sistema di pretensionamento, *(iii)* validazione attraverso l'analisi FEM del nuovo sistema di pretensionamento. In particolare, il Capitolo 2 presenta il funzionamento della split Hopkinson pressure bar (SHPB), illustrando nello specifico il meccanismo delle diverse parti che la compongono. Infine si mostrano i motivi per cui si è resa necessaria una riprogettazione del sistema di pretensionamento. Il Capitolo 3 elenca per prima cosa quali siano i requisiti progettuali del nuovo sistema di pretensionamento. Chiariti questi aspetti, sono descritte le fasi che hanno interessato la realizzazione del modello CAD 3D del sistema, dallo schizzo preliminare fino all'assieme finale. A completamento della progettazione, sono illustrati i passaggi matematici che verificano la validità del numero e della tipologia di viti usate nel collegamento sistema-putrella. Il Capitolo 4 introduce ed illustra lo studio del comportamento del sistema di pretensionamento mediante l'ausilio di software basati sul metodo FEM. Dopo una breve introduzione riguardo i processi coinvolti nell'analisi FEM mediante Ansys, sono elencati e descritti tutti i passaggi necessari ad ottenere i grafici desiderati. Infine, il Capitolo 5 conclude il manoscritto ripercorrendo gli aspetti esaminati nel corso del lavoro di tesi, per poi terminare raccogliendo e commentando i risultati ottenuti.

## Capitolo 2

### La barra di Hopkinson

Il test dinamico dei materiali è un compito importante per descrivere il comportamento ad alte velocità di deformazione e per comprendere fenomeni come la propagazione d'onda, l'inerzia e gli effetti d'attrito, formazione di onde d'urto, o gli effetti dinamici associati. Per questi test ad alta velocità di deformazione, le tecniche sperimentali della barra di Hopkinson si sono rivelate essere metodi fondamentali che producono risultati affidabili e costanti.

La barra di Hopkinson più usata è la *split Hopkinson pressure bar*. La Figura 2.1 schematizza il dispositivo, mostrando come essa sia formata da tre barre di acciaio coassiali cilindriche definite rispettivamente *striker bar*, *input bar* e *output bar*.

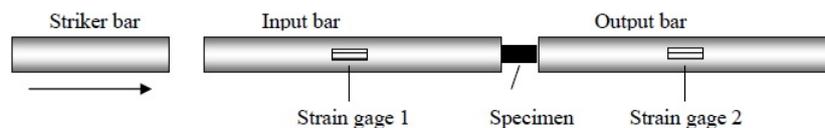


Figura 2.1: Schema complessivo della split Hopkinson pressure bar (SHPB).

Come mostrato in Figura 2.2, tra la input bar e la output bar è posto un campione, spesso di forma cilindrica, del materiale da testare. Per individuare la curva sforzo-deformazione del provino, la striker bar viene scagliata ad alta velocità contro la input bar. All'interfaccia tra le due barre si genera un'onda di tensione che si propaga per tutta la input bar raggiungendo il provino. L'onda viene quindi in parte riflessa dal campione, e in parte trasmessa alla output bar.

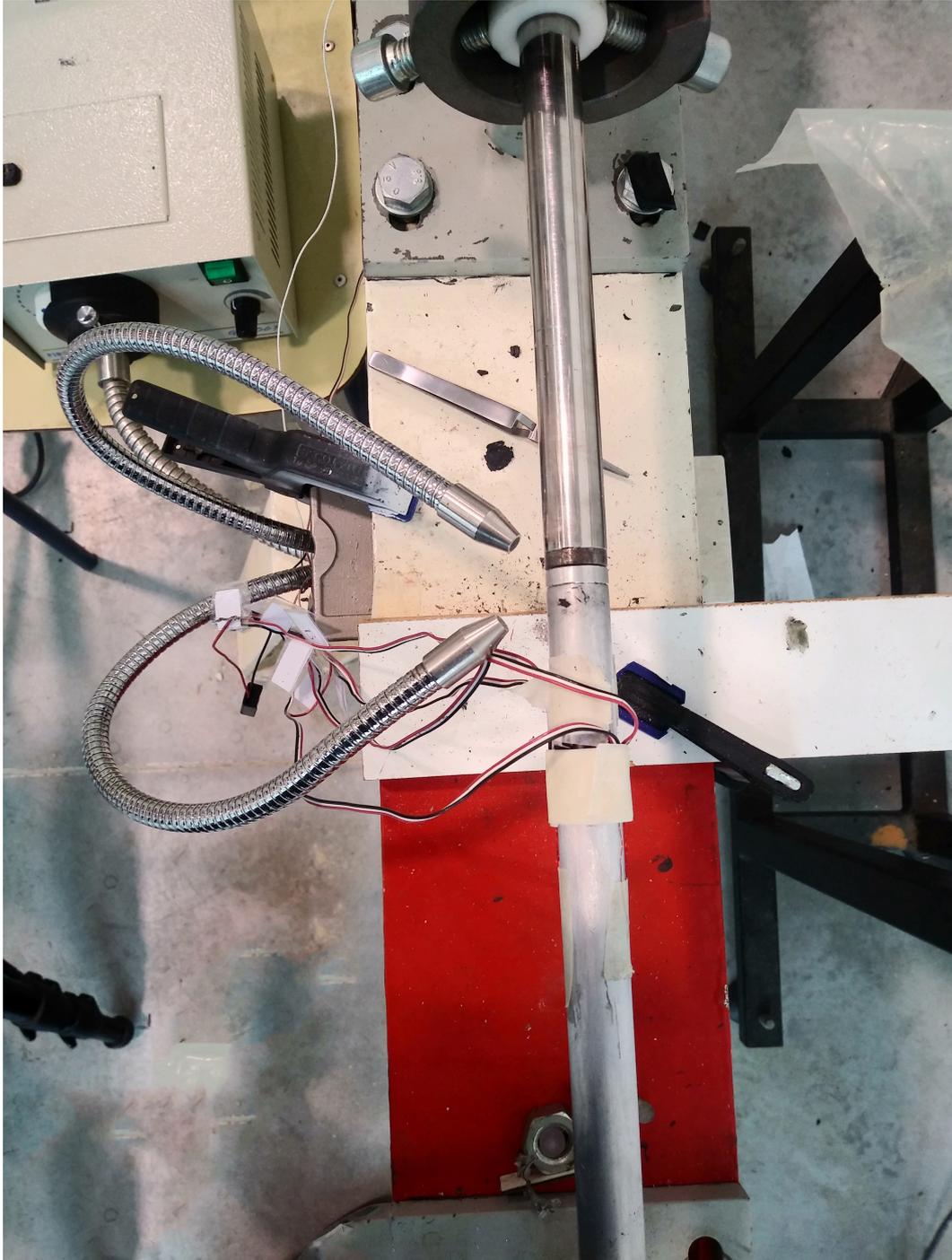


Figura 2.2: Interfaccia tra input bar e output bar della SHPB attualmente in uso nei laboratori dell'UNIVPM.

Nella split Hopkinson bar (split hopkinson pressure bar - SHPB), la deformazione massima ottenibile nel campione è proporzionale alla lunghezza della striker bar e

alla sua velocità d'impatto. Pertanto, la deformazione massima è vincolata dalla configurazione e dalle prestazioni del meccanismo di accelerazione della striker bar. Inoltre, nella teoria classica, la finestra temporale dell'esperimento è limitata al breve periodo di tempo prima che avvenga la sovrapposizione dell'onda nello strumento di rilevamento (tipicamente un estensimetro) dell'onda di deformazione. La velocità massima d'impatto della striker bar nella SHPB è limitata dalle prestazioni del dispositivo per l'accelerazione del percussore (tipicamente una *gas-gun*) e dal carico di snervamento del materiale delle barre [1].

La barra di Hopkinson è installata presso i laboratori pesanti dell'Università Politecnica delle Marche. La barra è posizionata su una trave a doppio T, chiamata *putrella*, sollevata dal pavimento tramite dei piedi di ancoraggio a terra. Sulla putrella sono fissati dei supporti regolabili, al cui interno sono posizionate le barre (*input bar e output bar*). Solitamente, nella SHPB convenzionale, la striker bar viene scagliata mediante un cannone ad aria compressa, mentre nella SHPB in questione si usa un sistema innovativo che permette di accelerare la striker bar.

L'estremità della striker bar è filettata, e su di essa vengono avvitati 2 nottolini di acciaio con interposto un elemento sacrificale di spessore variabile da 0,5 mm a 0,7 mm. L'elemento sacrificale è serrato da un manicotto sull'albero che trasferisce il moto prodotto da un martinetto meccanico. Grazie a quest'ultimo si è in grado di pretensionare la striker bar, in questo caso chiamata "barra pretensionata". Il martinetto tira indietro la barra pretensionata fino a provocare la rottura dell'elemento sacrificale. Il nottolino è collocato all'interno di un profilato che svolge sia la funzione di appoggio che di ostacolo per la *barra pretensionata*, che verrà quindi messa in tensione quando si azionerà il martinetto. Alla rottura dell'elemento sacrificale, la barra pretensionata accelererà in direzione opposta al martinetto andando ad impattare sulla input bar.



(a) Vista in dettaglio input Bar



(b) Vista in dettaglio output Bar

Figura 2.3: Input bar e output bar installate nei laboratori dell'UNIVPM.

## **2.1 Esigenze costruttive del sistema di pretensionamento**

Recenti studi condotti dall'Università Politecnica delle Marche sulla barra di Hopkinson hanno permesso di individuarne potenziali sviluppi volti a migliorarne le prestazioni in determinati contesti.

Uno di questi riguarda la modifica del sistema di pretensionamento di un meccanismo innovativo di grandi dimensioni. Poiché questa non può essere inserita nel dispositivo attualmente in uso in laboratorio per motivi di ingombro, l'obiettivo di questo lavoro di tesi è effettuare una modifica del sistema di pretensionamento in grado di permetterne una corretta installazione.

Inoltre, in base ai dati ottenuti da alcune prove effettuate con la barra di Hopkinson, è stata misurata una forza massima generata di 4 tonnellate. Il componente che si andrà quindi a progettare deve essere in grado di sopportare tale sollecitazione mantenendo una forma più rigida possibile.



# Capitolo 3

## Progetto del sistema di pretensionamento

### 3.1 Requisiti progettuali

Per risolvere i problemi illustrati nel Paragrafo 2.1, in questo Capitolo si procede con la realizzazione di un componente in grado di soddisfare tutte le esigenze costruttive. Tenendo presente le richieste esposte precedentemente, i principali aspetti da curare nella progettazione del componente sono i seguenti:

- **Ingombri:** realizzare una struttura che si integri adeguatamente con il sistema, sfruttando se possibile i fori già presenti sulla putrella;
- **Dimensionamento numero bulloni:** verificare che il numero di bulloni attualmente usati nel componente tutt'ora presente nel sistema siano sufficienti a fissare la base del componente alla putrella;
- **Dimensionamento geometria:** progettare una struttura predisposta a sopportare il carico applicato e in grado di accogliere il meccanismo di grandi dimensioni;
- **Autonomia:** il componente deve essere svincolato dal sistema in caso di interventi di manutenzione.

Sulla base di queste premesse, è stato realizzato il primo prototipo mostrato in Figura 3.1.



Figura 3.1: Vista prospettica modello 3D del prototipo del nuovo sistema di pretensionamento.

Il componente qui mostrato è sufficientemente alto da poter accogliere il meccanismo innovativo e presenta lateralmente dei supporti in grado di rendere la struttura più resistente al carico applicato.

### 3.2 Progettazione CAD 3D: CATIA V5®

Per la progettazione CAD 3D del componente, si è deciso di utilizzare il software CATIA V5.

Il software permette di effettuare un disegno 3D valutandone al meglio gli ingombri e verificandone la corretta integrazione con il resto del sistema. Il modello 3D è necessario anche per realizzare simulazioni mediante analisi FEM per verificarne il comportamento strutturale prevedendone difetti di progettazione. Una volta realizzato il componente, questo verrà integrato nel sistema di Figura 3.2.

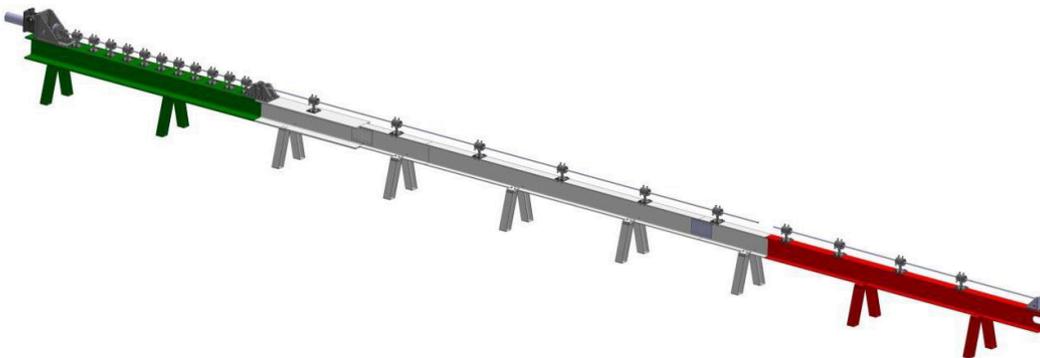


Figura 3.2: Rappresentazione in CAD 3D della barra di Hopkinson assemblata nei laboratori UNIVPM.

