



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

**Ottimizzazione topologica di un forcellone motociclistico
da realizzare tramite Additive Manufacturing**

**Topology optimization of a swingarm to be realized
through Additive Manufacturing**

Relatore:

Prof. **Marco Rossi**

Tesi di Laurea di:

Valentino Di Bernardino

A.A. 2019 / 2020

Alla mia famiglia, che non ha mai smesso di credere in me, grazie.

A me, che vedo realizzare il sogno di quando ero bambino.

Sommario

Nella seguente tesi verranno illustrate e commentate tutte le attività svolte per la corretta riuscita degli obiettivi che ci siamo preposti nel Dipartimento di Ingegneria Industriale e scienze matematiche presso l'Università Politecnica delle Marche.

L'obiettivo, come citato nel titolo, riguarda l'ottimizzazione topologica di un forcellone motociclistico, riducendone il peso e aumentandone la rigidità rispetto ad un forcellone già installato e funzionante nella moto, che chiameremo "originale". Il confronto verrà fatto attraverso 2 materiali: l'alluminio, che è il medesimo materiale che compone il forcellone originale, e il carbon PA, un materiale di ultima generazione utilizzato nell'Additive Manufacturing, in particolare, nella tecnica FDM.

La tesi si dividerà principalmente in 3 parti:

-La prima parte, dove si parlerà dell'Additive Manufacturing facendo riferimento alla stampa 3D; successivamente si parlerà del carbon PA nello specifico, descrivendo le sue proprietà, i vantaggi e gli svantaggi. Come ultima cosa verranno illustrati i calcoli che sono stati eseguiti, partendo dalla potenza del motore fino a quantificare le forze agenti sui forcelloni, dividendoli in 2 casi: moto dritta e moto piegata con angolo di 45°.

-La seconda parte, che è il vero e proprio "core" dell'analisi agli elementi finiti, dove si simuleranno sia le forcelle originali per avere dati di partenza da confrontare, sia i provini creati tramite disegno 3D ottimizzati dal calcolatore **ANSYS Workbench**. Verranno illustrate 4 tipi di simulazioni con 4 diversi tipi di input immessi nel software e scegliendo il caso più conveniente che soddisfi maggiormente l'obiettivo finale.

-La terza parte, cioè l'ultima, comprenderà la ricostruzione della miglior forcella ottimizzata dal calcolatore, la simulazione di essa, ed infine il confronto e i commenti rispetto ai dati delle forcelle originali, valutandone il lavoro svolto.

Indice

L'ADDITIVE MANUFACTURING.....	4
- Cos'è l'Additive Manufacturing.....	4
- Come funziona il processo dell'Additive Manufacturing	4
Tipologie e tecnologie di Additive Manufacturing	5
- Stereolitografia (SLA).....	5
- Selective Laser Sintering (SLS)	5
- Fused deposition modeling (FDM)	5
- Stampa a getto d'inchiostro	5
- DLP – Digital light processing.....	5
- LOM – Laminated object manufacturing	6
- EBM – Electron beam melting	6
La tecnologia FDM nello specifico (tecnologia di stampa 3D).....	6
- Funzionamento	6
- Materiali	7
- Limiti della tecnologia.....	7
Carbon PA per la stampa 3D.....	7
Analisi dei carichi sui forcelloni	9
SIMULAZIONI FORCELLE ORIGINALI	15
1) FORCELLA SINISTRA MOTO DRITTA.....	16
2) FORCELLA DESTRA MOTO DRITTA.....	17
3) FORCELLA SINISTRA MOTO PIEGATA	19
L'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA.....	20
L'ottimizzazione topologica in "Ansys workbench"	21
PROVINO REALIZZATO	22
Dati Provino	22
Figura Provino	22
OTTIMIZZAZIONI SIMULATE DEL PROVINO	22
1) 50% MATERIALE RESTANTE E 1mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO IN X,Y,Z. DATI APPLICATI ALLA FORCELLA DESTRA MOTO DRITTA	23
1a) Materiale: lega di alluminio	23
1b) Materiale: Carbon PA.....	24
2) 50% MATERIALE RESTANTE E 0,2mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO. DATI APPLICATI ALLA FORCELLA SINISTRA MOTO DRITTA.....	25

2a) Materiale: lega di alluminio	25
2b) Materiale: Carbon PA.....	27
3) 40% MATERIALE RESTANTE E 0,5mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO. DATI APPLICATI ALLA FORCELLA SINISTRA MOTO PIEGATA	28
3a) Materiale : lega di alluminio	28
3b) Materiale: Carbon PA.....	30
4) 20% MATERIALE RESTANTE E 0,1 mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO APPLICATO ALLA FORCELLA SINISTRA MOTO DRITTA.....	31
4a) Materiale: lega di alluminio	31
4b) Materiale: carbon PA.....	32
RICOSTRUZIONE FINALE DELLA FORCELLA.....	34
FIGURE FORCELLA RICOSTRUITA:	35
SIMULAZIONI FORCELLA RICOSTRUITA:.....	35
CONCLUSIONI FINALI PER LEGA DI ALLUMINIO:	37
CONCLUSIONI FINALI PER CARBON PA:.....	38
BIBLIOGRAFIA	39
RINGRAZIAMENTI.....	40

L'ADDITIVE MANUFACTURING

Nel mondo si parla sempre di più di manifattura additiva (Additive Manufacturing in inglese); l'introduzione di questa tecnologia ha permesso di oltrepassare le barriere costruttive che prima erano presenti, principalmente riguardanti la geometria. I materiali per l'Additive Manufacturing hanno avuto un lento sviluppo, anche se negli ultimi periodi si stanno facendo grandi progressi, portando i prodotti finiti ad avere delle proprietà molto simili a quelle come se fossero realizzati per esempio tramite asportazione di truciolo o anche per fonderia. L'unico aspetto da migliorare rimane il tempo di lavorazione, che è ancora abbastanza superiore rispetto alle tecniche tradizionali.

- Cos'è l'Additive Manufacturing

Quando si parla di Additive Manufacturing ci si riferisce a un processo industriale impiegato per fabbricare oggetti partendo da modelli 3D computerizzati fino ad arrivare al prodotto finito, aggiungendo uno strato dopo l'altro il materiale scelto per la creazione.

Questa tecnologia si definisce rivoluzionaria perché è l'inverso della tecnica tradizionale, cioè quella per asportazione di materiale o tramite creazione di stampi da riempire; qui, infatti, aggiungendo materiale uno strato dopo l'altro, si arriva ad ottenere geometrie impensabili con le tecniche precedenti.

- Come funziona il processo dell'Additive Manufacturing

Il processo di produzione basato sull'Additive Manufacturing parte da un modello CAD 3D che viene controllato da un software di gestione della macchina che suddivide il modello stesso in più strati. Questi ultimi poi guiderà una stampante nel deposito o nella sintetizzazione del materiale.

Tipologie e tecnologie di Additive Manufacturing

- Stereolitografia (SLA)

Questa tecnica si basa sull'utilizzo di una sorgente di luce all'interno di una vasca di resina. L'azione della luce porta all'indurimento della resina, generando in tal modo l'oggetto in 3D, strato dopo strato.

- Selective Laser Sintering (SLS)

È un processo a sinterizzazione selettiva che usa un fascio di luce laser, tra 200 e 400 KW, in una polvere di metalli, strato per strato.

- Fused deposition modeling (FDM)

Si basa sull'utilizzo di un filamento, costituito da polimeri, che viene riscaldato da una resistenza e fatto passare attraverso un ugello. A questo punto avviene la solidificazione strato dopo strato dando forma all'oggetto.

Le tecnologie elencate precedentemente sono quelle principali più usate nelle industrie, mentre ne esistono altre un pò più particolari:

- Stampa a getto d'inchiostro

La tecnica prevede che sul letto della stampante venga posto un getto di gesso o resina su cui viene gettato inchiostro e legante che solidificando strato dopo strato realizza il prodotto.

- DLP – Digital light processing

Questa tecnica prevede l'uso di una vasca di polimeri liquidi che viene posta all'azione della luce di un proiettore che si indurisce. La piastra esegue quindi un

movimento verso il basso con il polimero di nuovo liquido e ripete successivamente la stessa operazione fino a quando non si arriva al prodotto finito.

- **LOM – Laminated object manufacturing**

Questa tecnica si basa sull'utilizzo di carta, plastica o laminati sotto forma di strati che sono incollati e tagliati, con una lama o con l'uso di un laser, fino al raggiungimento della forma desiderata.

- **EBM – Electron beam melting**

Si tratta di una fusione a fascio di elettroni. La fusione del materiale, infatti, avviene per effetto dell'azione di una fonte di energia ad alta concentrazione rappresentata da elettroni.

Riguardo i materiali che possono essere utilizzati nell'additive manufacturing, stiamo assistendo al loro continuo aumento tra i quali si distinguono resine acriliche e epossidiche e polimeri termoplastici.

La tecnologia FDM nello specifico (tecnologia di stampa 3D)

- **Funzionamento**

L'FDM lavora su un principio "additivo" rilasciando il materiale su strati. Un filamento termoplastico è srotolato da una bobina, che fornisce il materiale ad un ugello di estrusione, con il quale è possibile gestire il flusso. L'ugello è riscaldato per poter sciogliere il materiale e può essere guidato sia in direzione orizzontale che verticale da un meccanismo computerizzato, combinando i movimenti nei diversi assi, cioè seguendo un percorso tracciato da un software di slicing come ad esempio "CURA", inviato alla macchina sotto forma di G-code.

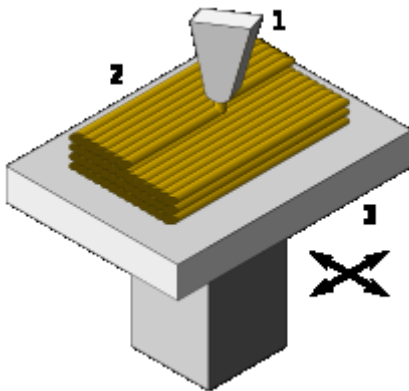
Per favorire l'adesione di alcuni materiali al piano di stampa, si ricorre spesso all'impiego di piani riscaldati che contrastano la compressione dovuta al raffreddamento del materiale, di solito la temperatura del piano (detto piatto) di stampa arriva anche a 50°C.

- Materiali

Alcune macchine permettono di stampare materiali compositi, depositando insieme al polimero termoplastico, fibre continue di Carbonio (o a base di carbonio come il carbon PA del quale andremo a parlare più avanti), Vetro o Kevlar.

I materiali più comuni, invece sono il PLA e l'ABS

Qui di seguito è riportata un'illustrazione dell'FDM:



- 1) Estrusore
- 2) Materiale depositato
- 3) Piatto di stampa

- Limiti della tecnologia

In molti casi questa tecnologia può portare a tolleranze non idonee e ad inestetismi, oltre a finiture superficiali non a livello delle tecniche tradizionali. Uno dei problemi più grandi è la stampa di parti con sottosquadro, che senza un supporto cederebbero; per risolvere questo problema, in fase di slicing vengono generati dei supporti che potranno essere stampati dallo stesso ugello, con lo stesso materiale o con un secondo estrusore che utilizza un differente materiale di supporto. I supporti saranno rimossi successivamente con diverse possibili tecniche.

Carbon PA per la stampa 3D

Il carbon PA è un materiale di ultima generazione per la stampa 3D, è stato sviluppato dalla "Roboze", ed è basato su una poliammide12 rinforzata con fibra di carbonio al 20%. È ideale per applicazioni meccaniche di fascia alta grazie al suo

elevato modulo di trazione rispetto ai comuni materiali utilizzati nel FDM, inoltre, ha una bassa densità, quindi un buon compromesso tra peso e resistenza.

Esempio di un componente stampato con il carbon PA:



Qui di seguito sono riportate le proprietà del carbon PA utilizzate anche per le simulazioni del forcellone:

Densità: 1200 kg/m³

Modulo di Young (E) in direzione X: 10000 Mpa

Modulo di Young (E) in direzione Y: 5000 Mpa

Modulo di Young (E) in direzione Z: 5000 Mpa

Coefficiente di Poisson in tutte le direzioni: 0,3

Modulo di elasticità tangenziale (G) in X, Y, Z: 4000 Mpa

Carico di snervamento a trazione: 120 Mpa

Carico di snervamento a compressione: 140 Mpa

Analisi dei carichi sui forcelloni

Inizialmente sono stati ipotizzati diversi dati riguardo al motore, rapporto di trasmissione e al peso di pilota e moto.

DATI IPOTIZZATI DI MASSA

Massa pilota(kg) Massa moto(kg)

Massa totale(kg)

Peso totale(N)

DATI IPOTIZZATI DI RAPPORTO DI TRASMISSIONE

Denti pignone Denti corona

Rapporto di trasmissione

DATI PRESI DA MOTORE REALE

Cilindrata(cc) Tipo motore

Potenza(kw) Potenza(cv)

Numero di giri pignone a regime massimo(rpm)

Velocità angolare pignone a regime massimo (rad/s)

DATI RUOTA POSTERIORE E MOZZO

Numero di giri ruota a regime massimo(rpm)

Velocità angolare ruota a regime massimo(rad/s)

Raggio ruota(m)

Successivamente sono stati divisi 2 casi: moto dritta e moto piegata di 45°, con opportune ipotesi di dimensioni e distanze.

1)CASO MOTO DRITTA(ANGOLO DI PIEGA $\alpha=0^\circ$)

IPOTESI

Distanza tra baricentro e punto di appoggio gomma(m):

IN X:
IN Y:

Interasse tra i 2 punti di appoggio delle gomme(m)

REAZIONI VINCOLARI (Newton) E COPPIA M ALLA RUOTA(N*M)

Coppia M alla ruota

I dati di partenza sono la potenza del motore e la velocità angolare della ruota posteriore, da cui si ricava la coppia agente su di essa:

$$P(W)/\omega(\text{rad/s}) = 13200/167,4 = \boxed{78,822} = M$$

Forza peso N (Dovuta alla forza peso moto+persona)

$$\boxed{1000,6}$$

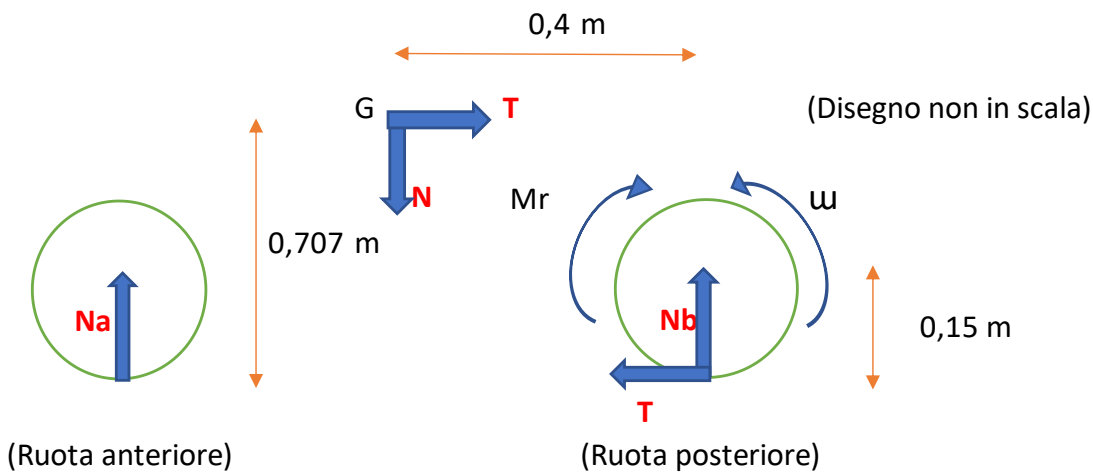
Forza tangenziale T (Dovuta alla coppia del motore)

Dalla coppia e dal raggio della ruota ipotizzato precedentemente si può ricavare la forza tangenziale T dovuta all'accelerazione:

$$M(N*m)/r \text{ ruota}(m) = 78,8217/0,15 = \boxed{525,48} = T$$

Si procede all'equilibrio delle forze e dei momenti tramite lo schema illustrato successivamente per calcolarci tutti i valori delle forze, prendendo come polo il baricentro G.

SCHEMA FORZE E REAZIONI VINCOLARI MOTO COMPLETA(VISTA FRONTALE)



Forza normale al terreno N_a ruota anteriore

$$\boxed{36}$$

Forza normale al terreno N_b ruota posteriore

$$\boxed{964,62}$$

Dal risultato si può notare che c'è stato un trasferimento di carico sulla ruota posteriore ($N_b > N_a$) e non c'è un impennamento della moto, risultando che $N_a > 0$.

