



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ENZO FERRARI

Corso di Laurea Magistrale in ***INGEGNERIA DEL VEICOLO***

Studio delle sollecitazioni di contatto fra
pattini di scorrimento e carpenteria di un
braccio telescopico

Prova finale di:

Luca Sandri

Relatore / Relatrice:

Enrico Bertocchi

Anno Accademico 2026-2027

Sommario

1 Abstract.....	3
2 Introduzione.....	4
3 Presentazione dello studio.....	6
3.1 Il modello M-250 e diagrammi di carico	6
3.2 Schema cinematico e problematiche strutturali della carpenteria.....	8
3.4 Meccanismo di sfilo e rinvio a catene.....	10
4 Analisi della struttura.....	13
4.1 Metodologia di calcolo e ipotesi semplificative	13
4.2 Analisi del quarto sfilo (sfilo di punta).....	14
4.5 Analisi del primo sfilo (sfilo base).....	25
5 Studio del problema locale	28
6 Analisi simulazioni FEM.....	33
7 Studio sollecitazioni al variare dei parametri	41
7.1 Influenza del modulo elastico del pattino	41
7.2 Impatto della lunghezza del pattino	52
7.3 Influenza della larghezza del pattino	59
8 Geometrie alternative e risultati	63
9 Conclusioni e possibili sviluppi.....	67
Bibliografia	68

1 ABSTRACT

In questo elaborato si presentano le analisi e gli studi fatti durante il periodo di tirocinio curriculare presso l'azienda BGLift s.r.l con sede a Cavaion Veronese (VR). La ditta in questione opera nel settore del sollevamento e si occupa, nello specifico, di mini-gru cingolate.

Durante l'esperienza ci si è focalizzati sullo studio di un braccio telescopico ispirato al modello di gru denominato M-250 con particolare attenzione sulle sollecitazioni a cui esso è sottoposto in normali condizioni di funzionamento. Le prime analisi sono state eseguite sfruttando il calcolo manuale, per poi affidarsi a simulazioni FEM.

Il focus è stato posto sugli effetti locali delle tensioni causati dalla presenza dei pattini di scorrimento fra i vari sfili e della pressione di contatto tra questi e la carpenteria. Infatti, a causa delle forze di contatto scambiate fra i pattini stessi e la struttura metallica si generano delle tensioni localizzate elevate se confrontate con quelle nelle zone non interessate da tali carichi localizzati. Alla luce di questa problematica sono state effettuate varie simulazioni variando sia le proprietà meccaniche del materiale dei pattini che alcuni parametri geometrici degli stessi al fine di investigarne gli effetti.

2 INTRODUZIONE

Il settore delle apparecchiature di sollevamento mobili compatte è guidato dalla necessità di operare in contesti sempre più complessi. In questo ambito si inseriscono le analisi realizzate durante il periodo di tirocinio curriculare trascorso presso l'azienda BGLift s.r.l., realtà specializzata nella progettazione e produzione di mini-gru cingolate.

Questi macchinari sono costituiti da un “carro” ossia un telaio in acciaio con relativa trasmissione a cingoli, la quale garantisce un'elevata manovrabilità su diverse tipologie di terreno e in spazi ristretti e da una parte aerea che comprende il braccio telescopico e i relativi accessori. Come interfaccia fra le due parti vi è una torretta collegata al telaio da una ralla che permette la rotazione a 360° della parte aerea. Su di essa è inoltre montato un martinetto di brandeggio che permette di inclinare il braccio rispetto al piano orizzontale. La movimentazione del macchinario è garantita da un circuito idraulico a cui vengono collegati attuatori come cilindri e motori idraulici, mentre la fonte di potenza può essere costituita sia da un motore a combustione che elettrico. Per mantenere i dispositivi stabili in fase di lavoro, essi sono equipaggiati con una serie di stabilizzatori estensibili che aumentano la pianta a terra della macchina, permettendo il sollevamento di carichi a distanze significative.

In fase progettuale i parametri principali da ottimizzare sono: la compattezza, la leggerezza e le prestazioni in termini di carico massimo sollevabile e distanza massima raggiungibile (sbraccio). Per poter sollevare carichi significativi, la macchina deve avere una certa tara, si parla infatti di rapporti fra carico massimo sollevato e peso del macchinario pari o superiori all'unità. Partendo da questi presupposti, risulta chiaro che l'ottimizzazione delle masse è un aspetto fondamentale, rendendo strategico il dimensionamento strutturale delle varie sezioni della carpenteria.

La macroarea dove l'ottimizzazione ha il maggiore impatto è la parte aerea. Questa, essendo costituita da un braccio telescopico, influenza significativamente la distribuzione dei pesi dal momento che il suo baricentro può trovarsi a metri di distanza dalla ralla. Considerando che la stabilità dipende dall'interazione tra il momento stabilizzante e quello ribaltante, avere una considerevole massa a grande distanza dal centro della ralla è altamente penalizzante. Si cerca quindi di limitare il più possibile la massa della parte aerea pur rispettando i target di carico utile.

Così facendo, a parità di massa massima dell'attrezzatura, è possibile posizionare eventuali zavorre in punti strategici al fine di ottimizzare la stabilità globale.

Il dimensionamento e la verifica strutturale di queste attrezzature vengono condotti secondo i criteri delle normative UNI EN 13001 e UNI EN 280, che stabiliscono una serie di coefficienti di sicurezza e modalità di verifica delle varie componenti.

Sulla base di tali premesse, il presente lavoro di tesi si è focalizzato sull'analisi strutturale di un braccio telescopico ispirato al modello M-250. In particolare, l'attenzione è stata rivolta allo studio degli effetti locali e delle forti concentrazioni di tensione causate dai pattini di scorrimento sui vari sfili della carpenteria. Attraverso l'ausilio di simulazioni numeriche FEM, sono state investigate diverse variazioni geometriche e di materiale per i pattini, al fine di studiare il comportamento strutturale del braccio.

Disclaimer

I dati e la geometria della carpenteria presentati nel seguente elaborato rappresentano un modello semplificato che non rispecchi a pieno la geometria e caratteristiche del modello commerciale. Per questo motivo i risultati di seguito riportati non sono da considerarsi attendibili rispetto al prodotto commercializzato.

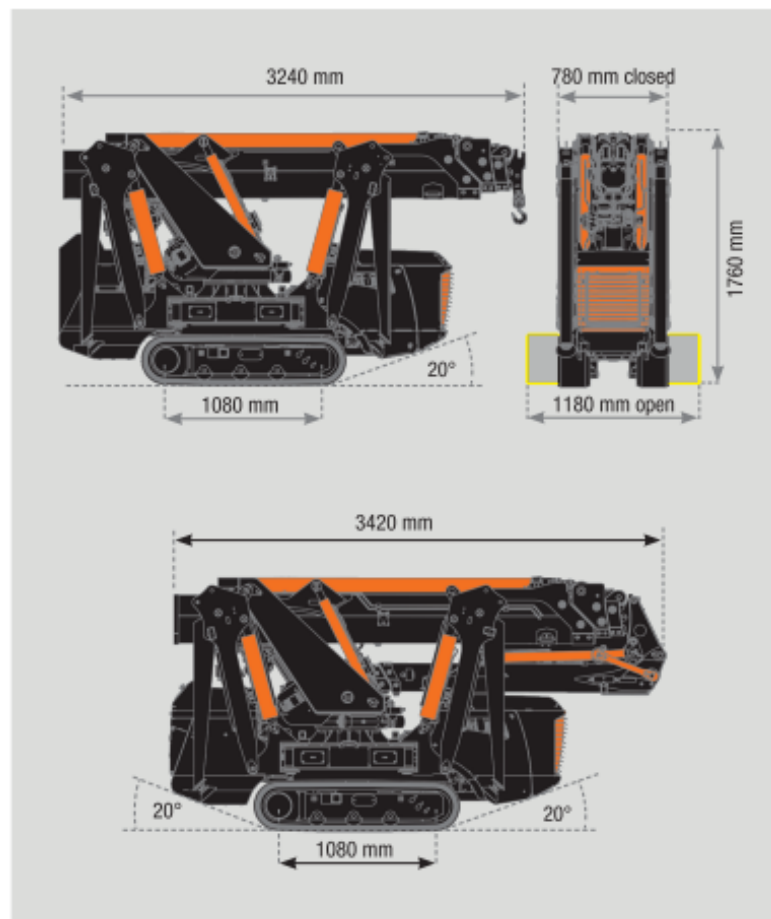
3 PRESENTAZIONE DELLO STUDIO

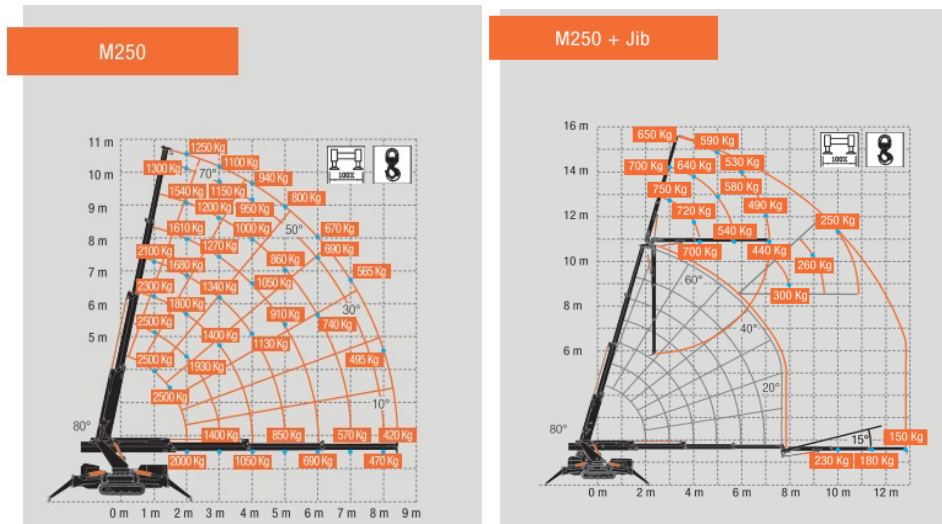
3.1 Il modello M-250 e diagrammi di carico

Come accennato precedentemente le analisi si sono focalizzate su un braccio telescopico ispirato a quello del modello di gru M-250.

Questa attrezzatura permette il sollevamento di carichi fino a 2500kg e di raggiungere un'altezza massima di 16m grazie all'ausilio di un accessorio chiamato "Jib". Inoltre, ha una portata massima con braccio orizzontale di 150kg ad una distanza di 12.85m dal centro della ralla, il tutto con un peso contenuto di appena 2420kg. Il braccio telescopico è costituito da quattro parti, denominate "sfili", che possono traslare assialmente di 2150mm l'uno rispetto all'altro. Il primo viene vincolato alla torretta tramite un fulcro e un martinetto idraulico che permette di variare l'angolo rispetto all'orizzontale chiamato cilindro di brandeggio.

Di seguito vengono riportate le dimensioni e performance dell'attrezzatura a cui ci si è ispirati nello studio.



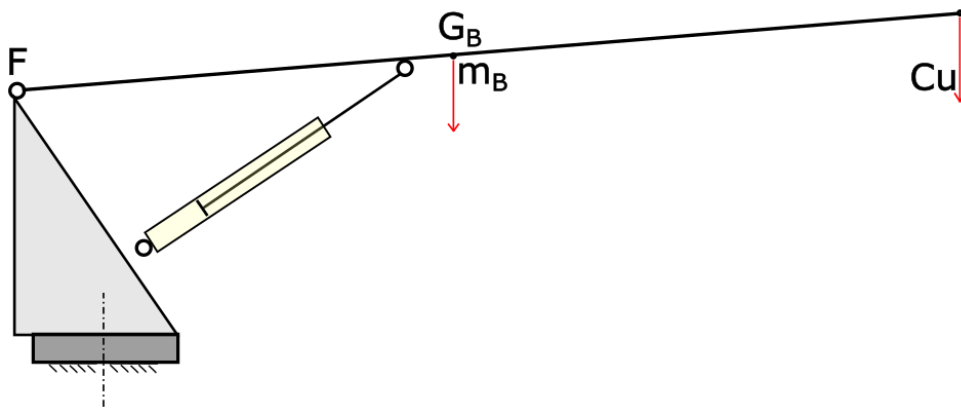


Il Jib è un accessorio installabile in testa al braccio che permette una seconda articolazione rispetto all'orizzontale e di estendere ulteriormente il braccio, questo componente non è stato oggetto di studio.

Il mio compito è stato quello di andare a identificare i principali carichi agenti sul braccio telescopico e, a partire da questi, si analizzano le sollecitazioni risultanti sulla carpenteria metallica. Le valutazioni sono state fatte sia tramite calcolo manuale che analisi FEM realizzate tramite il software di modellazione Solidworks, fornito dall'azienda.

3.2 Schema cinematico e problematiche strutturali della carpenteria

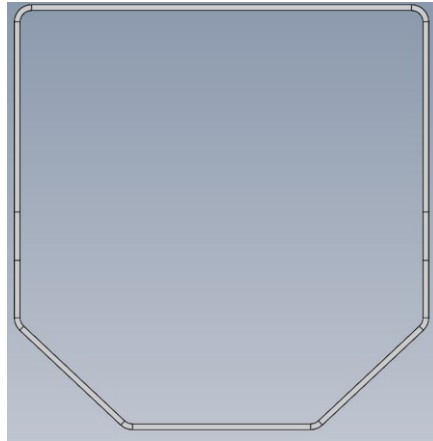
Dal punto di vista cinematico la torretta e la parte aerea possono essere rappresentati con un meccanismo piano. La torretta viene vincolata a telaio tramite la ralla, che ne permette la rotazione mentre il braccio ha esclusivamente due gradi di libertà ossia il brandeggio e l'inclinazione rispetto al piano orizzontale. Ad un dato angolo di rotazione ralla lo schema equivalente può essere rappresentato come quello di figura:



Da questo schema risulta ancora più evidente quanto avere una massa del braccio ' m_B ' consistente ad una discreta distanza dal centro ralla sia penalizzante nell'ottica di massimizzare il carico utile C_u , a parità di momento stabilizzante.

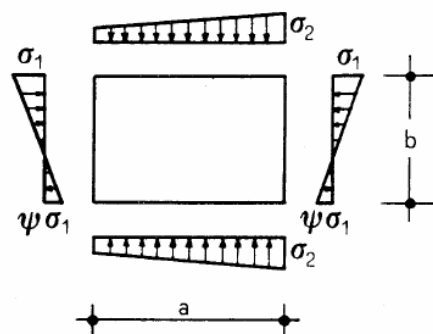
Questo schema a trave verrà sfruttato per eseguire dei calcoli in una prima fase preliminare in modo tale da avere una stima dei carichi agenti e che ci si aspettano sulle varie sezioni del braccio.

La struttura dei bracci viene realizzata prevalentemente in acciaio strutturale S700 che garantisce una tensione di snervamento di 700MPa, molto utilizzato nelle costruzioni di carpenteria per applicazioni dove leggerezza e resistenza sono fondamentali. La sezione caratteristica degli sfili è quella di un profilo cavo che presenta una faccia superiore piana, due fianchi verticali dritti mentre la parte inferiore presenta due pieghe per lato oltre a un tratto centrale orizzontale. Viene proposta di seguito un'immagine della sezione in questione:



Questa viene realizzata tramite la saldatura longitudinale di due semi gusci, uno superiore e uno inferiore, formati tramite la piegatura di lamiera tagliate al laser. Si sceglie questa forma dal momento che con il carico verticale applicato in punta il braccio sarà principalmente sottoposto a flessione. Per massimizzare il momento d'inerzia mantenendo una massa contenuta la scelta di un profilo cavo a sezione quasi rettangolare è ottimale dato che permette di distribuire il materiale distante dall'asse neutro. Le sollecitazioni agenti fanno sì che la parte inferiore della sezione sia in uno stato tensionale di compressione e, dal momento che la carpenteria viene realizzata tramite lamiera sottili, in queste zone si potrebbe incorrere nell'imbozzamento dei pannelli: una forma di instabilità elastica delle lamiere. Questo fenomeno, nel caso della sollecitazione di flessione, dipende principalmente da due parametri del pannello in lamiera: la sua larghezza b e dal suo spessore t .

Facendo riferimento all'immagine sottostante, se ad esempio si prende in considerazione una delle due facce inclinate inferiori, la quota a rappresenta lo sviluppo longitudinale del braccio mentre b la lunghezza inclinata della faccia:

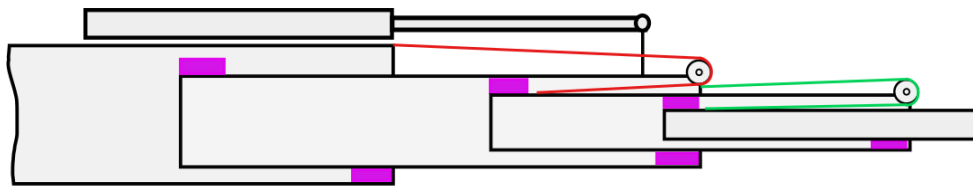


In particolare, a parità di spessore t , all'aumentare della larghezza b la sollecitazione limite accettabile è proporzionale a $\left(\frac{1}{b}\right)^2$. Dal momento che per minimizzare la massa della carpenteria gli spessori tendono ad essere mantenuti il minimo possibile si cerca di ridurre la larghezza b del pannello. Questo si raggiunge aggiungendo due o più pieghe nella parte inferiore della sezione, cosa che risulta in una forma analoga a quella presentata nell'immagine sovrastante.

3.4 Meccanismo di sfilo e rinvio a catene

Per garantire lo scorrimento delle varie sezioni del braccio telescopico si sfrutta un sistema costituito da un martinetto idraulico e dei rinvii a catena. La camicia del martinetto viene vincolata al primo sfilo mentre lo stelo si collega al secondo grazie ad un perno. Per trasmettere il moto alle successive sezioni del braccio si usano delle catene accoppiate a dei rulli. Questo sistema garantisce un movimento di uscita/rientro degli sfili sincronizzato a quello del martinetto utilizzando solamente un cilindro idraulico.

Nell'immagine sottostante viene presentato un disegno schematico di questo meccanismo.



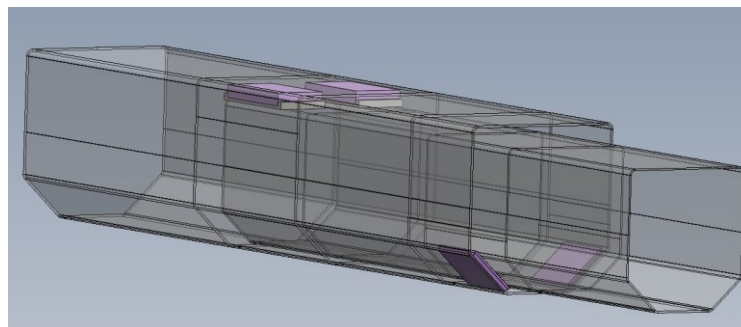
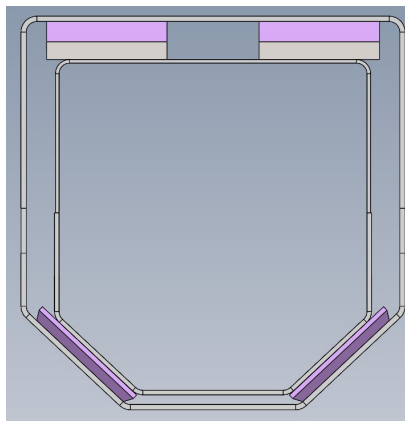
Come si nota dall'immagine il cilindro idraulico è collegato solamente al primo sfilo mentre i successivi sono collegati da due catene, rossa e verde, che permettono la fuoriuscita simultanea di tutti gli sfili tramite l'attuazione del martinetto. Per chiarezza nello schema non sono state incluse le catene per il rientro ma lo schema è analogo. Questo sistema garantisce il sincronismo nel movimento sia di uscita che rientro oltre ad ottenere un braccio più compatto dal momento che le catene scorrono nell'intercapedine superiore fra uno sfilo e l'altro. Non sarebbe possibile installare un martinetto per ogni sezione, sia per motivi di peso che di ingombro.

C'è infatti da considerare che la parte vuota all'interno della carpenteria viene sfruttata per il passaggio di cavi elettrici e tubi idraulici necessari per il collegamento di accessori in punta al braccio stesso.

I componenti evidenziati in viola sono dei pattini in materiale plastico, in particolare il Nylatron 703XL, che permettono lo scorrimento reciproco fra i vari sfili, in particolare ne sono previsti due superiori posteriori e due anteriori inferiori. Viene utilizzato questo materiale dal momento che offre eccellenti proprietà meccaniche ed inoltre tollera temperature di esercizio relativamente elevate che, grazie alla lubrificazione permette di avere un coefficiente di attrito costante.

Sono presenti anche altri pattini sui fianchi e nella parte inferiore posteriore dei vari bracci ma svolgono solamente funzioni secondarie come il centraggio e i carichi che li interessano sono trascurabili.

Nell'immagine sottostante si può meglio vedere come sono disposti i pattini:

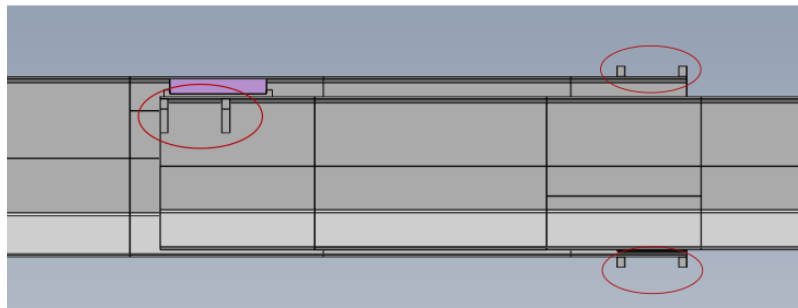


Nello specifico i pattini posteriori superiori sono vincolati alla parte superiore dello sfilo interno mentre quelli anteriori inferiori alla parte iniziale di quello esterno. Questo permette la corretta fuoriuscita delle varie sezioni in fase di estensione del braccio.

Anche a braccio totalmente esteso si avrà sempre una porzione di due sfili contigui che vanno a sovrapporsi l'una dentro l'altra, questo garantisce un certo braccio di leva fra le due coppie di pattini anteriore inferiore e posteriore superiore. Questa quota viene chiamata 'ingambonatura'.

In base allo schema con pattini e catene si può intuire che a braccio esteso, a causa sia del peso proprio della struttura che per l'applicazione di un carico in punta, si andranno a creare delle forze di reazione sotto i pattini che contrastano la componente perpendicolare al braccio della forza peso. Queste forze, andandosi a scaricare sulla superficie di contatto fra pattini e carpenteria, vanno a creare degli effetti locali di sollecitazione che si somma a quelle di flessione globale del braccio stesso. Questi effetti locali possono avere un impatto superiore al 50% sulle tensioni totali globali, motivo per cui è importante avere chiaro il loro impatto sulla struttura.