### 3.2.1 Progettazione del componente

Il componente deve essere progettato con lo scopo di essere al tempo stesso funzionale e costituito da parti di facile realizzazione. Quest'ultimo aspetto è importante, in quanto il componente finale dovrà essere economicamente sostenibile e dalla geometria quanto più semplice possibile.

La Figura 3.3 mostra lo schizzo preliminare del sistema di pretensionamento, ottenuto tenendo presente i requisiti citati nel Paragrafo 3.1. In tale figura è possibile identificare le 3 parti principali del sistema: (i) supporto centrale, (ii) supporti laterali, e (iii) piastra base.

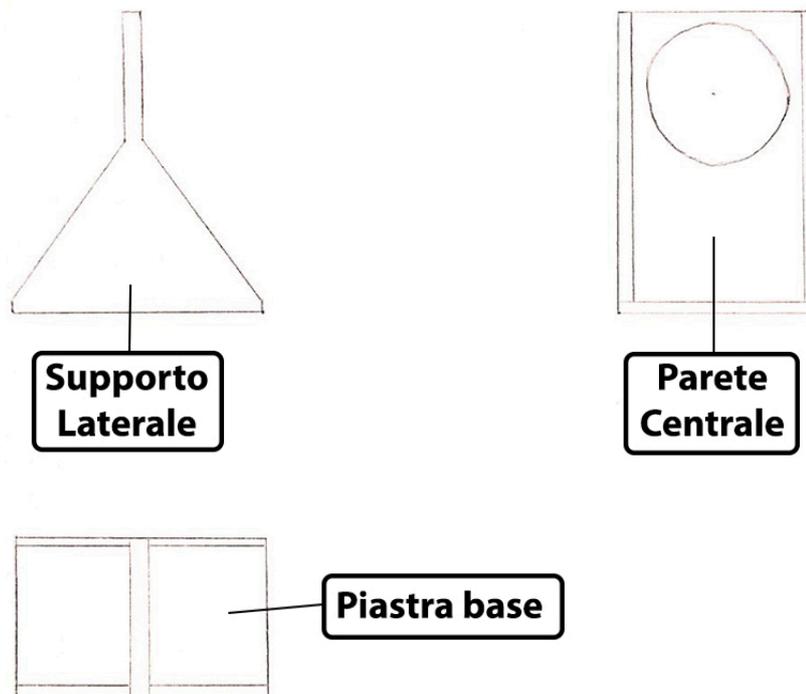


Figura 3.3: Schizzo preliminare del nuovo sistema di pretensionamento.

La Figura 3.4 mostra come nel nuovo componente il carico sarà applicato ad un'altezza maggiore rispetto al componente attualmente in uso in laboratorio.



Figura 3.4: Comparazione dei punti di applicazione del precarico tra il prototipo e l'attuale sistema di pretensionamento.

L'elevata altezza del carico rispetto al piano di appoggio ha imposto di effettuare delle ottimizzazioni alla geometria del sistema di pretensionamento, con l'obiettivo di migliorarne le capacità di resistenza.

Come mostrato dalla Figura 3.5, la prima miglioria ha interessato lo spessore della parete centrale e la larghezza dei supporti laterali.

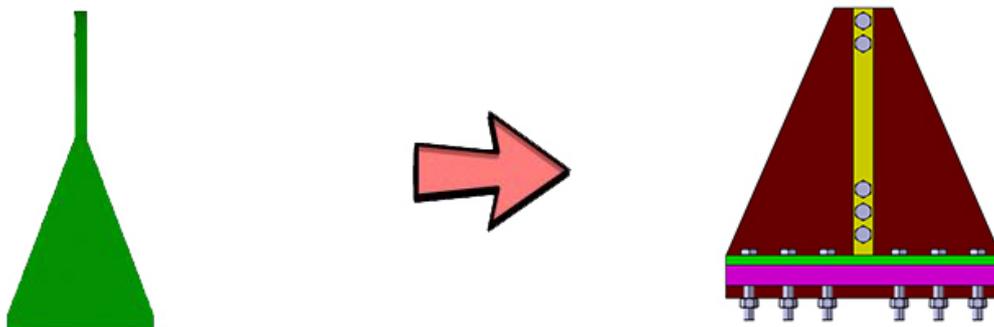


Figura 3.5: Rappresentazione dello sviluppo della parete centrale del sistema di pretensionamento.

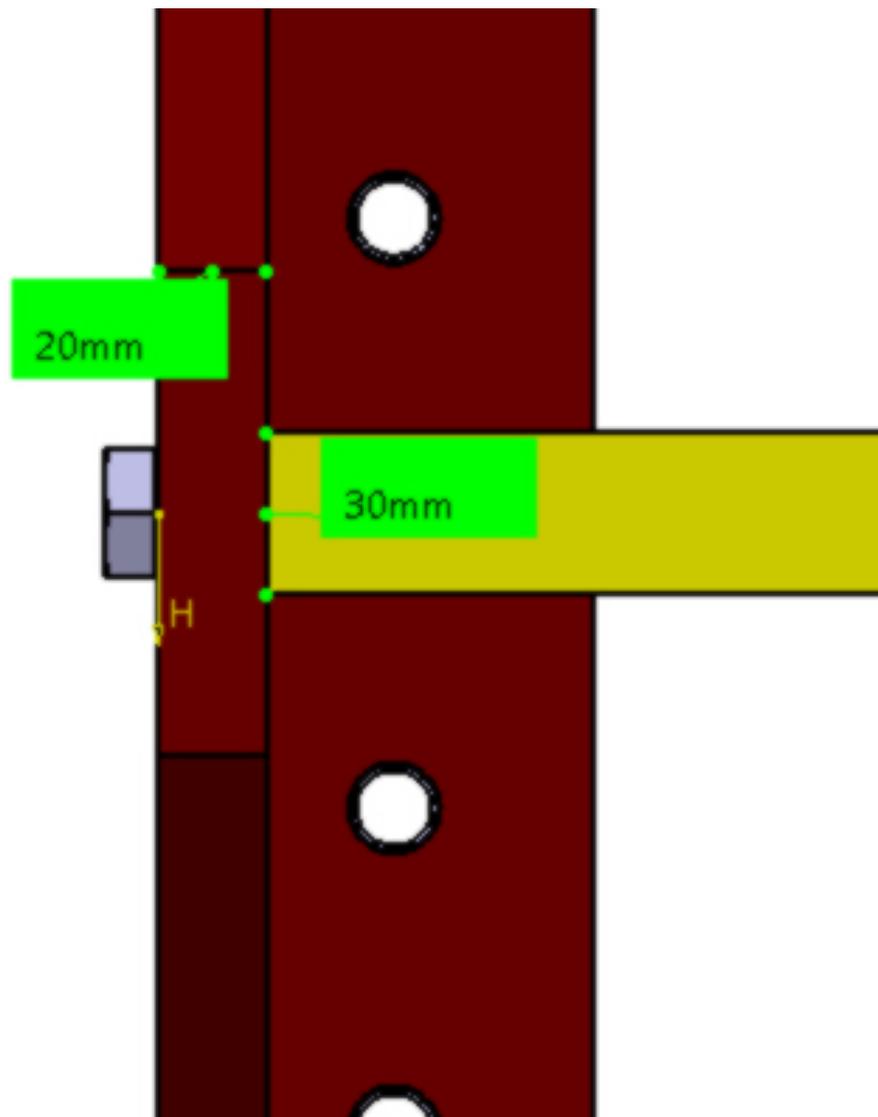


Figura 3.6: Rappresentazione spessori quotati del supporto Laterale (marrone) e della parete centrale (gialla).

In Figura 3.6 si può notare come in particolare gli spessori della parete centrale e dei supporti laterali sono stati portati rispettivamente a una grandezza di 30 mm e 20 mm.

In particolare, è necessario portare la parete centrale ad uno spessore di 30 mm non solo per ottenere una maggiore resistenza, ma anche per permetterne un corretto serraggio con i supporti laterali tramite l'utilizzo di viti M16.



### Capitolo 3 Progetto del sistema di pretensionamento

Per motivi di ingombro ed omogeneità, 2 viti sono disposte al di sopra del foro della parete centrale, mentre 3 viti al di sotto di esso:

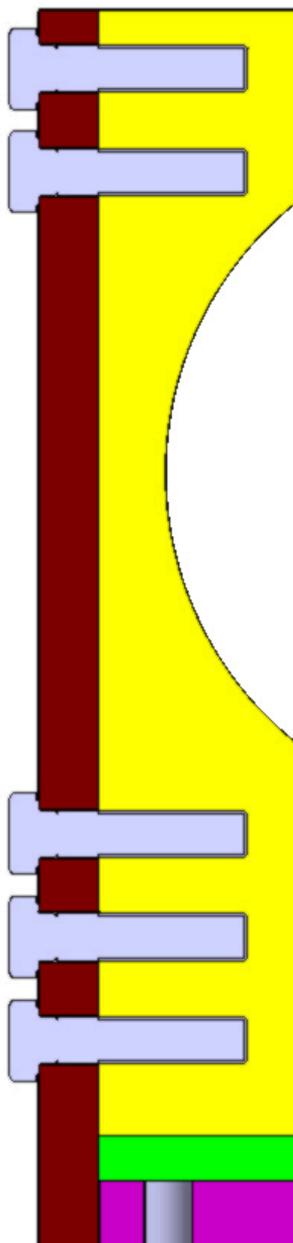
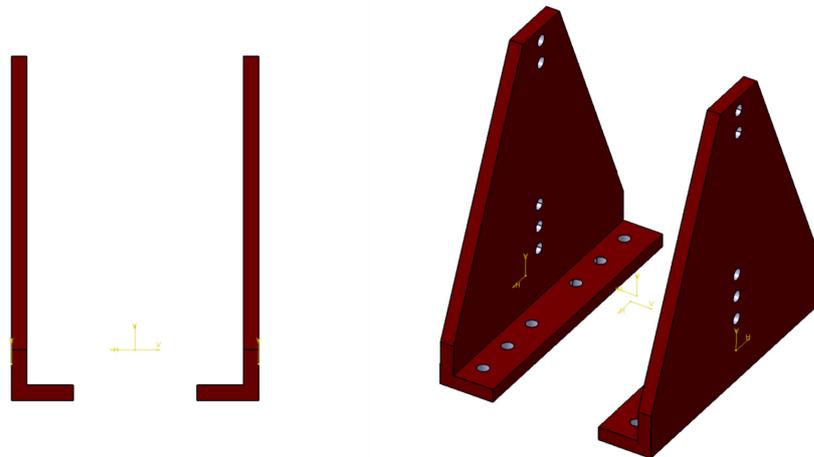


Figura 3.9: Vista frontale in sezione del serraggio tra supporto laterale e parete centrale nel nuovo sistema di pretensionamento.



(a) Vista frontale supporto laterale. (b) Vista prospettica supporto laterale.

Figura 3.10: Rappresentazione 3D del supporto Laterale nel nuovo sistema di riferimento.

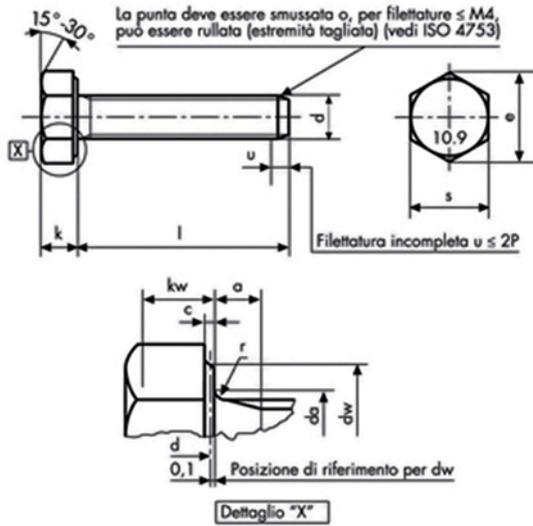
La seconda miglioria ha interessato l'accoppiamento tra il supporto laterale e la putrella.

Questa miglioria è necessaria per rendere più rigido il sistema, aumentando le superfici che si appoggiano alla putrella.

La Figura 3.15 mostra che per aumentare tale superficie di contatto tra le due parti si è progettato un supporto laterale dotato di un supplemento inferiore. Questo è costituito da un prolungamento del supporto laterale verso la parte inferiore della putrella, dotato di 6 fori filettati che consentono il serraggio del supporto laterale alla putrella stessa.

Come sostenuto nel Paragrafo 3.3, il collegamento “piastra base-putrella-supporto laterale” si realizza tramite l'utilizzo di 12 bulloni.

I bulloni impiegati in questo accoppiamento sono ISO 4017 - d M16 x l 100 - 10.9 (Figura 3.11) fissati alla base usando Dadi esagonali ISO 4032 - M16 - 10 (Figura 3.12).