Una volta ottenuti questi risultati bisogna verificare se la ruota posteriore riesce a trasmettere la coppia senza scivolamenti poiché in caso contrario non si sfrutterebbe la potenza massima.

VERIFICA DELLA TRASMISSIBILITA' DELLA COPPIA SENZA SCIVOLAMENTI

Ipotesi del coefficiente di attrito μ pari a 1

Verifico che N_b sia maggiore di T/μ

$$964,62 > 525,4777 \quad \text{OK}$$

Per avere un'idea generale della progressione all'avanzamento della moto, prima si calcola l'accelerazione, e poi si fa il suo rapporto rispetto al g gravitazionale, dove si può confrontare quest'ultimo con quello delle altre moto in circolazione.

CALCOLO DELL'ACCELERAZIONE "a" E IL SUO RAPPORTO RISPETTO A g GRAVITAZIONALE

Accelerazione (m/s²)

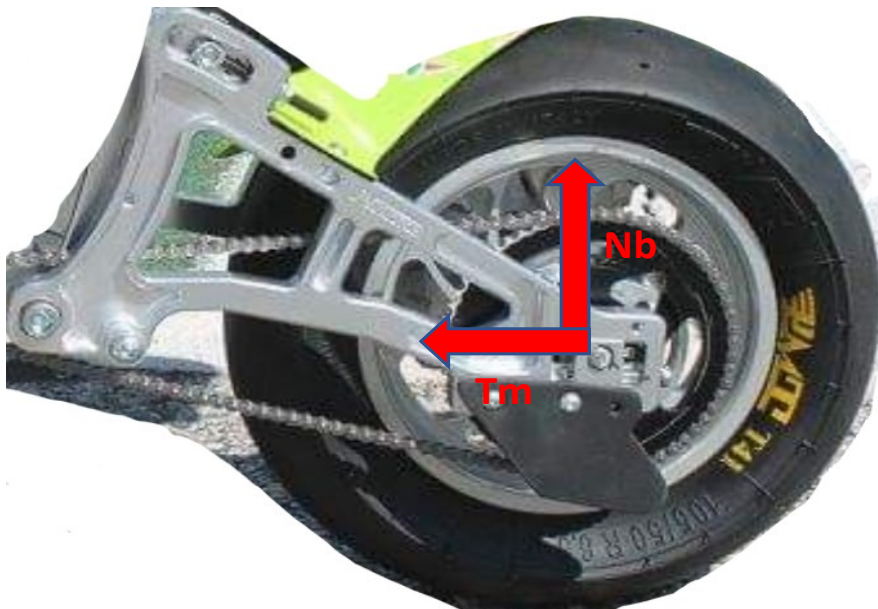
$$T/m(\text{kg}) = 525,478/102 = 5,1517 = a$$

Rapporto a/g (adimensionale)

$$5,1574/9,81 = 0,5252$$

SCHEMA REALE DETTAGLIATO RUOTA POSTERIORE (VISTA FRONTALE)

A questo punto si trasporta la forza di tiro della catena T_m sul mozzo per poi calcolarla successivamente, ipotizzando il raggio della corona e utilizzando la coppia del motore precedentemente calcolata.



Raggio corona(m)

$$0,07$$

Forza T_m trasportata sul mozzo dovuta al tiro della catena

$$M(\text{N}\cdot\text{m})/R \text{ corona}(\text{m}) = 78,822/0,07 = 1126 = T_m$$

Calcolata T_m si passa alla divisione delle forze sulle forcelle di sinistra e destra.

SCHEMA FORZE E REAZIONI VINCOLARI RUOTA POSTERIORE (VISTA DALL'ALTO)

Interasse tra le 2 forcelle(m)

0,15

Tramite l'equilibrio del sistema troviamo le seguenti forze:

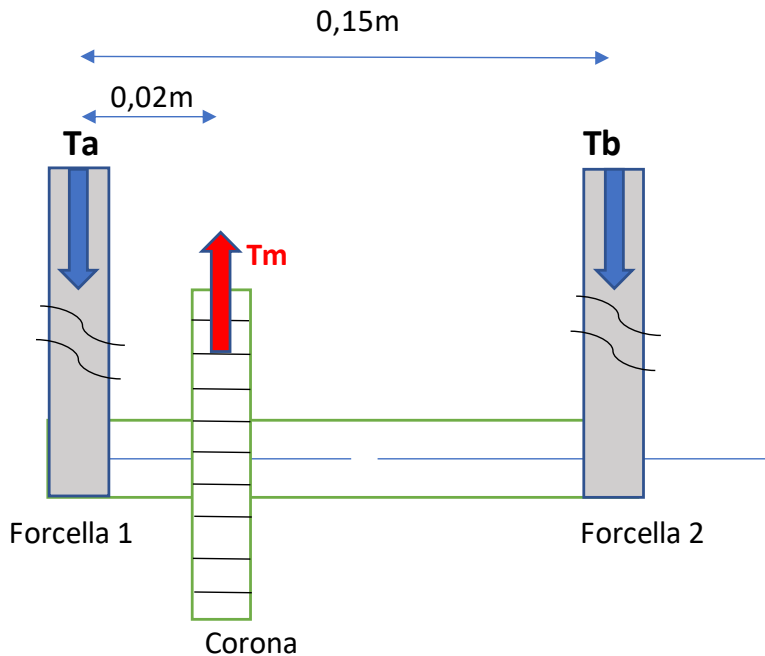
Forza di compressione T_a

975,89

Forza di compressione T_b

150,14

(Disegno non in scala)



Si può vedere che la corona, essendo a sinistra della mezzeria, fa scaricare più forza sulla forcella di sinistra ($T_a > T_b$)

Riassumendo, sulla forcella di sinistra agisce la forza peso $N_b/2$ e la forza T_a , e sulla forcella di destra agiscono le forze $N_b/2$ e T_b . Si ricorda che N_b e T_a/b sono ortogonali tra loro

Una volta studiato il caso della moto dritta si può passare a quello della moto in piega.

2)CASO MOTO IN PIEGA(ANGOLO DI PIEGA $\alpha=45^\circ$)

IPOTESI

Curva a velocità costante
Angolo di piega $\alpha=45^\circ$

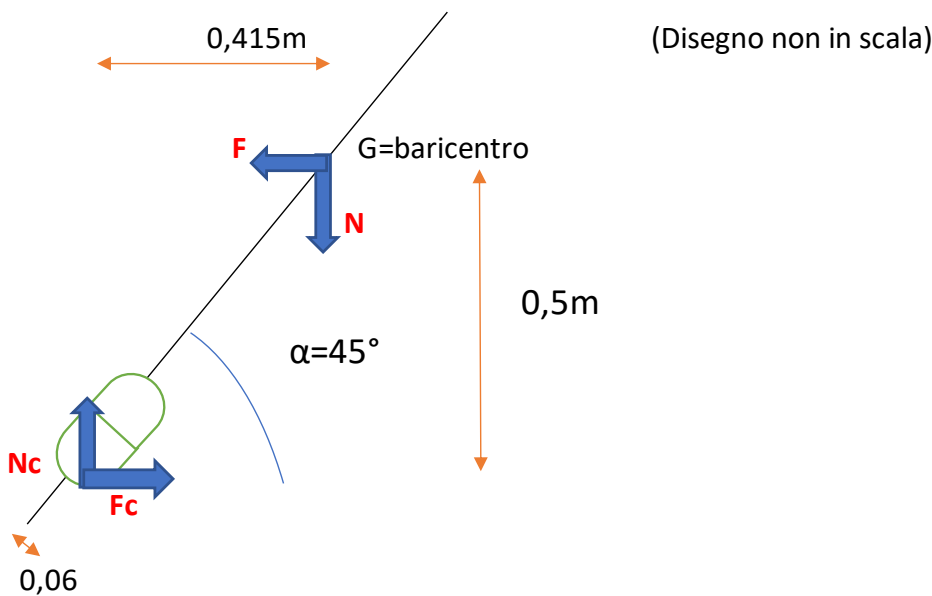
Distanza tra baricentro e punto di appoggio gomma (m):

IN X:
IN Y:

Distanza da punto di appoggio gomma a retta baricentrica(m):

0,06

SCHEMA FORZE E REAZIONI VINCOLARI RUOTA POSTERIORE (VISTA DA DIETRO)



Si disegna schematicamente la distribuzione delle forze e si fa l'equilibrio delle forze e momenti rispetto al baricentro G, ottenendo le seguenti reazioni vincolari:

REAZIONI VINCOLARI (Newton)

Forza normale N_c ruota posteriore (Dovuta alla forza peso moto+persona)

Forza tangenziale F_c ruota posteriore (Dovuta all'angolo di piega a V costante)

In questa configurazione ci potrebbero essere degli scivolamenti laterali della ruota, rendendo inutili tutti i calcoli effettuati, poiché gli scivolamenti assorbirebbero gran parte della F_c o addirittura la renderebbero uguale a zero in caso di caduta. Si procede alla verifica della stabilità laterale.

VERIFICA DELLA STABILITA' LATERALE

Ipotesi del coefficiente di attrito μ pari a 1

Verifico che N_c sia maggiore di F_c/μ

$$500,31 > 415,2573 \quad \text{OK}$$

Per un'analisi più completa si calcola l'accelerazione laterale e il rapporto rispetto a g gravitazionale

CALCOLO DELL'ACCELERAZIONE "a" E IL SUO RAPPORTO RISPETTO A g GRAVITAZIONALE

Accelerazione (m/s^2)

$$F_c/m(\text{kg}) = 415,2573/102 = 4,0712 \quad \rightarrow \text{cioè abbiamo un rapporto costante di } V^2/R \text{ pari a quel valore dove } V \text{ è la velocità della moto e } R \text{ è il raggio della curva che sta affrontando}$$

Rapporto a/g (adimensionale)

$$4,0712/9,81 = 0,415$$

SCHEMA REALE DETTAGLIATO RUOTA POSTERIORE (VISTA DA DIETRO)

Calcolati i valori delle forze N_c e F_c , si applicano sulla gomma e, tenendo conto dell'angolo di piega di 45° , tramite l'equilibrio delle forze e momenti rispetto al polo b si riescono a trovare le forze N_a , N_b e H_a agenti sulle 2 forcelle.

Forze espresse in Newton:

Forza N_a

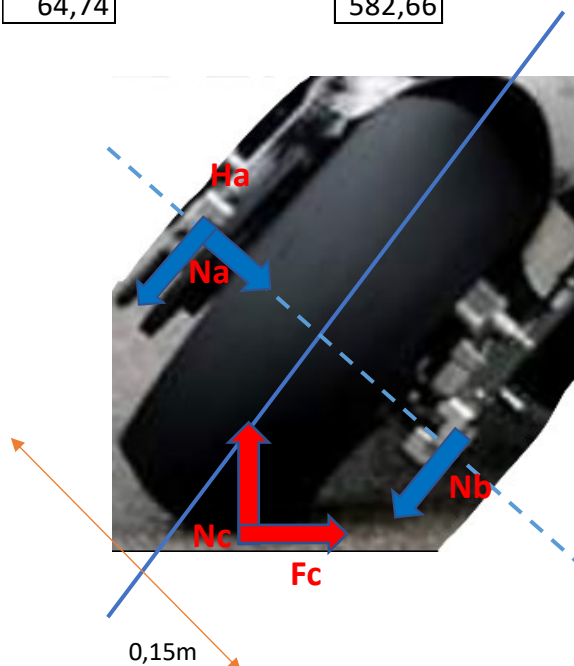
64,74

Forza N_b

582,66

Forza H_a

60,132



Dove N_a e H_a agiscono sulla forcella di sinistra e N_b agisce sulla forcella di destra

SIMULAZIONI FORCELLE ORIGINALI

Qui di seguito verranno rese note le simulazioni delle forcelle originali sia per quanto riguarda le tensioni sia gli spostamenti. In tutto prendiamo in considerazione 3 dei 4 casi possibili trascurando il caso di forcella destra moto piegata, scegliendo solo quella sinistra, dando più peso alle forze agenti in X e Y rispetto a quella agente solo in Y. Tutte le forze agenti per le diverse simulazioni sono state inserite in base ai calcoli mostrati precedentemente.

MATERIALE: Lega di alluminio

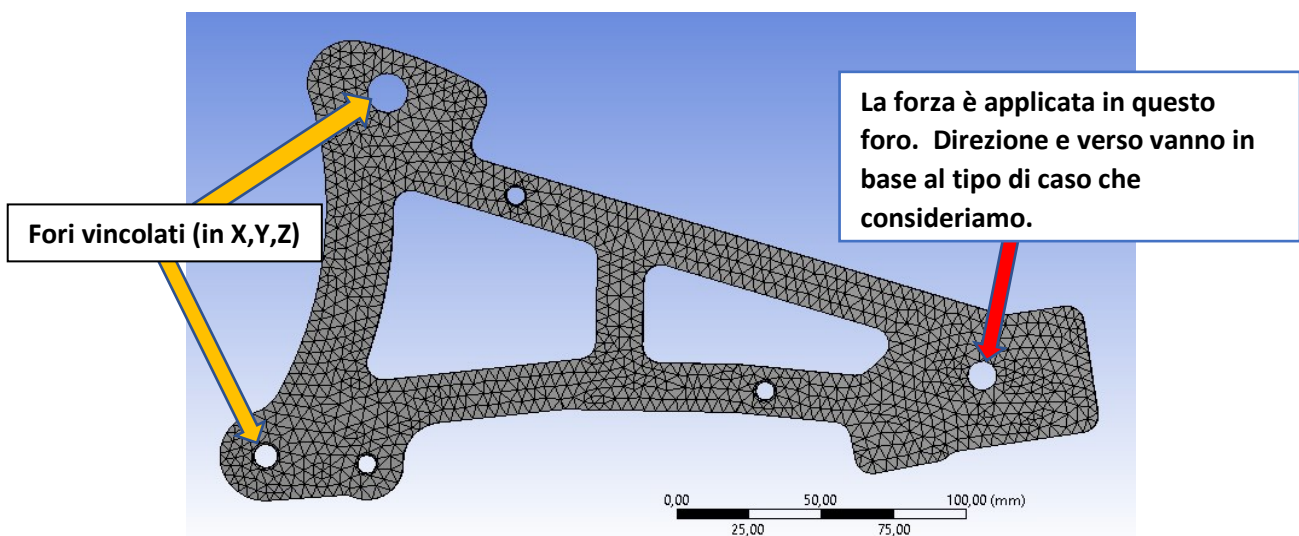
PROPRIETA':

- Densità: 2700 kg/m^3
- Modulo di Young (E) lungo X,Y,Z: 70000 Mpa
- Coefficiente di Poisson in X,Y,Z: $0,33$
- Modulo di elasticità tangenziale (G): 25000 Mpa
- Carico di snervamento a trazione: 280 Mpa
- Carico di snervamento a compressione: 280 Mpa

PESO FORCELLE ORIGINALI: $0,53 \text{ kg}$ **SPESSORE:** 15 mm

Per procedere alla corretta simulazione, ogni forcella è stata vincolata in 3 direzioni (x, y, z) nei 2 fori che sono collegati al telaio. La forza è stata applicata nel foro dove va collegato il perno della ruota. Sono state utilizzate mesh di 2 mm.