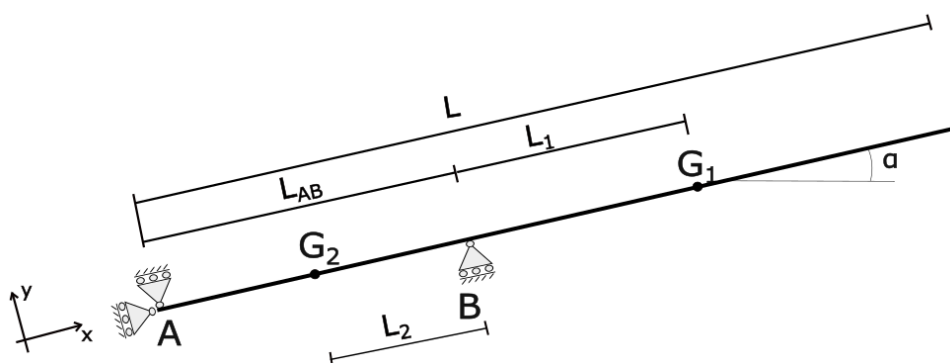
Va fatta la precisazione che, prendendo in esame i pattini posteriori del quarto sfilo, si andranno considerare gli sforzi sulla sezione dello sfilo precedente dove questi vanno in contatto. Per quelli anteriori, invece, si studiano le reazioni sullo sfilo direttamente in esame. Questa affermazione viene fatta considerando che gli sfili a cui sono fissati i pattini vengono opportunamente rinforzate. I componenti in questione vengono evidenziati nella vista in sezione di una delle simulazioni presentata di seguito:



4 ANALISI DELLA STRUTTURA

4.1 Metodologia di calcolo e ipotesi semplificative

Prendendo spunto dalla rappresentazione della torretta fatta in precedenza, ogni singola sezione del braccio viene inizialmente studiata con un classico modello a trave. Questo approccio permette di stimare le reazioni che le interessano e di avere un'idea approssimativa delle tensioni flessionali agenti sulla carpenteria. Ogni sfilo può essere rappresentato da una trave in cui i pattini vengono modellati con dei carrelli in modo tale da lasciare libera solo la traslazione fra due sezioni contigue. Quest'ultimo grado di libertà viene infatti bloccato dalle catene di uscita/rientro che vengono modellate con un carrello perpendicolare alla linea d'asse dello sfilo come viene presentato nella seguente figura:

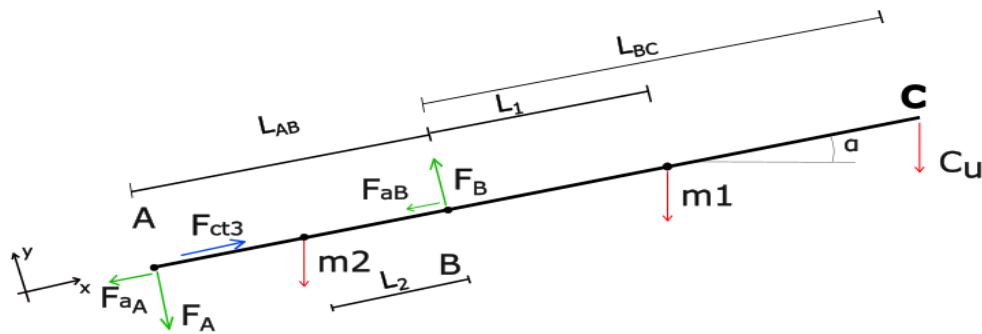


Le reazioni agenti sulle varie sezioni non sono del tutto simili, l'ultimo sfilo sarà quello a cui viene applicato il carico in punta mentre tutti i precedenti saranno interessati dalle forze che si scambiano reciprocamente. Arrivando infine al primo che viene vincolato alla torretta.

Si procederà ora allo studio di ogni singolo sfilo del braccio. Per non appesantire le simulazioni e i calcoli in prima analisi si è scelto di non conteggiare le masse del cilindro di sfilo e delle catene. Si faranno delle ipotesi semplificative ossia che le forze vengano applicate a punti giacenti sulla linea d'asse della trave.

4.2 Analisi del quarto sfilo (sfilo di punta)

Prendendo in esame l'ultimo sfilo si ricava uno schema equivalente della struttura come appena visto, a cui viene poi applicato il carico in punta. Per la geometria della macchina in questione il punto di applicazione del carico sollevato giace sul piano longitudinale del braccio, inoltre, la distribuzione della massa sulla carpenteria metallica è sostanzialmente omogenea. Per questo motivo si può affermare che la struttura non è sollecitata a torsione in maniera rilevante quindi forze e reazioni si possono studiare su un piano.



Prendendo in esame questo schema si identificano i punti A e B che rappresentano rispettivamente i pattini posteriori superiori e quelli anteriori inferiori a cui corrispondono le reazioni F_A e F_B . Altre forze che compaiono sono il carico utile in punta C_u , $m1$ ossia la quota parte del peso della parte di sfilo fra il pattino anteriore in B e la punta C e $m2$ che rappresenta la componente analoga della sezione compresa fra i due pattini. Per rendere lo schema più generale possibile si immagina di inclinare il braccio di un angolo α rispetto all'orizzontale e di essere in fase di sfilo. Questo fa sì che si instaurino delle forze di attrito sui pattini F_{aA} e F_{aB} opposte al moto. Al posto del carrello perpendicolare al braccio è presente la forza F_{ct3} che rappresenta la tensione nella catena responsabile dell'allungamento del braccio.

Partendo dall'ipotesi fatta in precedenza, ossia che il carico vada a scaricarsi solo sui pattini in A e B, si possono ricavare le rispettive reazioni partendo dall'equilibrio della trave nella direzione normale all'asse della trave:

$$\begin{cases} F_B - F_A = (m1 + m2 + C_u) * \cos(\alpha) \\ F_A * L_{AB} + m2 * \cos(\alpha) * L_2 - m1 * \cos(\alpha) * L_1 - C_u * \cos(\alpha) * L_{BC} = 0 \end{cases}$$

Da qui si ricavano le forze di contatto dei pattini:

$$\begin{cases} F_A = \frac{(-m_2 * L_2 + m_1 * L_1 + Cu * L_{BC}) * \cos(\alpha)}{L_{AB}} \\ F_B = (m_1 + m_2 + Cu) * \cos(\alpha) + F_A \end{cases}$$

Analizzando i risultati è evidente come i pattini maggiormente caricati siano quelli anteriori, la reazione è infatti costituita da due contributi: F_A , dovuta alla coppia generata dal peso proprio della struttura sommato al carico applicato in punta e dalla proiezione della forza peso totale perpendicolare al braccio stesso.

Le quote presenti nello schema rappresentano:

- L_{AB} = interasse fra i pattini
- L_{BC} = distanza fra pattini anteriori e il carico in punta
- L_1 = distanza fra il baricentro della parte sporgente e il pattino in B
- L_2 = distanza del baricentro della parte compresa fra i pattini e B

Per quanto riguarda questi interassi in fase preliminare si parte dal presupposto di non conoscere la distanza definitiva fra i pattini che si avrà a macchina finita né la posizione longitudinale del centro di pressione sugli stessi. Si propone una vista dall'alto:



Altre assunzioni preliminari sono:

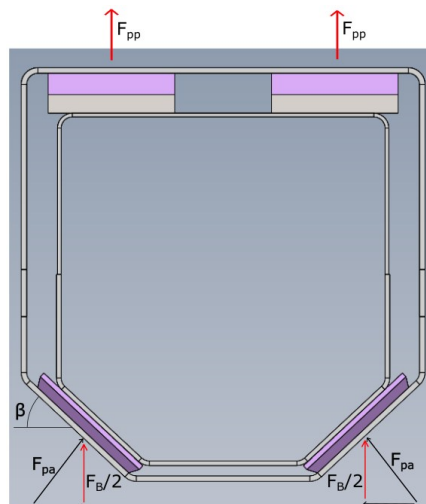
- I_p = all'ingambonatura. Questa scelta va nell'ottica di andare a sfruttare tutta la sezione longitudinale che va a sovrapporsi agli sfili precedenti. Questo permette di avere un braccio di leva il più grande possibile con l'ottica di minimizzare le reazioni risultanti sui pattini.
- Per considerare il fatto che il centro di pressione non sarà agli estremi dei pattini, basandosi sull'esperienza maturata in azienda, dalla quota I_p si sottrae per ogni pattino:

$$\begin{cases} \frac{v}{2} \text{ se } v \leq 100mm \\ 50mm \text{ se } v \geq 100mm \end{cases}$$

Rispetto alle altre quote, come la posizione dei baricentri e la posizione del carico in punta, si possono considerare definitive. Infatti, la lunghezza totale del braccio tutto chiuso, la corsa del cilindro di estensione del braccio e la lunghezza totale di ogni sfilo, sono parametri decisi nelle prime fasi di progettazione e non subiscono particolari variazioni durante lo sviluppo del progetto.

Per quanto riguarda i pattini anteriori è necessario effettuare un ulteriore passaggio per andare a ricavare le reazioni di contatto. Nell'analisi appena fatta si sono infatti calcolate solamente le reazioni normali alla linea d'asse della trave. Tuttavia i pattini anteriori inferiori, a differenza da quelli posteriori superiori, sono a contatto con le facce inclinate della parte inferiore dello sfilo. Questo garantisce il centraggio laterale di una sezione nella precedente ma causa una forza di reazione risultante maggiore di quella precedentemente calcolata.

Questo effetto si nota nell'immagine sottostante:



Partendo da questa considerazione sui pattini anteriori si avrà che:

$$F_{pp} = \frac{F_B}{2\cos(\beta)}, \text{ con } \beta = 43^\circ$$

Come si può notare dall'immagine per quanto riguarda i pattini superiori, essendo perpendicolari alla superficie della carpenteria dello sfilo precedente, la reazione sul singolo pattino è semplicemente:

$$F_{pp} = \frac{F_A}{2}.$$

Per completezza si propone anche l'analisi dell'equilibrio nella direzione parallela alla linea d'asse della trave che risulta essere:

$$F_{ct3} = (F_{aA} + F_{aB}) + (m1 + m2 + Cu) * \sin(\alpha)$$

Con $F_{aA} = F_A * \mu$ mentre $F_{aB} = \frac{F_B}{\cos(\beta)} * \mu$

Per quanto riguarda le forze di attrito, l'esperienza in azienda ha insegnato che si possono considerare proporzionali alle reazioni di contatto e ad un coefficiente di attrito $\mu=0.08$. Grazie alla scelta del materiale del pattino e alla lubrificazione degli stessi non si hanno effetti di "stick slip" quindi si può considerare che il coefficiente di attrito rimanga costante durante la transizione da statico a dinamico. Grazie a questi valori si possono calcolare le tensioni nelle catene di uscita e di rientro per un loro dimensionamento. Si riesce inoltre a valutare la forza che il cilindro di sfilo deve garantire per poter estendere il braccio quando vi è applicato un carico.

Si può quindi procedere a calcolare le reazioni sui pattini considerando un caso notevole ossia con il braccio perfettamente orizzontale ($\alpha=0$) e completamente esteso con un carico in punta 440Kg o 4300N. Viene scelta questa geometria dal momento che dal punto di vista delle forze sui pattini è la più gravosa.

Per la definizione dell'interasse dei pattini si parte dalla quota I_p pari a 640mm.

Considerando poi che i pattini posteriori e anteriori sono lunghi rispettivamente $V_p=125\text{mm}$ e $V_a = 90\text{mm}$ fatte le considerazioni espone in precedenza sui centri di pressione verranno tolti 95mm.

In questa configurazione le quote di interesse del problema sono:

- $L_{AB} = 640-95=545\text{mm}$
- $L_{BC} = 2230\text{mm}$
- $L_1 = 1115\text{mm}$
- $L_2 = 320\text{mm}$

La quota della forza peso delle due porzioni di sfilo sono rispettivamente:

- $m1 = 408\text{N}$
- $m2 = 117\text{N}$

Partendo da questi dati si può avere una stima delle reazioni che interessano la struttura, in particolare:

- $F_A = 18360\text{ N}$
- $F_B = 23185\text{ N}$
- $F_{aA} = 1479\text{ N}$

- $F_{aB} = 2536 \text{ N}$
- $F_{ct3} = 4015 \text{ N}$

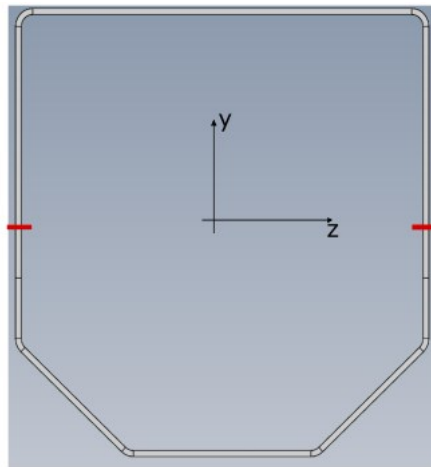
Perciò:

$$F_{pp_4} = 9180 \text{ N}$$

$$F_{pa_4} = 15850 \text{ N}$$

I valori appena ricavati confermano il fatto che i pattini maggiormente caricati siano gli anteriori, inoltre il segno positivo indica la scelta opportuna del verso per le reazioni.

Vengono ora illustrate le caratteristiche della sezione resistente della carpenteria facendo riferimento alla seguente figura:



Come si vede dall'immagine, in cui è stata evidenziata la linea di saldatura in rosso, la sezione è simmetrica rispetto all'asse y mentre non gode della medesima proprietà rispetto a z . Inoltre, per la presenza delle due pieghe nella parte inferiore si avrà che il baricentro della sezione non si troverà a metà altezza della stessa. Questo implica che il modulo di resistenza della parte superiore e inferiore non siano uguali. Dove possibile, per cercare di eliminare questa disuguaglianza e quindi non penalizzare uno dei due semigusci, si tende a realizzare la parte inferiore di uno spessore maggiore. Per quanto riguarda il quarto sfilo infatti, la parte superiore è spessa 2 mm mentre l'inferiore 2.5. Questa scelta va anche a migliorare l'aspetto presentato precedentemente riguardo l'imbozzamento andando a diminuire la probabilità che questo fenomeno possa instaurarsi avendo aumentato lo spessore nelle parti sollecitate a compressione.

Per il calcolo del momento d'inerzia e del modulo di resistenza ci si è affidati al CAD, i valori ricavati sono:

- Modulo di resistenza superiore $Wz_s = 8.30E+04 \text{ mm}^3$
- Modulo di resistenza inferiore $Wz_i = 8.25E+04 \text{ mm}^3$
- Area sezione $A_s = 1500 \text{ mm}^2$

In questo caso aver differenziato gli spessori ha permesso di avere il modulo di resistenza sostanzialmente identico fra la metà superiore e quella inferiore. Questo aspetto aiuta inoltre considerando che se si posiziona la saldatura in mezzeria questa sarà poco caricata.

Data la disposizione dei carichi ci si aspetta di trovare il momento flettente massimo in corrispondenza del punto B ossia dove lo sfilo si infila in quello precedente di cui ora se ne ricaverà il valore; partendo dall'estremo C si può scrivere:

$$Mf_B = Cu * L_{BC} + m1 * L_1 = 1.027 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

Taglio e sforzo normale, a favore di sicurezza vengono valutati appena oltre questo punto:

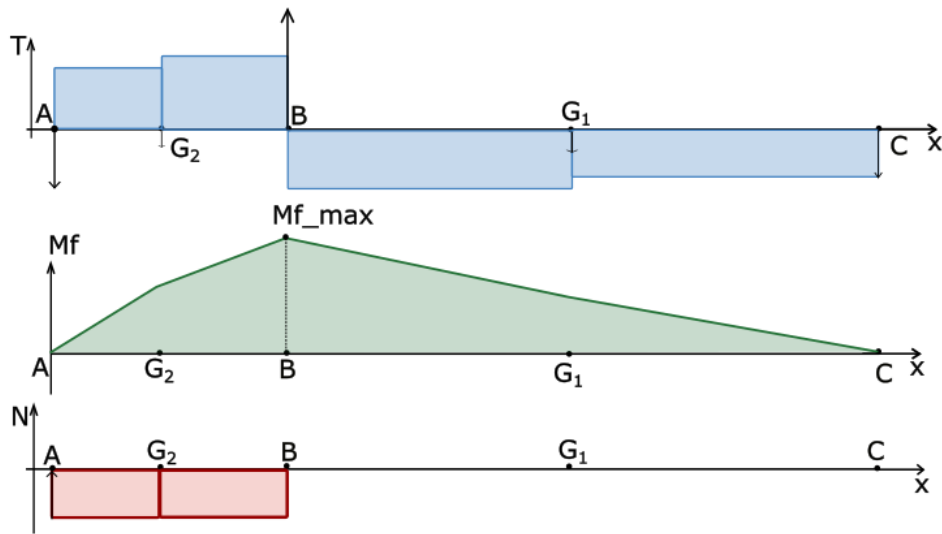
- $T_B = F_B - Cu - m1 = 18769 \text{ N}$
- $N_B = Fa_B = 2579 \text{ N}$

A fronte di questi dati si possono calcolare le tensioni flessionali e il taglio medio in B:

- $\sigma_{f_sup_B} = \frac{Mf_B}{Wz_s} = 123.7 \text{ MPa}$
- $\sigma_{f_inf_B} = -\frac{Mf_B}{Wz_i} = -124.5 \text{ MPa}$
- $\tau_{_B} = \frac{T_B}{A_s} = 12.5 \text{ MPa}$
- $\sigma_{n_B} = \frac{N_B}{A_s} = 1.7 \text{ MPa}$

Valutando questi risultati è possibile verificare che la sollecitazione più impattante sia quella di flessione agli estremi superiore ed inferiore della sezione dove il taglio sarebbe nullo. Considerando inoltre che sia il taglio medio ma anche lo sforzo normale sono almeno di un ordine di grandezza inferiori si possono trascurare. Le reazioni sui pattini e le tensioni ricavate con questa breve analisi saranno utili come confronto rispetto a quelle estrapolate nelle simulazioni FEM.

Basandosi su questa analisi si possono costruire i diagrammi di sollecitazione di questo tratto del braccio che vengono proposti di seguito:

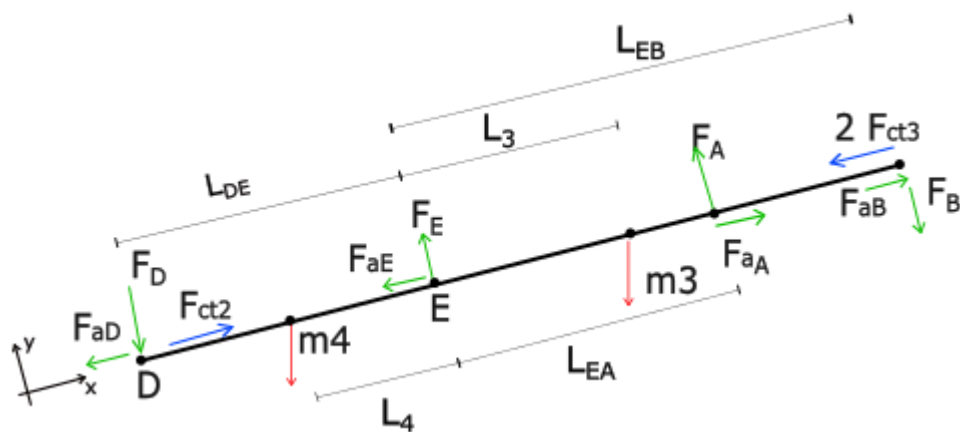


Per motivi di rappresentazione i tre grafici non sono in scala.

Di seguito verranno proposte le medesime analisi anche per gli sfilì precedenti fino ad arrivare a quello che solitamente viene chiamato “base”, il quale è poi vincolato alla torretta come mostrato in precedenza.

4.3 Analisi del terzo sfilò

Si propone ora l'analisi del terzo sfilò, a differenza del precedente non è presente un carico in punta ma le reazioni di trasporto dallo sfilò precedente.



Come si può vedere sono state riportate le reazioni in A e B dovute alla presenza del quarto sfilò all'interno del terzo. In punta è presente $2F_{ct3}$ dal momento che essendoci un rullo su cui scorre la catena si scarica una forza pari al doppio della tensione della catena.