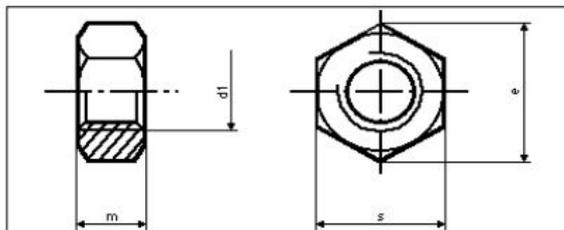


<b>M 16 X 100</b>		<b>da</b> max	17,7	<b>kw</b> min cat. A	6,87
<b>p</b>	2	<b>dw</b> min cat. A	22,49	<b>r</b> min	0,6
<b>a</b> max	6	<b>e</b> min cat. A	26,75	<b>s</b> max	24
<b>a</b> min	2	<b>nom</b>	10	<b>min cat. A</b>	23,67
<b>c</b> max	0,8	<b>k</b> min cat. A	9,82		
<b>c</b> min	0,2	<b>max cat. A</b>	10,18		

Figura 3.11: Diagramma Norma UNI 5739 - ISO 4017 M16 10.9.

Dadi esagonali tipo 1

**UNI EN 24032**  
**DIN EN 24032**  
**ISO 4032**  
passo grosso



<b>d1</b>	<b>M16</b>
<b>passo</b>	2
<b>e min.</b>	26,75
<b>m max.</b>	14,8
<b>m min.</b>	14,1
<b>s max.</b>	24

Figura 3.12: Diagramma Norma UNI EN 24032 - ISO 4032 M16.

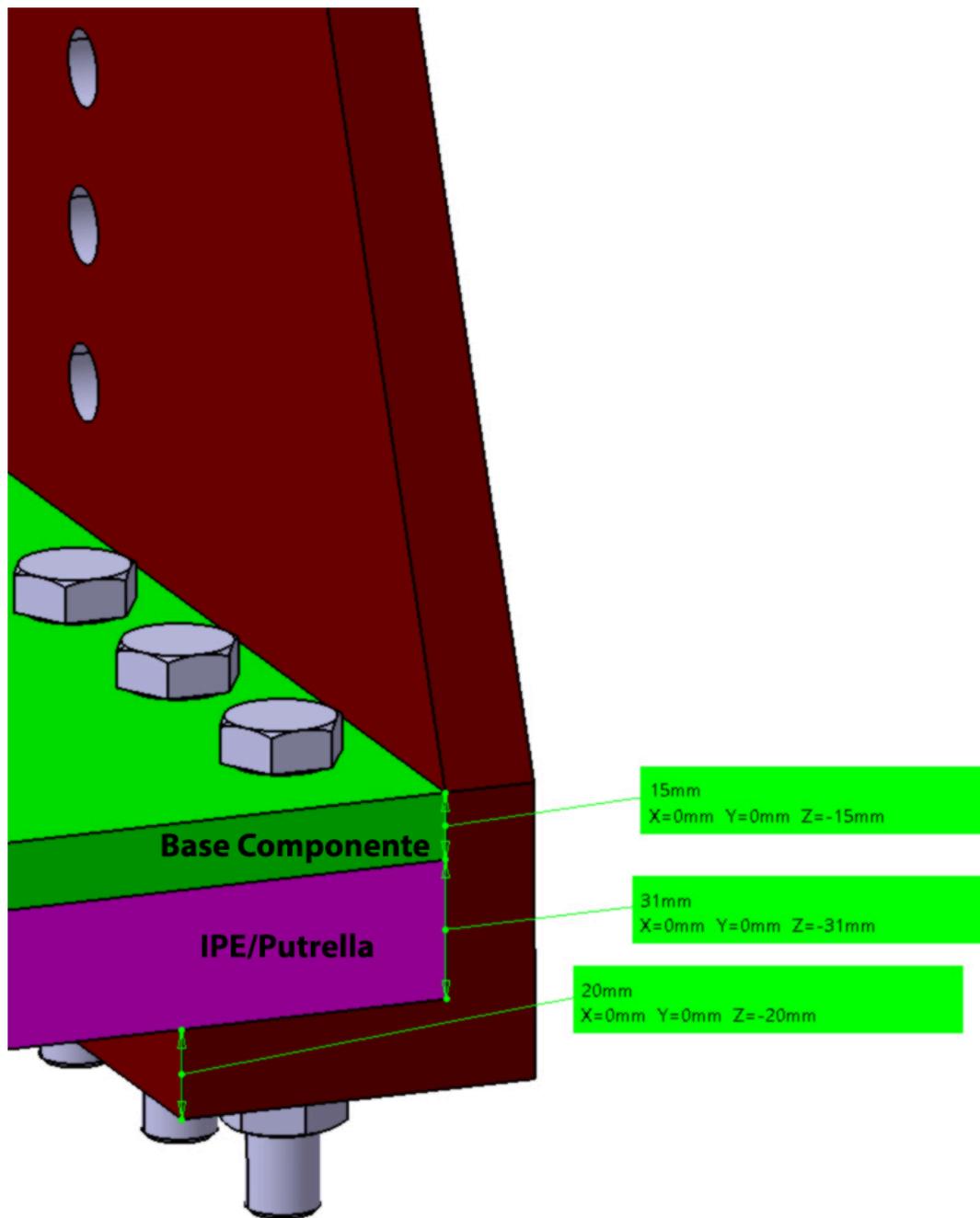


Figura 3.13: Dettaglio della vista prospettica del nuovo sistema di pretensionamento.

### Capitolo 3 Progetto del sistema di pretensionamento

Nella parete centrale si realizza un foro dal diametro di 235 mm, come mostrato in dettaglio nella Figura 3.14. Il foro ricavato nella parete centrale del sistema è realizzato con una grandezza tale da consentire il movimento del sistema di pretensionamento nella fase di rilascio del precarico. Esso, tuttavia, determina un indebolimento strutturale importante alla parete centrale.

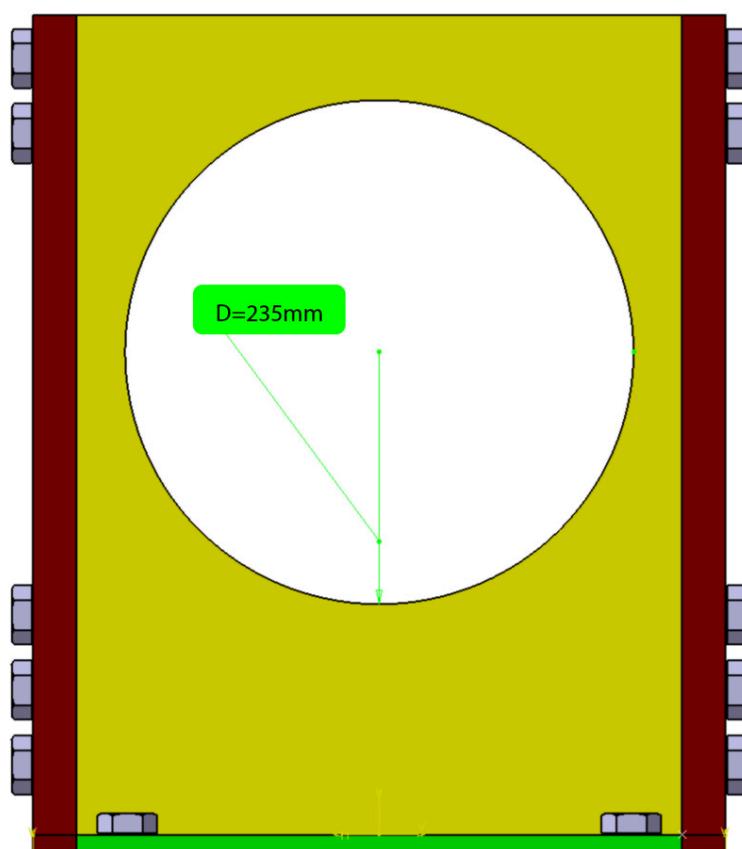
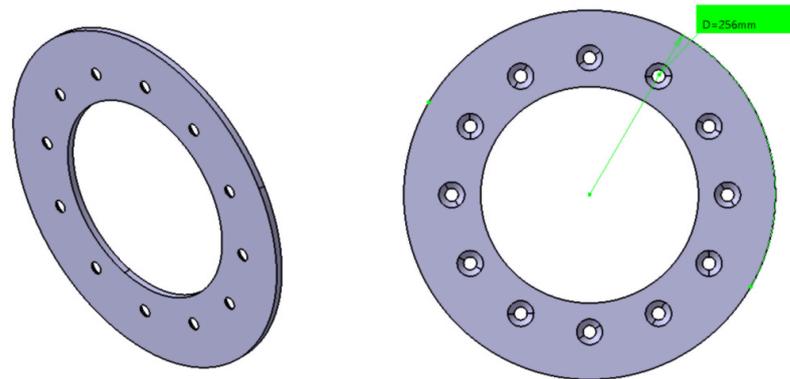


Figura 3.14: Dettaglio del foro nella parete centrale del nuovo sistema di pretensionamento.



(a) Vista Prospettica del disco di supporto. (b) Vista frontale del disco di supporto.

Figura 3.15: Modello 3D del disco montato alla base meccanismo di pretensionamento.

La superficie compresa tra le pareti laterali ed il grande foro centrale viene sfruttata per sostenere il carico derivante dal meccanismo di pretensionamento. Sulla superficie poggia un grande disco che rappresenta, in questo lavoro di tesi, la parte del meccanismo di pretensionamento che esercita la spinta sul supporto. Come mostrato in Figura 3.15b, si nota come il diametro esterno del disco sia di 256 mm. È quindi sovradimensionato di 21 mm rispetto al foro della parete centrale in modo da consentire il pretensionamento.

Inoltre, dalla Figura 3.15 si può osservare come sul disco sono realizzati 12 fori che permettono l'accoppiamento tra quest'ultimo e la Parete Centrale del Sistema di Pretensionamento.

Per il collegamento sopracitato sono state impiegate delle viti DIN EN ISO 10642 M8x12,5, descritte in Figura 3.16.

ART.5933 sim. ISO 10642 ex UNI 5933 DIN 7991  
 Vite a testa svasata piana con cava esagonale  
 Hexagon socket countersunk head screw

disponibile in A2 / A4  
 available in A2 / A4

	M3	M4	M5	M6	M8	M10	M12	(M14)	M16	M20
<i>d</i>										
<i>dk</i> max.	6,72	8,96	11,2	13,44	17,92	22,4	26,88	30,8	33,6	40,32
<i>e</i> min.	2,303	2,873	3,443	4,583	5,723	6,863	9,149	11,429	11,429	13,716
<i>k</i> max.	1,86	2,48	3,1	3,72	4,96	6,2	7,44	8,4	8,8	10,16
<i>s</i> nom.	2	2,5	3	4	5	6	8	10	10	12
<i>l</i> min.	1,1	1,5	1,9	2,2	3	3,6	4,3	4,5	4,8	5,6

Figura 3.16: Diagramma Norma UNI 5933 - ISO 10642 M8.

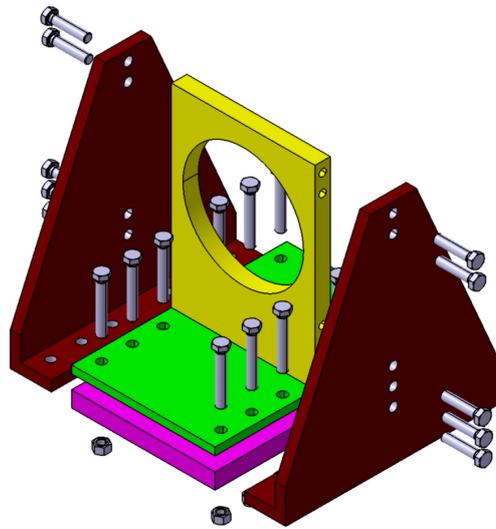


Figura 3.17: Vista in prospettiva del nuovo sistema di pretensionamento Esploso in CATIA.

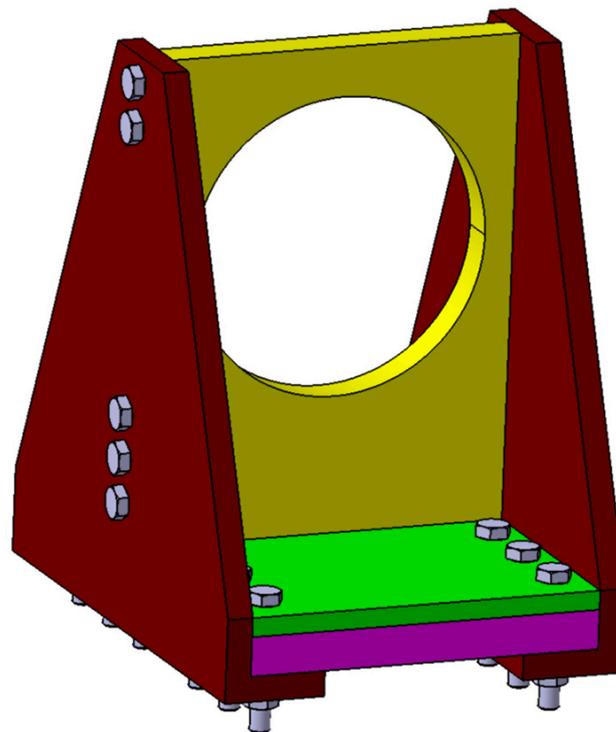


Figura 3.18: Vista in prospettiva del nuovo sistema di pretensionamento ottenuto in CATIA.