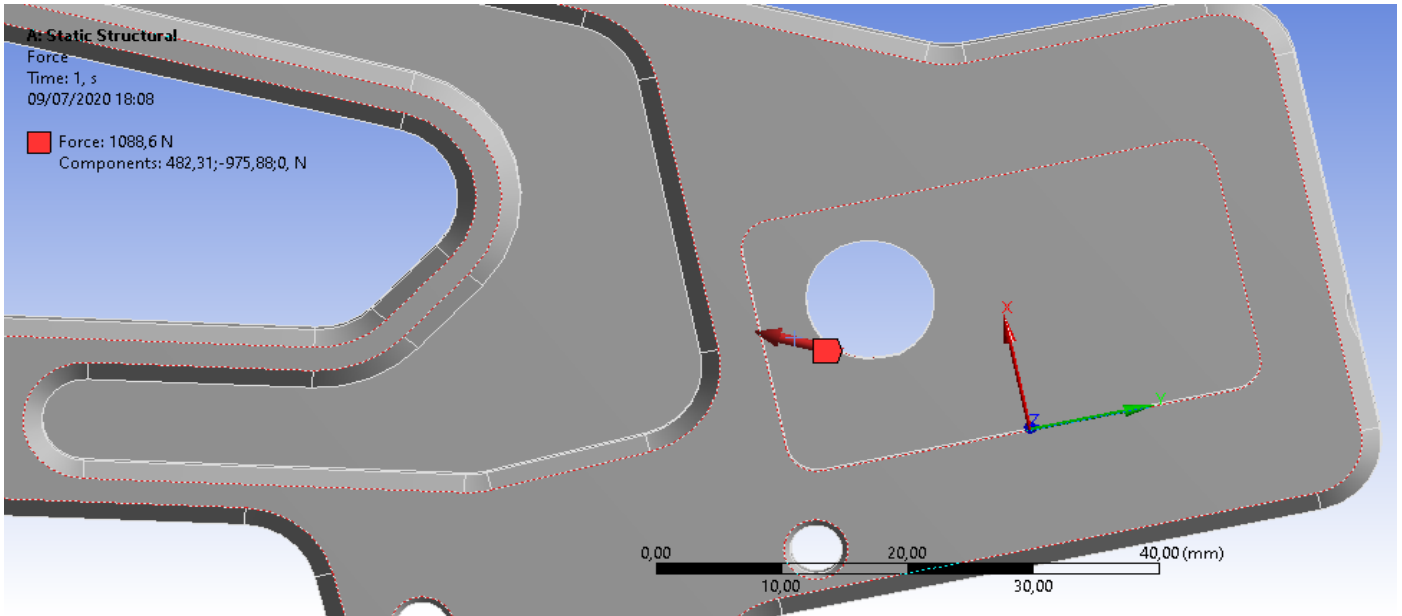
Figura applicazione forze e mesh:



In questo modo possiamo passare alle simulazioni delle 3 casistiche descritte precedentemente.

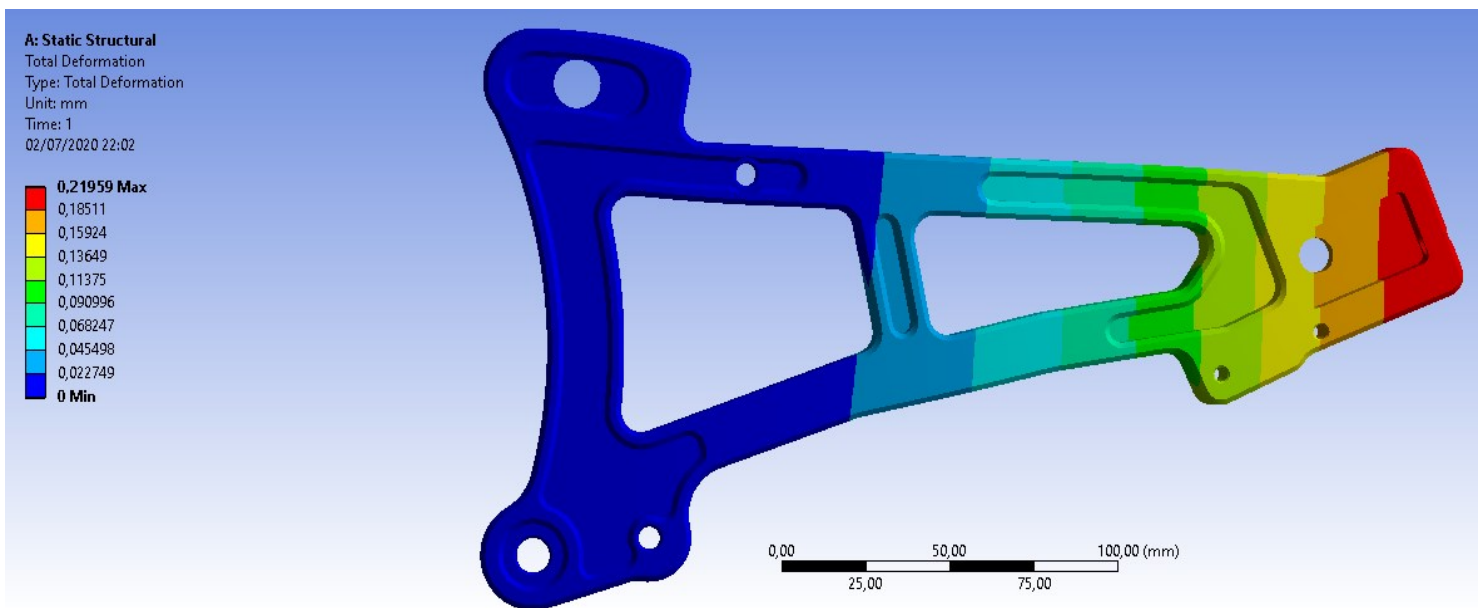
1) FORCELLA SINISTRA MOTO DRITTA

La seguente figura mostra la risultante delle forze applicate e il rispettivo sistema di riferimento.



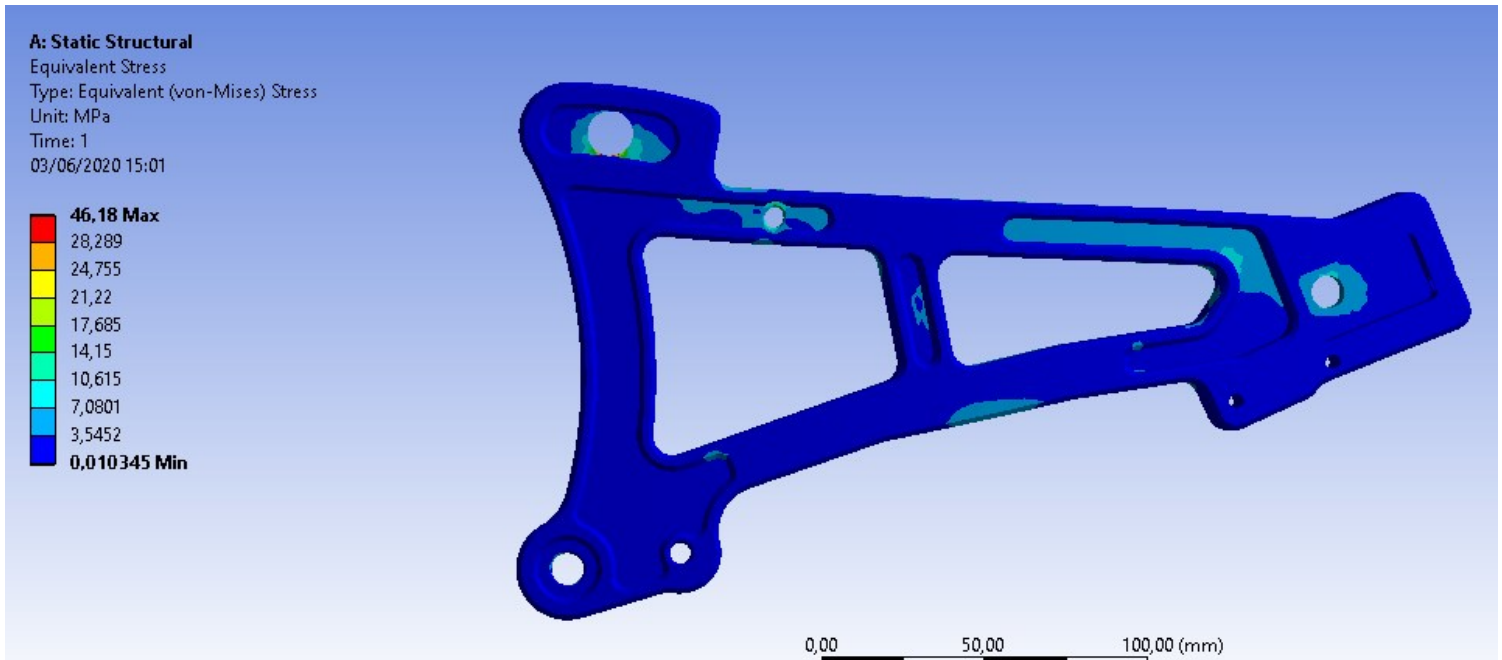
- Forza applicata in X: 482,32 N
- Forza applicata in Y: -975,88 N (il segno negativo è dovuto dall'asse y che è invertito rispetto al verso reale della forza)
- Risultante (in rosso sul bordo del foro): 1088,6 N

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,21959 mm

TENSIONI:

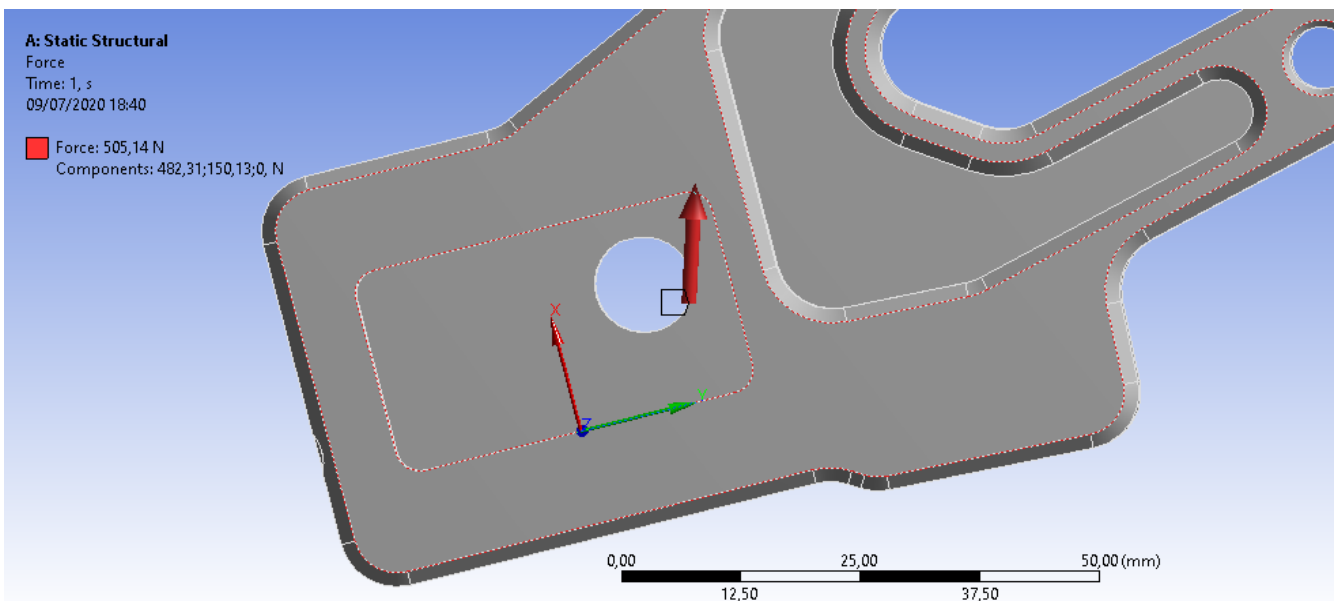


La tensione massima, come si può vedere, arriva a 46,18 MPa , quindi molto bassa, notando subito nessun rischio di snervamento e rottura.

Si può notare una disposizione non omogenea delle tensioni lungo tutta la geometria, facendo capire che c'è un buon margine di ottimizzazione.

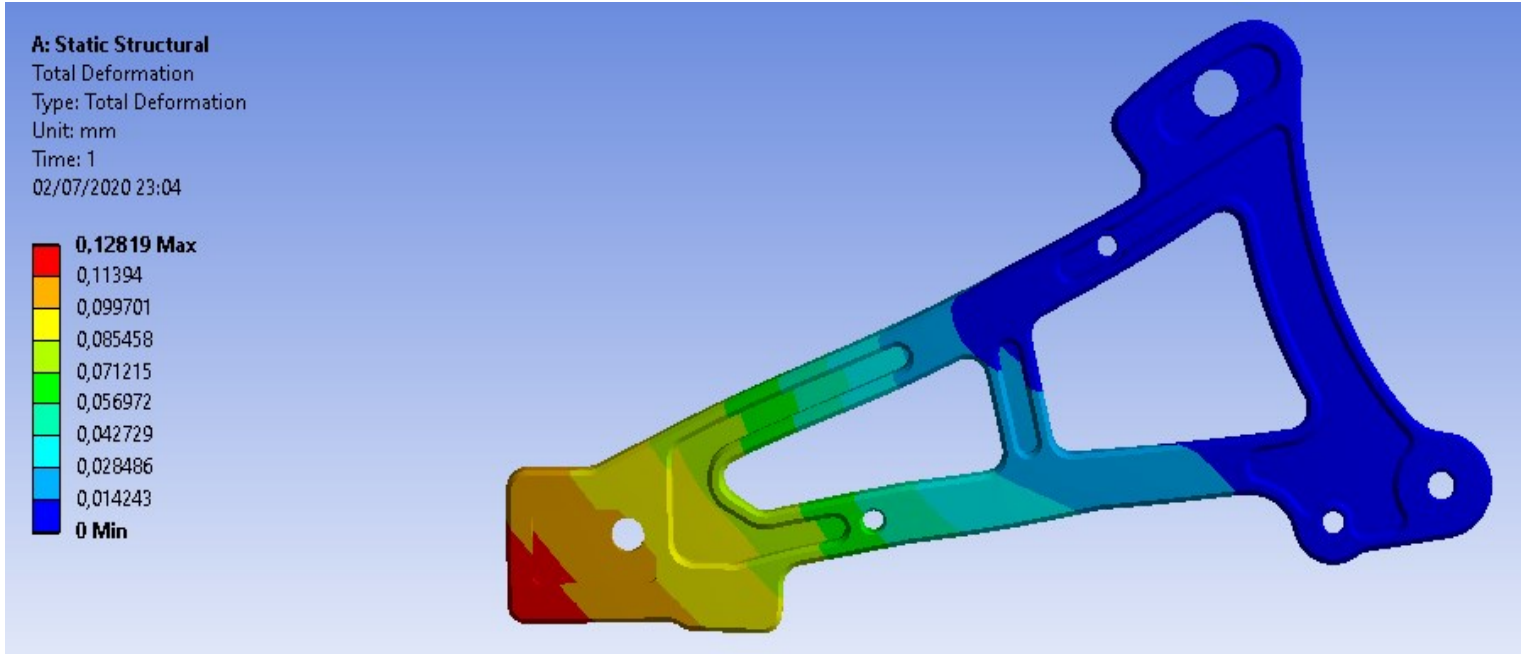
2) FORCELLA DESTRA MOTO DRITTA

La seguente figura mostra la risultante delle forze applicate e il rispettivo sistema di riferimento.