Anche qui viene proposto l'equilibrio nella direzione parallela all'asse della trave con un bilancio dei momenti rispetto al punto E:

$$\begin{cases} F_E - F_D - (m_3 + m_4) * \cos(\alpha) + F_A - F_B = 0 \\ F_D * L_{DE} + m_4 * \cos(\alpha) * L_4 - m_3 * \cos(\alpha) * L_3 + F_A * L_{EA} - F_B * L_{EB} = 0 \end{cases}$$

Quindi si ricavano le forze di contatto dei pattini:

$$\begin{cases} F_D = \frac{(-m_4 * L_4 + m_3 * L_3) * \cos(\alpha) - F_A * L_{EA} + F_B * L_{EB}}{L_{DE}} \\ F_E = (m_3 + m_4) * \cos(\alpha) + F_D - F_A + F_B \end{cases}$$

Si può osservare la risultante sul pattino anteriore tiene conto di tutte le componenti verticali dei pesi degli sfili a valle di quello considerato dal momento che

$$(-F_A + F_B) = m_1 + m_2 + C_u.$$

L'analisi dell'equilibrio nella direzione parallela alla linea d'asse della trave che risulta essere:

$$F_{ct2} = -(F_{aA} + F_{aB}) + (F_{aD} + F_{aE}) + 2F_{ct3} + (m_3 + m_4) * \sin(\alpha)$$

In questo caso le quote di interesse valgono

- $L_{DE} = 586 \text{ mm}$
- $L_{EA} = 1699 \text{ mm}$
- $L_{EB} = 2244 \text{ mm}$
- $L_3 = 1122 \text{ mm}$
- $L_4 = 340.5 \text{ mm}$

La quota della forza peso delle due porzioni di sfilo sono rispettivamente:

- $m_3 = 767 \text{ N}$
- $m_4 = 233 \text{ N}$

La forma della sezione, a parte le dimensioni, è la medesima dello sfilo precedente. L'unica differenza è che in questo caso non si è optato per differenziare gli spessori fra guscio superiore ed inferiore; questo risulta in una "eccentricità" della posizione in y dell'asse neutro rispetto alla mezzzeria della sezione. Per questo motivo i moduli di resistenza superiore ed inferiore rispetto all'asse z sono differenti, infatti:

- $W_{z_s} = 1.66 \text{ E} + 05 \text{ mm}^3$
- $W_{z_i} = 1.39 \text{ E} + 05 \text{ mm}^3$

- $A_s = 2382 \text{ mm}^2$

Partendo da questi dati si può avere una stima delle reazioni che interessano la struttura, in particolare:

- $F_D = 36885 \text{ N}$
- $F_E = 42710 \text{ N}$
- $F_{aD} = 2951 \text{ N}$
- $F_{aE} = 4672 \text{ N}$
- $F_{ct2} = 11638 \text{ N}$

Perciò:

$$F_{pp_3} = 18443 \text{ N}$$

$$F_{pa_3} = 29200 \text{ N}$$

Anche qui il punto interessato dal massimo momento flettente sarà il punto E quindi come prima avremo:

- $M_{fE} = F_D \cdot L_{DE} = 2.16 \times 10^7 \text{ Nmm}$
- $T_E = F_E - F_B + F_A - m_3 = 18769 \text{ N}$
- $N_B = F_{aE} + 2F_{ct3} - F_{aA} - F_{aB} = 2579 \text{ N}$

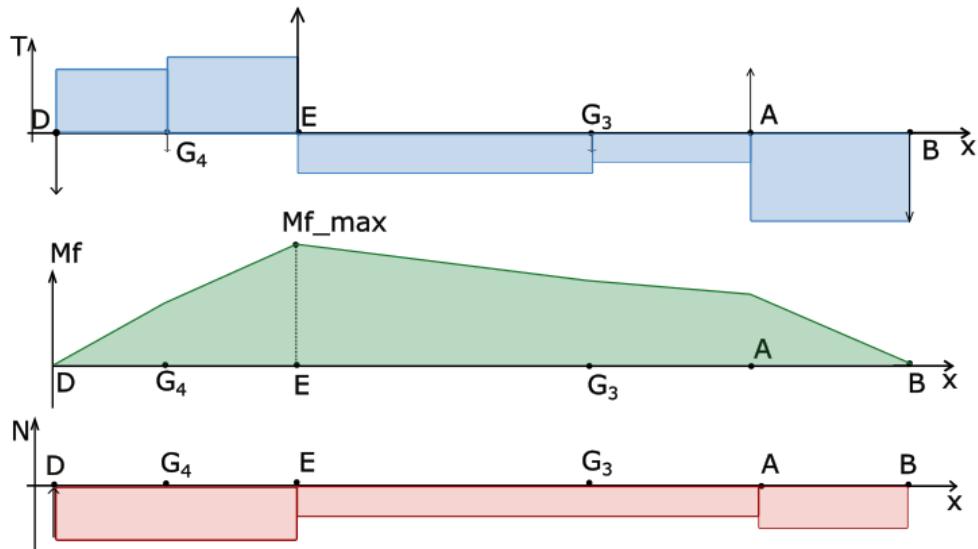
Perciò:

- $\sigma_{f_sup_E} = \frac{M_{fE}}{W_{z_s}} = 130 \text{ MPa}$
- $\sigma_{f_inf_E} = -\frac{M_{fE}}{W_{z_i}} = -155.5 \text{ MPa}$
- $\tau_{_E} = \frac{T_E}{A_s} = 15.6 \text{ MPa}$
- $\sigma_{n_E} = \frac{N_E}{A_s} = 3.6 \text{ MPa}$

Per avere un confronto con i dati in simulazione vengono calcolate le tensioni flessionali superiori anche nel punto A, in presenza del pattino posteriore superiore del quarto sfilo:

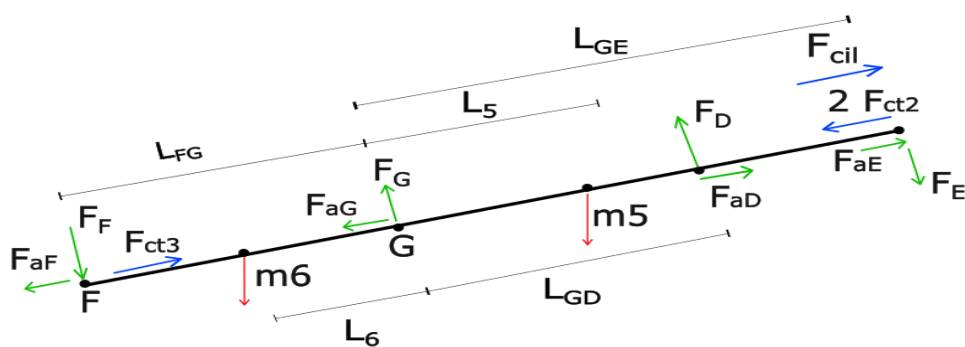
- $\sigma_{f_sup_A} = \frac{M_{fA}}{W_{z_s}} = \frac{F_B \cdot L_{AB}}{W_{z_s}} = 76.1 \text{ MPa}$

Per completezza di seguito vengono riportati i diagrammi di sollecitazione.



4.4 Analisi del secondo sfilo

Il secondo sfilo è analogo a quello appena presentato quindi verranno proposti solamente i risultati delle reazioni. Le uniche differenze sono la presenza della forza di spinta del cilindro di sfilo, applicata in punta, e della tensione della catena di uscita F_{ct3} . Le catene di uscita, come si può vedere nello schema presentato all'inizio sono sempre ancorate da un lato alla sezione di braccio interessata mentre all'altro capo a due sfili precedenti.



Con i dati relativi a questa sezione del braccio si ricava che:

- $F_F = 55211 \text{ N}$
- $F_G = 62339 \text{ N}$
- $F_{aF} = 4416 \text{ N}$
- $F_{aG} = 6819 \text{ N}$

- $F_{cil} = 22873 \text{ N}$

Quindi:

- $F_{pp_2} = 26706 \text{ N}$
- $F_{pa_2} = 42618 \text{ N}$

Partendo dalle proprietà della sezione resistente in E:

- $W_{z_s} = 2.30E+05 \text{ mm}^3$
- $W_{z_i} = 1.93E+05 \text{ mm}^3$
- $A_s = 2757 \text{ mm}^2$

Si possono ricavare gli sforzi in questo punto:

- $\sigma_{f_sup} = \frac{Mf_G}{W_{z_s}} = 155.5 \text{ MPa}$
- $\sigma_{f_inf} = -\frac{Mf_G}{W_{z_i}} = -185.3 \text{ MPa}$
- $\tau = \frac{T_G}{A_s} = 20.14 \text{ MPa}$
- $\sigma_n = \frac{N_G}{A_s} = 0.15 \text{ MPa}$

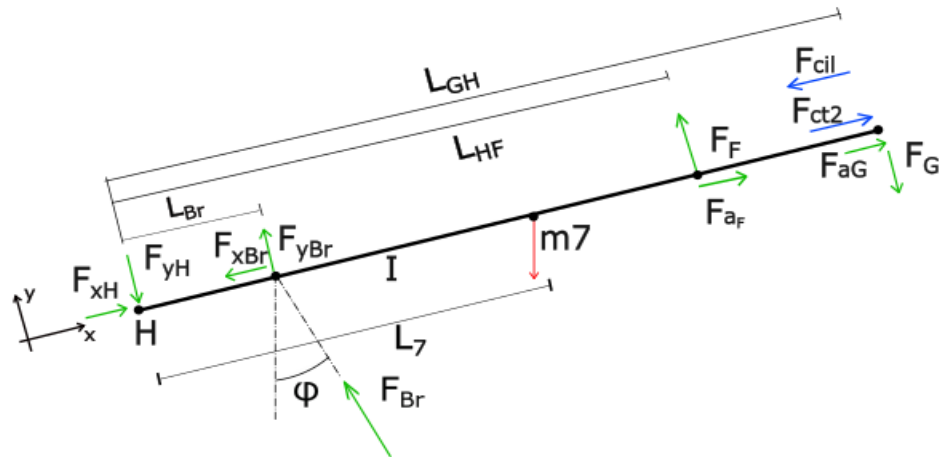
Come fatto in precedenza si valutano le tensioni flessionali superiori nel punto D in presenza del pattino posteriore superiore del terzo sfilo:

- $\sigma_{f_sup_D} = \frac{Mf_D}{W_{z_s}} = \frac{F_E * L_{DE}}{W_{z_s}} = 108.8 \text{ MP}$

Non verranno proposti i diagrammi di sollecitazione dal momento che sono analoghi a quelli riportati precedentemente fatta eccezione per lo sforzo normale che rappresenta un piccolo contributo.

4.5 Analisi del primo sfilo (sfilo base)

Si studia ora il primo sfilo denominato “base” che ha il compito di accoppiare il braccio alla torretta che avviene tramite due perni, uno montato all’inizio di questo tratto di braccio e uno che ne permette il vincolamento al cilindro di brandeggio.



Dalla figura si possono identificare questi punti, rispettivamente H ed I.

Dal momento che il cilindro di brandeggio è vincolato da due perni, uno all'estremità sulla torretta e l'altro sul braccio la forza che esercita sullo stesso sarà parallela alla linea d'asse dello stesso. Questo, considerando l'angolo φ del cilindro rispetto la verticale, ci permette di scrivere la seguente relazione:

$$\frac{F_{xBR}}{F_{yBR}} = \tan(\varphi)$$

Grazie a questo rapporto fra le due componenti la struttura è risolvibile in entrambe le direzioni.

Procedendo in tal senso si può scrivere:

$$\begin{cases} F_{Hy} = F_{yBr} + F_F - F_G - m7 * \cos(\alpha) \\ F_{yBr} = \frac{m7 * L_7 * \cos(\alpha) - F_F * L_{HF} + F_G * L_{GH}}{L_{Br}} \end{cases}$$

Grazie alla relazione ricavata in precedenza si avrà che $F_{xBr} = F_{yBr} \tan \varphi$, quindi:

$$F_{xH} = F_{xBr} + F_{cil} - F_{ct2} - m8 * \sin(\alpha) - F_{aF} - F_{aG}$$

Le quote in questo caso valgono:

- $L_{GH} = 2390 \text{ mm}$
- $L_{HF} = 1742 \text{ mm}$
- $L_{Br} = 456 \text{ mm}$
- $L_7 = 1195 \text{ mm}$

Considerando che $m7$ ha un valore pari a 1800 N e che con $\alpha = 0$ il cilindro assume un angolo $\beta = 27.5^\circ$ si possono ricavare le reazioni che interessano questa sezione:

- $F_{yBr} = 147757 \text{ N}$
- $F_{xBr} = 76917 \text{ N}$
- $F_{yH} = 138829 \text{ N}$
- $F_{xH} = 76917 \text{ N}$

Qui il momento massimo non interessa la zona dei pattini dato che si trova nel punto di ancoraggio del cilindro di brandeggio.

Le caratteristiche di questa sezione sono:

- $W_{Z_s} = 4.37 \text{ E} + 05 \text{ mm}^3$
- $W_{Z_i} = 3.64 \text{ E} + 05 \text{ mm}^3$
- $A_s = 4342 \text{ mm}^2$

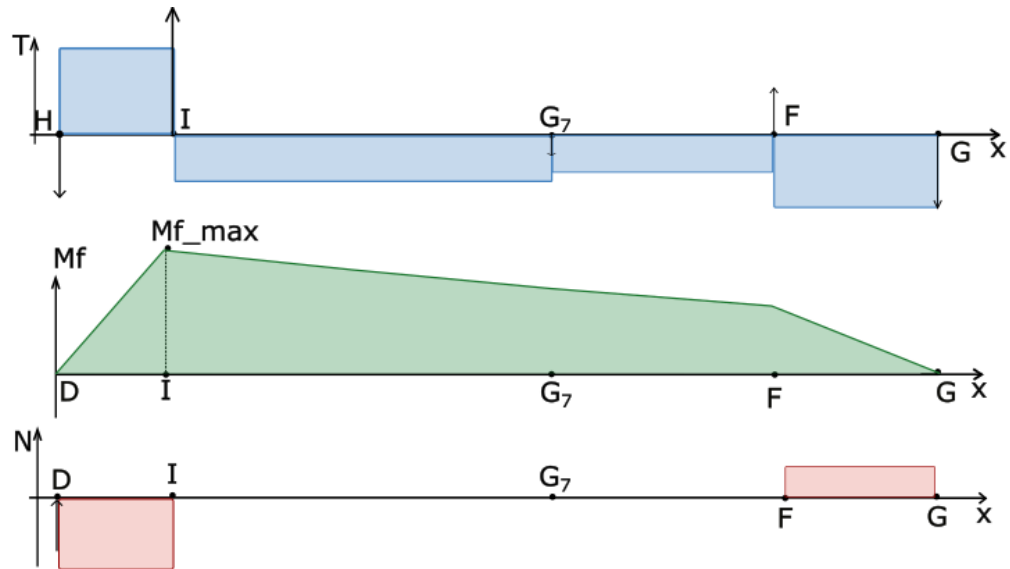
Si ricavano quindi le tensioni nelle zone interessate dai pattini, in particolare in F dato che in G le sollecitazioni sono minime:

- $\sigma_{f_sup_F} = \frac{M_{fF}}{W_{Z_s}} = 92.4 \text{ MPa}$
- $\sigma_{f_inf_F} = -\frac{M_{fF}}{W_{Z_i}} = -111 \text{ MPa}$
- $\tau_{_F} = \frac{T_F}{A_s} = 14.4 \text{ MPa}$
- $\sigma_{n_F} = \frac{N_F}{A_s} = 1.0 \text{ Mpa}$

Nonostante nel punto di attacco del cilindro di brandeggio si raggiunga il momento flettente massimo questo non rappresenta un punto critico dal

momento che questa zona viene rinforzata saldando dei “fazzoletti” di lamiera.

In ultima analisi si riportano i diagrammi di sollecitazione di questa sezione del braccio.



5 STUDIO DEL PROBLEMA LOCALE

Come anticipato nella prima parte della trattazione oltre a studiare la struttura una parte consistente dello studio è stato quello di andare a valutare come il contatto fra carpenteria e i pattini di scorrimento andasse ad influenzare localmente le sollecitazioni sulla struttura. Qui, infatti, la teoria classica della trave sfruttata nella prima parte non contempla effetti localizzati di questo tipo e diventa quindi un fattore limitante nello studio di un problema simile.

Come primo approccio si è preso spunto da un articolo scientifico “Stress analysis in contact zone between the segments of telescopic booms of hydraulic truck cranes” facente parte della raccolta “Thin walled structures” recuperato sul sito web della pagina “Elsevier”.

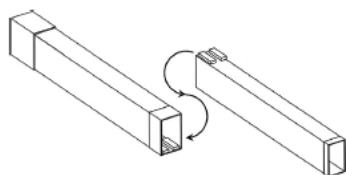


Fig. 2. Sliding pads locations on the outer and inner segment.

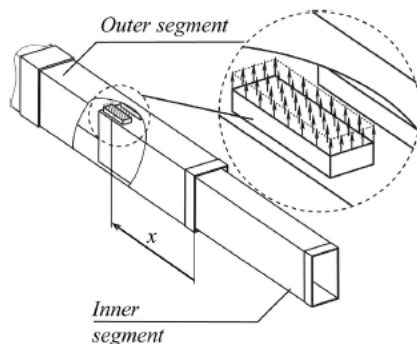
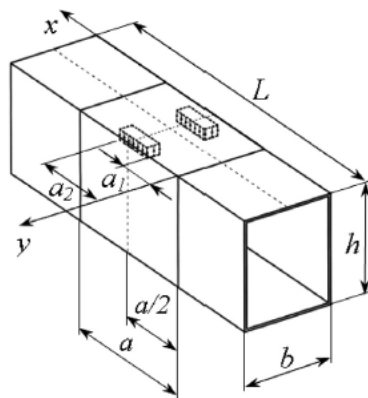


Fig. 3. Load transfer on the outer segment via sliding pads.



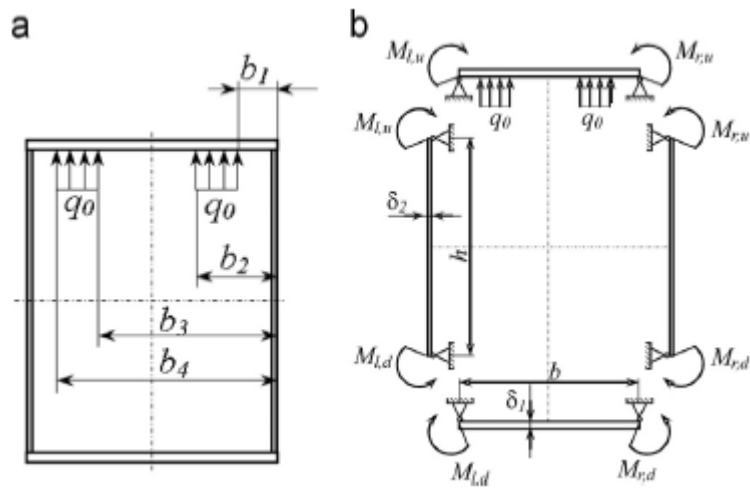
Qui gli autori dello studio prendono in considerazione un caso analogo a quello dei pattini posteriori superiori affrontato in questa trattazione di cui verranno proposte alcune immagini di seguito. In particolare, si studia la geometria sfruttando la teoria delle piastre sviluppata da Timoshenko ottenendo dei buoni risultati che vengono validati da prove estensimetriche.

Caratterizzando la geometria dei pattini e della struttura con dei parametri geometrici si riesce a ricavare una funzione costituita da uno sviluppo in serie di Fourier che rappresenta la deformata della superficie della carpenteria metallica contatto con il pattino stesso. Gli autori partono dall'ipotesi che la pressione di contatto fra pattino e carpenteria sia uniforme su tutta la superficie. Questa ipotesi permette di

semplificare l'analisi dal momento che si tratta di sviluppare in serie una funzione di carico costante a tratti.

Per quanto riguarda la struttura in lamiera quella in esame nello studio ha una geometria più semplice di quella sotto mio esame, gli autori hanno suddiviso la sezione rettangolare in 4 piastre ortogonali fra di loro. Per mettere in relazione i 4 lati della struttura hanno poi inserito dei momenti di trasporto sui bordi che permettono di risolvere la struttura e di avere un quadro completo sia delle deformazioni che tensioni risultanti sia sulla faccia direttamente a contatto sui pattini che su tutto il resto della sezione.

Di seguito viene riportata un'immagine della scomposizione appena descritta:

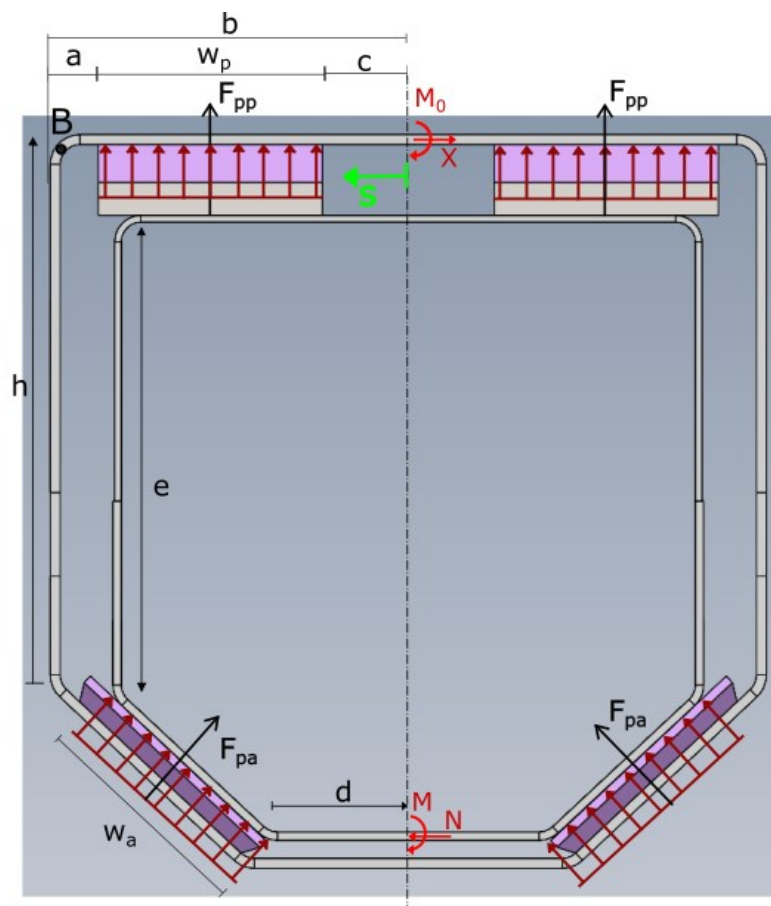


Sebbene questo approccio sia matematicamente rigoroso data la natura più complessa della sezione studiata in questa tesi e a fronte dei risultati delle prime simulazioni FEM effettuate non si è scelto di seguire questo approccio. Come si vedrà successivamente l'ipotesi di pressione di contatto uniforme non può essere accettabile nel nostro caso.

Ciò nonostante, sfruttando questo articolo si possono proporre alcune considerazioni che aiuteranno ad interpretare i risultati ottenuti dalle simulazioni. Nello specifico la sezione resistente della struttura su cui vanno a contatto i pattini posteriori superiori e gli anteriori inferiori possono essere paragonati a dei portali. Per semplificare l'analisi si suppone che il carico sia uniformemente distribuito sulla faccia del pattino

Si parte dall'analisi della geometria che interessa i pattini posteriori, in particolare viene fatto un focus sulla metà superiore della sezione resistente dello sfilo.

Considerando che la superficie inferiore a cui vengono fissati viene opportunamente rinforzata verrà considerata come rigida. Al contrario la carpenteria metallica su cui si scaricano le reazioni di contatto dati gli spessori contenuti è certamente deformabile e la sua vista in sezione, come precedentemente puntualizzato, richiama quella di un portale.



Partendo da questa osservazione si possono fare delle considerazioni riguardo quello che ci si aspetterebbe da una struttura di questo tipo caricata dalle reazioni F_{pp} e F_{pa} . Sfruttando sia la simmetria della struttura che del carico rispetto all'asse verticale si può affermare che in mezzeria il taglio sarà nullo e di conseguenza il momento sarà costante. Ipotizzando che la piega nella parte inferiore dello sfilo si comporti similmente ad un incastro si può impostare e risolvere il portale che caratterizza la sezione esterna. Per fare questo viene introdotta la quota coordinata "s" che scorre lungo il portale e le reazioni incognite sull'asse di simmetria. Si identificano due tratti, il primo "1" che corrisponde alla parte orizzontale superiore e "2" che rappresenta il tratto verticale compreso fra la piega superiore ed inferiore. Quindi a partire dallo schema si possono scrivere le equazioni che caratterizzano il momento flettente lungo il portale.

$$M_1(s) = M_0 - M_q(s)$$

$$M_q(s) = \begin{cases} 0 & 0 \leq s < c \\ q \frac{(s-c)^2}{2} & c \leq s \leq c + w_p \\ q l_p (s - c - \frac{w_p}{2}) & c + w_p < s \leq b \end{cases}$$

$$M_2(s) = M_B + X \cdot s$$

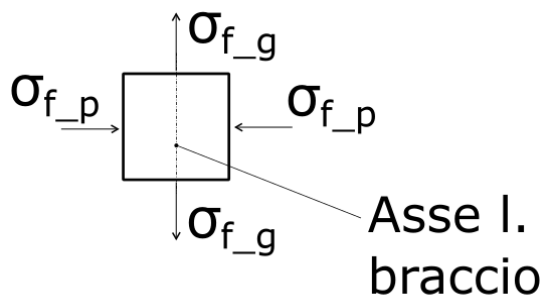
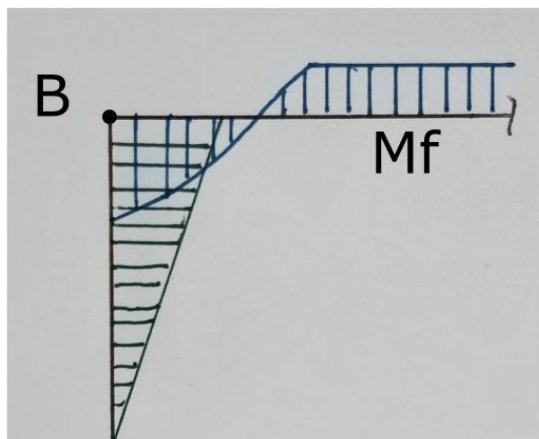
A partire da queste relazioni il portale è stato risolto tramite Castigliano quindi impostando l'equazione dell'energia elastica totale. A partire da questa si è poi differenziato rispetto a M_0 e X per poi ricavarne le rispettive relazioni:

$$M_0 = q w_p \left[\frac{6a(a + w_p) + 2l_p^2 + 3h(a + w_p/2)}{3(4b + h)} \right]$$

$$X = q w_p \frac{1}{h} \left[\frac{6b(a + w_p/2) - 3a(a + w_p) - w_p^2}{3(4b + h)} \right]$$

Da queste si può notare come sia rilevante la quota 'a' che rappresenta la distanza del pattino dalla parete e la somma 'a+w_p' che è inevitabilmente legata alla posizione del centro di pressione del pattino. Partendo da queste reazioni si può ricavare un andamento qualitativo del momento flettente in

questo tratto come si può vedere nella prossima immagine.