Una volta definite tutte le parti del componente, si genera nell'ambiente assembly il modello CAD dell'assieme.

### 3.2.2 Tavole tecniche

Dal modello CAD 3D appena ottenuto, è possibile realizzare grazie alla funzione *drafting* integrata in CATIA V5, le tavole tecniche delle singole parti e dell'assieme.

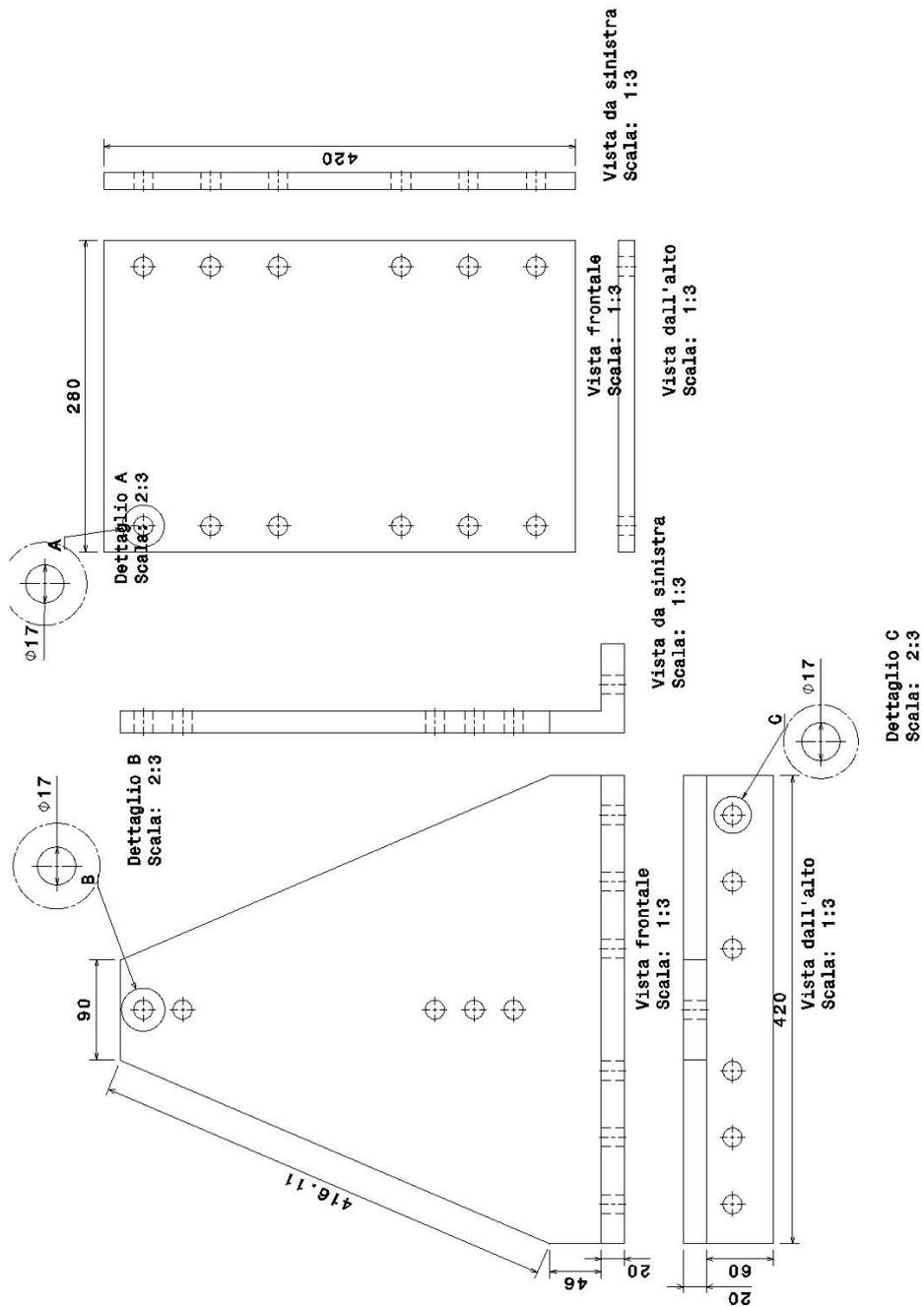


Figura 3.19: Tavola tecnica del supporto laterale e della piastra base.

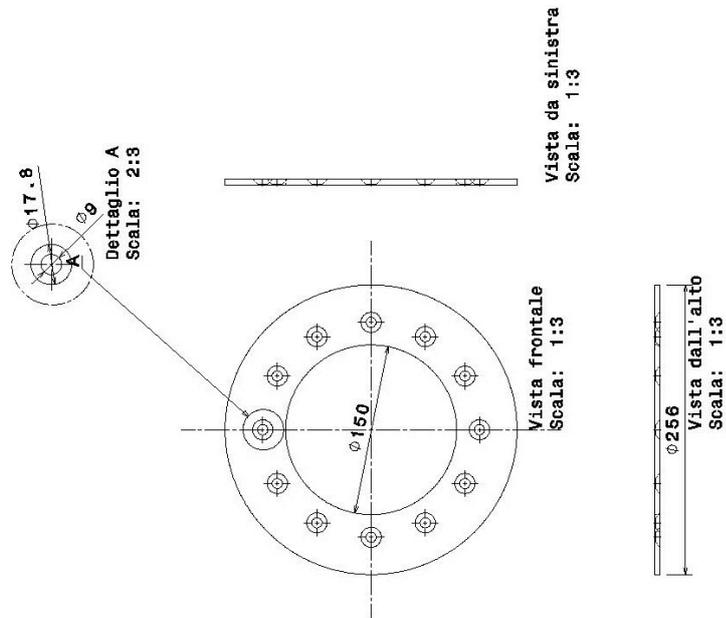


Figura 3.20: Tavola tecnica della piastra di supporto al meccanismo.

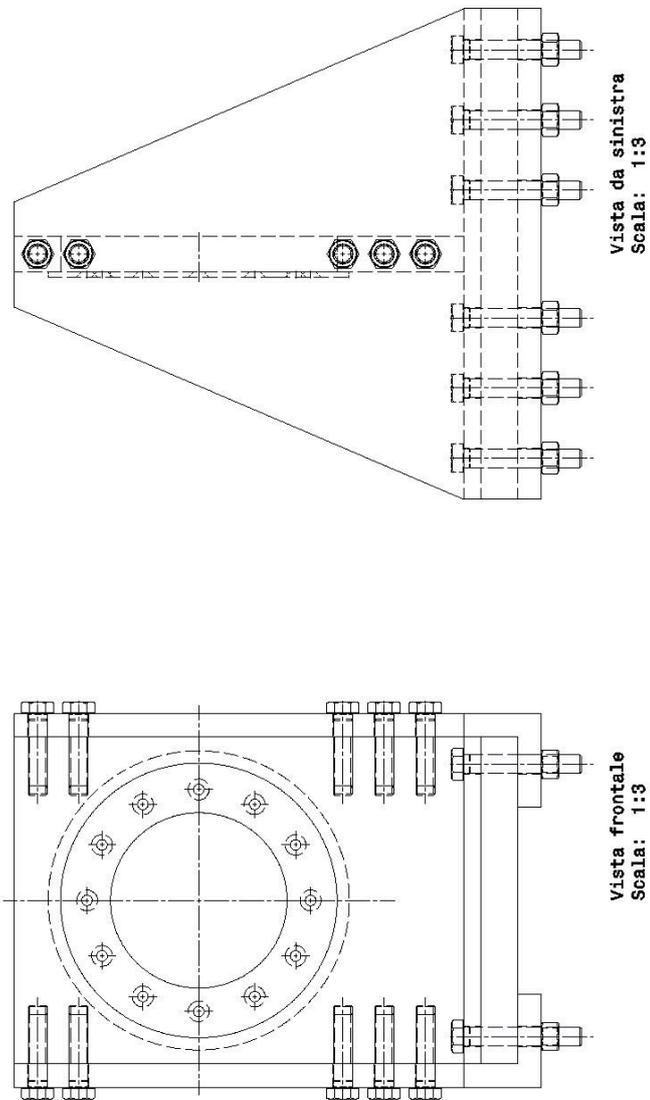


Figura 3.21: Tavola tecnica del sistema di pretensionamento assemblato.

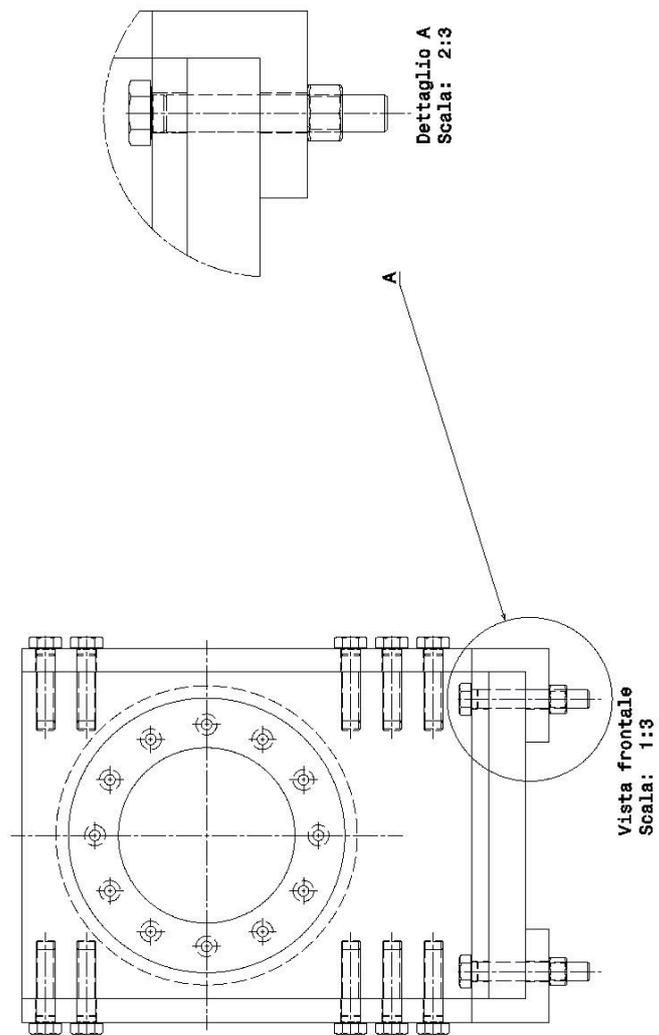


Figura 3.22: Tavola Tecnica del dettaglio sui bulloni UNI 5730 - ISO 4017 M16X100.

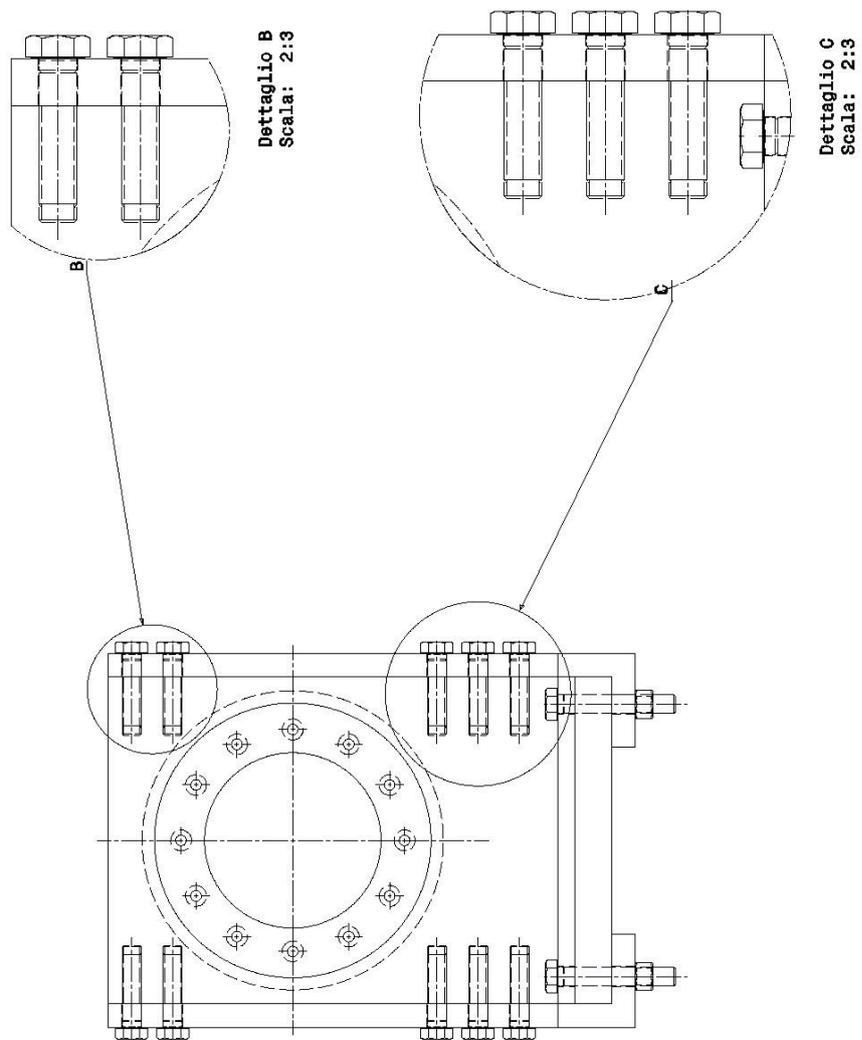


Figura 3.23: Tavola Tecnica dei dettagli sui bulloni Lateral UNI 5730 - ISO 4017 M16X70.