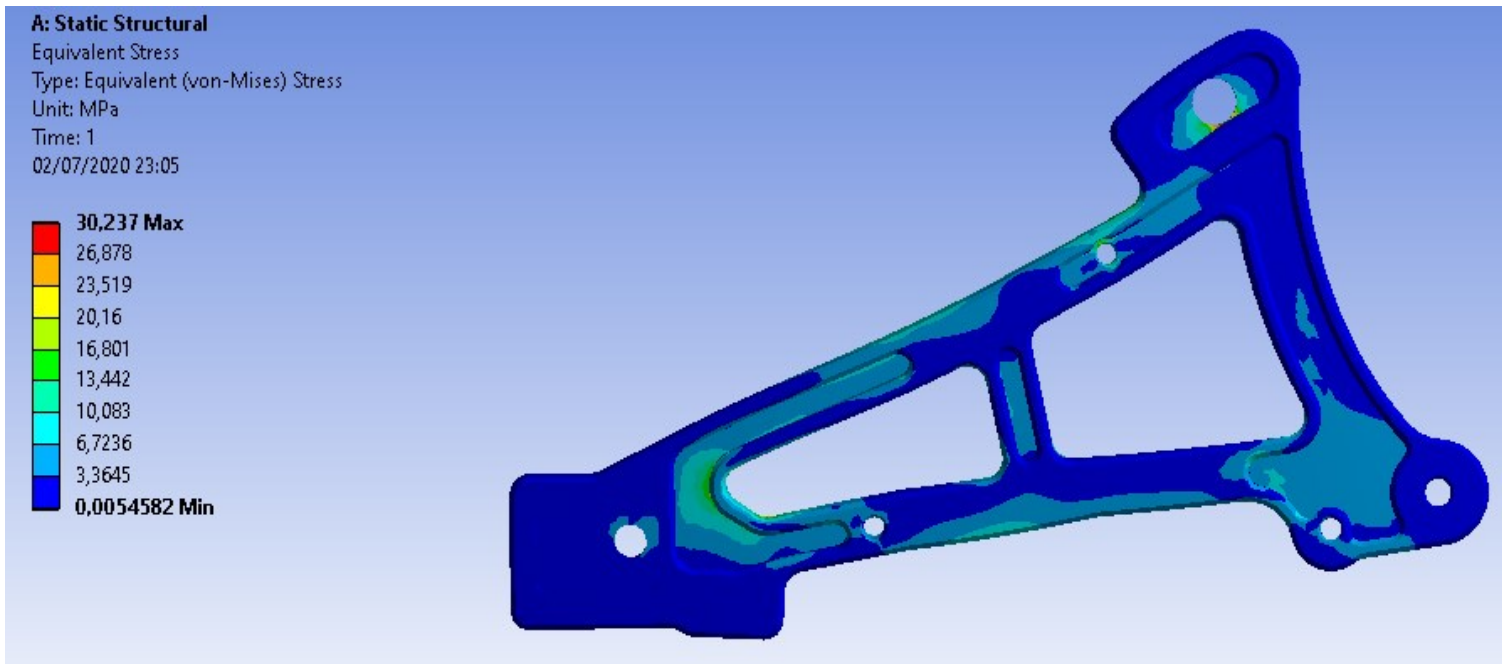
- Forza applicata in X: 482,32 N
- Forza applicata in Y: 150,13 N
- Risultante (in rosso sul bordo del foro): 505,14 N

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,12819 mm

TENSIONI:

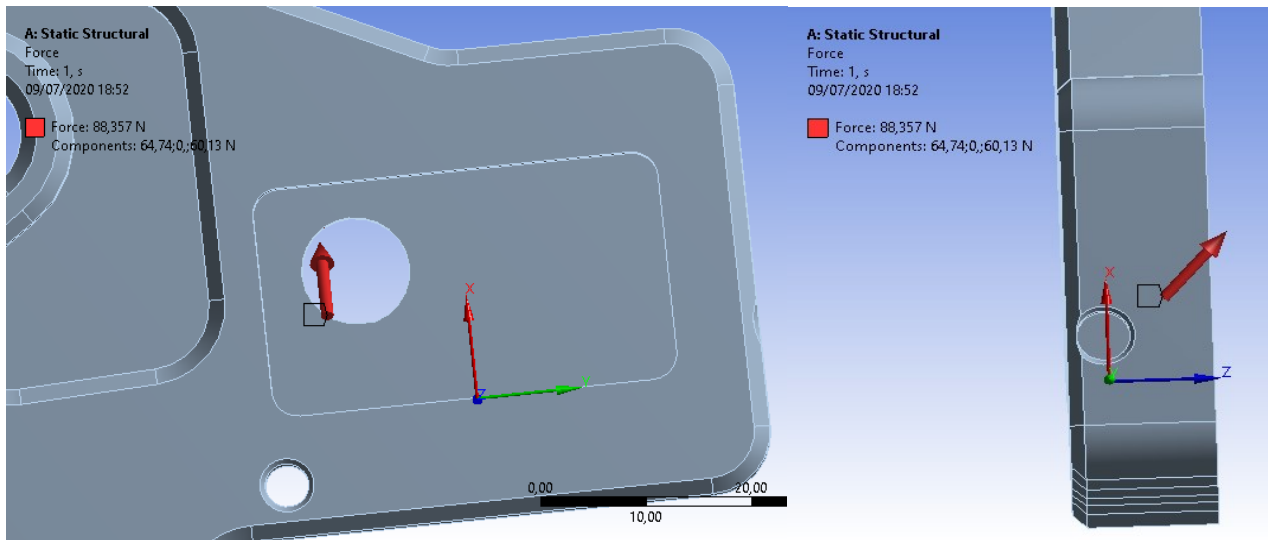


La tensione massima, come si può vedere, arriva a 30,237 MPa, quindi molto bassa, notando subito nessun rischio di snervamento e rottura.

Si nota una disposizione più omogenea delle tensioni rispetto al caso della forcella sinistra moto dritta, ma molti punti sono ancora scarichi, lasciando un discreto margine di ottimizzazione.

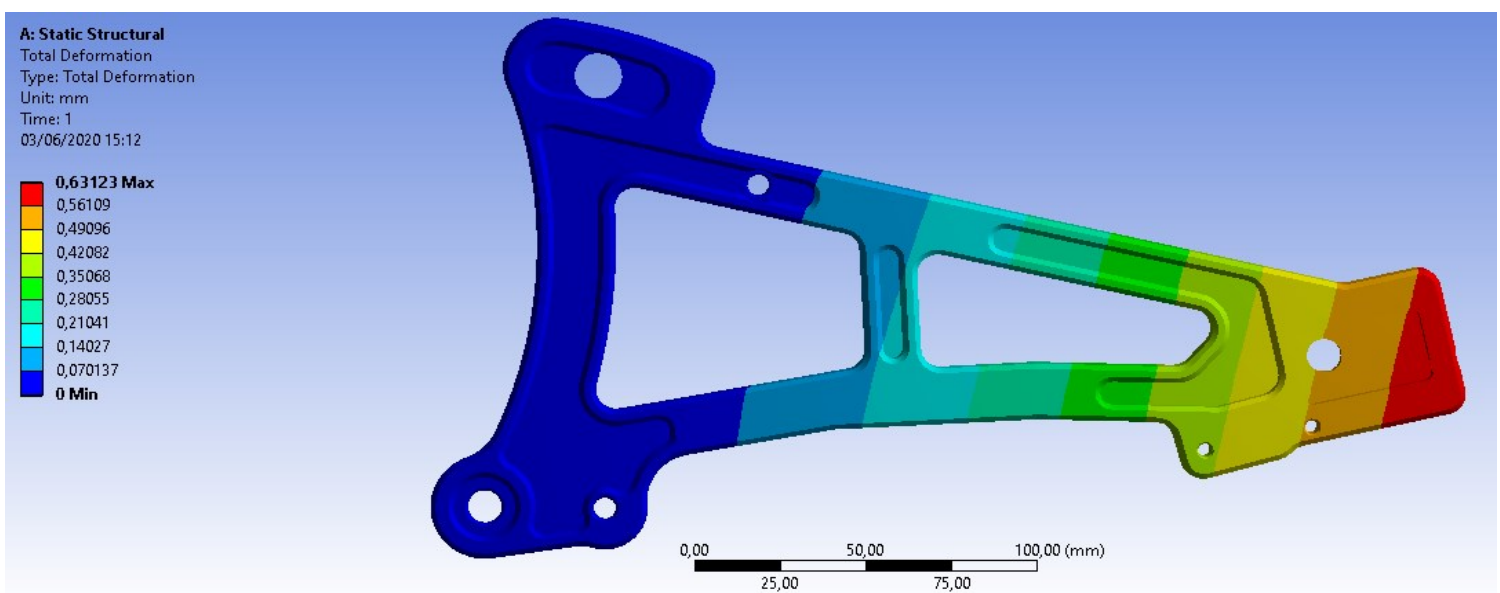
3) FORCELLA SINISTRA MOTO PIEGATA

La seguente figura mostra la risultante delle forze applicate e il rispettivo sistema di riferimento.



- Forza applicata in X: 64,74 N
- Forza applicata in Z: 60,13 N
- Risultante (in rosso sul bordo del foro): 88,357 N

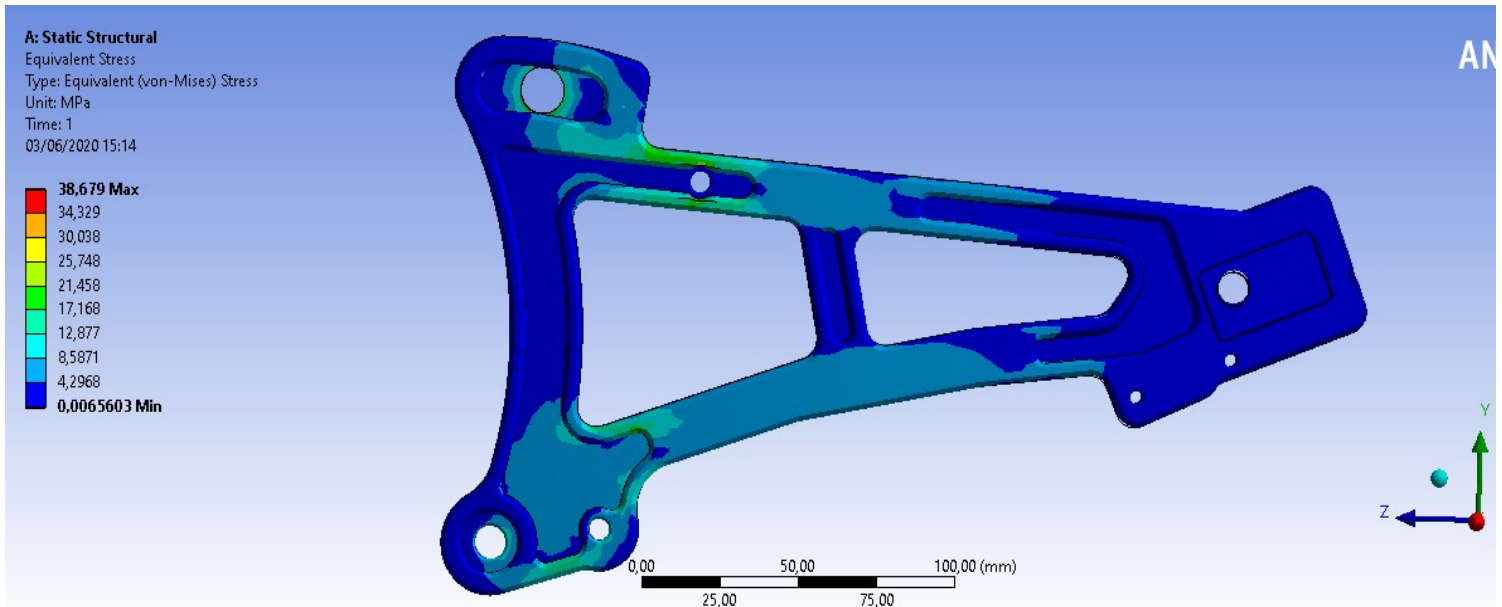
SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,63123 mm.

Notiamo che, in quest'ultimo caso, anche avendo la forza risultante minore rispetto agli altri casi, lo spostamento massimo è maggiore; questo risultato è dovuto dal fatto che abbiamo una forza in Z e lo spessore in quella direzione è minore rispetto alle altre.

TENSIONI:



La tensione massima, come si può vedere, arriva a 38,679 MPa, quindi molto bassa, notando subito nessun rischio di snervamento e rottura.

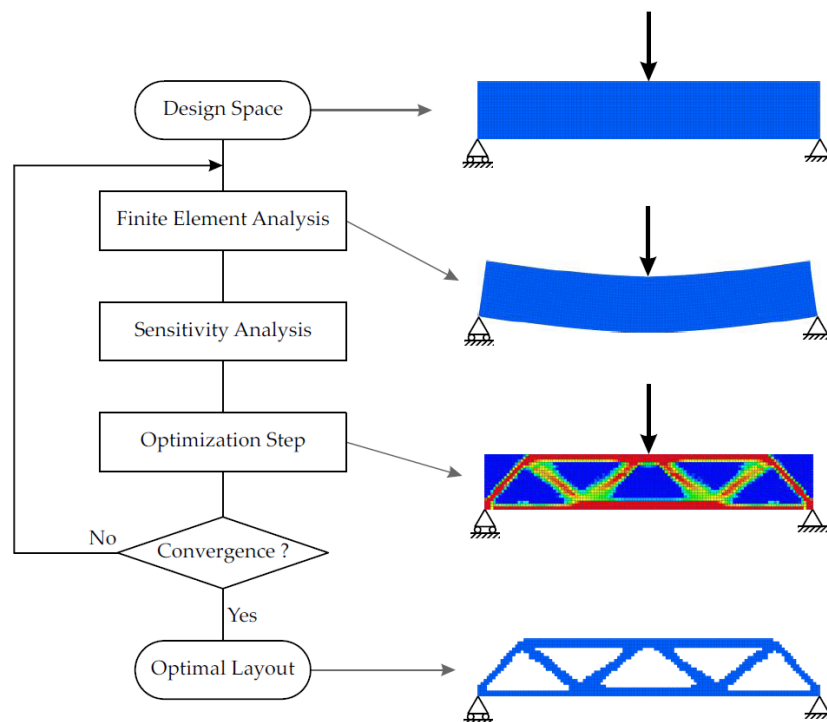
La distribuzione di tensioni fa notare un discreto margine di ottimizzazione.

L'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA

L'ottimizzazione topologica è una tecnica di simulazione al computer nella quale è possibile far convergere le caratteristiche essenziali del progetto in termini di volume di progetto, tecnologia produttiva, carichi, condizioni di funzionamento e obiettivi da raggiungere, che permette di sintetizzare una forma innovativa per il prodotto, identificando quelle zone del volume necessarie al raggiungimento del target, e rimuovendo tutte le altre. Il bello dell'ottimizzazione topologica è che può essere applicata praticamente in qualsiasi contesto strutturale per determinare, ad esempio, la migliore distribuzione di materiale per il basamento di una macchina utensile realizzata per fusione, oppure la traversa di una pressa che deve essere molto rigida, oppure per migliorare la forma delle parti in movimento che devono essere rigide e leggere allo stesso tempo.

Essa parte da un modello continuo dello spazio di progettazione. In modo iterativo,

il processo di ottimizzazione rimuove, o ridistribuisce il materiale dallo spazio di progettazione che non viene utilizzato in modo efficiente. Il processo di ottimizzazione continua rimuovendo il materiale fino alla frazione volumetrica predefinita dello spazio di progettazione e si ferma. La seguente figura illustra il diagramma di flusso dell'Ottimizzazione Topologica, con una rappresentazione schematica di come viene interpretato il modello FEM nelle varie fasi. Il risultato di questa analisi fornisce la distribuzione ottimale del materiale per l'applicazione considerata. A differenza delle iterazioni di progetto manuali ispirate dall'esperienza e l'intuizione del progettista, questo sistema a volte può portare a disegni molto sorprendenti.



L'ottimizzazione topologica in "Ansys workbench"

Come già detto, per la realizzazione delle ottimizzazioni è stato utilizzato il software "Ansys workbench". Questo software ha un modulo dedicato a questo tipo di ottimizzazioni. Esso permette di variare principalmente 4 parametri: massa, volume, tensione e spostamenti massimi. Dato che le tensioni sono trascurabili, come visto nelle simulazioni, e il volume è legato alla massa, si sceglierà di variare 2 soli parametri: massa e spostamento massimo in X,Y,Z. Tutto ciò verrà applicato a un provino di partenza realizzato con geometrie grossolane e regolari che successivamente verrà simulato nuovamente tramite software per analizzare e confrontare i risultati. Verranno utilizzati 2 tipi di materiali: lega di alluminio e carbon PA.