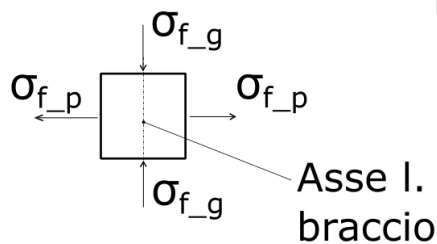
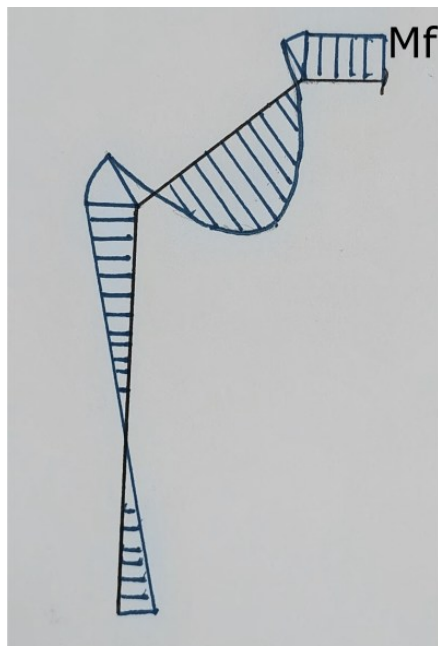


Partendo da un punto sull'asse di simmetria si ha un momento flettente costante che poi cambia segno nella zona interessata dalla pressione di contatto. Questo momento verrà poi trasportato sulla parte verticale della struttura nella zona interessata dalla piega. Il valore massimo del momento dipenderà, al netto del valore della reazione del pattino, dalla distanza del centro di pressione dalla piega rappresentato dalla quota "a". Non sono stati dati

dei valori dato che questo vuole essere un grafico qualitativo dal momento che trattare questa casistica con la teoria classica della trave potrebbe dare valori non veritieri dal momento che è complesso assegnare una sezione caratteristica al portale nella direzione normale al foglio.

Analizzando solamente le tensioni flessionali risultanti nel punto A, dov'è presente la piega, si avrà che sulla faccia esterna della lamiera verticale a causa del solo contributo dei pattini si avrà uno stato tensionale di compressione " σ_{f_p} ". Nella direzione parallela all'asse longitudinale del braccio a causa del momento flettente "globale" essendo nella parte superiore della sezione avremo uno stato tensionale trattivo " σ_{f_g} ". Questa condizione rappresenta uno stato tensionale in cui la composizione delle tensioni, se fatta con Von Mises, darebbe un valore massimo.

Con la porzione di sfilo dove appoggiano i pattini anteriori si può applicare un ragionamento analogo, infatti, anche in questo caso geometria e carico godono di simmetria rispetto all'asse verticale.



Anche qui viene proposto un andamento qualitativo del momento flettente partendo sempre dal presupposto che le pieghe dal lato opposto si comportino similmente ad un incastro.

Si può vedere come il valore massimo del momento sia localizzato sulla faccia inclinata dove si induce uno stato tensionale trattivo nella faccia interna.

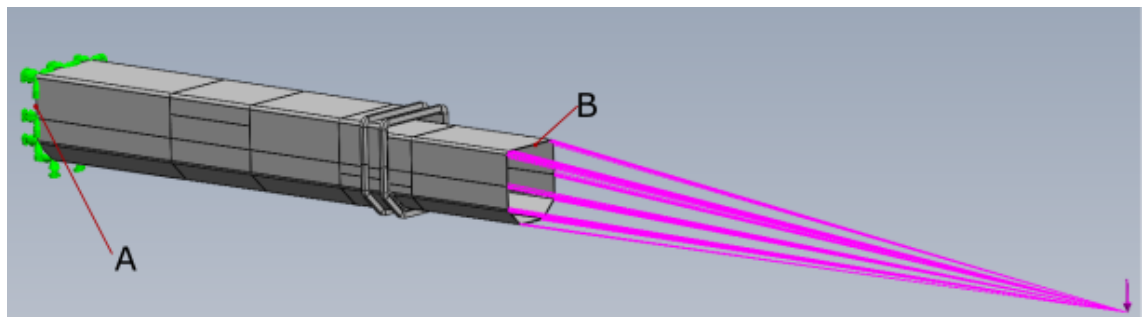
Considerando anche qui l'interazione di questa sollecitazione con quella flessionale globale si nota come sulla faccia interna si avrà questa tensione indotta dal pattino in combinazione con uno stato di compressione dovuta al contributo flessionale globale del braccio stesso. Perciò ci si aspetterà di

trovare la tensione massima nella faccia interna della carpenteria metallica.

6 ANALISI SIMULAZIONI FEM

Si procede ora con la descrizione del lavoro fatto sulle simulazioni FEM del braccio telescopico dove in primis è stata fatta un'analisi con la configurazione attuale del braccio. Successivamente è stato preso in esame solamente il quarto sfilo come campione su cui apportare delle modifiche sia alla geometria che alle proprietà meccaniche del materiale dei pattini per analizzarne l'influenza sui risultati.

Date le dimensioni del braccio telescopico, con un'estensione totale maggiore di 9 metri per limitare lo sforzo computazionale si è scelto di simulare volta per volta una sola coppia di sfili. Inoltre, dal momento che le zone di interesse sono localizzate nel tratto in cui avviene la sovrapposizione fra le sezioni contigue dei bracci, ognuna di esse viene modellata solo per una parte della sua estensione totale. Per rendere comunque fedele il caricamento si è sfruttata la possibilità di applicare un carico remoto alla struttura in modo da avere un momento flettente consistente con quello reale. Il generico setup di simulazione viene riportato di seguito:



Uno dei due sfili viene vincolato tramite un incastro in *A* posizionato ad una distanza sufficiente dalla zona di interesse per non influenzarne le tensioni. Al successivo viene applicato, come accennato, un carico remoto in *B* che tiene conto sia della massa sollevata dal braccio che di quella della carpenteria stessa. Per quanto riguarda le zone di contatto è stato modellato come “frictionless” dal momento che non era necessario introdurre questo parametro nella simulazione. Dal punto di vista teorico non ci dovrebbero essere forze che comportino lo scorrimento reciproco degli sfili o il loro movimento laterale, tuttavia, è stata introdotta una “molla morbida”. Essa è un'opzione della simulazione grazie alla quale qualsiasi gradi di libertà residuo della struttura viene bloccato attraverso delle rigidità fittizie. Sfruttando questa possibilità si stabilizzano eventuali

fluttuazioni durante la risoluzione che potrebbero portare ad eventuali errori o al mancato successo della simulazione. Un'altra strada sarebbe stata quella di vincolare fra di loro i due sfili tramite un link rigido per simulare la catena presente nelle normali condizioni operative.

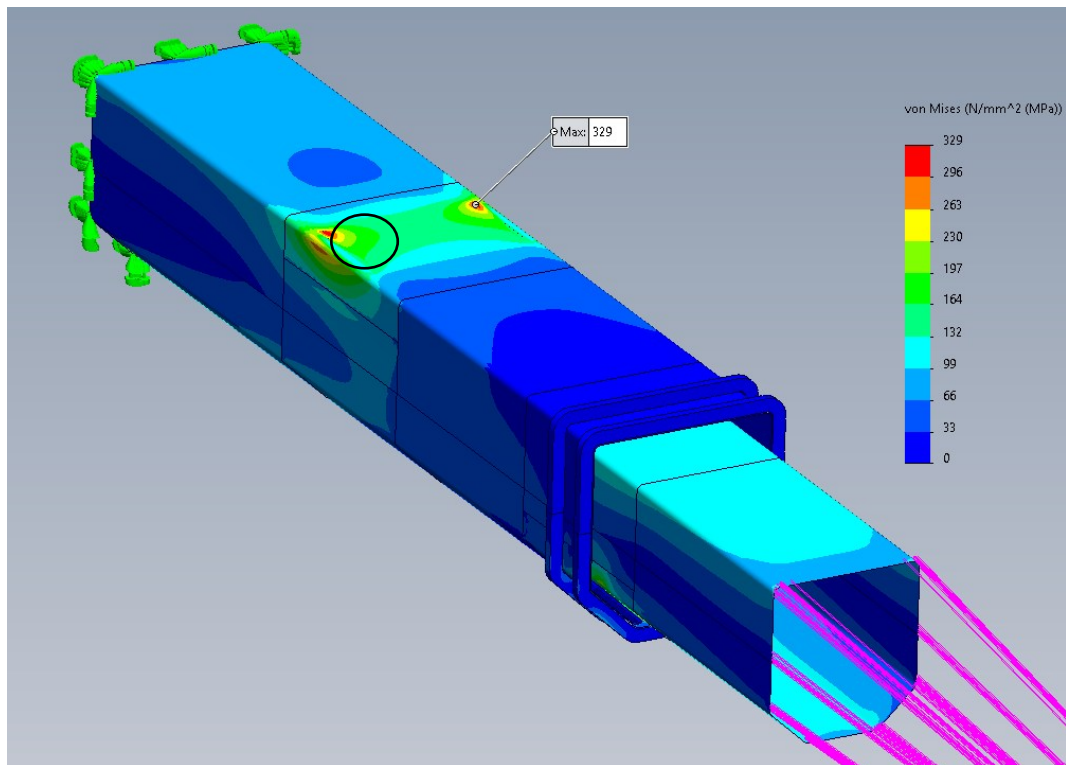
Le componenti in lamiera dei bracci sono state modellate come shell mentre per quanto riguarda i rinforzi degli sfili e i pattini vengono considerati come solidi data la natura più tozza. Questa scelta ha permesso di diminuire il numero totale di nodi sotto le 500000 unità così da non appesantire le simulazioni. Sempre con quest'ottica la mesh è stata tenuta più grossolana nelle zone non interessate andando ad effettuare affinamenti localizzati nelle zone interessate dal contatto. Per quanto riguarda i componenti solidi si è cercato di avere almeno quattro elementi lungo lo spessore per consentire un discreto livello di integrazione.

I pattini nel caso reale sono alloggiati e stretti tramite un collegamento bullonato all'interno di un supporto in acciaio ottenuto per fresatura e poi saldato alla carpenteria. Dal momento che questo vincolamento non permette alcun movimento lungo l'asse longitudinale o trasversale nella simulazione è stato sostituito da un vincolo "bonded".

Inoltre, questi componenti ottenuti per fresatura vengono considerati come elementi rigidi dal momento che per la loro geometria necessiterebbero di applicare una mesh molto fina che causerebbe un aumento importante del numero di elementi. A fronte del fatto che la zona in cui i pattini vengono collegati alla carpenteria viene sempre ben rinforzata si è ritenuto legittimo apportare questa semplificazione.

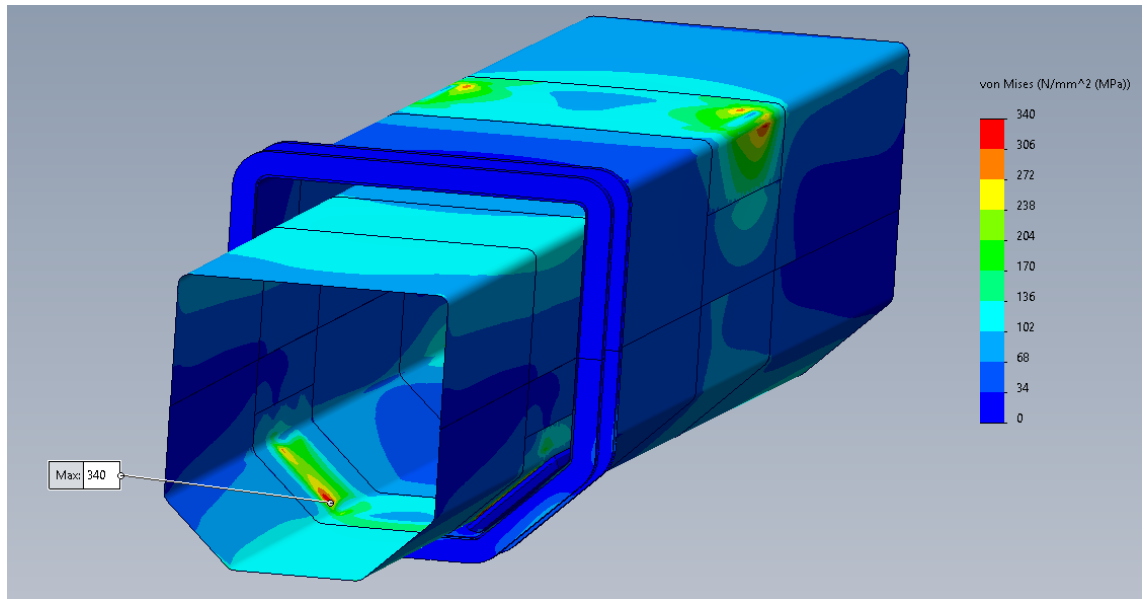
Verranno ora proposti ed analizzati i risultati delle simulazioni effettuate sulla versione "di base" del braccio telescopico per poi confrontarle con i valori ricavati nella prima parte riguardo le tensioni flessionali e le reazioni sui pattini calcolate analiticamente.

Come prima analisi si porteranno i risultati della simulazione sul quarto e terzo sfilo partendo dalla zona interessata dal contatto dei pattini posteriori superiori.

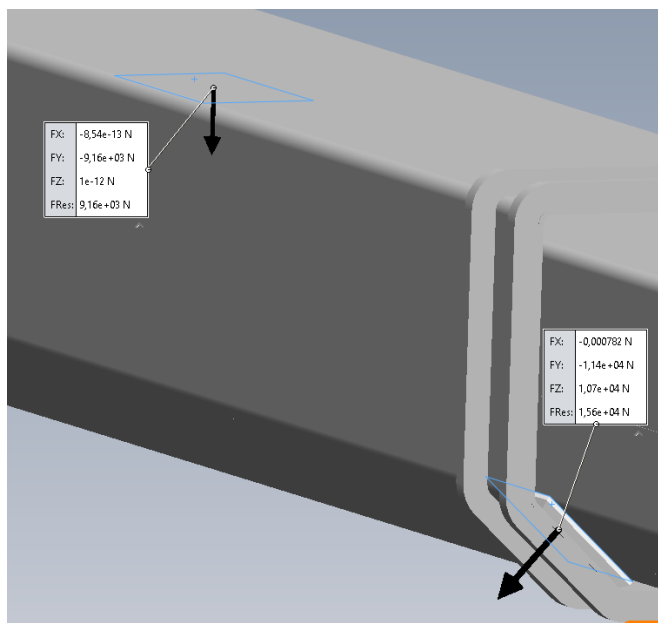


Come si può chiaramente notare dall'immagine è presente in questo punto un'elevata concentrazione locale degli sforzi se comparata con quella nelle zone appena adiacenti. Si trova infatti una tensione massima di Von Mises pari a 329MPa mentre nelle porzioni non interessate le tensioni nella parte superiore si attestano nell'intorno dei 70-100 MPa. Questo conferma i valori calcolati in precedenza di circa 76MPa nel punto "A" dello studio tramite il modello della trave del terzo sfilo. A supporto della validità delle osservazioni proposte sfruttando gli schemi con i portali vi è il fatto che la tensione massima di appunto 329 MPa si ottiene visualizzando la tensione della parte esterna della lamiera. Inoltre, come ci si aspettava, la zona a concentrazione massima, è adiacente alla piega di transizione fra la lamiera superiore e quella laterale. In questa porzione evidenziata si può infatti notare una la carpenteria particolarmente caricata.

Un ulteriore conferma viene fornita per quanto riguarda i pattini anteriori qui, infatti, per avere il valore massimo della tensione locale si deve analizzare la superficie interna del quarto sfilo una cui immagine viene proposta di seguito.



Altro aspetto che avvalora le considerazioni si deve al fatto che il valore massimo è localizzato sulla parete inclinata della sezione come suggeriva il modello proposto del portale. Il motivo per cui il valore massimo si trovi vicino alla parte inferiore piuttosto che al centro è spiegabile dal fatto che avvicinandosi alla parete orizzontale le tensioni flessionali globali aumentano linearmente. Come si può notare il valore nelle porzioni non influenzate dal contatto si arrivi a valori di sforzo compresi fra i 102 e 136 MPa confermando nuovamente quelli calcolati analiticamente di 125 MPa.



Dalla simulazione è inoltre possibile valutare le reazioni risultanti sui pattini per poi confrontarle con quelle calcolate.

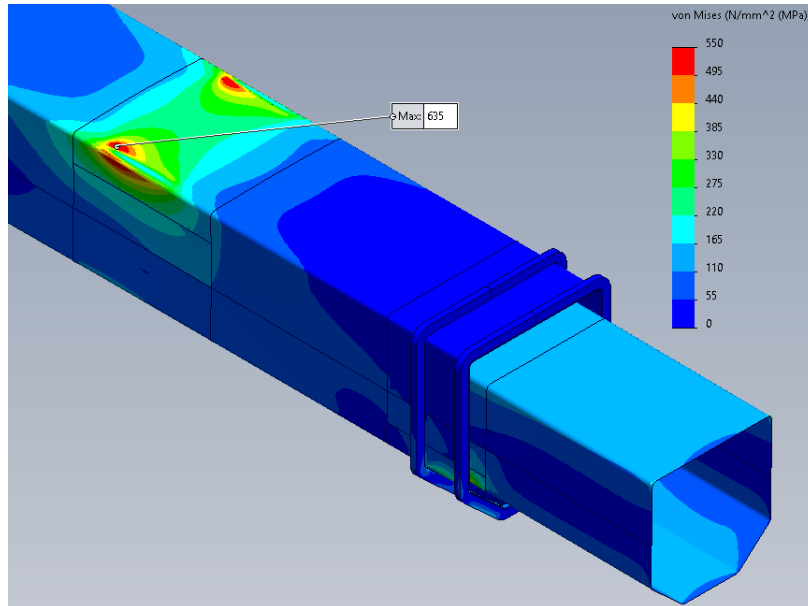
I valori ricavati dalla simulazione presentano una risultante di $9.16 \times 10^3 \text{ N}$ per quanto riguarda i pattini posteriori mentre $15.6 \times 10^3 \text{ N}$ per

quelli anteriori.

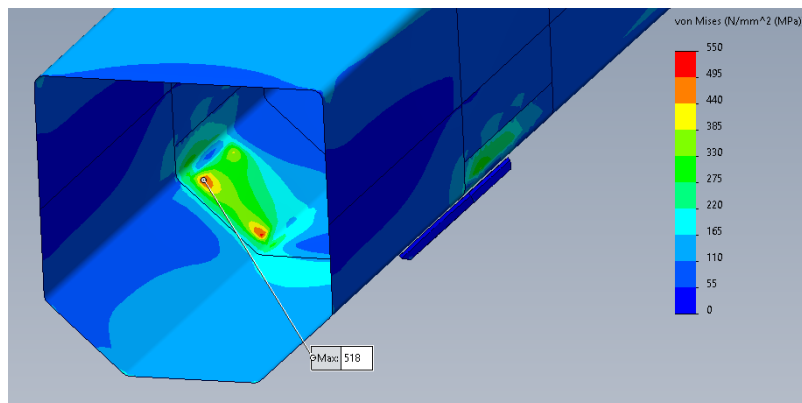
Se confrontare con quelle calcolate che valgono rispettivamente $R_{pp_4} = 9.18 \times 10^3 \text{ N}$ e $R_{pa_4} = 15.85 \times 10^3 \text{ N}$ confermano che le considerazioni riguardo l'interasse fra i centri di pressione dei pattini in relazione alla lunghezza

degli stessi sono più che valide dal momento che l'errore massimo è dell'1,6%.

Verranno ora presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni che coinvolgono rispettivamente terzo-secondo sfilo e secondo-primo sfilo su cui verranno fatte considerazioni analoghe.



Anche qui
sia per
quanto
riguarda i
pattini
posteriori
che quelli
anteriori
si ha una



concentrazione di tensioni notevole nelle zone identificate precedentemente come critiche. In particolare, in quelli posteriori si arriva a 635MPa rispetto ai 76 calcolati, mentre per quanto riguarda sulla faccia interna del terzo sfilo si raggiungono 518MPa quando le verifiche analitiche ne avrebbero previsti appena 155.

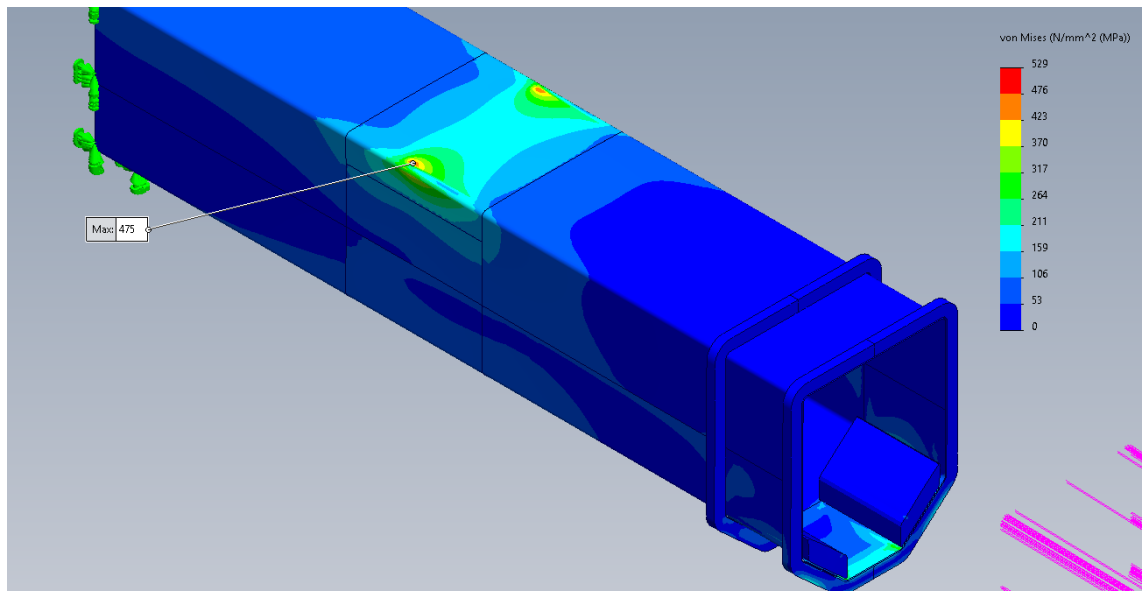
Per quanto riguarda le reazioni di spinta sui pattini posteriori si hanno 1.86e4 N rispetto a $R_{pp_3} = 1.84e+4N$ calcolati. Anche all'anteriore si conferma l'accuratezza del calcolo manuale dove era stato ricavato

$R_{pa_3} = 2.92e+4N$ che confrontati con 2.81e+4 ottenuti dalla simulazione confermano un errore più che accettabile del 3.9%.