### 3.3 Calcolo e verifica del serraggio putrella-piastra base

Come già anticipato nel Paragrafo 2.1, il componente sarà sottoposto ad un carico di 4 tonnellate. Osservando la Figura 3.24, si nota che la forza  $F$  è applicata nel punto  $A$  ad un'altezza di 230 mm. Prendendo come esempio il componente già

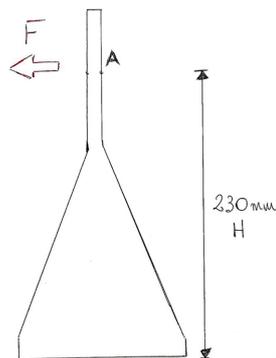


Figura 3.24: Vista laterale dello schizzo preliminare del nuovo sistema di pretensionamento.

presente in laboratorio, si ipotizza che il collegamento base-putrella si realizzi tramite l'impiego di 12 bulloni, in modo tale da sfruttare i fori già presenti sulla putrella in laboratorio. Per collocare adeguatamente i bulloni si ha la necessità di usare come base del componente una piastra dalla grandezza di almeno 280mm x 420mm, come mostrato in Figura 3.25.

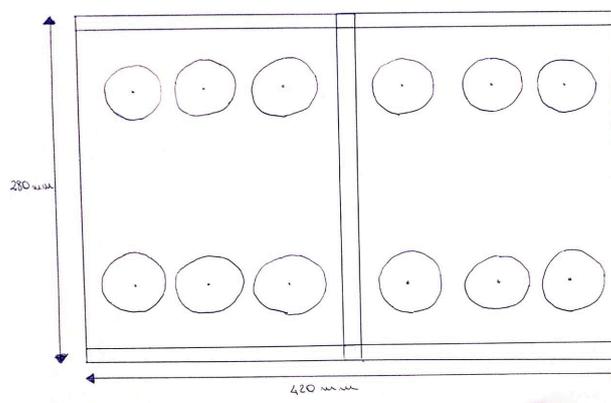


Figura 3.25: Vista superiore dello schizzo preliminare del nuovo sistema di pretensionamento.

### 3.3 Calcolo e verifica del serraggio putrella-piastra base

Definite queste grandezze, si procede con il calcolo che verifica il corretto serraggio della base alla putrella.

Per prima cosa si ricava il *momento flettente* generato dalla Forza  $\mathbf{F}$ . Il momento flettente è definito come:

$$M_f = F * H \quad (3.1)$$

$$M_f = 40000 * 0.23 = 9200 \text{ N} * \text{m} \quad (3.2)$$

In questa situazione non c'è momento torcente ripetto all'asse di applicazione del precarico di 4 tonnellate. Il taglio primario sui bulloni corrisponde alla seguente relazione:

$$V_t = \frac{F}{n_v} \quad (3.3)$$

in cui  $n_v$  rappresenta il numero di viti/bulloni totali coinvolti nel collegamento, nel nostro caso 12. Procedendo con le dovute sostituzioni si ottiene:

$$V_t = \frac{40.000}{12} = 3333,33 \text{ N} \quad (3.4)$$

Essendo questo un momento flettente applicato in un caso di *flangia rigida*, è possibile calcolare la *forza di separazione della flangia rigida* attraverso l'espressione:

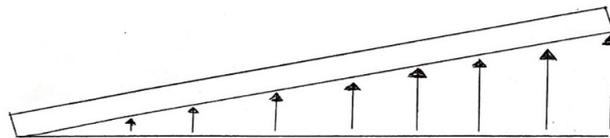


Figura 3.26: Rappresentazione generica di una flangia rigida sottoposta ad un carico di separazione.

$$N_{sep.F.R.} = \frac{M_f * a_i}{\sum a_i^2} \quad (3.5)$$

In Equazione 3.5 il termine  $a_i$  indica la distanza del bullone più critico dal centro, e il termine  $\sum a_i^2$  è la somma delle distanze di ogni singolo bullone dal centro. In

particolar i valori assunti delle variabili sopracitate sono:

- $d_1 = 0,210 m$
- $d_2 = 0,163 m$
- $d_3 = 0,128 m$
- $a_i = 0,210 m$

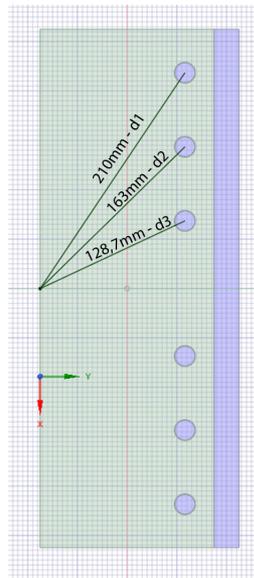


Figura 3.27: Distanze centro-bullone della piastra Base.

$$\begin{aligned}\sum a_i^2 &= 4 * d_1^2 + 4 * d_2^2 + 4 * d_3^2 \\ &= 4 * 0,21^2 + 4 * 0,163^2 + 4 * 0,128^2 \\ &= 0,176 + 0,106 + 0,06 = 0,342 m\end{aligned}\tag{3.6}$$

Procedendo con le dovute sostituzioni, si ottiene che:

$$N_{sep.F.R.} = \frac{9.200 * 0,21}{0,342}\tag{3.7}$$

### 3.3 Calcolo e verifica del serraggio putrella-piastra base

Quest'operazione va però moltiplicata per  $\frac{1}{2}$ , in quanto si dispone di 2 file da 6 bulloni ciascuna. L'operazione quindi diventa:

$$N_{sep.F.R.} = \frac{9.200 * 0,21}{0,342} * \frac{1}{2} = 2.824.5N \quad (3.8)$$

A questo punto va scelta la classe di resistenza dei bulloni più adeguata alle nostre necessità.

La scelta del bullone va fatta in base alla *tensione limite* a cui una vite può essere sollecitata. In questo caso, si è scelto di utilizzare la stessa classe di bulloni attualmente in uso per l'analogo componente tutt'ora in laboratorio. La classe di bulloni in questione è M16 10.9.

Con M16 si indica il tipo di filettatura del bullone.

Con la sigla 10.9, come mostrato dalla Figura 3.28, si indicano invece rispettivamente la *tensione di rottura* e *tensione di snervamento*:

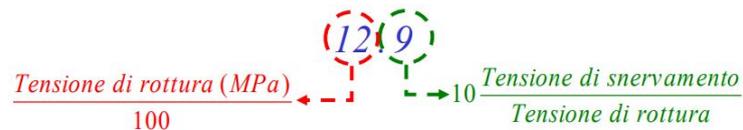


Figura 3.28: Schema di come poter ricavare la tensione di rottura ( $\sigma_r$ ) e la tensione di snervamento ( $\sigma_s$ ) dalla classe della vite.

In questo caso si ha una *tensione di rottura* pari a  $\sigma_r = 1000MPa$  e *tensione di snervamento* pari a  $\sigma_s = 900MPa$ . Una volta stabilita la classe dei bulloni, si procede a ricavarne il corrispondente *carico di serraggio* ( $N_s$ ) dalla tabella in Figura 3.29 :

**Prospetto 4-IV**

d mm	A <sub>res</sub> mm <sup>2</sup>	T <sub>s</sub> (N · m)					N <sub>s</sub> (kN)					d mm
		4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	4.6	5.6	6.6	8.8	10.9	
12	84	39	48	58	90	113	16	20	24	38	47	12
14	115	62	77	93	144	180	22	28	33	52	64	14
16	157	96	121	145	225	281	30	38	45	70	88	16
18	192	133	166	199	309	387	37	46	55	86	108	18
20	245	188	235	282	439	549	47	59	71	110	137	20
22	303	256	320	384	597	747	58	73	87	136	170	22
24	353	325	407	488	759	949	68	85	102	158	198	24
27	459	476	595	714	1 110	1 388	88	110	132	206	257	27
30	561	646	808	969	1 508	1 885	108	135	161	251	314	30

Figura 3.29: Prospetto generico che mostra i valori dell'Area resistente ( $A_{res}$ ), forza normale ( $T_s$ ) e carico di serraggio ( $N_s$ ) delle viti.

### Capitolo 3 Progetto del sistema di pretensionamento

Ottenuti questi dati, si prosegue con il calcolo della *Forza trasmissibile per attrito*:

$$V_{f,0} = \frac{\mu * N_S}{\gamma_f} * n_S \quad (3.9)$$

in cui  $\mu$  è il coefficiente d'attrito,  $\gamma_f$  è il coefficiente di sicurezza e  $n_S$  è il numero di superfici. Poiché in questo caso agisce anche una *forza di separazione*  $N_{sep.f.r.}$  che riduce le forze di contatto tra le piastre, la formula diventa:

$$\begin{aligned} V_{f,N} &= V_{f,0} * \left(1 - \frac{N_{sep.f.r.}}{N_S}\right) = \frac{\mu * N_S}{\gamma_f} * \left(1 - \frac{N_{sep.f.r.}}{N_S}\right) \\ \Rightarrow V_{f,N} &= \frac{0,12 * 88.000}{1,25} * \left(1 - \frac{2824,5}{88.000}\right) = 8.176,8N \end{aligned} \quad (3.10)$$

Per verificare l'idoneità dei bulloni scelti per il carico di 4 tonnellate, deve essere dimostrata la seguente relazione:

$$V_{f,N} > V_t \Rightarrow 8176,8N > 3333,33N \quad (3.11)$$

In conclusione, questo dimostra che la forza di trasmissione è maggiore della forza applicata alla vite più carica.

É quindi possibile il serraggio tra la putrella e la piastra base tramite l'impiego di 12 bulloni M16 10.9.

## Capitolo 4

# Verifica Sperimentale attraverso l'analisi FEM

È fondamentale prevedere il comportamento del componente appena predisposto e delle tensioni interne che vi si generano nel materiale. Per questo motivo si deve ricorrere all'ausilio di software basati sul metodo **FEM** (*Finite Element Method*).

### 4.1 Metodo FEM

#### Introduzione

La creazione di soluzioni di problemi ingegneristici usando analisi FEA (*Finite Element Analysis*) richiede lo sviluppo di un software basato sull'elaborazione FEA o l'uso di un software FEA polivalente come ANSYS.

Ansys è un potente software, uno strumento di analisi universale che può essere usato in una vasta gamma di ambiti ingegneristici, in grado di simulare possibili problematiche in molti settori ingegneristici.

#### Considerazioni funzionali alla modellazione

Al fine di ridurre il tempo di calcolo, dettagli secondari che non influenzano i risultati non dovrebbero essere inclusi nel modello FE. I dettagli secondari vengono ignorati anche per rendere la geometria simmetrica, e quindi ridurre ulteriormente il tempo di calcolo. In alcune geometrie, i dettagli secondari possono essere ad esempio **filettature** o **fori**.

Nell'ottimizzazione della geometria è fondamentale effettuare una valutazione ingegnerista riguardo un guadagno nel costo computazionale a fronte di una perdita nella precisione dei risultati.

Se il componente/assieme che stiamo considerando presenta delle simmetrie, allora è vantaggioso considerarne solo una sezione. Le simmetrie sopracitate sono nello specifico le seguenti:

- **Geometria;**
- **Proprietà del materiale;**
- **Carichi applicati;**
- **Gradi di libertà.**

### **Mesh**

In generale, un sistema con un elevato numero di elementi offre una soluzione più precisa. Comunque, in molte situazioni, un numero eccessivo di elementi potrebbe incrementare il numero di errori dovuti all'approssimazione. È quindi importante che la mesh sia adeguatamente *raffinata* nelle zone che la richiedono.

Non è possibile dire quanto una mesh debba essere raffinata, in quanto è un fattore totalmente dipendente dalle specifiche tecniche dell'assieme.

### **Metodo di analisi ANSYS**

L'analisi in ANSYS può essere quindi schematizzata in 3 principali steps:

- **Generazione della mesh**
  - *Semplificazioni*
  - *Definizione del materiale e delle sue proprietà*
  - *Generazione mesh*
- **Soluzione**
  - *Specificare eventuali condizioni al contorno*
  - *Raccogliere le soluzioni*

- **Analisi dei risultati**

### **Suddivisione dei processi in Ansys**

Una normale analisi effettuata in Ansys, sono distinguibili tre principali steps:

- **Generazione del modello;**
- **Soluzione;**
- **Analisi dei risultati.**

La generazione del modello si realizza durante la fase *preprocessor*, in cui vengono specificate le caratteristiche del materiale, viene generato il modello e infine la mesh. Successivamente si trova la fase *solution processing*, in cui si raccolgono i risultati del modello FE generato nella fase di *processing*.

Infine si ha la fase di *postprocessing* in cui vengono analizzati i risultati ottenuti riguardante tutto o solo una sezione del modello [2].

## 4.2 Valutazioni preliminari

La prima cosa da fare per impostare correttamente la simulazione, è scegliere il metodo di analisi che verrà utilizzato. In Figura 4.1 si vede come per questa analisi verrà utilizzata la funzione "Static Structural", ovvero la sezione utilizzata per analizzare la statica delle strutture.