PROVINO REALIZZATO

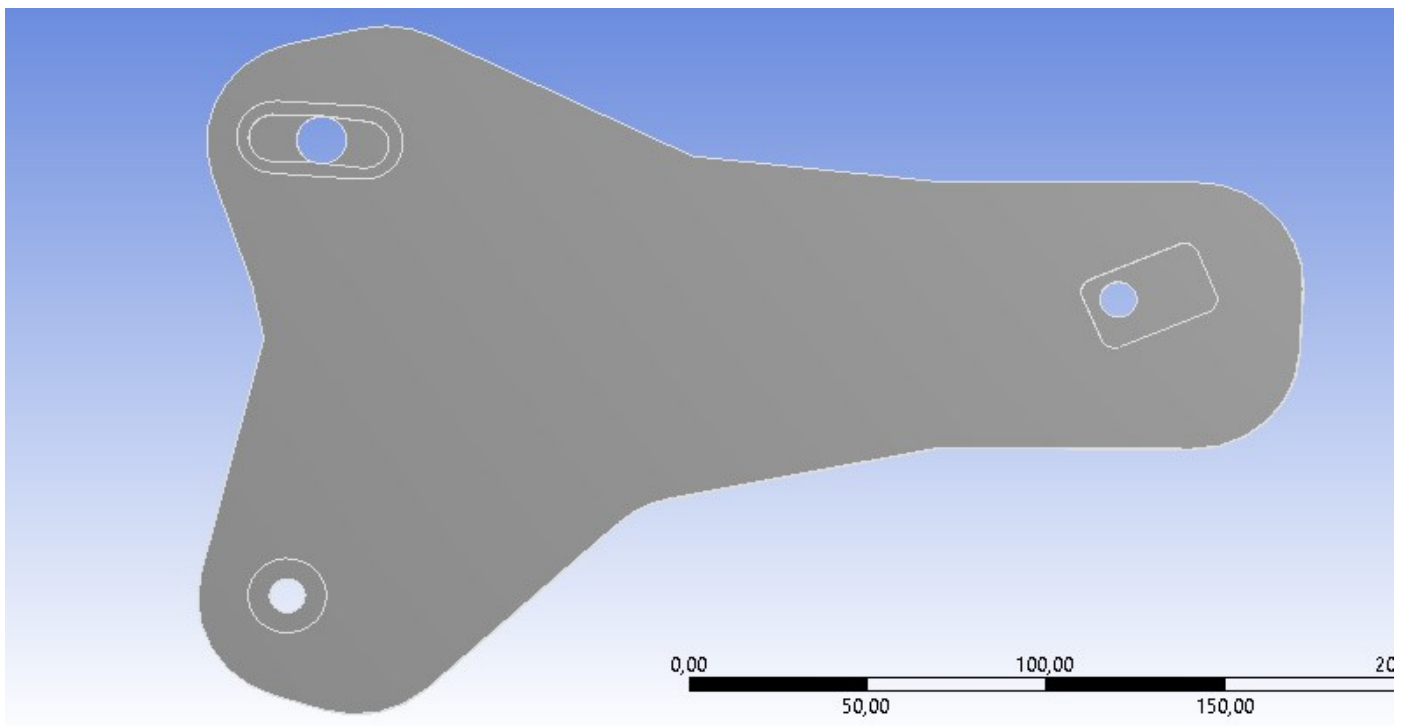
Come punto di partenza per la nostra ottimizzazione è stato realizzato un provino tramite il software “Solid edge”, dove è stata creata una forma generale approssimata mettendo i fori alle medesime posizioni delle forcelle originali. Per quanto riguarda lo spessore è stato tenuto invariato cioè 15 mm.

Dati Provino

- **Materiale 1:** Lega di alluminio
- **Peso:** 1,42 kg

- **Materiale 2:** Carbon PA
- **Peso:** 0,62 kg

Figura Provino



OTTIMIZZAZIONI SIMULATE DEL PROVINO

Nelle ottimizzazioni sono stati scelti 4 tipi di input e ognuno è stato applicato a un tipo di forcella, ottimizzando prima con il materiale lega di alluminio e poi con il carbon PA. Tutte le forze applicate per ogni tipo di forcella del provino sono le stesse delle forcelle originali.

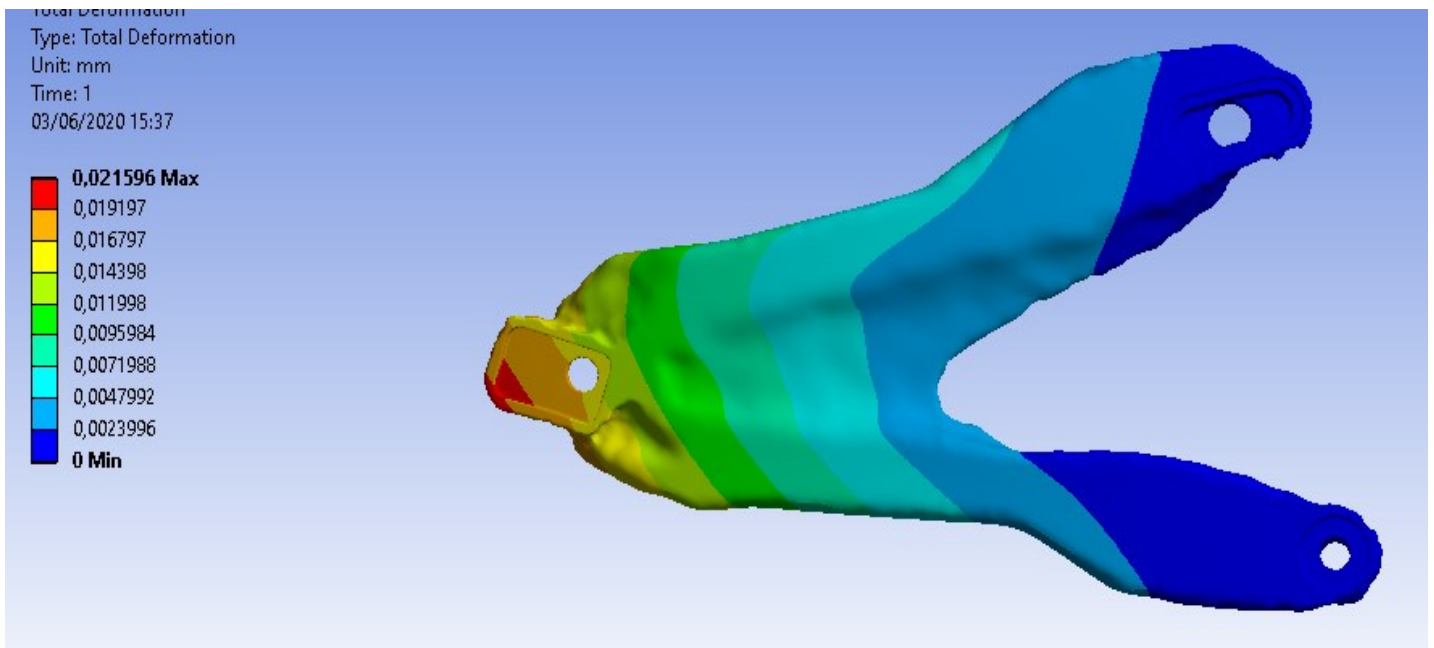
I 4 casi sono:

- 1) 50% MATERIALE RESTANTE E 1mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO IN X,Y,Z. DATI APPLICATI ALLA FORCELLA DESTRA MOTO DRITTA

1a) Materiale: lega di alluminio

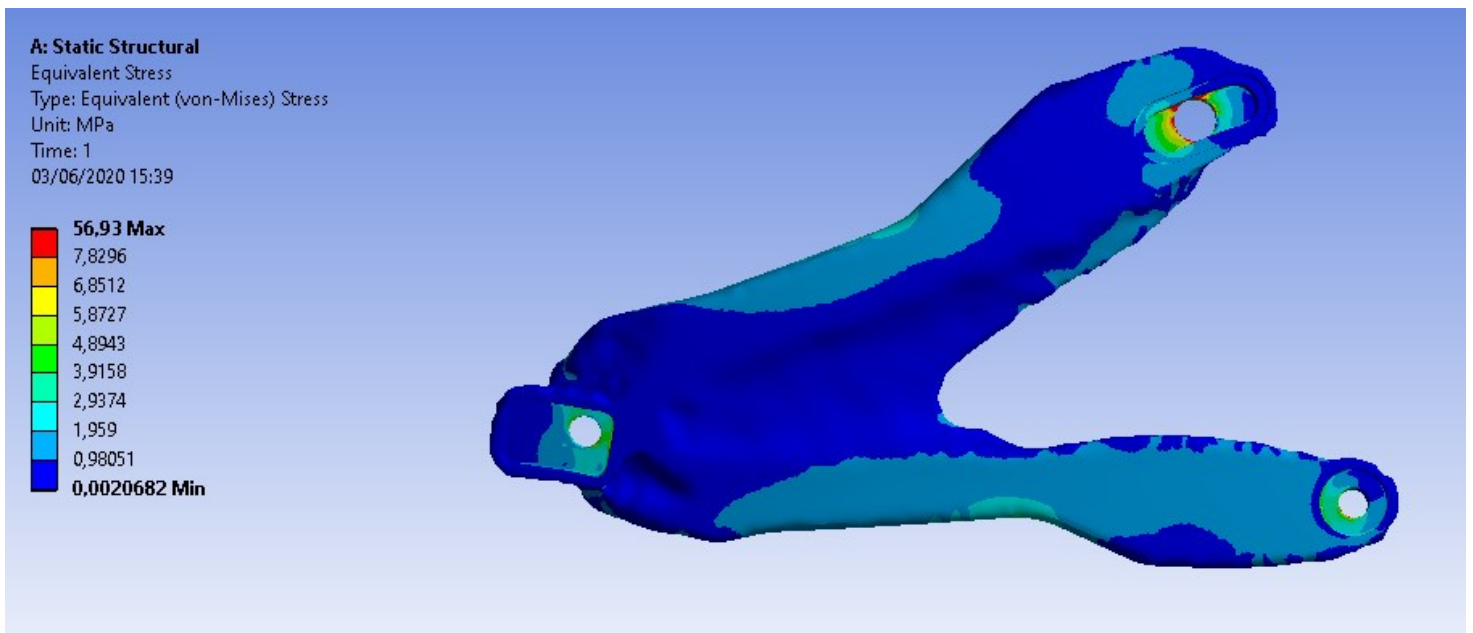
Peso: 0,74 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo è di 0,021596 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 56,93 MPa in prossimità del foro per il collegamento al telaio, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

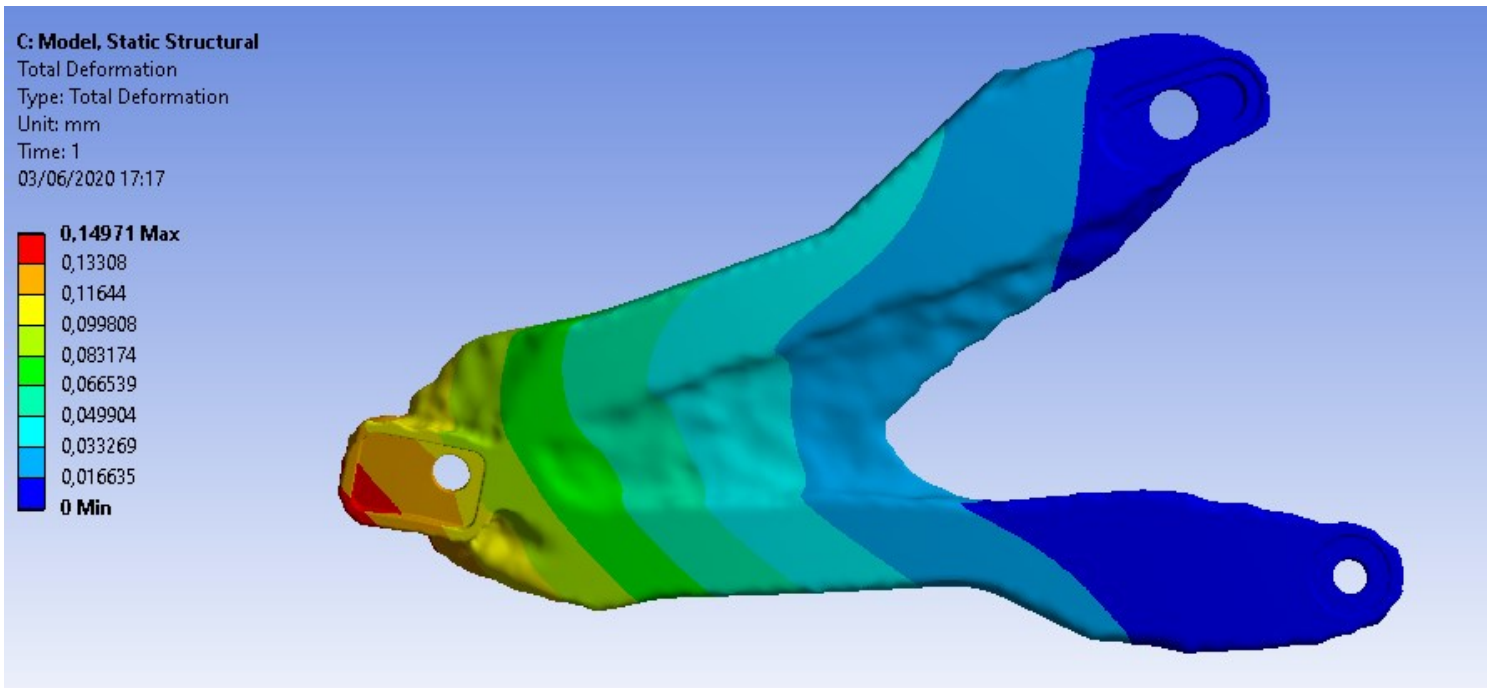
Considerazioni:

Lo spostamento massimo è molto al di sotto rispetto a quello della forcella originale che è di 0,12819 mm mentre questo di 0,021596 mm, però il peso è superiore, quindi cerchiamo di spingere oltre i parametri di ottimizzazione.

1b) Materiale: Carbon PA

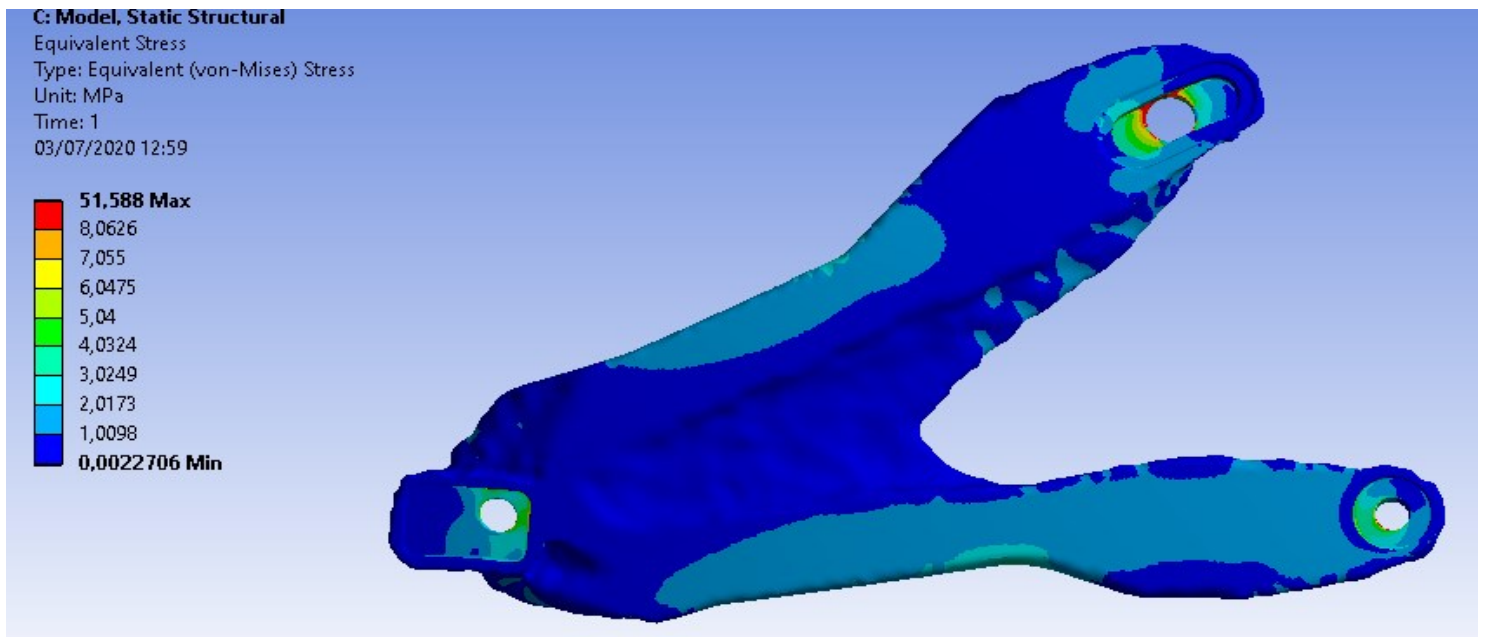
PESO: 0,32 Kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,14971 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 51,588 MPa in prossimità del foro per il collegamento al telaio, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

Considerazioni:

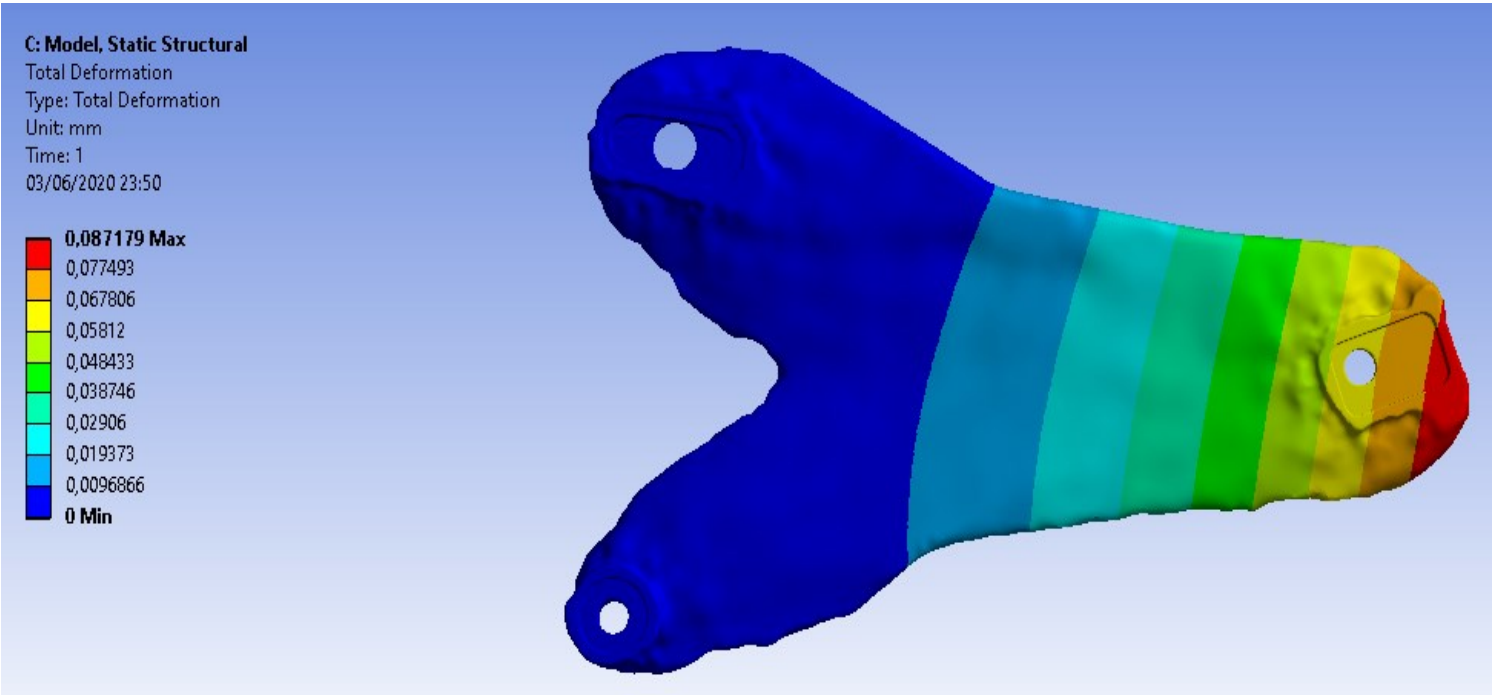
Il peso è al di sotto delle forcelle originali ma lo spostamento massimo è superiore arrivando a 0,14971 mm. Si tentano altre ottimizzazioni.

**2) 50% MATERIALE RESTANTE E 0,2mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO.
DATI APPLICATI ALLA FORCELLA SINISTRA MOTO DRITTA**

2a) Materiale: lega di alluminio

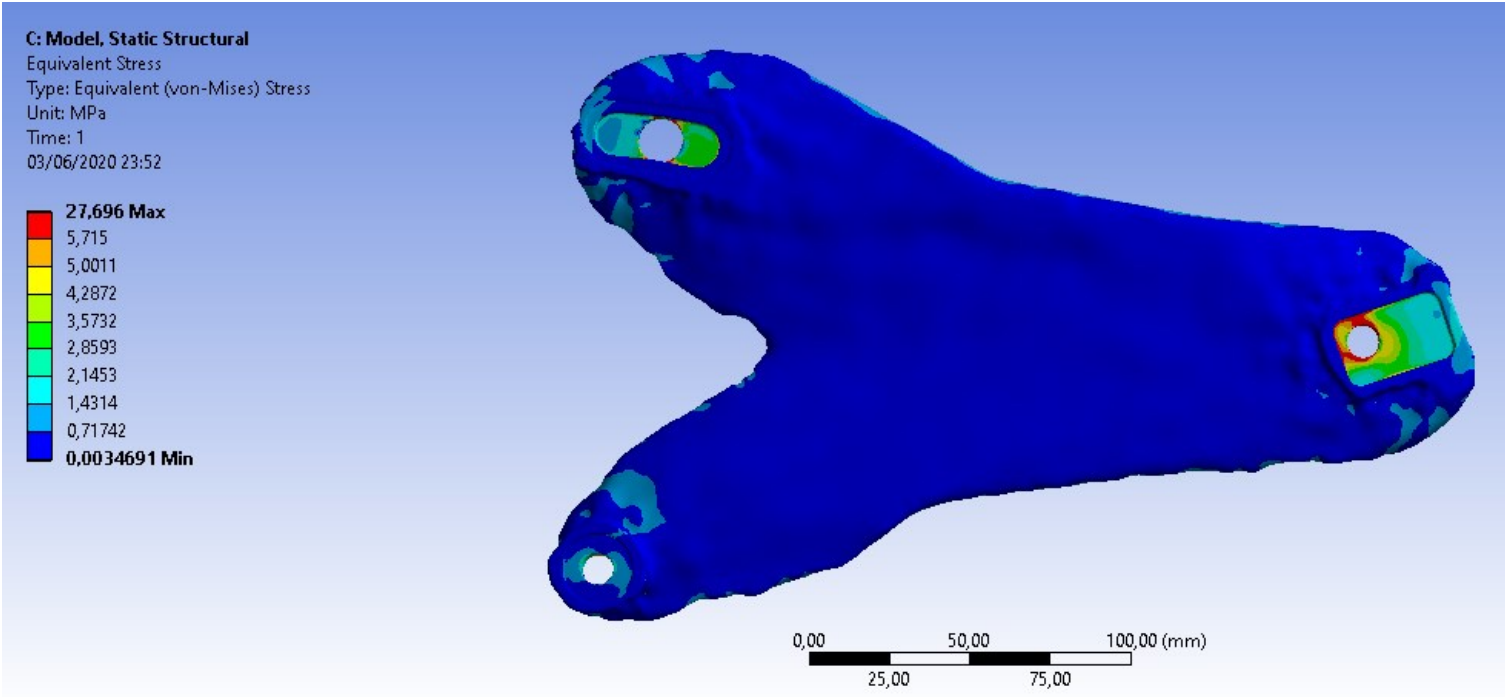
Peso: 0,74 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,087179 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 27,696 MPa in prossimità del foro per il collegamento al telaio e in quello di collegamento al perno della ruota, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

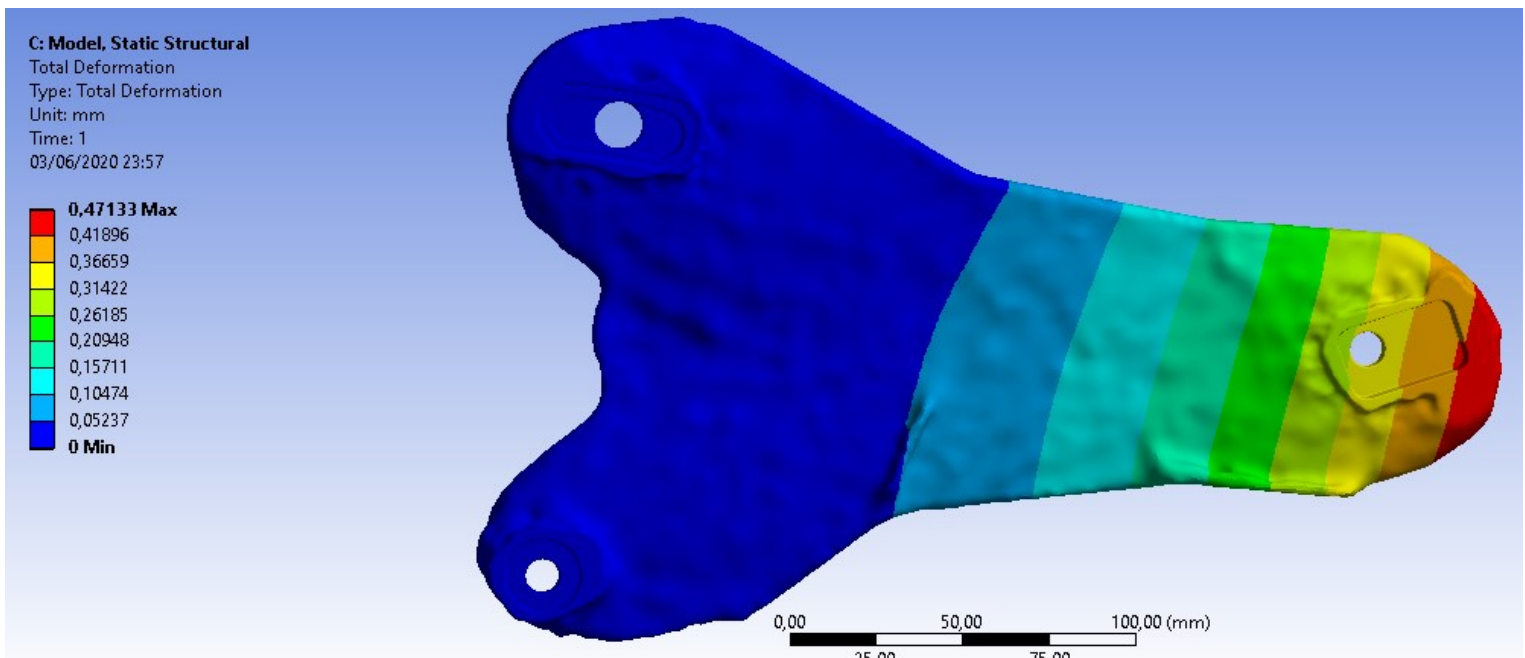
Considerazioni:

Lo spostamento massimo è molto al di sotto rispetto a quello della forcella originale che era di 0,21959 mm, mentre questo è di 0,087179 mm, però il peso è superiore ad essa, quindi cerchiamo di spingere oltre i parametri di ottimizzazione.

2b) Materiale: Carbon PA

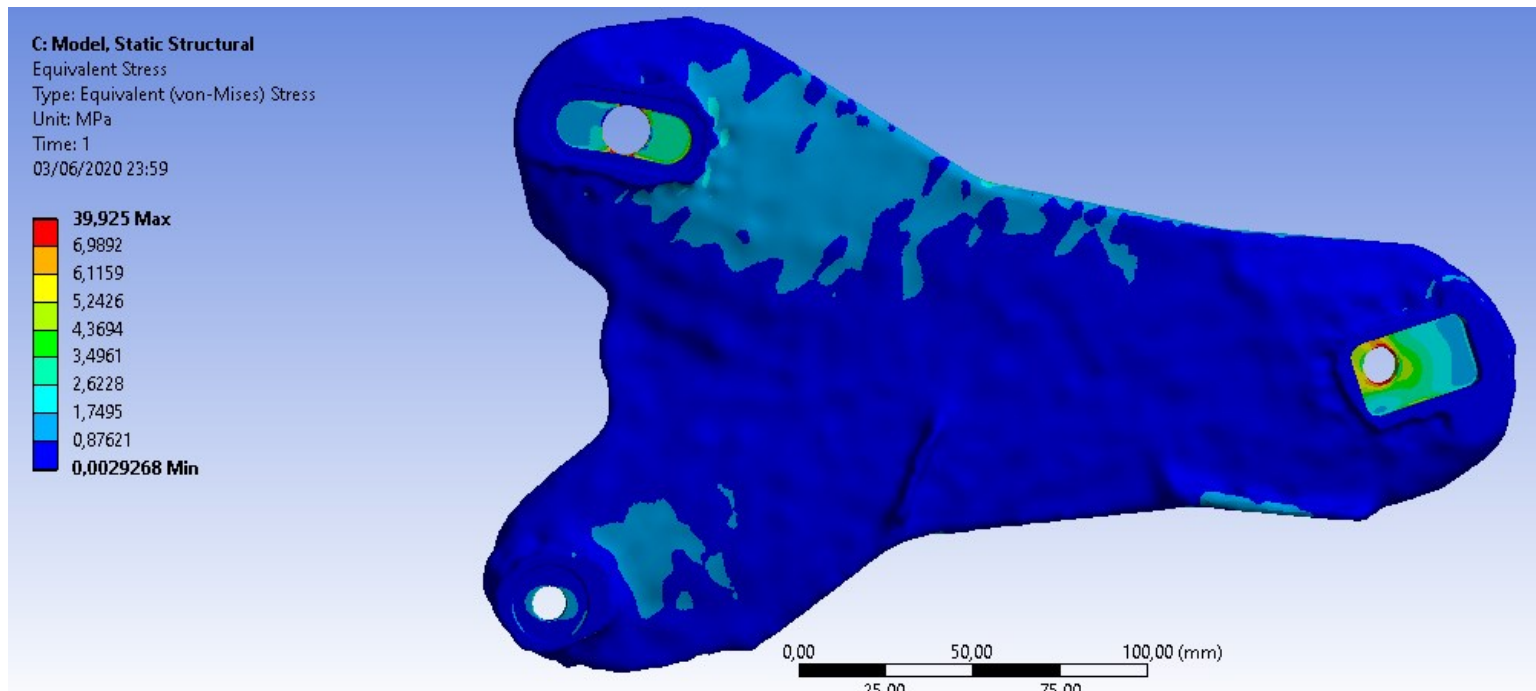
PESO: 0,32 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,47133 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 39,925 MPa in prossimità del foro per il collegamento al telaio e in quello di collegamento al perno della ruota, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

Considerazioni:

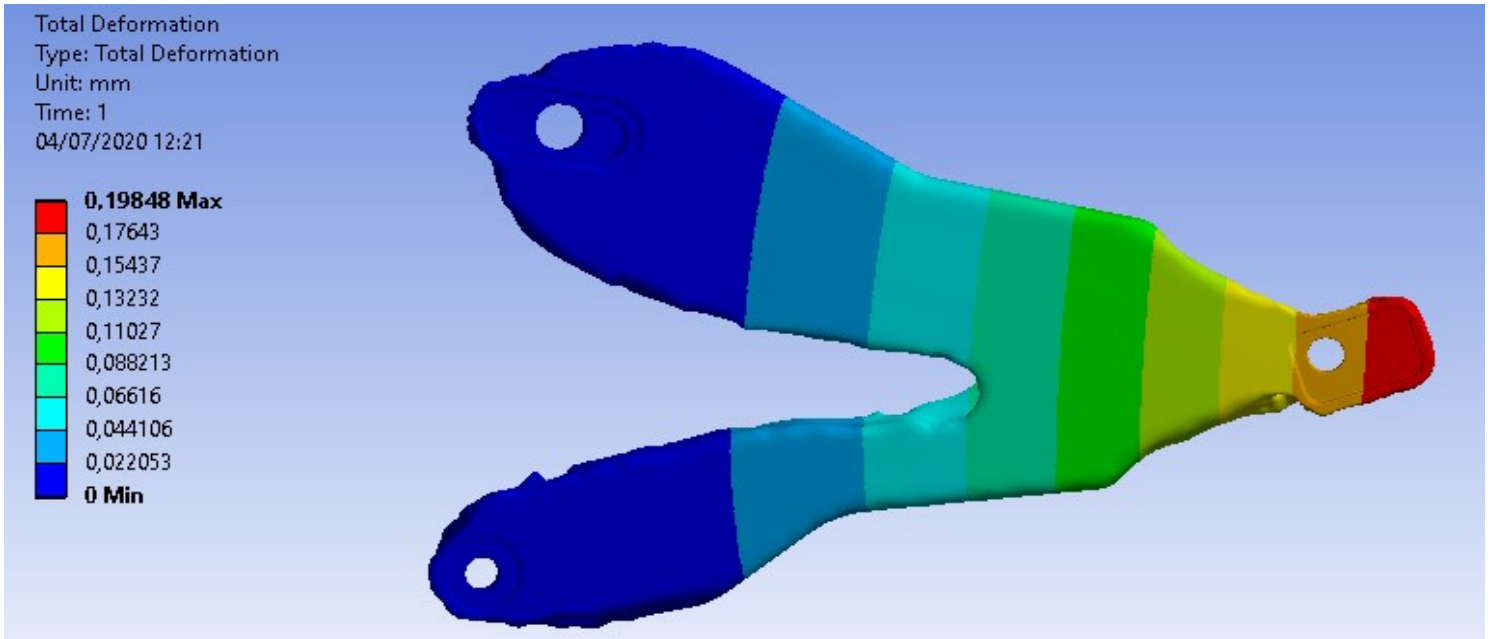
Il peso è al di sotto delle forcelle originali ma lo spostamento massimo è superiore arrivando a 0,47133 mm. Si tentano altre ottimizzazioni.