A differenza del precedente sfilo qui le tensioni superano abbondantemente i 400MPa, tensione che viene considerata “di soglia” per avere il sufficiente margine da garantire il rispetto dei coefficienti di sicurezza imposti da normativa. Le possibili strategie per diminuire questi valori di picco per quanto riguarda i pattini anteriori possono essere quelli di aumentare il numero di pieghe in questa zona e variare la geometria dei pattini in modo che agiscano su due o più delle facce inclinate risultanti. Un'altra opzione è quella di aumentare lo spessore della carpenteria dato che le tensioni sono una funzione decrescente con il quadrato dello spessore della lamiera.

Per quanto riguarda la zona dei pattini posteriori la principale strada che si intraprende è, ove possibile, introdurre dei rinforzi locali andando a saldare sulla faccia esterna dell'ulteriore lamiera. Questi aumenti locali di spessore tendenzialmente non vengono fatti negli sfilati intermedi dato che nell'intercapedine fra i vari sfilati vi scorrono le catene sia di sfilo che di rientro e lo spazio rimanente tende ad essere minimizzato in fase di progetto.

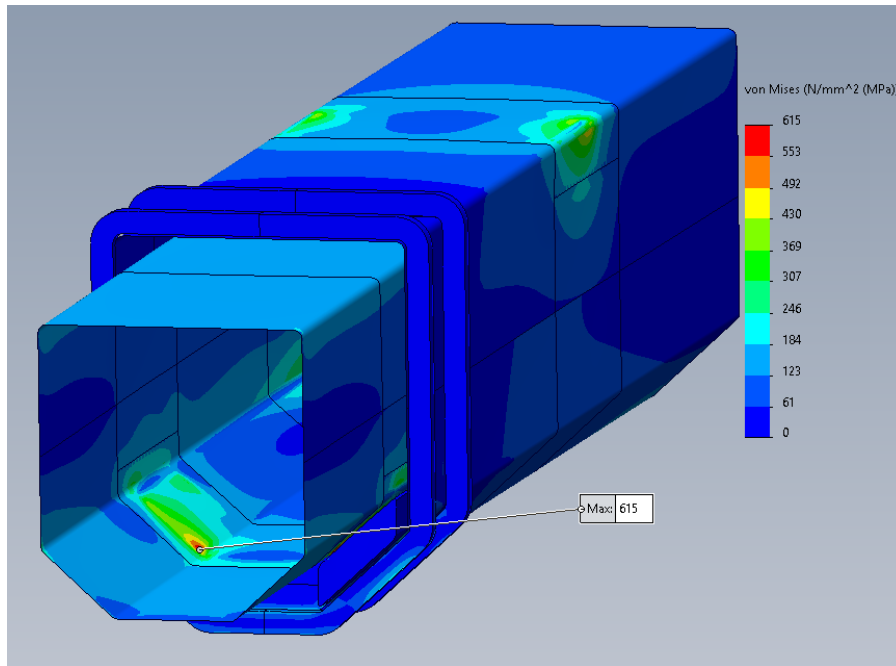
Come ultimo esempio si considera la sezione del braccio chiamata “base” che permette l'interfacciamento con la torretta. La zona di collegamento tra i due organi del macchinario non è inclusa nella simulazione dal momento che non è oggetto di studio, inoltre data l'importanza di questa parte dello sfilo viene opportunamente rinforzata.



Qui si vede la zona dei pattini posteriori superiori caratterizzata da una tensione massima di 475 MPa, valore inferiore a quello visto nello sfilo precedente nonostante le sollecitazioni siano maggiori. Questo si spiega considerando che questa sezione del braccio è formata da due semigusci di

lamiera da 4mm di spessore a differenza del precedente in cui erano elementi da 3mm. Nonostante la poca differenza questo ha fatto calare considerevolmente gli sforzi dal momento che è presente un fattore quadratico rispetto allo spessore.

Anche sulla parte del secondo sfilo interessata dai pattini anteriori inferiori si possono notare delle tensioni minori di quelle viste nel precedente esempio. Tutto ciò nonostante si sia visto come siano questi quelli maggiormente caricati, la maggiore differenza sta nel fatto che sullo sfilo “base” i pattini anteriori montati sono considerevolmente più lunghi di quelli delle sezioni successive. Si passa infatti dai 90mm di lunghezza a 125mm di lunghezza in questo caso, questo fa sì che la pressione di contatto si distribuisce su un’area maggiore e contribuisce a diminuire il picco di tensione.



In quest’ultimo caso le reazioni sui pattini differiscono maggiormente rispetto a quelle ricavate analiticamente restando comunque entro il 5% di errore che rimane comunque accettabile dal momento che si parla di calcoli preliminari semplificati. I valori forniti dalla simulazione infatti sono di 2.81×10^4 N per quanto riguarda i pattini posteriori e di 4.16×10^4 N su quelli anteriori.

I risultati ottenuti in questa prima parte vengono proposti nella seguente tabella riassuntiva:

n° sfilo	Reazione P post [kN]		Err. %	Tensione P post [MPa]		Reazione P ant [kN]		Err. %	Tensione P ant [MPa]	
	Calcoli	FEM		Calcoli	FEM	Calcoli	FEM		Calcoli	FEM
4°	9.18	9.16	0.21	-	-	15.85	15.6	1.60	125	340
3°	18.44	18.6	-0.86	76	329	29.20	28.1	3.91	155	518
2°	26.71	28.1	-4.95	108	635	42.62	41.6	2.45	185	615
1°	-	-		92	475	-	-	-	-	-

Come si può notare la correlazione fra i calcoli analitici e la simulazione è fedele per quanto riguarda le reazioni sui pattini, a conferma che le ipotesi fatte sul loro interesse siano affidabili. Per quanto riguarda invece le tensioni questo non è affatto vero in quanto la teoria classica della trave non è adeguata per caratterizzare effetti così intenso e soprattutto localizzati. Questo pone un limite all'utilità dei calcoli analitici in un contesto come questo soprattutto se l'obiettivo è quello di ottimizzare le sezioni per risparmiare massa sulla parte aerea.

Nella prossima parte si prenderà come riferimento il quarto sfilo e verranno apportate modifiche ai pattini sia in termini di proprietà del materiale che di dimensioni dello stesso.

7 STUDIO SOLLECITAZIONI AL VARIARE DEI PARAMETRI

Per comprendere meglio la natura del contatto fra i pattini e la carpenteria si è deciso di effettuare una serie di esperimenti andando a variare:

- modulo elastico dei pattini
- lunghezza dei pattini “V_p”
- larghezza dei pattini “W_p”

In questa maniera si riesce ad analizzare come questi parametri influenzino il comportamento di questa particolare zona della struttura. A questo scopo verranno valutate le tensioni sulla carpenteria e la pressione di contatto fra pattino e carpenteria, in particolare come varia la sua distribuzione e i valori massimi ottenuti. Infatti, una pressione di contatto eccessiva può portare a un’usura precoce o non omogenea della superficie. Questo è evidenziato da un parametro denominato “PV”, fornito dal costruttore come limite superiore che lega la pressione di contatto P alla velocità di scorrimento V.

Come precedentemente accennato i pattini attualmente in uso dall’azienda sono prodotti in Nylatron 703XL, un tecnopolimero caricato caratterizzato da un’ottima resistenza meccanica ed eccellenti proprietà di scorrevolezza non essendo affetto da “stick slip”.

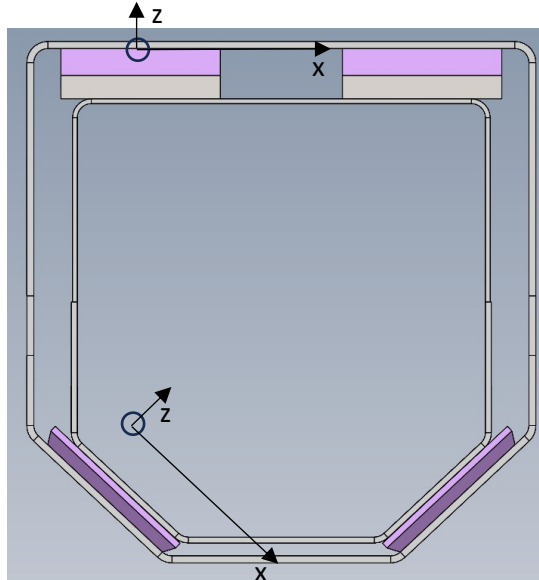
Queste proprietà lo rendono un eccellente materiale per questa applicazione, in passato questi componenti erano realizzati in bronzo.

7.1 Influenza del modulo elastico del pattino

Si analizzeranno ora i risultati delle simulazioni ottenuti andando a diminuire il modulo elastico del materiale che assume un valore di partenza di 2GPa. Nei limiti del possibile sono stati fatti due step: il primo dove il modulo di Joung è stato diminuito di un fattore $\sqrt{10}$ mentre il secondo in cui era pari ad un decimo di quello originale. Non si è potuto diminuire ulteriormente dal momento che poi si sarebbe arrivati ad un comportamento simile ad una gomma più che ad una plastica “rigida”.

I dati delle simulazioni sulle pressioni di contatto sono stati elaborati grazie al software Matlab grazie al quale è stato creato un sistema di riferimento locale sui pattini per migliorare la lettura dei dati.

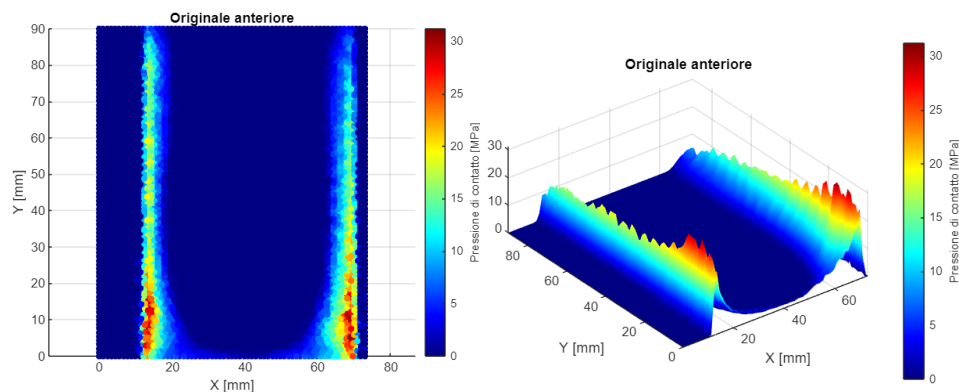
Si riporta nuovamente la vista frontale del braccio, in particolare l'origine dei sistemi di riferimento locali sono posizionati nel vertice sinistro dei rispettivi pattini con l'asse y entrante nel foglio mentre l'asse x parallelo allo spigolo visibile.



Si parte quindi dai pattini anteriori inferiori che hanno una dimensione di 80x90mm con il lato da 90mm orientato lungo la linea d'asse dello sfilo in particolare l'asse y nell'immagine è parallelo all'asse del braccio con l'origine in concomitanza dell'inizio del terzo filo.

Come si nota dall'immagine non si ha affatto una distribuzione uniforme della pressione di contatto come suggeriva l'articolo citato in precedenza. Sono infatti chiaramente visibili due linee parallele coincidenti con le pieghe inferiori del quarto sfilo.

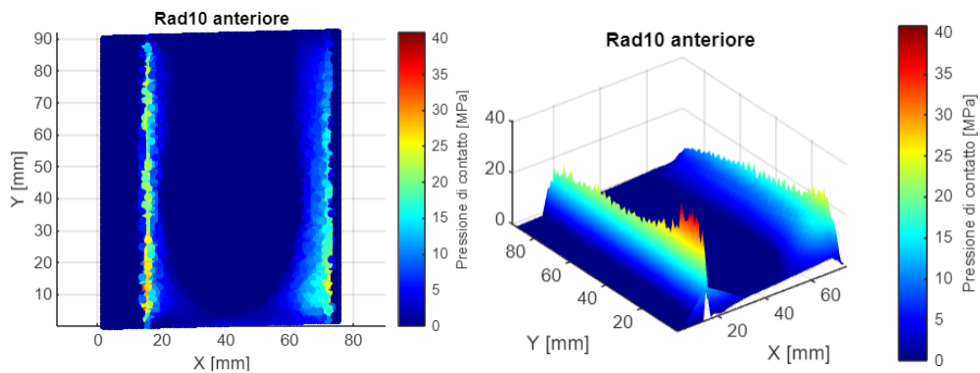
Questo comportamento è spiegabile dal fatto che le pieghe sono la zona che subisce meno deformazione mentre la parte in lamiera fra di esse è più cedevole quindi la maggior parte della forza di contatto viene scaricata in questi punti.



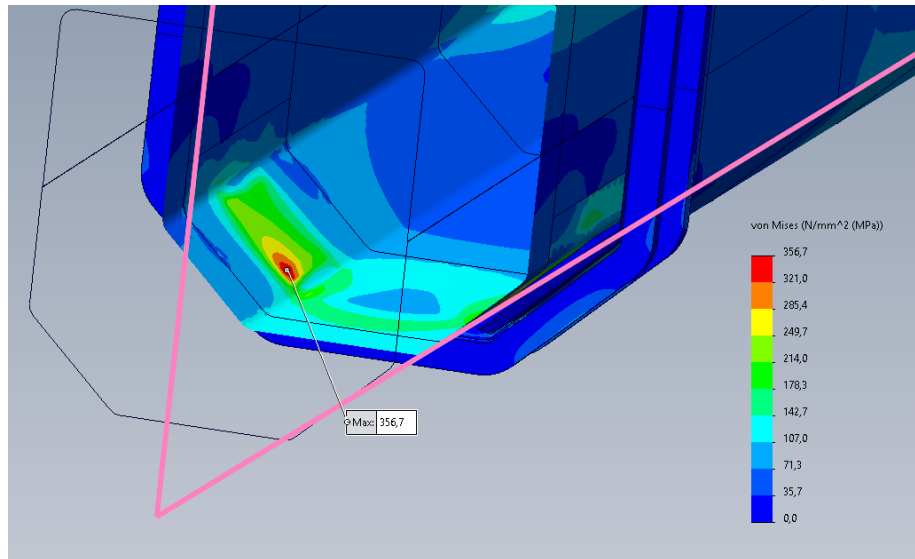
Altro aspetto osservabile è come la pressione sia mediamente maggiore nella parte anteriore del pattino e vada a scemare andando all'interno dello sfilo. Questo conferma le ipotesi fatte riguardo l'interesse fra i pattini dove non si è preso semplicemente un punto in mezz'ora.

Le pressioni di contatto massime sono entro valori accettabili dal momento che con un valore massimo attorno ai 30 MPa siamo al 75% della tensione di snervamento del materiale di 40MPa. Inoltre, in queste simulazioni si sta presupponendo una geometria "ideale", tuttavia, l'azienda non registra elevata usura su questi componenti quindi seppur certamente i valori di picco andranno a calare questi dati rimangono sufficientemente attendibili.

La prossima serie di immagini presente invece la distribuzione della pressione di contatto on il modulo elastico scalato di un fattore $\sqrt{10}$.



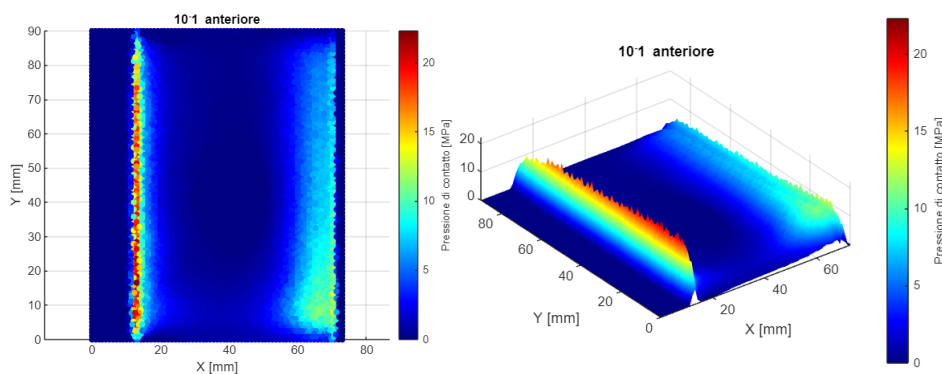
Si può notare come ci sia stata una ridistribuzione della pressione di contatto, infatti, la zona interessata dalla piega sinistra presenta ora dei valori considerevolmente più alti di quelli dal lato opposto. Un'ulteriore osservazione può essere fatta sui valori massimi che sono aumentati, questo ragionevolmente a causa del fatto che con questo scompenso fra i due lati ci sia stata una diminuzione dell'area "efficace" che contribuisce al contatto.



E' inoltre aumentata la tensione di picco in questa zona, infatti si è passati da un valore massimo di 340MPa con il pattino “originale” a circa 357MPa.

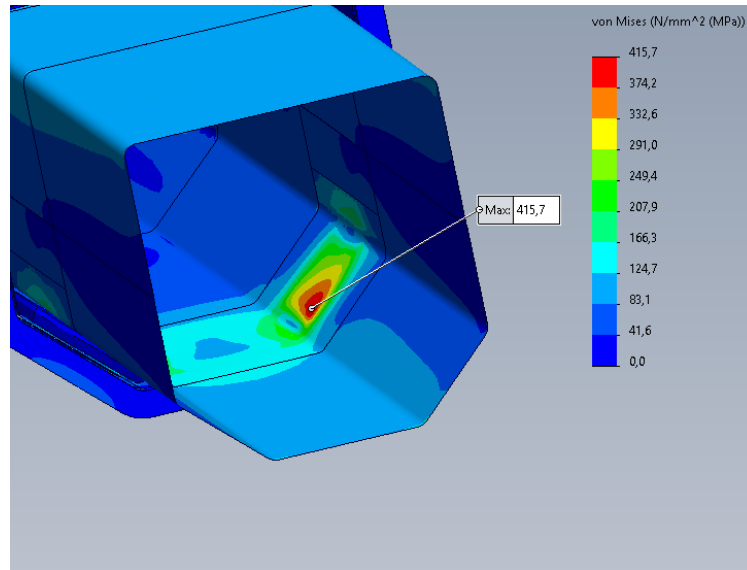
In quest'ultimo esempio il modulo elastico è stato portato ad $\frac{1}{10}$ di quello iniziale.

Si nota subito come la distribuzione sia ulteriormente variata, confermando la tendenza precedente con la maggior parte della forza scaricata nella porzione sinistra del pattino.

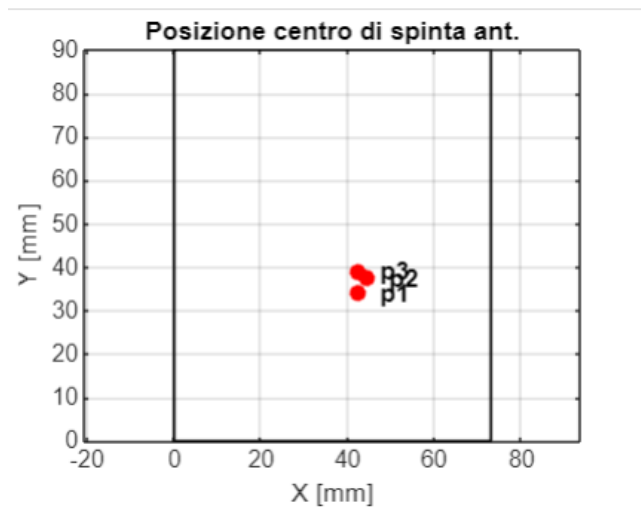


A differenza del caso precedente, però, i valori massimi sono calati. Si è infatti passato da un fondo scala di 40 MPa ad appena oltre i 20Mpa.

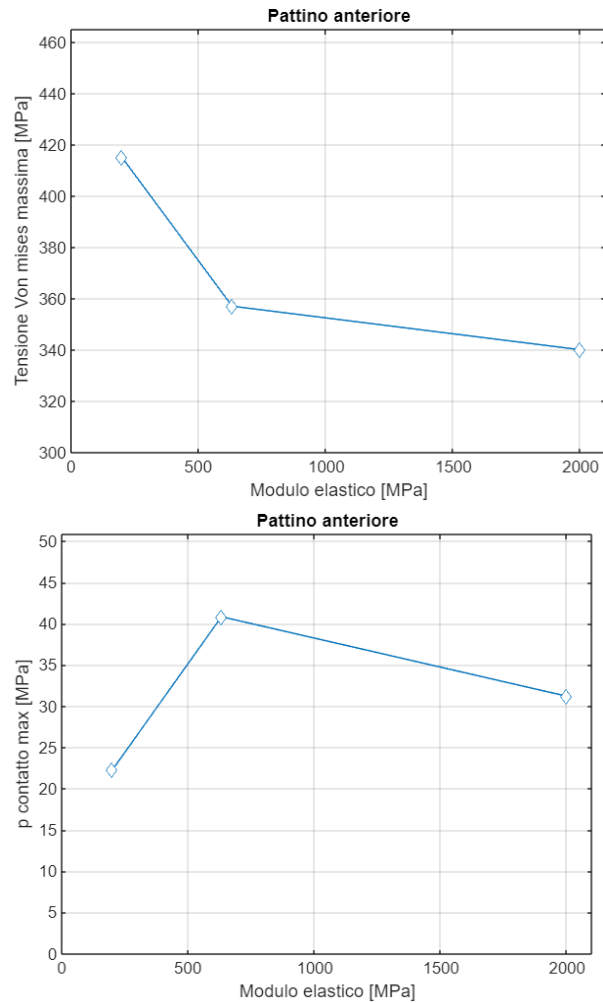
Anche in questo caso la tensione di picco aumentata ulteriormente e appare leggermente traslata verso la piega inferiore.



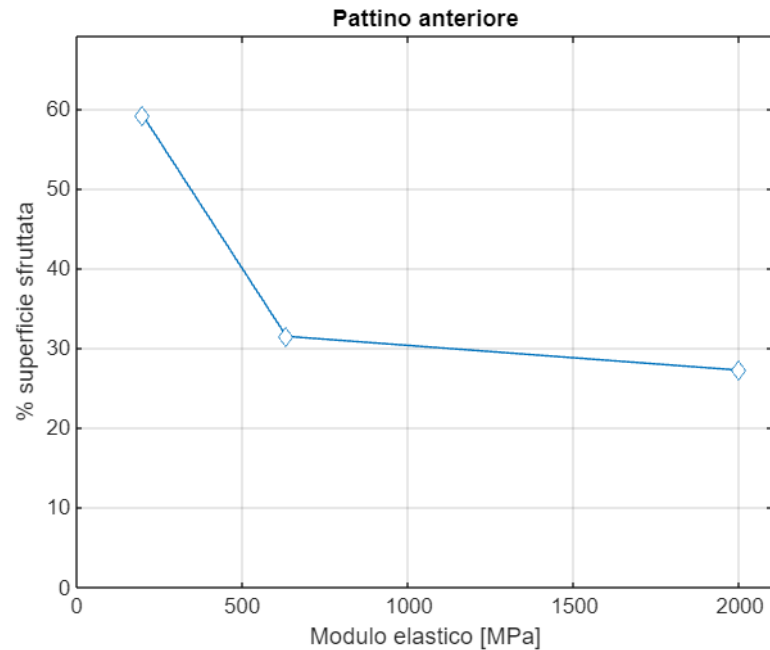
Si propongono ora dei grafici riassuntivi.