Successivamente, si procede con la scelta delle caratteristiche del materiale di cui è

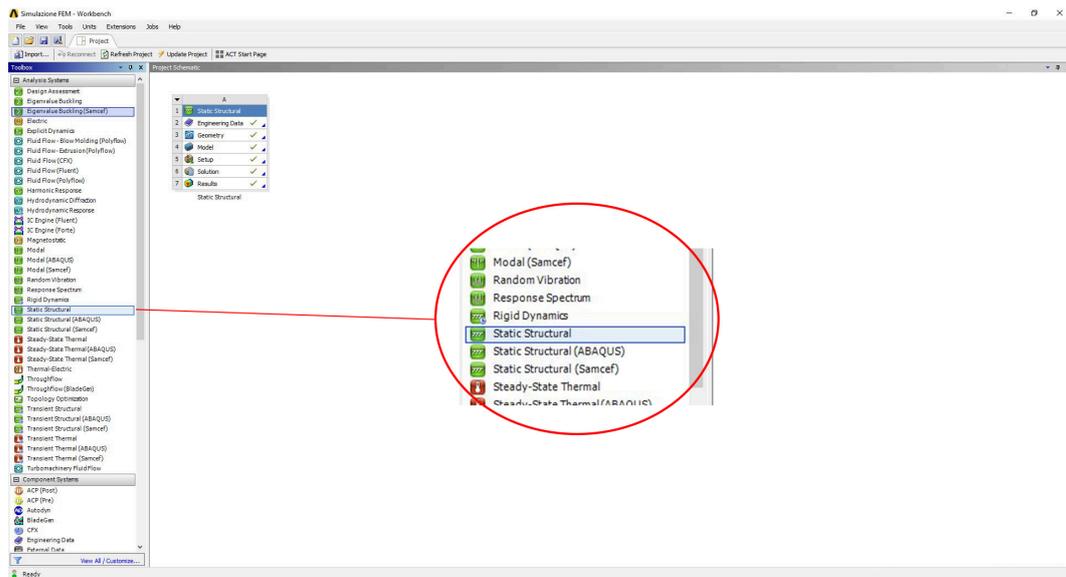


Figura 4.1: Rappresentazione della funzione Static Structural nel menu *Analysis Systems*.

costituito il sistema di pretensionamento.

Il materiale in questione è *Structural Steel*, ovvero acciaio strutturale, come mostrato in Figura 4.2.

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D E
	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
8	Young's Modulus	2E+05	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,3		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
16	Strain-Life Parameters			
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa	
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa	
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa	
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

Figura 4.2: Caratteristiche del materiale impostate nella voce *Structural Steel*.

### 4.3 Definizione della Geometria

Una volta impostate correttamente queste voci, si procede con l'importazione del modello CAD del componente realizzato con CATIA.

ANSYS è dotato di un modulo, *geometry*, grazie al quale è possibile effettuare delle modifiche al modello, adattandolo così alle esigenze di simulazione.

Il file importato apparirà come in Figura 4.3.

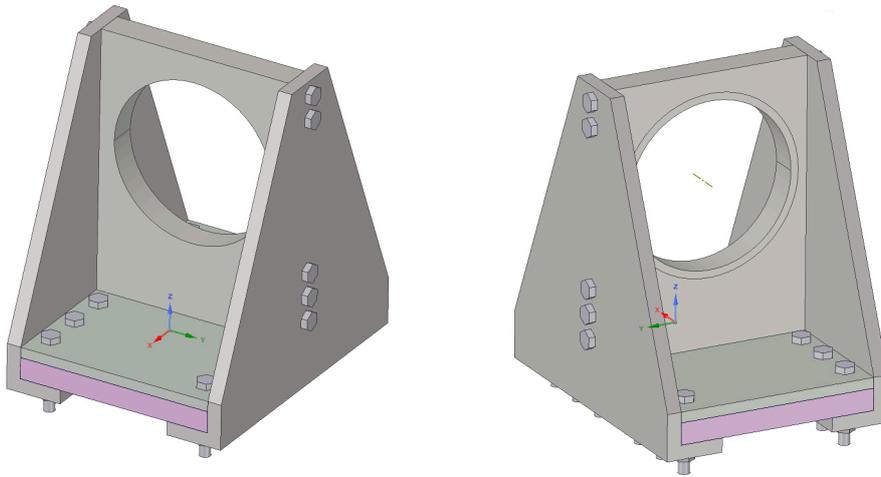


Figura 4.3: Viste in prospettiva del sistema di pretensionamento visualizzate in *SpaceClaim*.

#### Semplificazione della Geometria

Una volta predisposto il componente, si procede con una semplificazione della geometria tale da ridurre al minimo il tempo di calcolo finale.

In questo caso, la semplificazione interessa tutti i bulloni e i dadi montati sulla struttura. Questi presentano numerose superfici che possono essere ignorate, in quanto il loro apporto al risultato finale è pressoché nullo.

Dalle immagini 4.4 e 4.5 si possono apprezzare tali ottimizzazioni eseguite attraverso il comando *remove faces*.

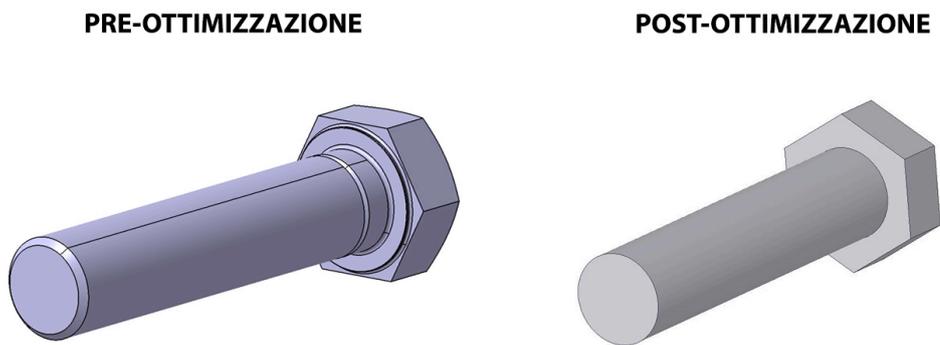


Figura 4.4: Rappresentazione dell'ottimizzazione fatta sulle superfici del bullone tramite la funzione integrata nella sezione Geometry di Ansys .



Figura 4.5: Rappresentazione dell'ottimizzazione fatta sulle superfici del dado tramite la funzione integrata nella sezione Geometry di Ansys.

## 4.4 Verifica dei contatti

Questo step ha l'obiettivo di definire e specificare i contatti che intercorrono tra le superfici delle singole parti dell'assieme. I contatti che il software mette a disposizione sono 5:

- **Bonded:** non è consentito lo scorrimento o la separazione tra le facce o i bordi. Le zone vanno intese come incollate tra loro;
- **No separation:** è concesso lo scorrimento, ma i nodi a contatto tra loro sono vincolati rispetto alla direzione normale;
- **Frictionless:** realizza un contatto di strisciamento senza attrito;
- **Rough:** si applica a superfici in contatto senza strisciamento, con un coefficiente di attrito molto elevato tra i corpi;
- **Frictional:** realizza un contatto di strisciamento con attrito, il quale può essere impostato a seconda delle proprie necessità.

Il software è in grado di rilevare autonomamente tutti i contatti che si sviluppano nell'assieme.

Tuttavia, in questo caso è necessario intervenire manualmente per impostare correttamente i contatti tra le superfici.

Nello specifico i contatti sono stati assegnati con i seguenti criteri:

- **Bonded:** contatto tra dado e bullone;
- **Frictional:** contatto tra bullone e piastra base;
- **Frictional:** contatto tra bullone e putrella;
- **Frictional:** contatto tra bullone e parete centrale;
- **Frictional:** contatto tra dado e putrella.

Riguardo ai contatti *frictional*, si è applicato un coefficiente d'attrito di 0,1 e si è specificato un comportamento simmetrico.

## 4.5 Generazione mesh

Come già espresso nel Paragrafo 4.1, questa fase è fondamentale al fine di ottenere un'analisi quanto più accurata possibile.

Ansys permette la realizzazione automatica della mesh, in quanto riconosce la geometria di ciascun corpo ed esegue la ricerca dell'elemento finito più appropriato.

Come accennato precedentemente, mesh più fitte generano simulazioni più accurate, ma aumentano il numero di elementi finiti che occorrono per definire il volume che si sta esaminando.

### 4.5.1 Scelta delle mesh

Per questo assieme sono stati usati diversi tipi di mesh, ognuna con delle particolarità:

- **Multizone:** fornisce una scomposizione automatica della geometria, generando automaticamente una mesh esaedrica grezza dove possibile e poi riempie le regioni più difficili da acquisire con una mesh poco strutturata;
- **Hex-Dominant:** il suo obiettivo è di generare mesh come una prevalenza di elementi esaedrici;
- **Face Sizing:** si applica a facce o gruppi di facce per regolarne in modo più accurato e specifico la mesh.

Particolare menzione va fatta riguardo ai dadi. Come visibile dalla Figura 4.5, in post-ottimizzazione si è diviso il volume in 6 parti uguali (vedi Figura 4.6). Quest'operazione ha permesso una generazione automatica della mesh adeguata senza alcuna assegnazione specifica sopraelencata.

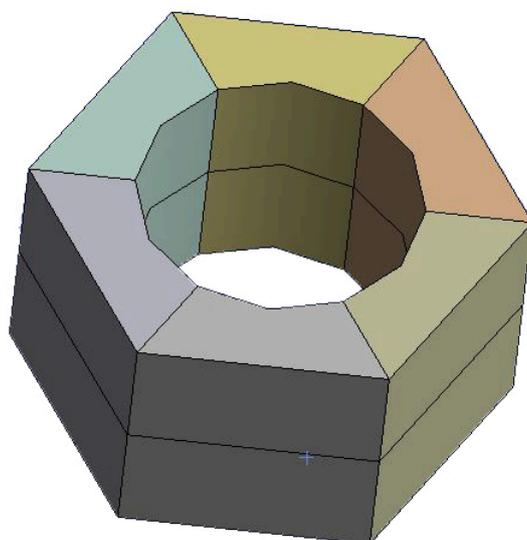


Figura 4.6: Maglia della mesh del dado generata automaticamente su Ansys.

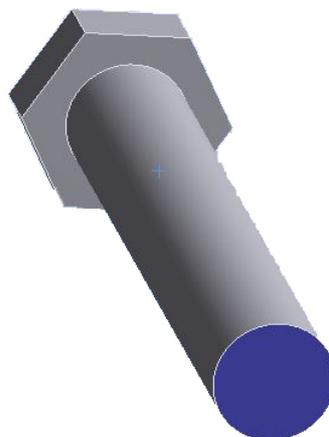


Figura 4.7: Rappresentazione della faccia dei bulloni soggetta al facesizing.

Capitolo 4 Verifica Sperimentale attraverso l'analisi FEM

Details of "MultiZone 2" - Method		Details of "MultiZone" - Method	
<b>Scope</b>		<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body	Geometry	2 Bodies
<b>Definition</b>		<b>Definition</b>	
Suppressed	No	Suppressed	No
Method	MultiZone	Method	MultiZone
Mapped Mesh Type	Hexa	Mapped Mesh Type	Hexa
Surface Mesh Method	Program Controlled	Surface Mesh Method	Program Controlled
Free Mesh Type	Not Allowed	Free Mesh Type	Not Allowed
Element Order	Use Global Setting	Element Order	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Automatic	Src/Trg Selection	Automatic
Source Scoping Method	Program Controlled	Source Scoping Method	Program Controlled
Source	Program Controlled	Source	Program Controlled
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size	Sweep Size Behavior	Sweep Element Size
<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	Default	<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	Default
<b>Advanced</b>		<b>Advanced</b>	
Preserve Boundaries	Protected	Preserve Boundaries	Protected
Mesh Based Defeaturing	Off	Mesh Based Defeaturing	Off
Minimum Edge Length	15, mm	Minimum Edge Length	20, mm
Write ICEM CFD Files	No	Write ICEM CFD Files	No

(a) Mesh della piastra base.

(b) Mesh supporti laterali.

Figura 4.8: Proprietà della mesh assegnate alla piastra base e ai supporti laterali.

Details of "MultiZone 3" - Method		Details of "Hex Dominant Method" - Method	
<b>Scope</b>		<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body	Geometry	1 Body
<b>Definition</b>		<b>Definition</b>	
Suppressed	No	Suppressed	No
Method	MultiZone	Method	Hex Dominant
Mapped Mesh Type	Hexa	Element Order	Use Global Setting
Surface Mesh Method	Program Controlled	Free Face Mesh Type	Quad/Tri
Free Mesh Type	Not Allowed	Control Messages	No
Element Order	Use Global Setting		
Src/Trg Selection	Automatic		
Source Scoping Method	Program Controlled		
Source	Program Controlled		
Sweep Size Behavior	Sweep Element Size		
<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	Default		
<b>Advanced</b>			
Preserve Boundaries	Protected		
Mesh Based Defeaturing	Off		
Minimum Edge Length	31, mm		
Write ICEM CFD Files	No		

(a) Mesh putrella.

(b) Mesh parete centrale.