**3) 40% MATERIALE RESTANTE E 0,5mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO.
DATI APPLICATI ALLA FORCELLA SINISTRA MOTO PIEGATA**

3a) Materiale : lega di alluminio

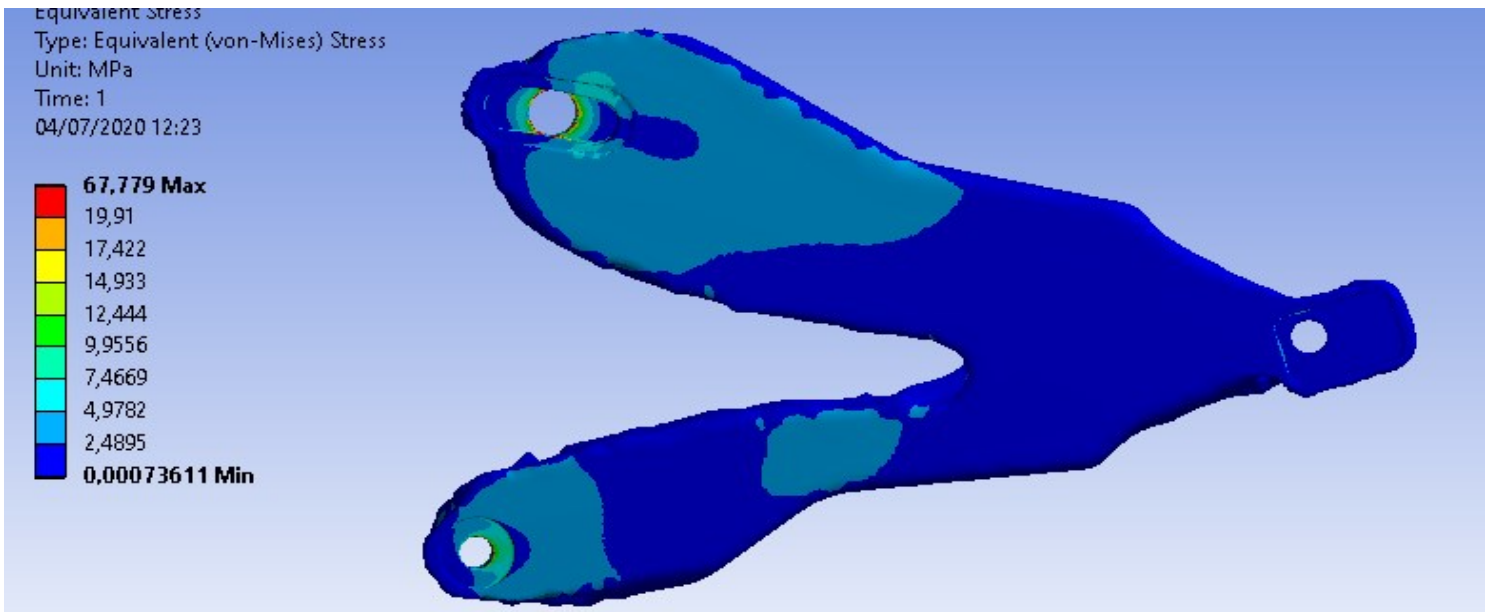
PESO: 0,61 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,19848 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 67,779 MPa in prossimità del foro per il collegamento al telaio, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

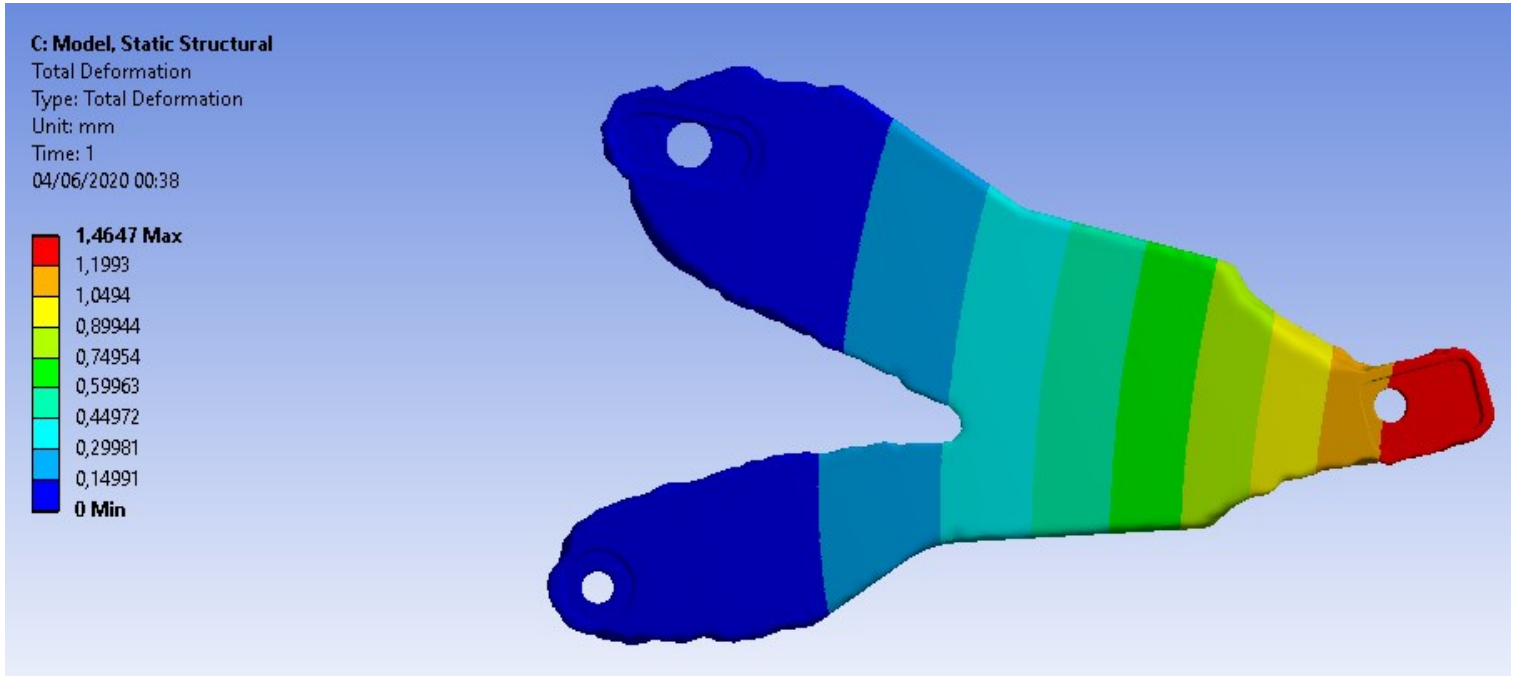
Considerazioni:

Lo spostamento massimo è al di sotto rispetto a quello della forcella originale che è di 0,63123 mm, mentre questo è di 0,19848 mm, però il peso è superiore, quindi cerchiamo di spingere oltre i parametri di ottimizzazione.

3b) Materiale: Carbon PA

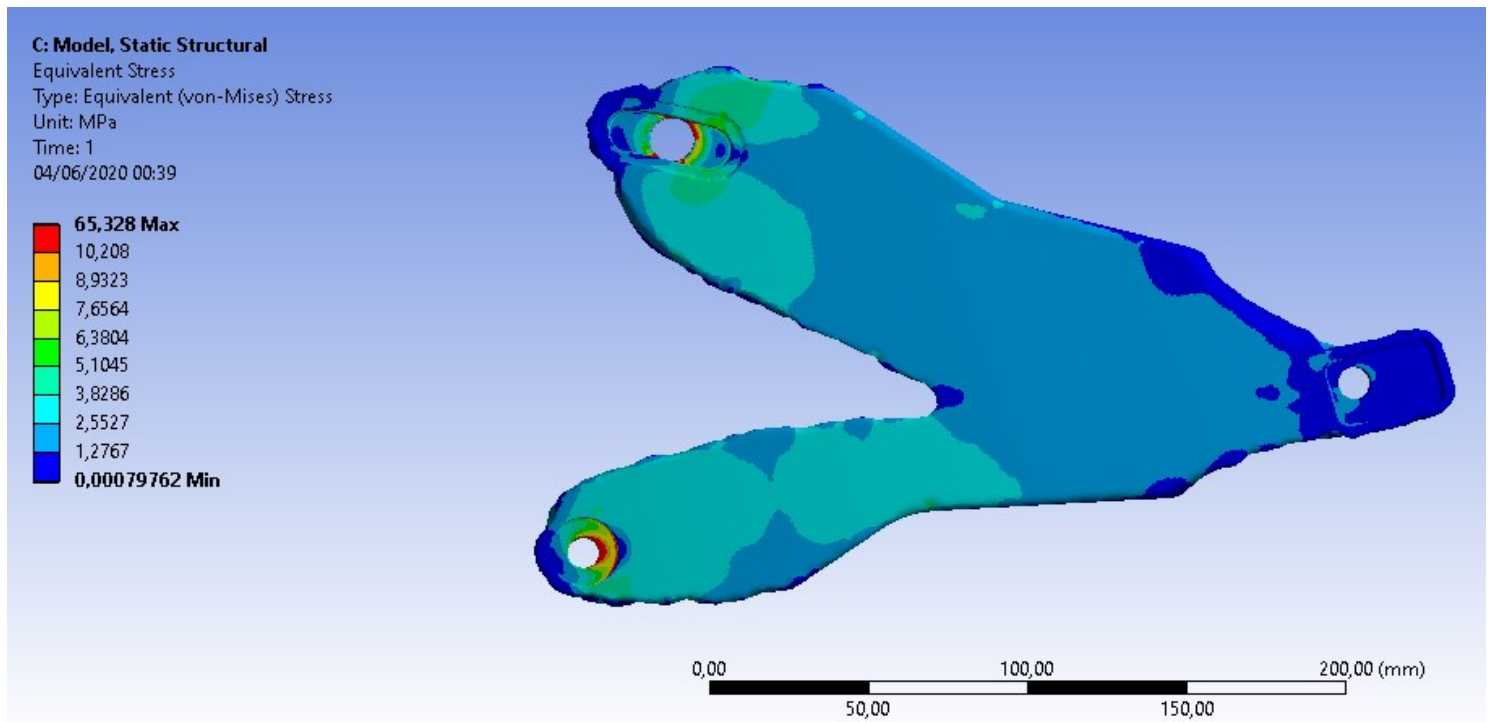
PESO: 0,277 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 1,4647 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 65,328 MPa in prossimità dei fori per il collegamento al telaio, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

Considerazioni:

Il peso è al di sotto delle forcelle originali ma lo spostamento massimo è molto superiore, arrivando a 1,4647 mm. Si tentano altre ottimizzazioni.

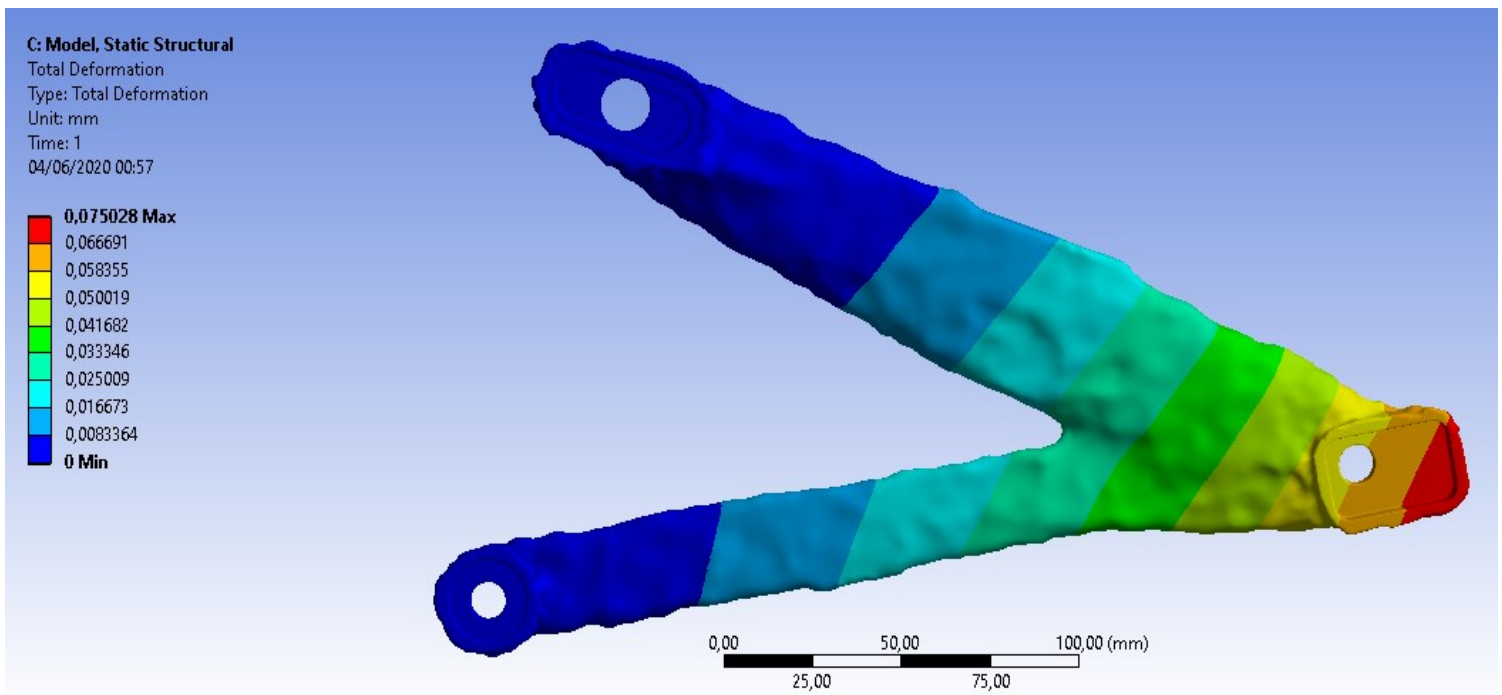
Nella quarta e ultima ottimizzazione si cercherà di portare quasi al limite il calcolatore.