In questa prima immagine viene visualizzata la posizione del centro di spinta, come si può notare è pressoché invariata nei tre casi. Perciò la spiegazione riguardo all'aumento della tensione massima sulla carpenteria è probabilmente da ricercare in una differente distribuzione delle pressioni sulla superficie del pattino stesso. In particolare, andando a diminuire il modulo elastico, una porzione sempre più consistente della superficie racchiusa dalle due linee di piega è interessata dal contatto. Questo, sommato al fatto che man mano che si va verso il centro pattino la distanza dalle pieghe aumenta da come risultato un maggior momento flettente agente sul “portale” portando in definitiva ad una tensione massima maggiore.



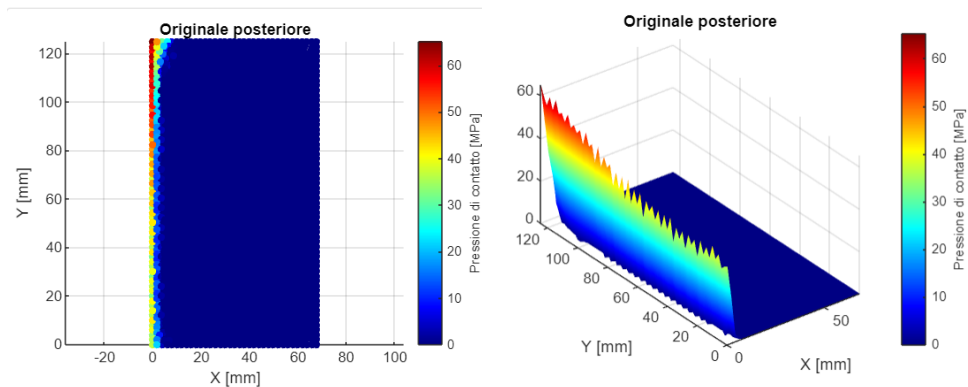
Sfruttando il fatto che la mesh sui pattini è omogenea è stato possibile stimare la percentuale della superficie totale del pattino che viene effettivamente sfruttata. Per fare questo è stata scelta una soglia pari al 2% del valore massimo della pressione di contatto massima. Grazie a questo valore è stato fatto un rapporto fra il numero di nodi che presentano un valore di pressione maggiore della soglia e il numero totale presente sull'intera faccia del pattino.



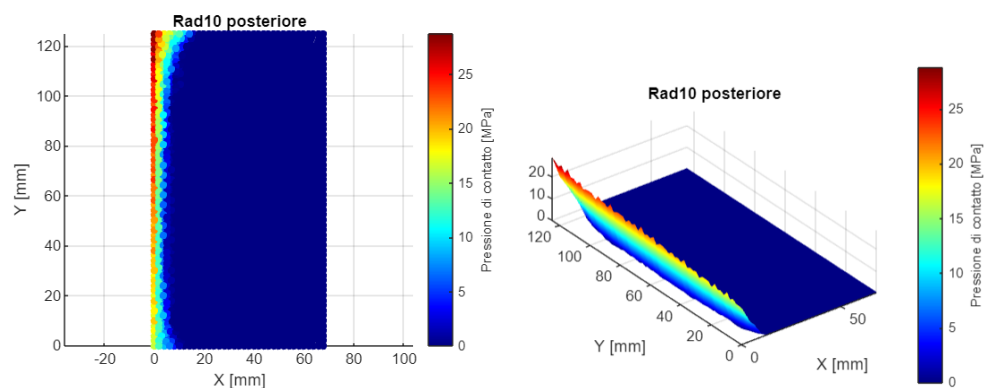
Dal grafico è evidente come al diminuire del modulo di Young la percentuale di superficie sfruttata aumenti drasticamente fino a raddoppiare nell'ultimo studio. Questo comportamento è spiegabile dal momento che man mano che diminuisce la rigidità del materiale a, parità di carico applicato, questo si deformerà maggiormente. Così facendo la superficie del pattino meglio si adatta a quella deformata della struttura permettendo di scaricare una parte della forza in zone che precedentemente non erano nemmeno a contatto avvalorando la tesi proposta sull'aumento delle tensioni.

Questo comportamento potrebbe aiutare a diminuire l'usura del materiale, tuttavia, c'è da considerare che al diminuire del modulo elastico è lecito aspettarsi un calo della tensione di snervamento del materiale. Considerando quest'ultimo fattore ci potrebbero essere effetti negativi dal punto di vista della durata o eventuali danneggiamenti dei pattini.

Si passerà ora ad uno studio analogo sui pattini posteriori partendo sempre dal campione di riferimento originale. Data la forma della sezione sulla quale vanno a contatto i pattini posteriori e a fronte delle simulazioni già effettuate è lecito pensare che la maggior parte della forza di contatto venga scaricata vicino allo spigolo laterale dov'è presente la piega. Questo ragionamento è supportato dal fatto che nelle immagini delle prove FEM finora presentate è chiaramente visibile un picco localizzato nella zona in cui si trova lo spigolo posteriore esterno del pattino.



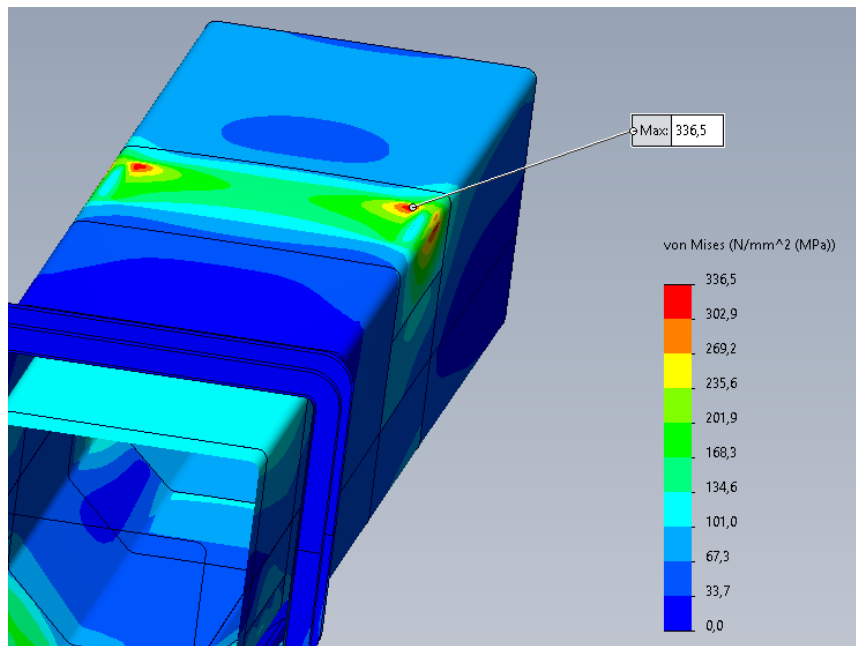
Come si può vedere i risultati delle pressioni di contatto confermano quanto appena ipotizzato infatti il pattino viene caricato sostanzialmente solo sullo spigolo adiacente alla piega con i valori massimi concentrati nell'intorno dello spigolo posteriore. Il fatto di sfruttare una superficie così limitata porta ad avere delle pressioni di contatto sensibilmente più alte rispetto al pattino anteriore, all'incirca doppie. Partendo dalle analisi fatte in precedenza anche qui ci si aspetta che al diminuire del modulo elastico la superficie sfruttata aumenti esponenzialmente, cosa che viene confermata dalle immagini proposte di seguito.



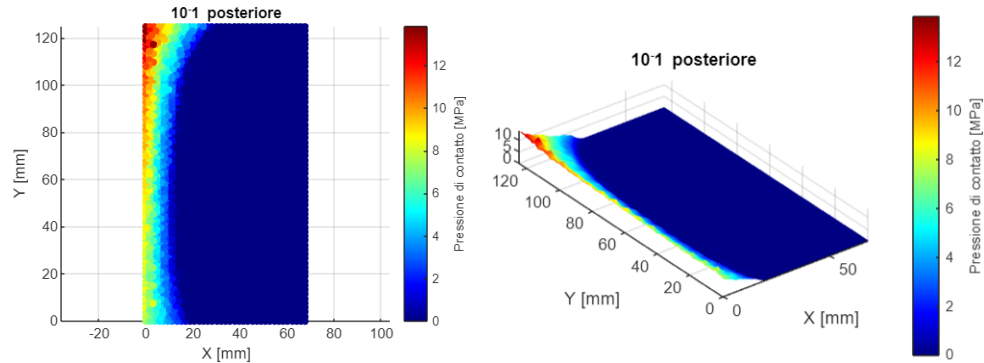
Si nota infatti che la zona interessata dal contatto sta gradualmente aumentando, soprattutto nell'angolo posteriore, si sta inoltre cominciando a sfruttare maggiormente la parte anteriore del pattino e i picchi precedenti di 60Mpa sono scomparsi.

Come si nota dall'immagine sottostante il valore della tensione massima è aumentato come nel caso del pattino anteriore. Anche qui la spiegazione più plausibile è che aumentando la superficie a contatto il centro di pressione si stia spostando verso la parte centrale dello sfilo aumentando il braccio di leva rispetto alla piega sulla lamiera. A confermare questo aspetto vi è anche il fatto che stanno aumentando le tensioni sulla lamiera superiore nella zona compresa fra i due pattini posteriori. Si può infatti notare che, a differenza della simulazione proposta nella precedente parte della trattazione

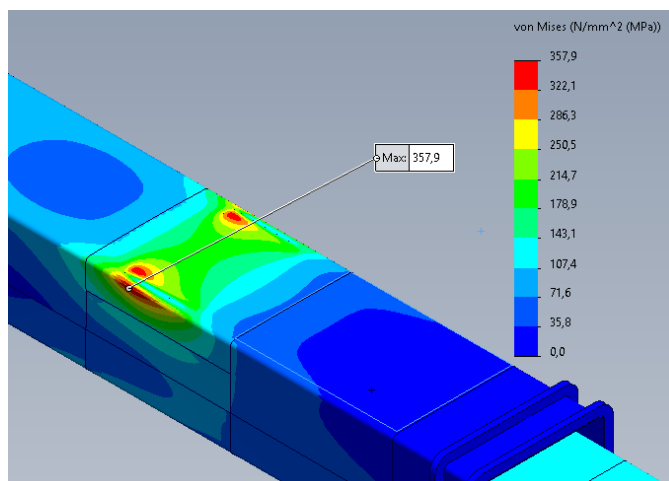
l'intervallo di tensioni in questa porzione è passato da 140-200 a 140-230MPa.



Per ultimo si espongono i risultati ottenuti con il modulo elastico pari ad un decimo di quello di partenza.



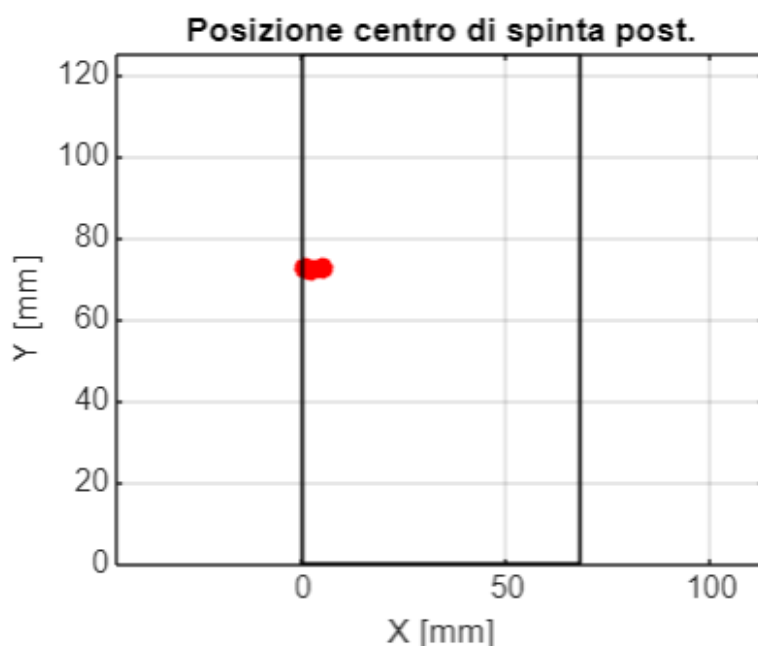
Viene ulteriormente confermato la tendenza sull'aumento della superficie impegnata e della notevole diminuzione delle pressioni di contatto.



A conferma della validità del modello dei portali vi è un ulteriore aumento delle tensioni massime ed una migrazione del punto in cui queste si manifestano, andando a confermare il paragone.

Anche in questo caso l'aumento della superficie di contatto ha provocato la migrazione del centro di pressione a maggiore distanza dal bordo esterno.

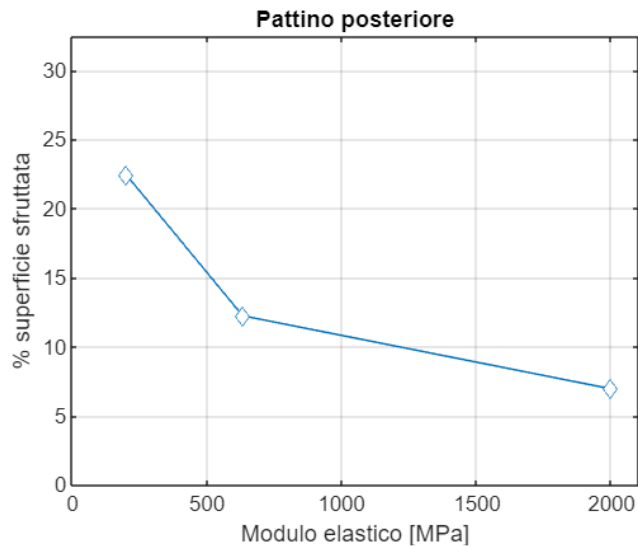
Sfruttando la stessa logica dei pattini anteriori sono state valutate l'andamento della superficie sfruttata del pattino, del valore massimo delle pressioni di contatto e la posizione del centro di spinta.



Per motivi di leggibilità non sono stati numerati i punti.

Si consideri che andando da sinistra verso destra è diminuito il modulo di Young quindi il centro di pressione di è allontanato, seppur di poco, dalla piega superiore

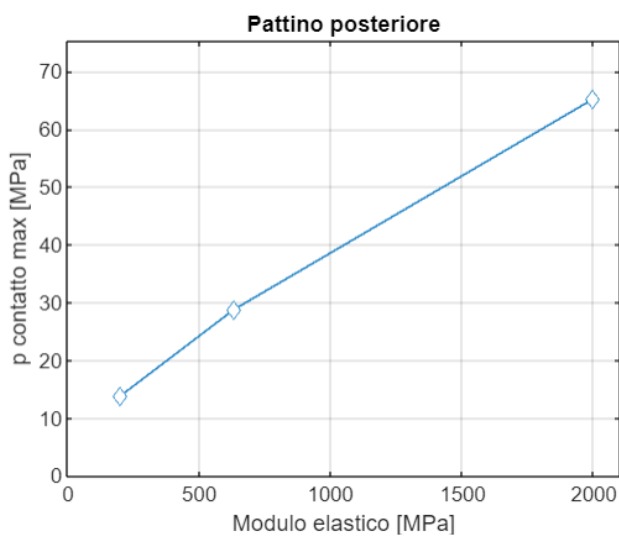
della carpenteria. Questo comportamento porta inevitabilmente ad un aumento del momento flettente e quindi delle tensioni massime.



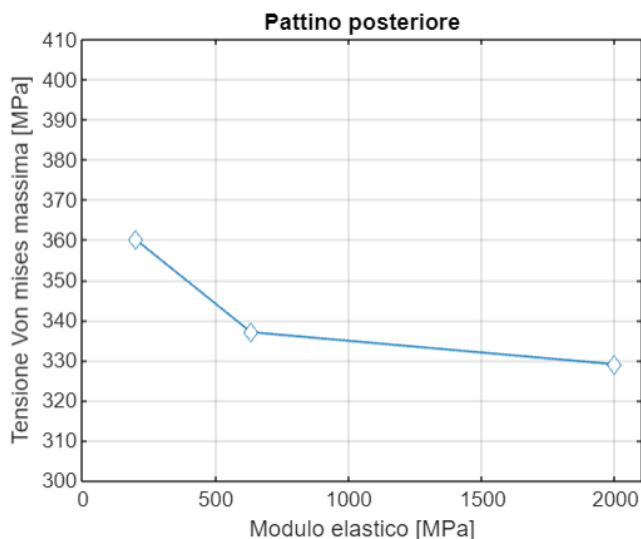
Come notato in precedenza al diminuire del modulo elastico la superficie del pattino effettivamente sfruttata è aumentata, in questo caso triplicata passando dal 7 al 22%. Questo suggerisce anche che i pattini potrebbero essere realizzati più stretti con

un conseguente risparmio di materiali costi e peso.

Logicamente le pressioni di contatto sono calate proporzionalmente all'aumento della superficie di contatto mentre i valori massimi delle tensioni, come già spiegato sono aumentati in seguito all'aumento del



braccio di leva del centro di pressione rispetto alla parete verticale in presenza della piega superiore.



In ultima analisi la diminuzione del modulo elastico del pattino ha l'effetto positivo di diminuire le pressioni di contatto massime, a beneficio dell'usura, ma porta ad un aumento delle sollecitazioni sulla carpenteria. Inoltre i risultati confermano la validità del modello proposto con i portali che permettono di meglio comprendere il fenomeno e di prevedere le possibili conseguenze di eventuali modifiche.

Alla luce dei risultati appena analizzati si possono fare previsioni sulle ulteriori prove riguardo alle variazioni della geometria dei pattini, in particolare ci si aspetta che:

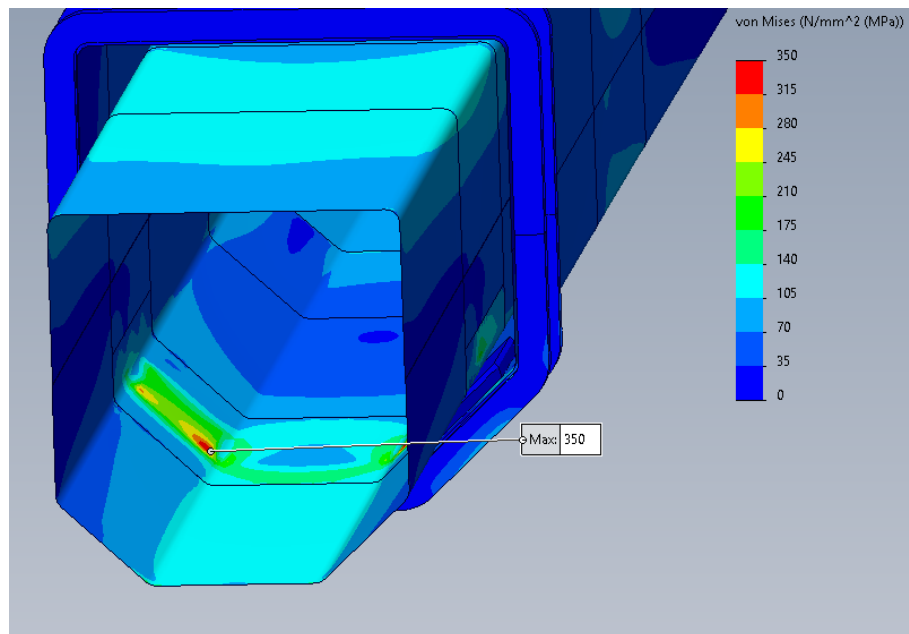
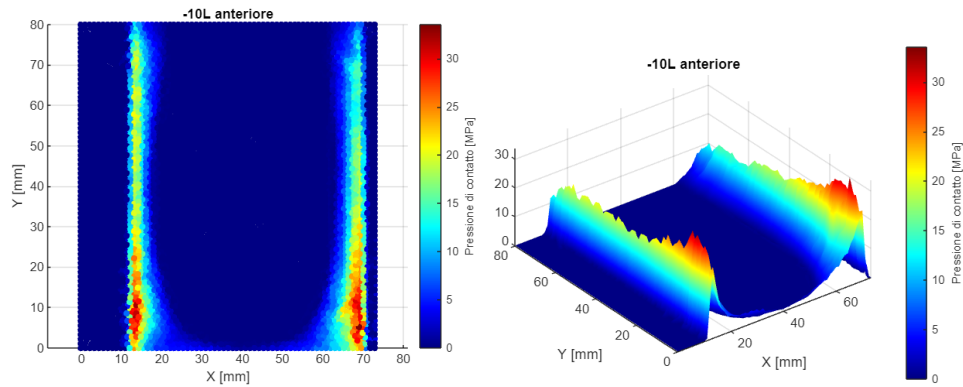
- diminuendo la lunghezza dei pattini le pressioni massime di contatto dovrebbero aumentare in maniera contenuta e di conseguenza anche le tensioni massime dal momento che la reazione di contatto verrà scaricata su una porzione minore di carpenteria.
- diminuendo la larghezza dei pattini, specialmente quelli posteriori non si dovrebbero notare particolari variazioni dal momento che la superficie sfruttata è limitata.

7.2 Impatto della lunghezza del pattino

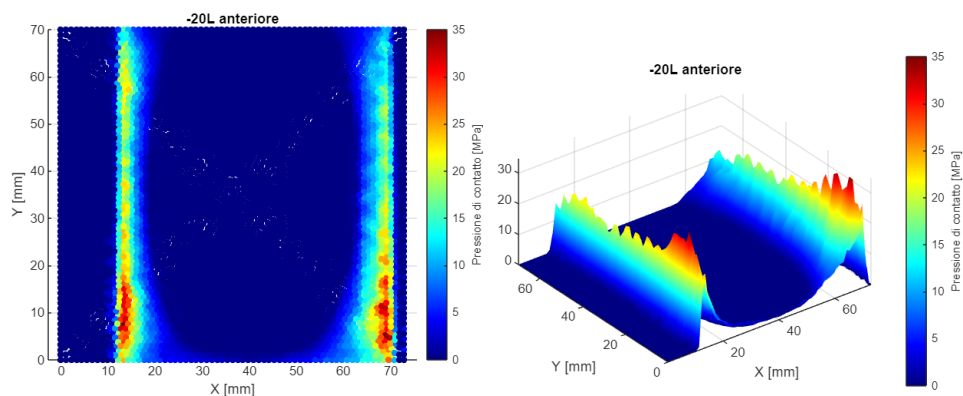
Verrà ora investigata l'evoluzione delle sollecitazioni al variare della lunghezza dei pattini, in particolare verrà diminuita progressivamente di 10, 20 e 30mm mantenendo la posizione del pattino invariata ossia coincidente con il bordo d'uscita dello sfilo. Questa scelta viene fatta per massimizzare l'interesse fra i pattini anteriori e posteriori.

Come accennato poco fa quello che ci si aspetta è che le pressioni medie di contatto aumentino e, dal momento che verrà sfruttata una porzione minore della carpenteria, le tensioni massime tendano ad aumentare.

Partendo dal caso del pattino anteriore accorciato di 10mm si nota che il valore massimo della pressione di contatto è aumentata salendo oltre i 30MPa. Per quanto riguarda la sua distribuzione, invece, non si notano particolari differenze se non un leggero aumento della zona di contatto nella parte centrale anteriore del pattino.