Figura 4.9: Proprietà della mesh assegnate alla putrella e alla parete centrale.

Details of "Face Sizing" - Sizing		Details of "MultiZone 4" - Method	
<b>Scope</b>		<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	22 Faces	Geometry	22 Bodies
<b>Definition</b>		<b>Definition</b>	
Suppressed	No	Suppressed	No
Type	Element Size	Method	MultiZone
<input type="checkbox"/> Element Size	4, mm	Mapped Mesh Type	Hexa
<b>Advanced</b>		Surface Mesh Method	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default	Free Mesh Type	Not Allowed
Behavior	Soft	Element Order	Use Global Setting
		Src/Trg Selection	Automatic
		Source Scoping Method	Program Controlled
		Source	Program Controlled
		Sweep Size Behavior	Sweep Element Size
		<input type="checkbox"/> Sweep Element Size	Default
		<b>Advanced</b>	
		Preserve Boundaries	Protected
		Mesh Based Defeaturing	Off
		Minimum Edge Length	9,2 mm
		Write ICEM CFD Files	No

(a) Mesh Apici Bulloni (vedi Figura 4.7). (b) Mesh di tutti i bulloni esclusi gli apici.

Figura 4.10: Proprietà della mesh assegnate ai bulloni.

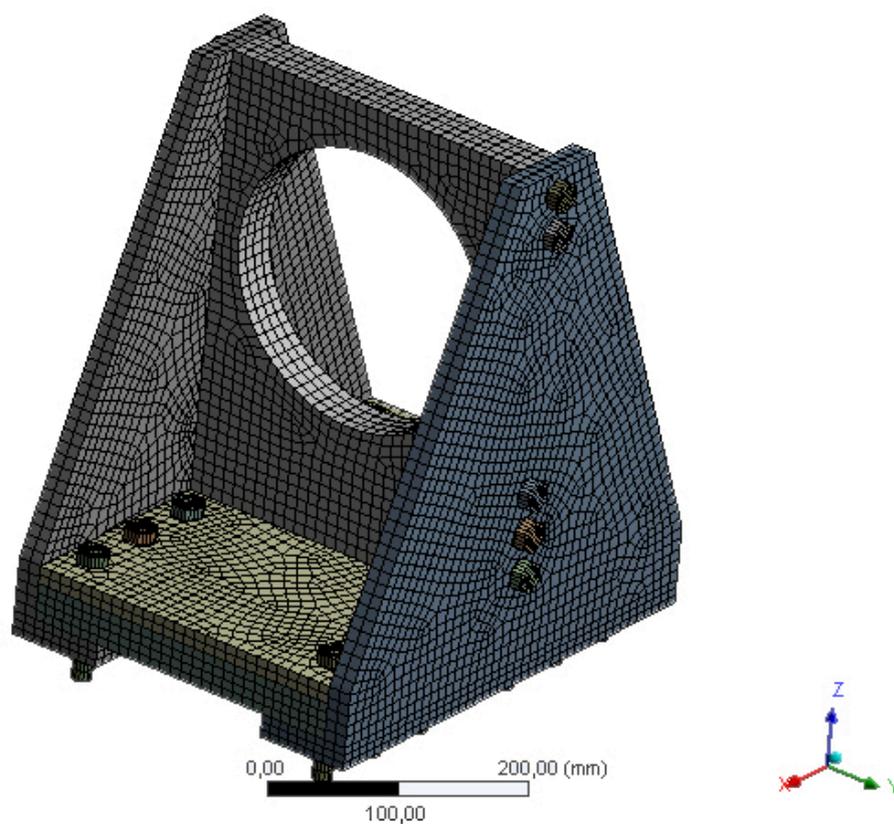


Figura 4.11: Mesh del nuovo sistema di pretensionamento.

In seguito a una simulazione preliminare, la mesh visibile in Figura 4.11 è risultata idonea al calcolo finale.

## 4.6 Applicazione Carichi e Precarichi

A questo punto si procede ad imporre i carichi e i precarichi desiderati.

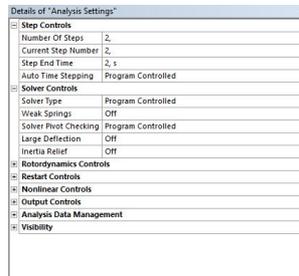


Figura 4.12: Dettagli delle impostazioni relative ad Analysis Settings.

Innanzitutto, come si vede dalla Figura 4.12, si impone un numero di step pari a 2. Ad ogni step corrisponde l'applicazione o la rimozione di uno o più carichi sull'assieme.

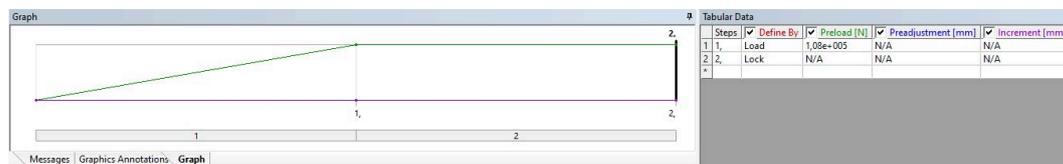


Figura 4.13: Impostazioni relative al carico di serraggio delle viti (bolt pretension).

Nella Figura 4.13 si osserva come durante lo step 1 sia stato impostato un carico di serraggio (*load*) pari a 108 kN con la funzione di *bolt pretension*.



Figura 4.14: Impostazioni relative la forza di precarico (force) applicata al sistema di pretensionamento.

Dalla Figura 4.14 si vede invece come il carico di 40 kN, dovuto al pretensionamento della barra, sia stato invece applicato durante lo step 2 tramite la funzione *force*.

## 4.7 Analisi ed Interpretazione dei risultati

Terminate le impostazioni di *preprocessing*, si raccolgono le soluzioni che si desiderano visualizzare in fase di *postprocessing* attraverso l'elaborazione grafica dei risultati.

Per il test che si sta affrontando, è necessario osservare l'energia massima di distorsione (*Equivalent (Von Mises) Stress*) e le deformazioni lungo le direzioni principali (*Directional Deformation X/Y/Z*).

*Equivalent (Von Mises) Stress* è un metodo che descrive un calcolo delle tensioni utilizzando il criterio di Von Mises. Questo è un criterio di resistenza relativo a materiali duttili, isotropi e con uguale resistenza a trazione e compressione, secondo cui il materiale raggiunge lo snervamento quando l'energia di distorsione raggiunge il valore limite. Il risultato di tale criterio è visibile in Figura 4.15. Dai risultati

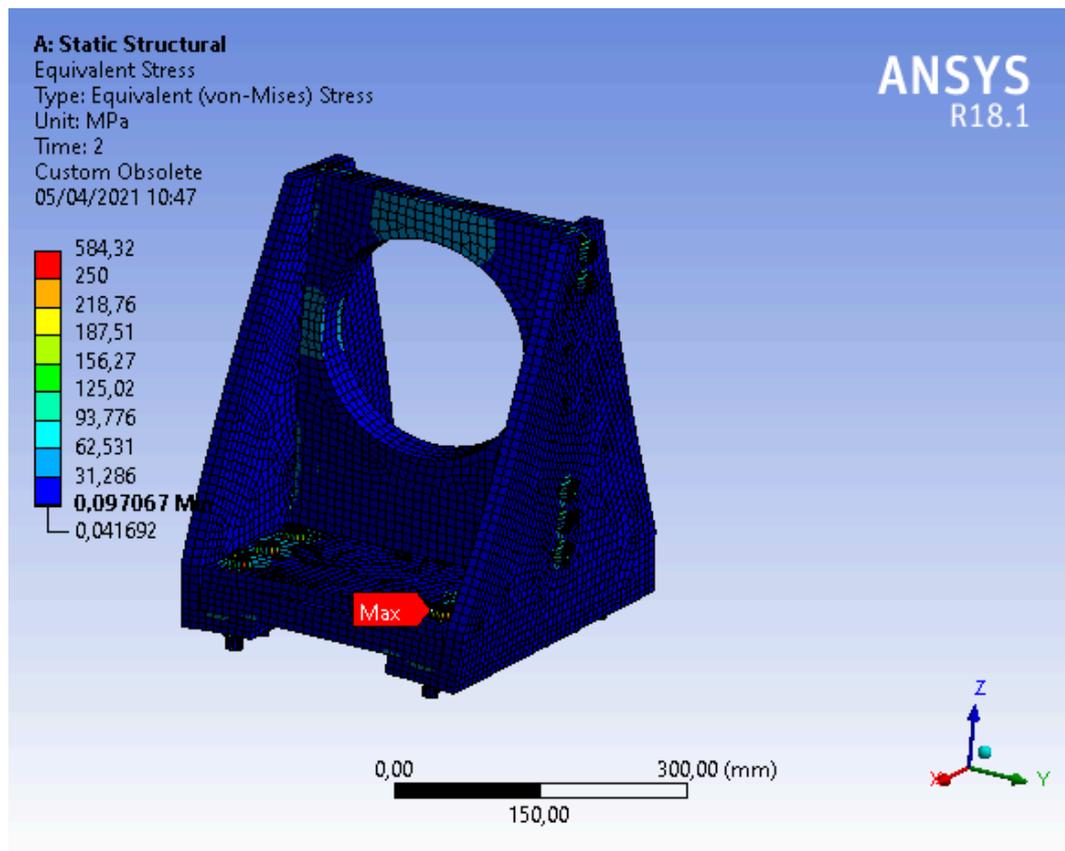


Figura 4.15: Risultati relativi alla massima distorsione (Equivalent Stress) del sistema di pretensionamento.

ottenuti, si deduce che il carico di serraggio dei bulloni è eccessivo, creando delle criticità nella zona di interesse con  $\sigma_{max} \sim 824 MPa$ .

Poichè il sistema è sottoposto ad un carico con direzione lungo l'asse X, si è interessati a verificarne il comportamento lungo i principali assi.

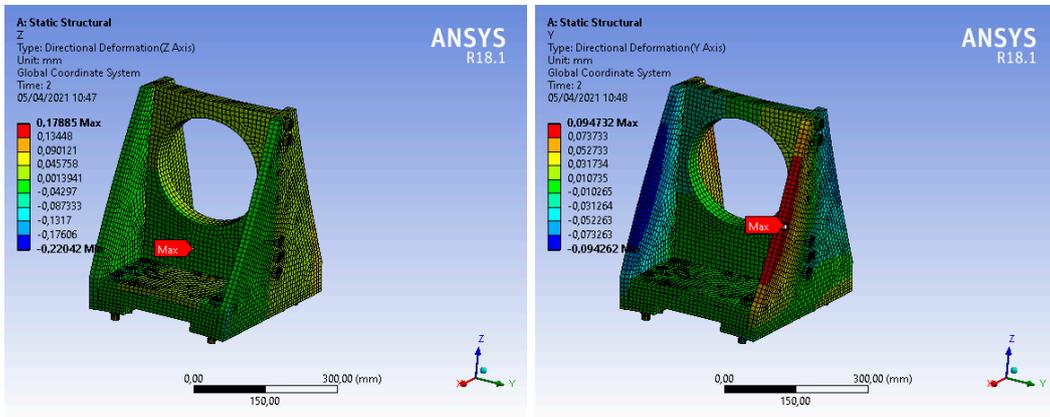
Tali spostamenti sono osservabili dalle immagini 4.16.

Per quanto riguarda la direzione Y e Z, il sistema si comporta correttamente, senza presentare alcuna criticità.

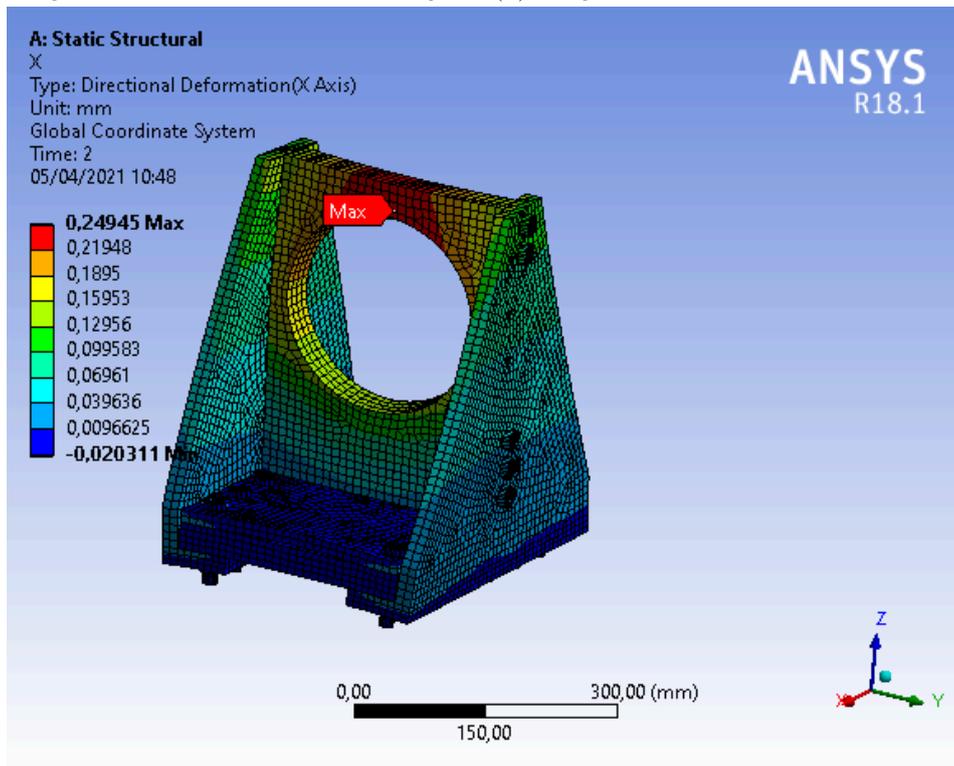
Analizzando invece la situazione mostrata in Figura 4.16c, che interessa lo spostamento lungo X, emergono delle problematiche. Nella zona superiore della parete centrale, si evidenzia una zona di colore rosso con una tensione massima  $\sigma_{max_x} \sim 0.25 MPa$  che mostra un problema progettuale di rigidità di tutto il supporto, in particolare lungo la direzione X.

Raccolte tutte le dovute informazioni dal *postprocessing*, si è reso necessario un intervento nel *preprocessing* con l'obiettivo di correggere il sistema in modo opportuno.

## 4.7 Analisi ed Interpretazione dei risultati



(a) Diagramma della deformazione Lungo Z. (b) Diagramma della deformazione Lungo Y.



(c) Diagramma della deformazione Lungo X.

Figura 4.16: Risultati relativi ai valori massimi di spostamento lungo le direzioni X/Y/Z (Directional Deformations) del sistema di pretensionamento.

## 4.8 Correzione dell'assieme

Per prima cosa, si valuta l'utilizzo un carico di serraggio dei bulloni pari a 54 KN. In questo modo diminuisce la deformazione accumulata nell'intorno del bullone garantendone comunque un corretto serraggio.

Successivamente si deve provvedere ad aumentare la rigidezza nella zona superiore della parete centrale. La soluzione migliore che si è trovata comporta l'installazione del componente di Figura 4.17. Il componente che si vede qui in sezione è il profilo

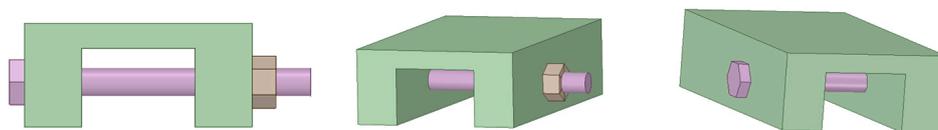


Figura 4.17: Viste in sezione del componente di rinforzo alla parete centrale del sistema di pretensionamento.

di una barra ad “U” imbullonato utilizzando 2 Viti ISO 4018 - d M10 x l 100 e 2 Dadi ISO 4032 M10 a2 70 .

Prima di procedere a svolgere nuovamente i calcoli, si realizza un ulteriore passaggio rivolto ad ottimizzare i tempi dedicati all'acquisizione dei risultati.

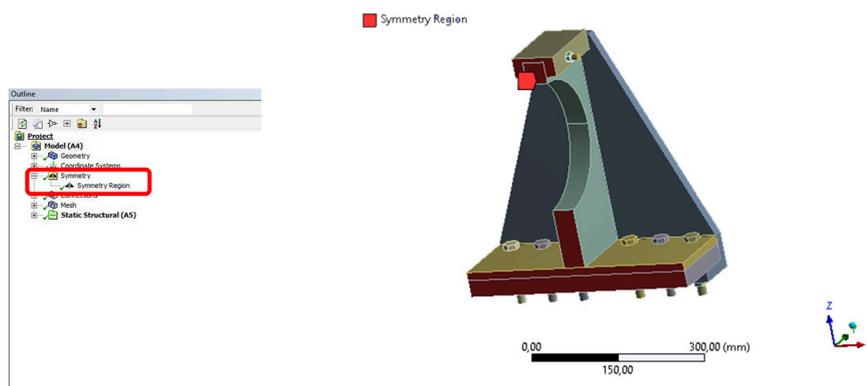


Figura 4.18: Impostazione relativa la superficie di simmetria (simmetry region) del sistema di pretensionamento in ANSYS.

## 4.9 Analisi ed Interpretazioni dei risultati finali

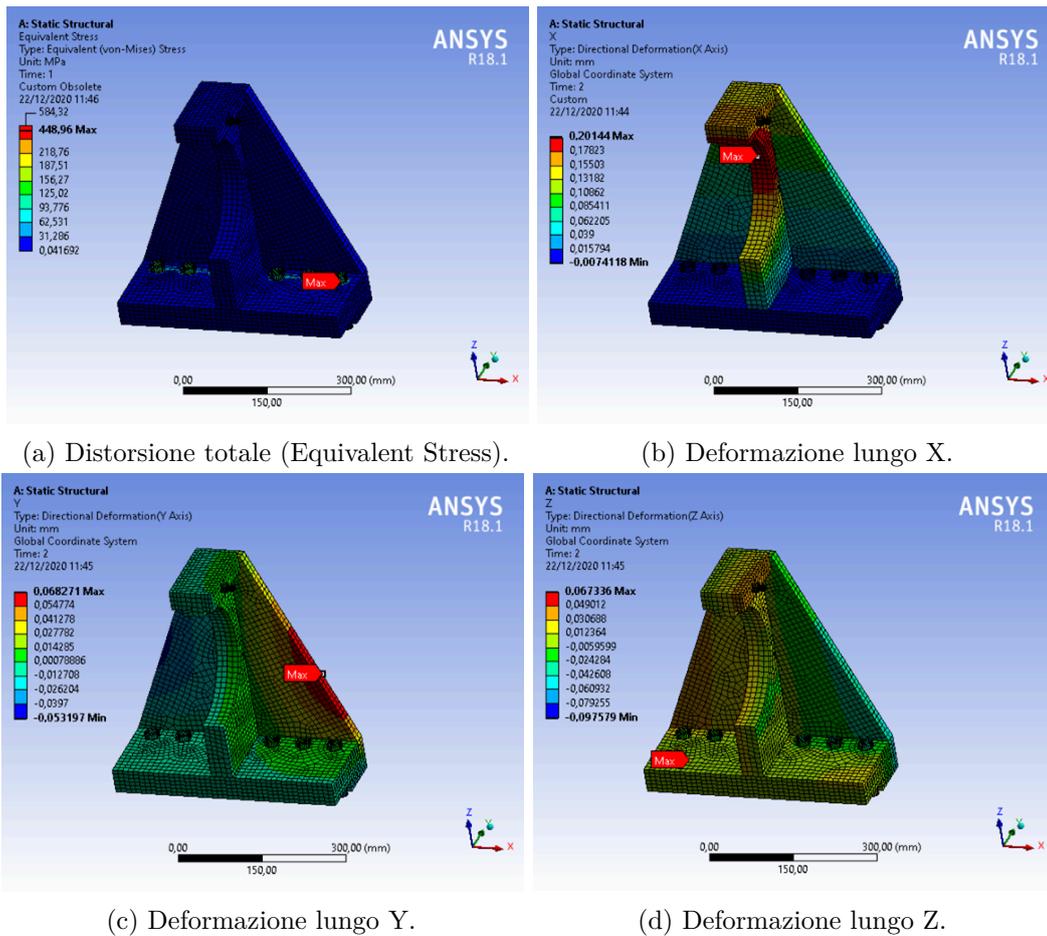


Figura 4.19: Risultati finali delle tensioni e degli spostamenti riguardanti il sistema di pretensionamento dotato del componente di rinforzo.

Essendo un assieme simmetrico sia nella geometria che nell'applicazione dei carichi, è possibile sfruttare la funzione *symmetry*. Questa permette di dividere l'assieme lungo un piano di simmetria, in questo caso il piano XZ, andando così ad analizzare solo una sezione dell'intero sistema.

## 4.9 Analisi ed Interpretazioni dei risultati finali

Una volta ultimate le dovute correzioni in fase di pre-processing, si procede nuovamente con la scelta delle soluzioni che si desiderano visualizzare in fase di post-processing mediante l'elaborazione grafica dei risultati.

I diagrammi acquisiti da quest'ultima analisi (vedi Figure 4.19) mostrano due importanti miglioramenti nei valori delle tensioni massime rilevate:

**M1:** il primo riguarda la riduzione della tensione massima dovuta al carico di serraggio delle viti;

**M2:** il secondo riguarda la riduzione della tensione massima rilevata lungo la direzione X.

M1 è stato ottenuto riducendo il carico di serraggio delle viti montate sulla piastra base da 108 KN a 54 KN. Questo ha permesso di ridurre la tensione massima di deformazione mostrata in Figura 4.19a ad un valore di 448 MPa.

M2 è stato invece ottenuto tramite l'installazione del componente aggiuntivo di Figura 4.17. Dalla Figura mostrata in 4.19b si evince come il valore della tensione massima lungo la direzione X sia di 0.20 MPa. Confrontando i valori delle tensioni massime prima e dopo il montaggio del componente aggiuntivo, si deduce che l'implementazione di tale componente ha ridotto la tensione massima di  $\sim 23\%$ .

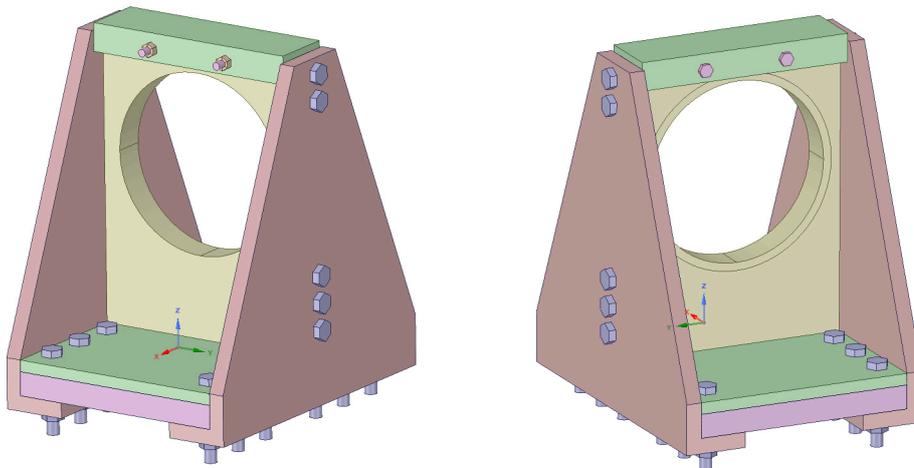


Figura 4.20: Sistema di pretensionamento dotato del componente di rinforzo visualizzato in SpaceClaim.

# Capitolo 5

## Conclusioni

Il lavoro presentato in questa tesi è contestualizzato in un progetto in corso all'Università Politecnica delle Marche e volto a superare alcuni limiti riguardanti il funzionamento della barra di Hopkinson.

L'obiettivo principale è stato permettere l'integrazione di un meccanismo innovativo di grandi dimensioni nel sistema di pretensionamento. Tale esigenza è emersa dall'impossibilità del dispositivo di pretensionamento attualmente in uso nei laboratori della UNIVPM di soddisfare specifiche necessità.

Lo studio e la realizzazione del sistema di pretensionamento della barra è costituito da due fasi: studio e progettazione 3D del componente; analisi con il metodo degli elementi finiti del modello 3D ottenuto. Quest'ultima parte si è rivelata particolarmente importante, in quanto ha permesso di individuare eventuali comportamenti anomali del sistema di pretensionamento quando sottoposto ad un precarico di 4 tonnellate. I primi test realizzati sulla struttura progettata hanno permesso di rilevare due importanti criticità:

- C1:** l'applicazione dell'analisi agli elementi finiti ha rivelato un eccessivo carico di serraggio ai bulloni posti sulla piastra base;
- C2:** la seconda è legata alla geometria della parete centrale, in quanto essa è risultata cedevole all'applicazione di un precarico di 4 tonnellate.

C1 è stata risolta correggendo il carico di serraggio imposto alle viti collocate sulla piastra base. Tale correzione è stata ottenuta riducendone il carico di serraggio da 108

KN a 54 KN. Questo ha permesso di ottenere una tensione massima di deformazione nell'intorno delle viti base di  $\sim 448 \text{ MPa}$ .

C2 ha richiesto un miglioramento della geometria della parete centrale. Tale intervento è stato realizzato tramite l'implementazione del componente mostrato in Figura 4.17.

Figura 4.19 mostra i miglioramenti apportati al sistema (Figura 4.20), la cui analisi delle simulazioni FEM conferma il superamento delle criticità sopra citate. L'inserimento del componente aggiuntivo atto a superare la criticità C2 ha registrato la diminuzione del carico di serraggio e prodotto notevoli miglioramenti mostrati. Pertanto, è dimostrato che la struttura mostrata in Figura 4.20 è in grado di sopportare adeguatamente il pretensionamento di 4 tonnellate applicato alla input bar.

## Bibliografia

- [1] Tomáš Fíla, Petr Koudelka, Jan Faltá, Petr Zlámá, Václav Rada, Marcel Adorna, Stefan Bronder, and Ondřej Jiroušek. Dynamic impact testing of cellular solids and lattice structures: Application of two-sided direct impact hopkinson bar. *International Journal of Impact Engineering*, 148:103767, 2021.
- [2] Erdogan Madenci and Ibrahim Guven. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*. Springer, 2015.