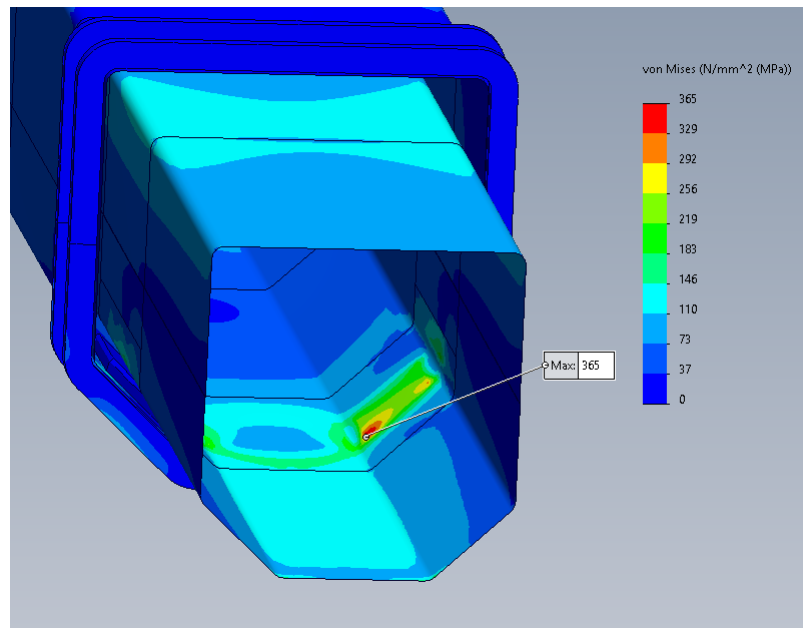


Anche in questo caso la tensione massima è leggermente aumentata passando da 340MPa dell'originale a 350MPa come ci si aspettava.

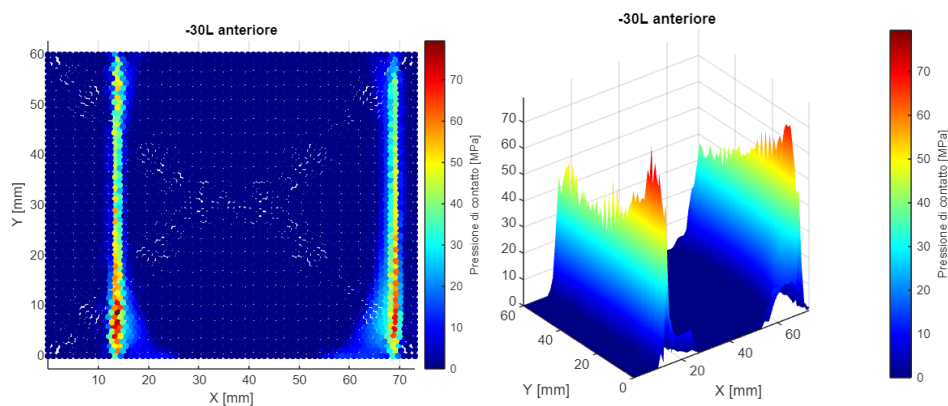


Diminuendo ulteriormente la lunghezza di 10mm, passando quindi dagli originali 90mm a 70mm si nota un progressivo aumento delle pressioni di contatto e la formazione di una zona più ampia nella parte posteriore del pattino. La piega esterna rimane comunque mediamente più caricata di

quella interna. Anche in questo caso le tensioni massime sono aumentate. Come si vedrà nella prossima immagine, si è infatti saliti a 365MPa.

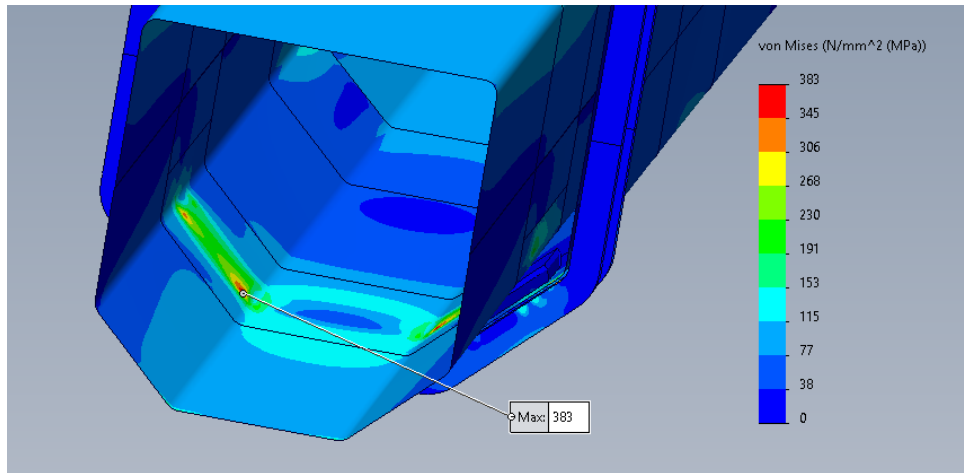


Si presentano ora gli ultimi risultati riguardo un ulteriore accorciamento del pattino di 10mm arrivando ad una lunghezza finale di 60mm.

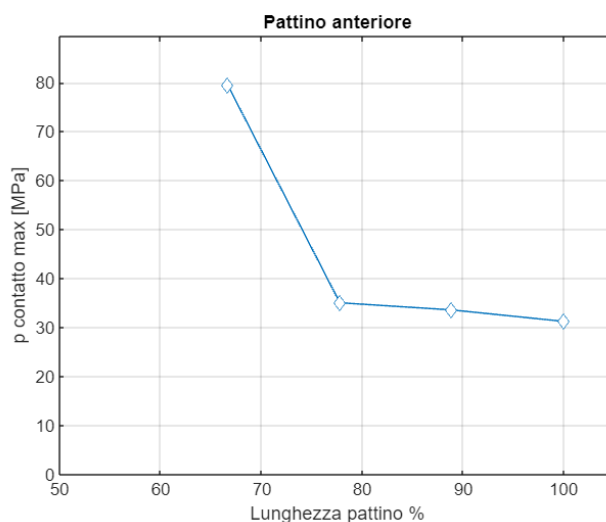


In questo ultimo tentativo si nota come la pressione massima sia aumentata esponenzialmente passando ca circa 35MPa a oltre 70MPa. Questo fenomeno improvviso è probabilmente da imputare al fatto che al diminuire della superficie di contatto e al conseguente aumento delle pressioni il pattino è soggetto ad una maggiore deformazione, soprattutto nella parte anteriore. Questo fa sì che, accoppiato allo stesso fenomeno sul pattino posteriore, la carpenteria tenda a lavorare maggiormente sugli spigoli con un conseguente ulteriore aumento delle pressioni. Quindi un effetto a catena.

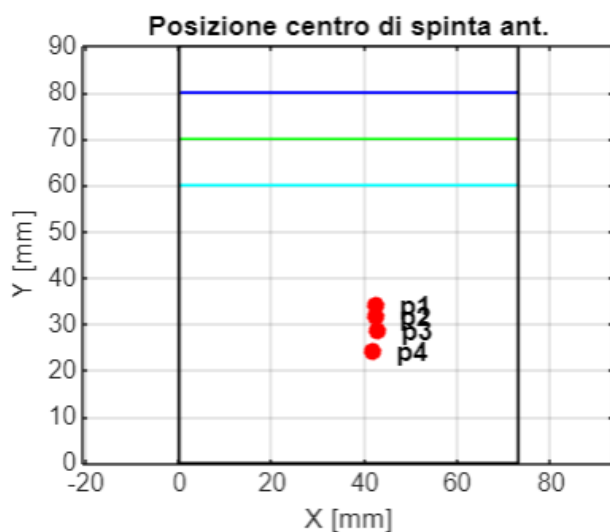
Un aumento così importante delle sollecitazioni porterebbe certamente ad un'usura precoce dei pattini oltre ad un loro probabile danneggiamento.



Com'era pronosticabile le tensioni sono ulteriormente aumentate, fenomeno imputabile anche al fatto che accorciando il pattino una porzione sempre minore della carpenteria viene sfruttata per gestire il carico applicato dai pattini.



Si propongono anche in questo caso dei grafici riassuntivi dove si nota evidentemente il rapido degenerare della pressione massima di contatto in conseguenza alla diminuzione della lunghezza del pattino anteriore.

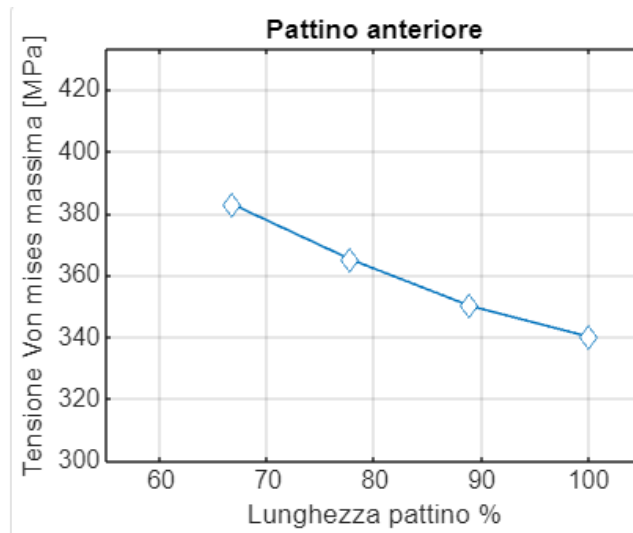


Nell'immagine successiva vengono evidenziate le differenti lunghezze del pattino nei 4 casi con quella originale evidenziata dal bordo nero.

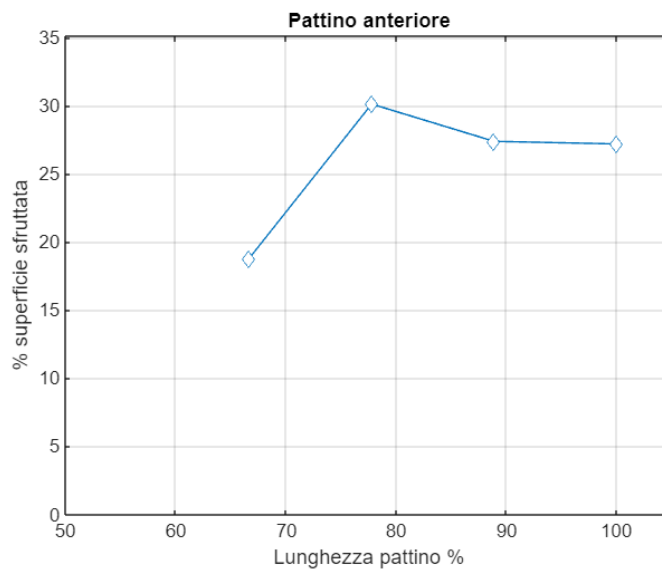
Anche in questo caso il centro di spinta rimane in una posizione abbastanza stabile nonostante il pattino sia stato accorciato in totale

di 30mm. Questo è originato dal fatto che pressioni di contatto maggiori

sono localizzate nella parte anteriore del pattino quindi seppur allungandolo la pressione si redistribuisce su tutta la lunghezza la parte anteriore è comunque predominante nel calcolo del centro di spinta.

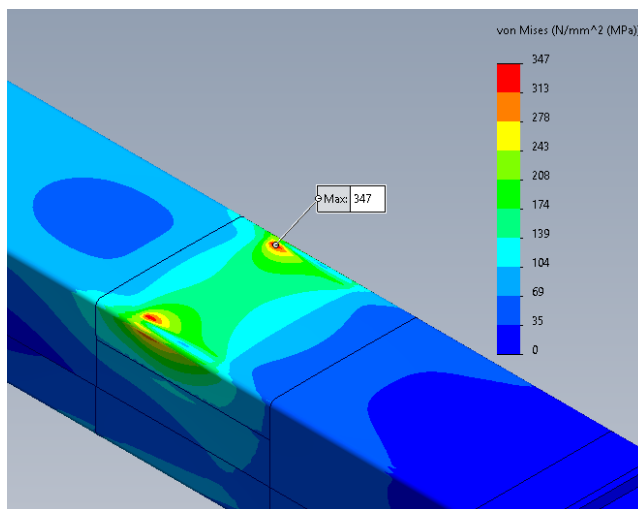
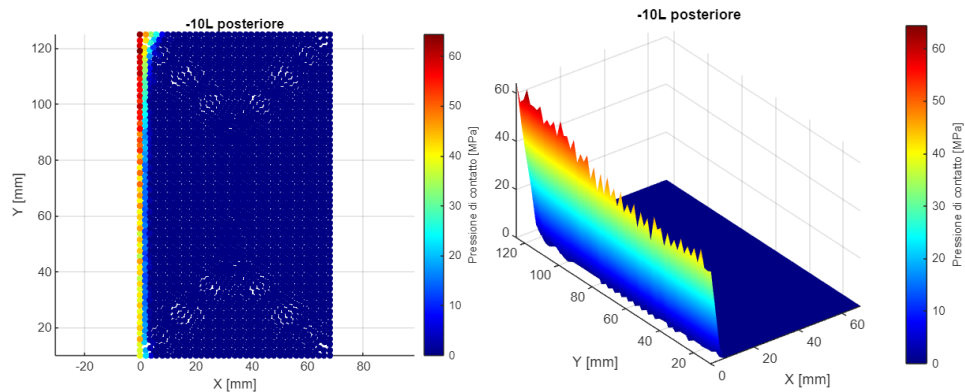


Come si nota da questo grafico le tensioni massime non hanno avuto un aumento così rapido come sulla superficie del pattino.



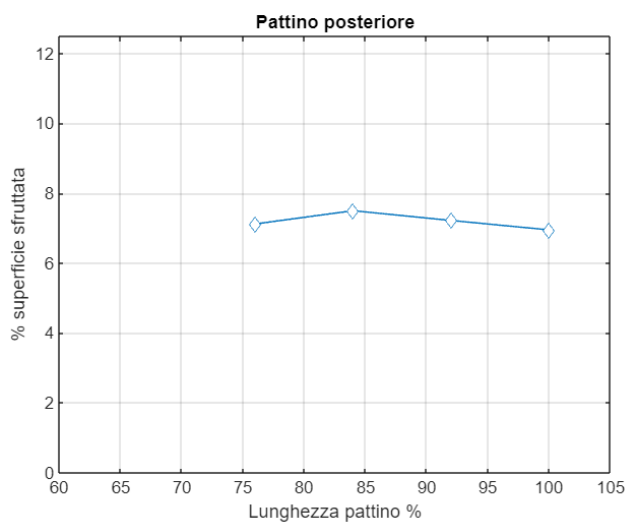
In accordo con quanto discusso la percentuale di superficie sfruttata per il contatto è bruscamente diminuita nell'ultima simulazione a testimonianza del fatto che lavori principalmente la porzione anteriore.

Si procederà ora con l'analoga analisi per il pattino posteriore superiore.

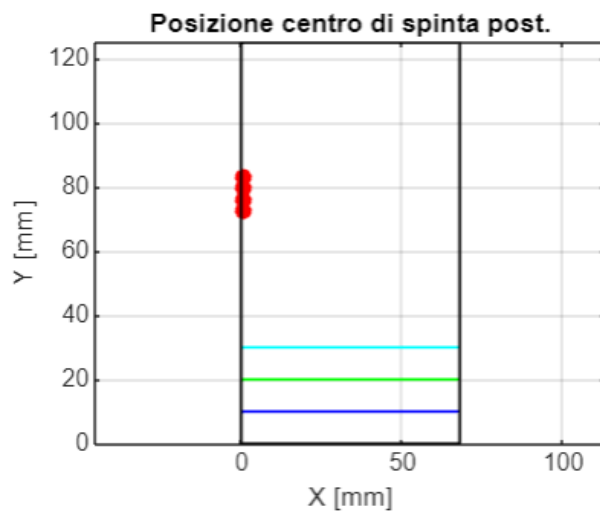
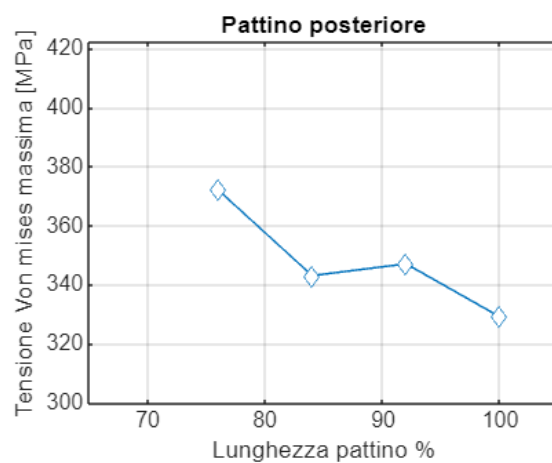
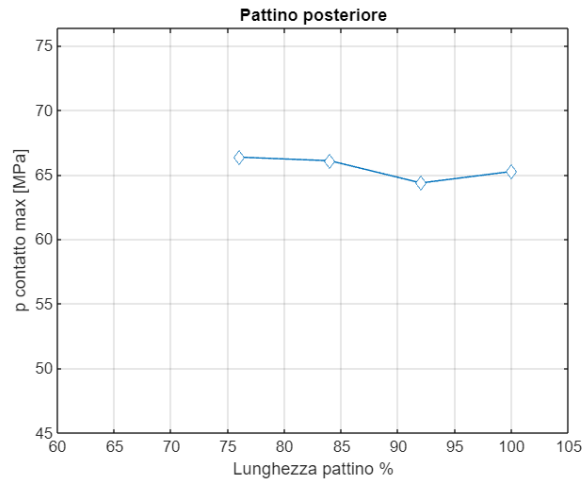


Come visto in precedenza rimane il comportamento del pattino per cui si sfrutta sostanzialmente lo spigolo esterno e le pressioni di contatto massime sono mediamente più alte di quelle anteriori nelle zone “di lavoro”. Anche

in questo caso la tensione massima conferma la tendenza analizzata all'anteriore con un leggero aumento.



Qui, a differenza dei pattini anteriori non vi è stato una diminuzione della superficie di contatto che è invece rimasta costante in tutti i tre casi rimanendo nell'intorno del 7% del primo punto che identifica la condizione di partenza.

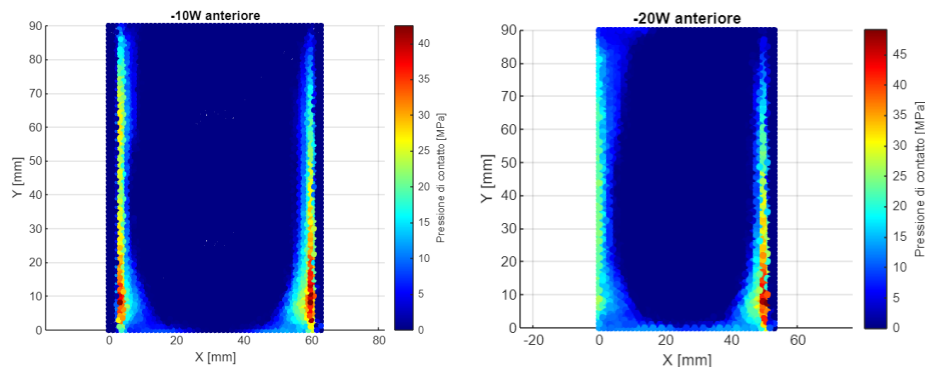


Come visto per quanto riguarda la superficie sfruttata anche le pressioni massime sono rimaste pressoché costanti presentando un leggero aumento. Per quanto riguarda le tensioni massime sulla carpenteria, invece si ha un graduale aumento con il terso punto leggermente anomalo e probabilmente considerabile come outlier.

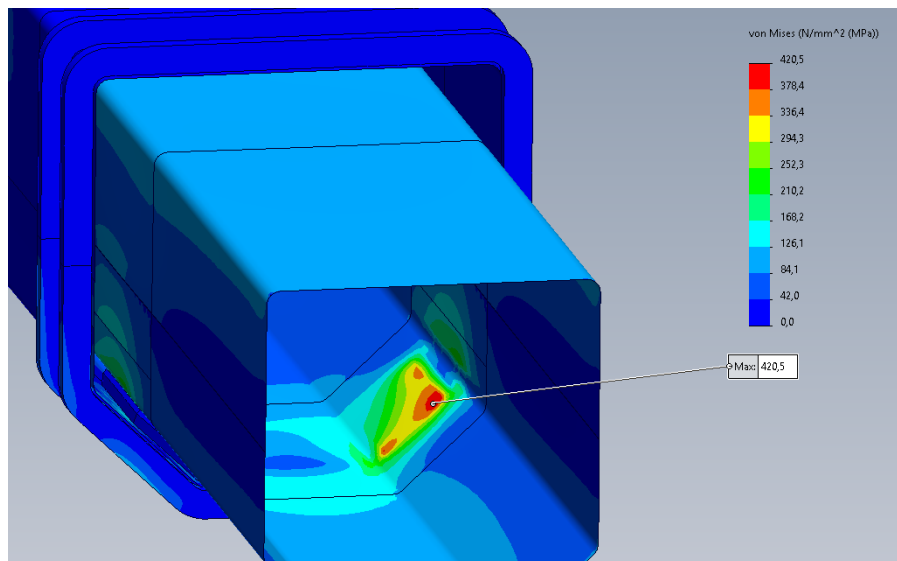
Per quanto riguarda la posizione del centro di spinta si mantiene stabile sul bordo esterno e con la leggera tendenza a spostarsi verso la parte posteriore al diminuire della lunghezza.

7.3 Influenza della larghezza del pattino

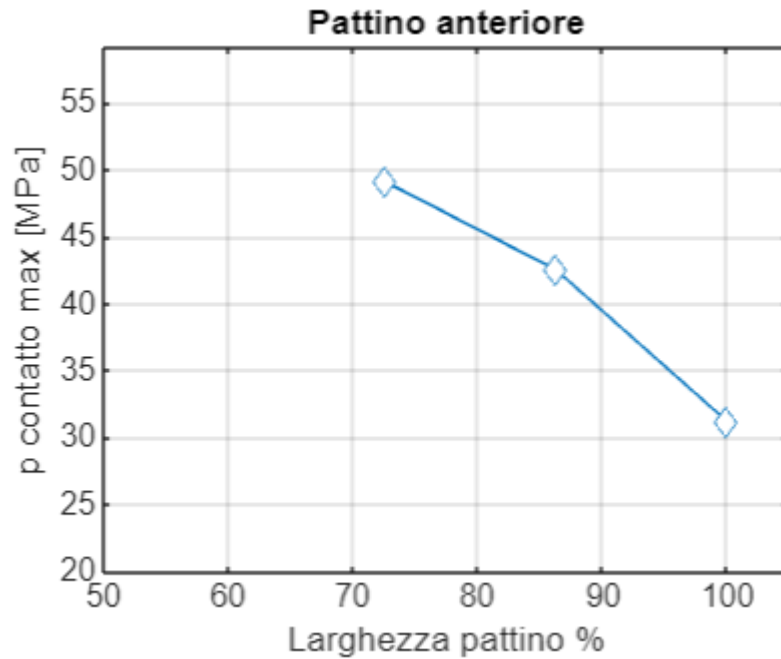
Questa analisi viene proposta principalmente per avvalorare la tesi sul fatto che la prestazione del pattino posteriore è sostanzialmente indipendente da questo parametro. Per quanto riguarda invece quello anteriore si arriverà ad una condizione in cui una delle due pieghe inferiori dello sfilo non è più a contatto con il pattino e lo porta a lavorare in condizioni non ottimali.



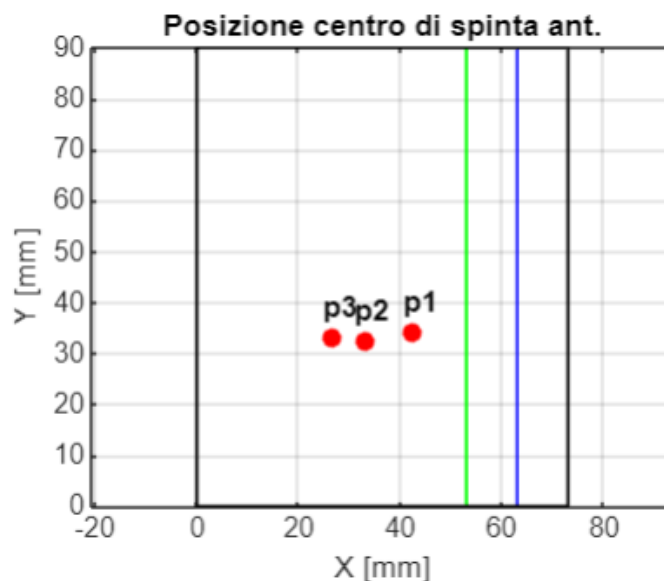
Si nota come nell'immagine di sinistra la situazione sia analoga a quelle viste fin ora. In quella di destra, invece, una delle due pieghe non è più a diretto contatto con il pattino. Questo porta ad avere la concentrazione delle pressioni massime asimmetrica con conseguente usura non uniforme del pattino stesso. Inoltre il fatto che la sezione del braccio non sia più a contatto con uno dei due spigoli della faccia inclinata porta ad un notevole peggioramento delle tensioni in questa zona come viene presentato di seguito.



Dall'immagine si nota infatti come le tensioni siano aumentate fino ad avere un valore di picco di 420,5 MPa, inoltre, la zona caricata con valori al di sopra di 300 MPa è notevolmente aumentata. Questo aspetto è certamente da tenere in considerazione in fase progettuale dato che non avere entrambe le pieghe a contatto porta a degli sforzi medi notevolmente più elevati in questa zona.

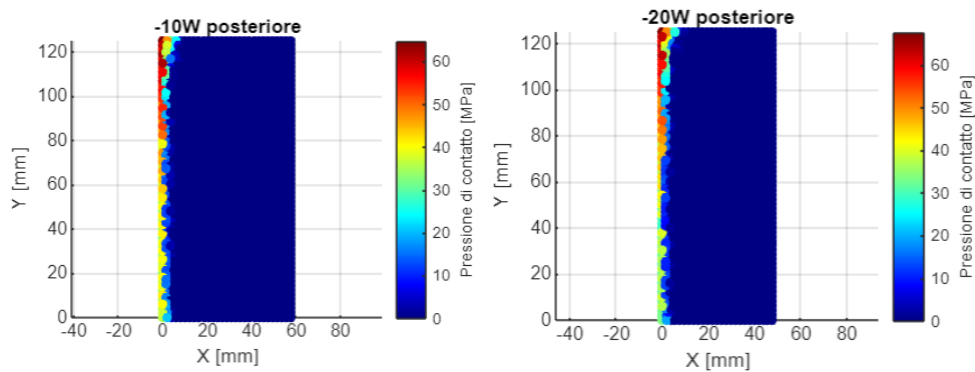


Si nota infine come questo parametro, oltre ad aver peggiorato lo stato tensionale sulla carpenteria, abbia innalzato notevolmente la pressione di contatto quindi si avrà un peggioramento delle prestazioni del pattino anche a livello di usura.

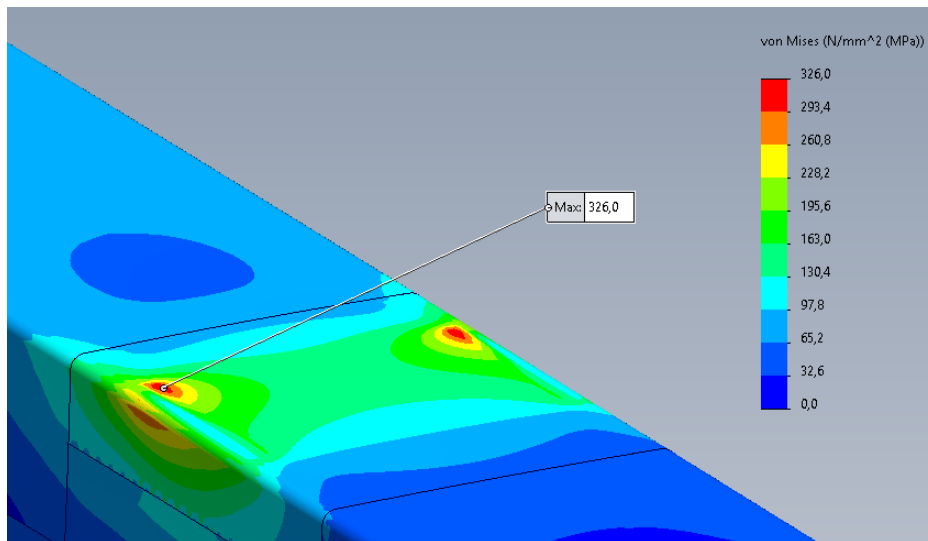


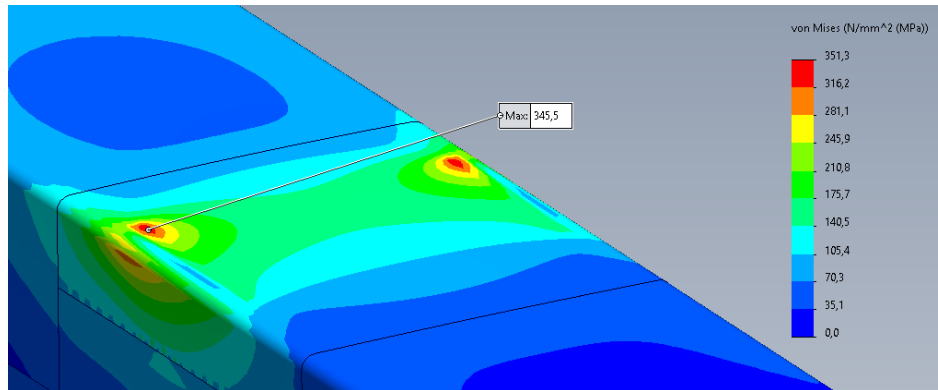
Nonostante sia notevolmente variata la distribuzione delle pressioni nei tre casi si può vedere come, al contrario, la posizione del centro di spinta sia rimasta costantemente al centro del pattino rispetto alla quota X.

Viene ora proposta la medesima analisi sul pattino posteriore, partendo da una larghezza iniziale di 68mm fino ad arrivare a 48mm. Come già detto in precedenza ci si aspetta che questo parametro abbia poca influenza.



Si nota immediatamente come la distribuzione della pressione sia pressoché invariata nei due casi come non sono cambiati i valori massimi. Come si vedrà di seguito anche le tensioni sulla carpenteria non hanno subito evidenti variazioni se non nel secondo caso dove però sono una conseguenza del netto cambiamento visto sul pattino anteriore.



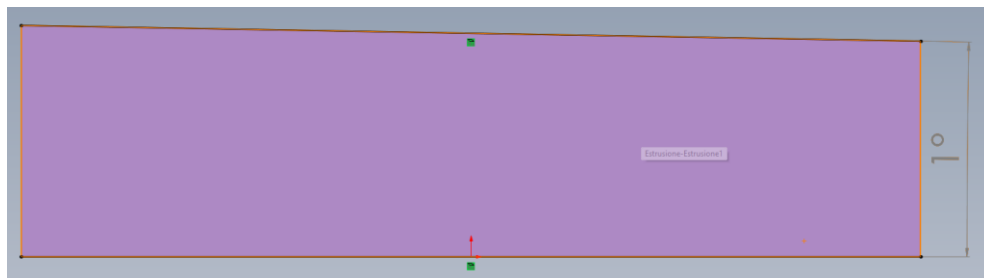


In questa seconda immagine si nota un leggero aumento delle tensioni, tuttavia, come citato poca fa, questo è da imputare ad una non corretta condizione di lavoro dei pattini anteriori.

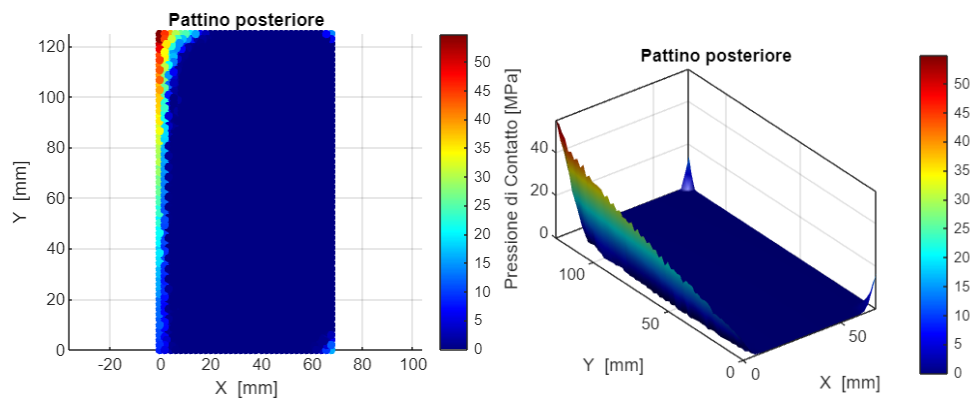
8 GEOMETRIE ALTERNATIVE E RISULTATI

In questa sezione si analizzeranno due geometrie alternative riguardo i pattini posteriori.

La prima tenta di simulare una situazione di usura del pattino che, lavorando solamente con uno spigolo, avrà inevitabilmente un'usura non uniforme. Per simularla è stata inclinata la superficie superiore di 1° con il tratto discendente verso l'esterno dello sfilo come illustrato di seguito.

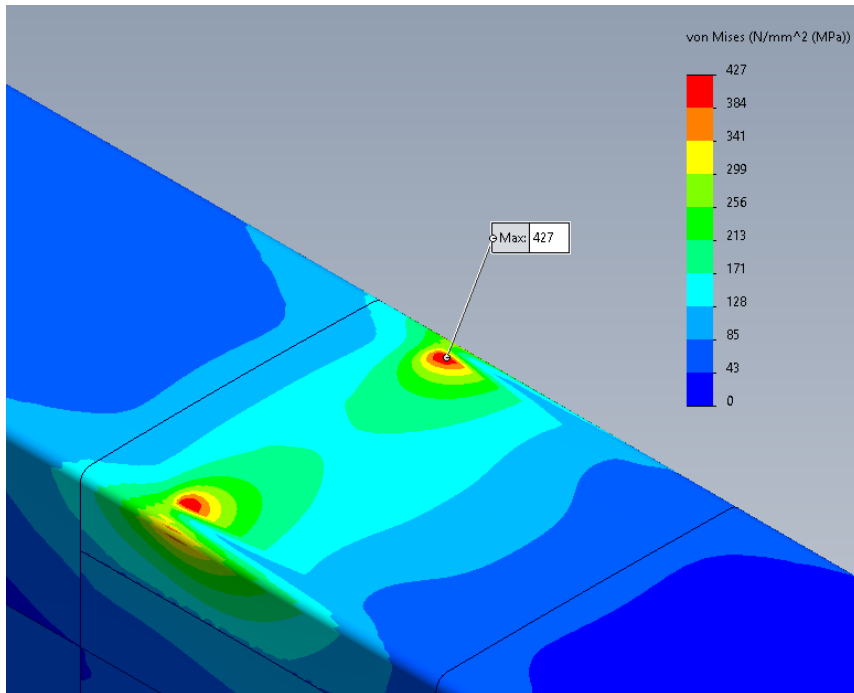


Da questa modifica ci si aspetta che le pressioni di contatto siano calate dal momento che una porzione maggiore della superficie sarà interessata dal contatto. Tuttavia un aspetto negativo pronosticabile è che il centro di pressione tenderà a spostarsi verso l'interno risultando in uno stato tensionale peggior di quello "da nuovo".

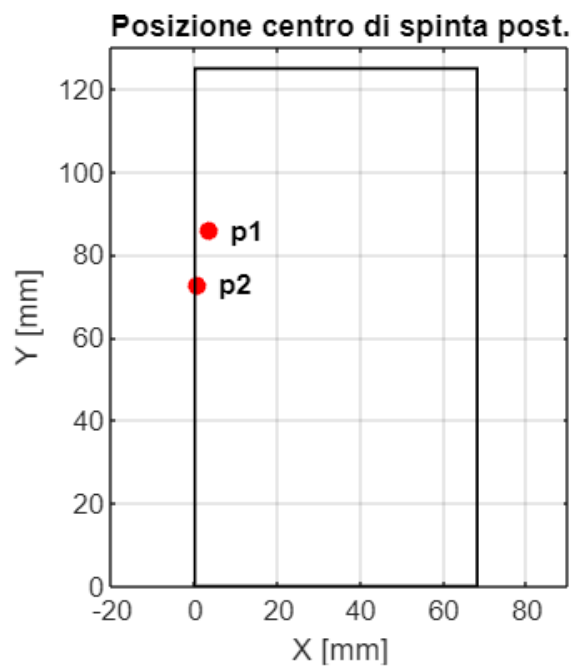


Come si può notare i picchi di pressione sono calati infatti precedentemente i valori massimi si attestavano oltre i 60MPa. Cominciano, inoltre, a formarsi delle nuove aree di lavoro nei due vertici opposti allo spigolo esterno. Il fatto che lavorino solamente sui vertici è dovuto al fatto che la carpenteria essendo in lamiera sottile subisce una discreta deformazione arrivando ad una forma bi-concava che perciò porta al contatto solo nei punti estremi del pattino.

Un altro aspetto importante riguarda un notevole aumento delle tensioni massime sulla carpenteria arrivate a 427 MPa rispetto ai precedenti 329 MPa con un aumento di circa il 30%.



Questo comportamento è spiegabile con il fatto che il centro di pressione è migrato verso l'interno conseguentemente al diverso sfruttamento della superficie del pattino come si può vedere di seguito.

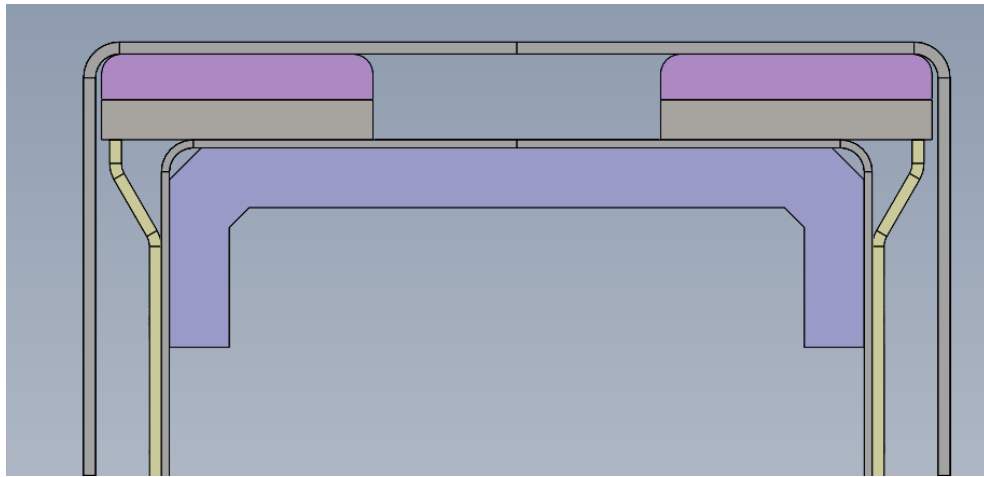


Identificato dal punto 'p1' si può vedere come rispetto all'originale 'p2' sia più interno seppur di poco, questo testimonia l'importanza di come viene fatto lavorare il pattino.

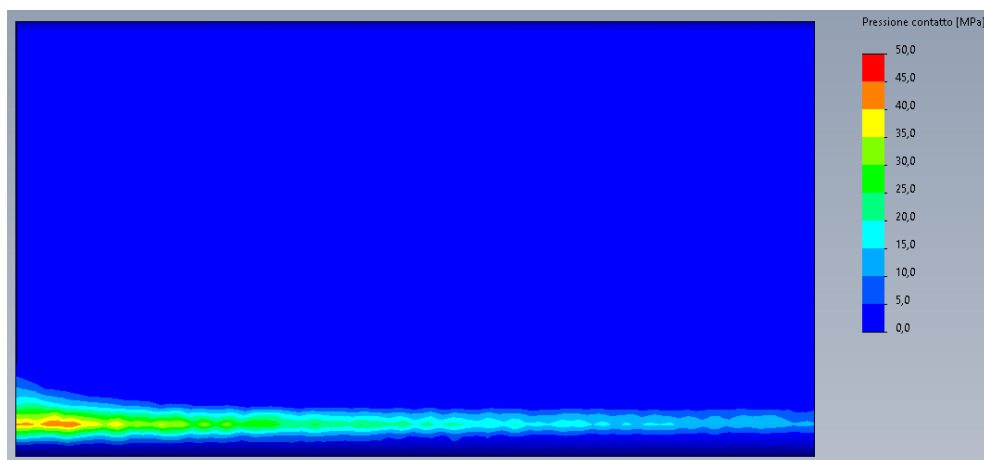
Questa prova si è rivelata interessante nell'ottica di comprendere come, successivamente all'usura seppur lieve, il comportamento sia notevolmente cambiato soprattutto per quanto riguarda la carpenteria. Un effetto del genere in fase

progettuale è certamente da tenere in considerazione onde evitare di sollecitare la struttura eccessivamente seppur si parli di stati tensionali molto localizzati.

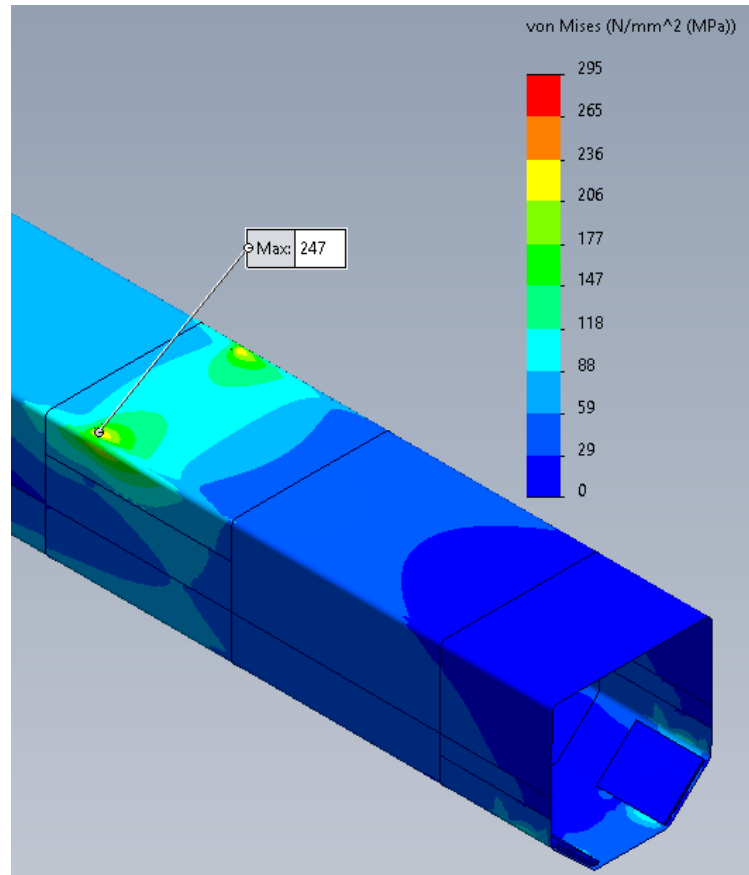
La seconda variazione geometrica del pattino posteriore nasce da queste ultime considerazioni riguardo l'evidente importanza della distanza del centro di pressione dalla piega do sfilo. Nello specifico è stato avvicinato il pattino a quest'ultima lasciando comunque del gioco laterale per evitare problemi in fase di scorrimento. Per poter apportare questa modifica è stato inoltre aggiunto un raccordo sullo spigolo esterno del pattino per garantire una corretta interazione con il raggio interno di piega. Di seguito si propone una vista in sezione della parte posteriore:



Si possono vedere in lilla i rinforzi presenti sullo sfilo interno mentre i pattini con la geometria modificata in magenta. Per permetter di montare questi ultimi a sbalzo rispetto alla sezione dello sfilo interno sono stati aggiunti dei rinforzi qui evidenziati in giallo. Nella realtà verrebbe studiata una soluzione più ad-hoc ma per non appesantire la simulazione si è scelta una geometria semplice.



Come si può vedere la distribuzione delle pressioni non è variata molto, ciò nonostante, viene sfruttata anche una parte interessata dal raggio di raccordo con la conseguente diminuzione dei valori di picco.



Inoltre, come si può notare, l'aver avvicinato al bordo interno il pattino ha prodotto una notevole diminuzione delle tensioni con una riduzione del 25% rispetto al valore di partenza.

Quest'ultima soluzione ha ulteriormente confermato l'importanza di scaricare la forza di contatto più vicino possibile alla parete verticale portando ad immediati benefici strutturali.

9 CONCLUSIONI E POSSIBILI SVILUPPI

Con questo studio si è potuto studiare più approfonditamente un'area strategica per il dimensionamento strutturale di un braccio telescopico quale la zona interessata dal contatto fra la carpenteria e i pattini di scorrimento.

In particolare, l'analisi della struttura e di come i carichi vengano trasmessi ha permesso di formulare dei possibili modelli analitici che permettono di migliorare la comprensione di questa delicata zona. Infatti, come si è potuto vedere, la teoria classica delle travi non permette di carpire questi effetti locali concentrati che però sono fondamentali nell'ottica di uno studio raffinati della carpenteria dei bracci telescopici.

Va sottolineato che, lavorando con delle geometrie “nominali”, i valori ricavati durante questo studio siano teorici dal momento che in seguito ad usura si ha un cambiamento del comportamento.

Possibili sviluppi futuri riguardano lo studio di geometrie alternative anche grazie a quanto appreso grazie all'ultima simulazione proposta cercando quindi di minimizzare il gioco fra parete verticale e pattino posteriore.

Questo andrebbe certamente ragionato a fonte di eventuali complicazioni realizzative dei pattini che potrebbero portare a costi che si potrebbero non voler sostenere. Inoltre, sarebbe sicuramente interessante una validazione dei dati raccolti tramite delle prove estensimetriche nelle zone critiche che sono state evidenziate.

BIBLIOGRAFIA

1. M. Savković, M. Gašić, G. Pavlović, R. Bulatović, and N. Zdravković, "Stress analysis in contact zone between the segments of telescopic booms of hydraulic truck cranes," *Thin-Walled Structures*, vol. 85, pp. 332–340, 2014.
2. S. P. Timoshenko and J. M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed., Auckland: McGraw-Hill International Book Company, 1961.
3. G. Critti, "Reingegnerizzazione di una gru foldable per ambito offshore," Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino, 2020.
4. C. Fragassa, G. Minak, and A. Pavlovic, "Verifiche teoriche e sperimentali come ausilio nella progettazione di bracci telescopici a funzionalità e sicurezza incrementate," in *Atti del 44° Convegno Nazionale AIAS*, Messina, Italia, 2-5 Settembre 2015, art. 554.