4) 20% MATERIALE RESTANTE E 0,1 mm DI SPOSTAMENTO MASSIMO APPLICATO ALLA FORCELLA SINISTRA MOTO DRITTA

4a) Materiale: lega di alluminio

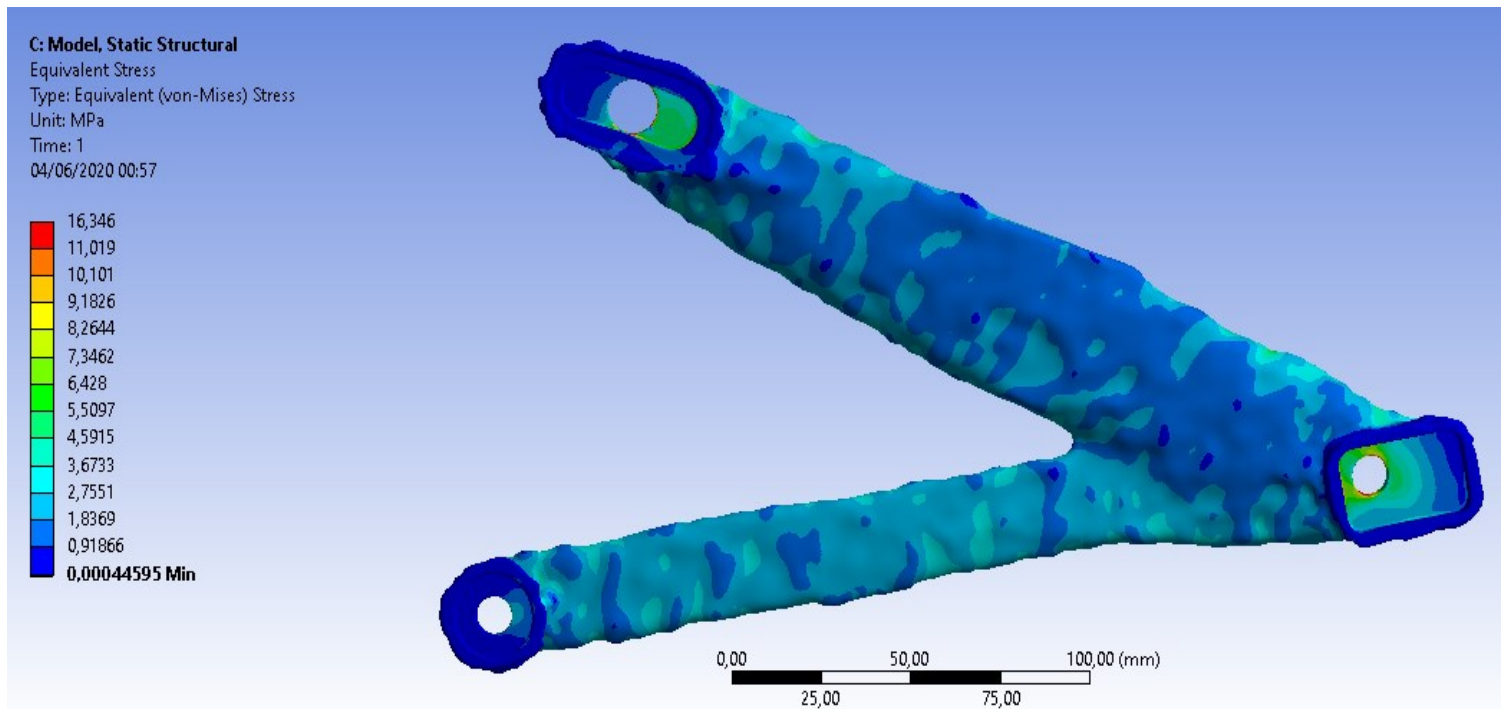
PESO: 0,33 KG

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,075028 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 16,346 MPa in prossimità dei fori per il collegamento al telaio e al perno della ruota, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

Considerazioni:

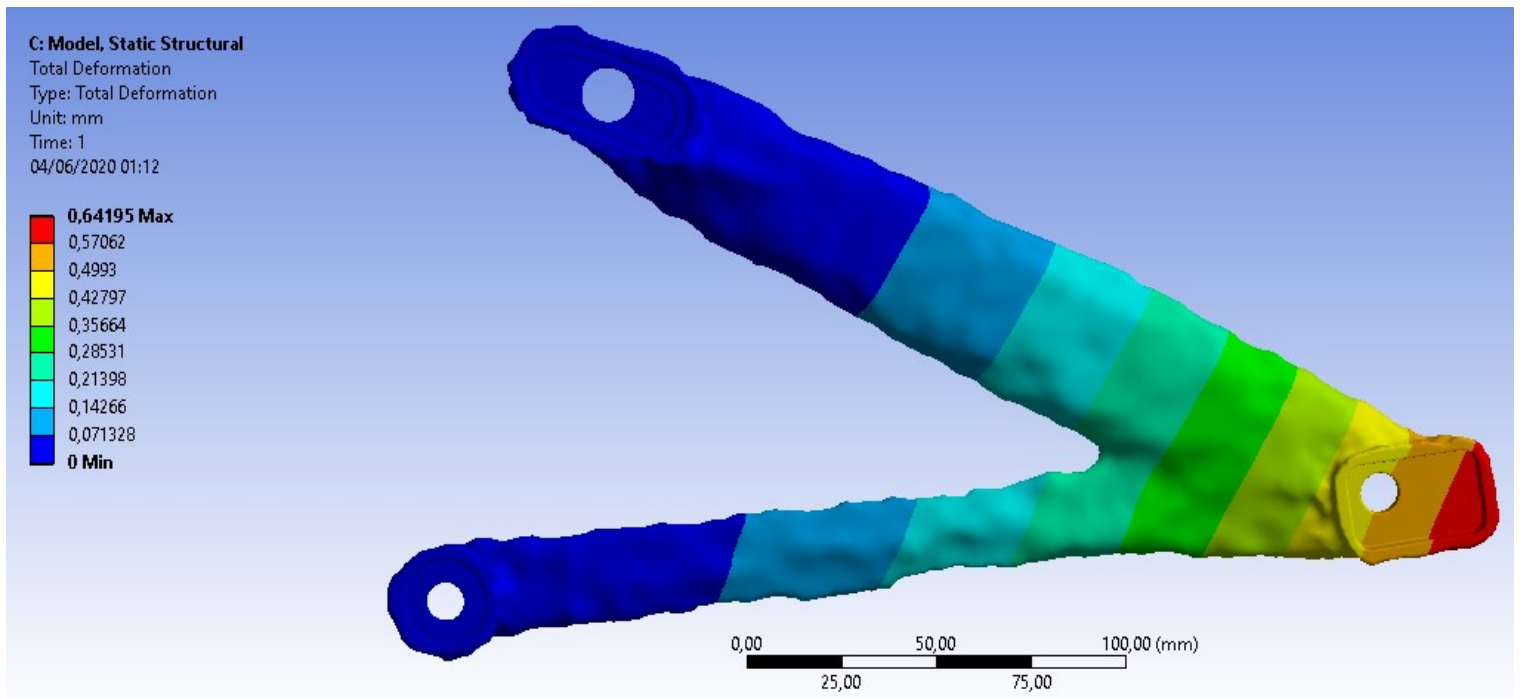
Il peso è al di sotto delle forcelle originali di una differenza pari a 0,2 kg, inoltre, anche gli spostamenti sono al di sotto, facendo capire di aver fatto un buon lavoro, confermato anche dalla distribuzione omogenea delle tensioni lungo tutta la geometria.

Riguardo alla lega di alluminio si può procedere alla ricostruzione finale.

4b) Materiale: carbon PA

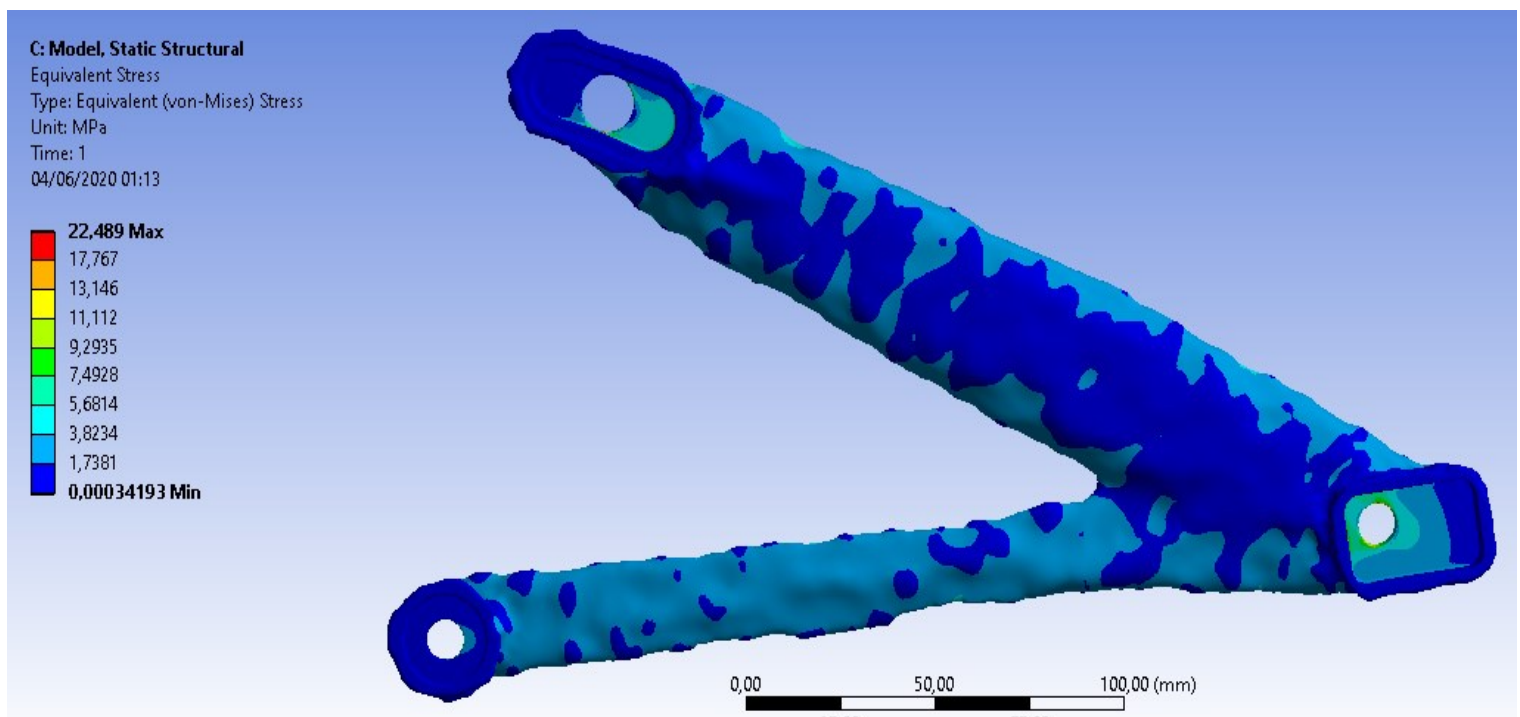
PESO: 0,14 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,64195 mm

TENSIONI:



La tensione massima arriva a 22,489 MPa in prossimità dei fori per il collegamento al telaio e al perno della ruota, quindi, oltre ad essere trascurabile, è molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

Considerazioni:

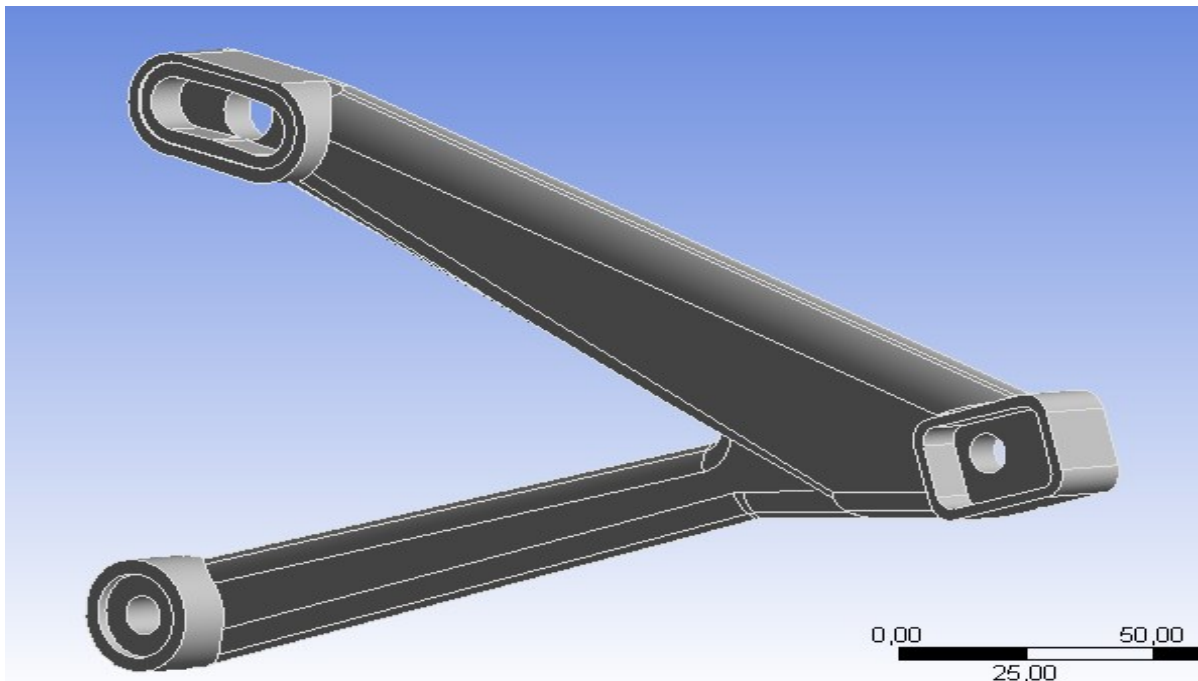
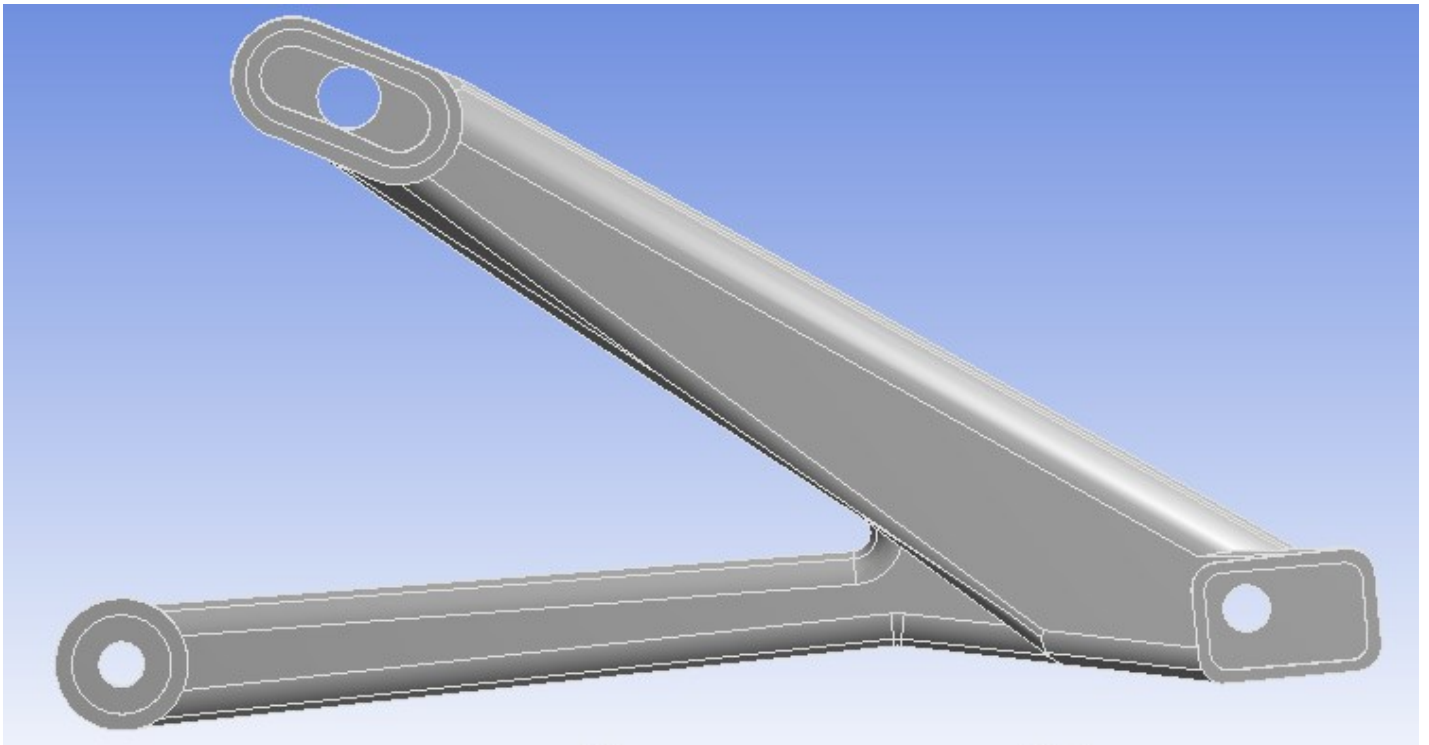
Possiamo dire che, avendo portato il peso a soli 0,14 kg rispetto ai 0,53 kg della forcella originale, questa ottimizzazione può essere considerata buona anche se lo spostamento è superiore a quest'ultima, quindi, nella pratica potremmo usare questo tipo di forcella creata con questo materiale innovativo come una nuova configurazione motociclistica, diminuendo di molto il peso e aumentando di poco la flessibilità (cosa non sempre negativa).

Si fa notare che la forcella da realizzare con il carbon PA può essere anche non ricostruita con superfici omogenee, perché, come descritto nella prima parte, l'Additive Manufacturing può realizzare anche geometrie molto irregolari. In questo caso come, anche per vedere un confronto, ricostruiremo la forcella simulandola anche con il carbon PA

RICOSTRUZIONE FINALE DELLA FORCELLA

In base ai dati mostrati precedentemente, abbiamo capito che l'ultima configurazione dell'ottimizzazione è quella più conveniente, quindi si procede ad una ricostruzione più precisa delle superfici tramite il software "Solid Edge". La ricostruzione è stata attuata partendo dai contorni dell'ottimizzazione, creando una prima una curva chiusa per poi estruderla con uno spessore medio preso dalla forcella da ricostruire. Successivamente sono stati realizzati i fori alle medesime posizioni, presi tutti i punti medi nei quali variava lo spessore della forcella ottimizzata, misurati, e tramite degli scavi sono stati realizzati le superfici di spessore variabile, ottenendo il risultato finale illustrato successivamente.

FIGURE FORCELLA RICOSTRUITA:

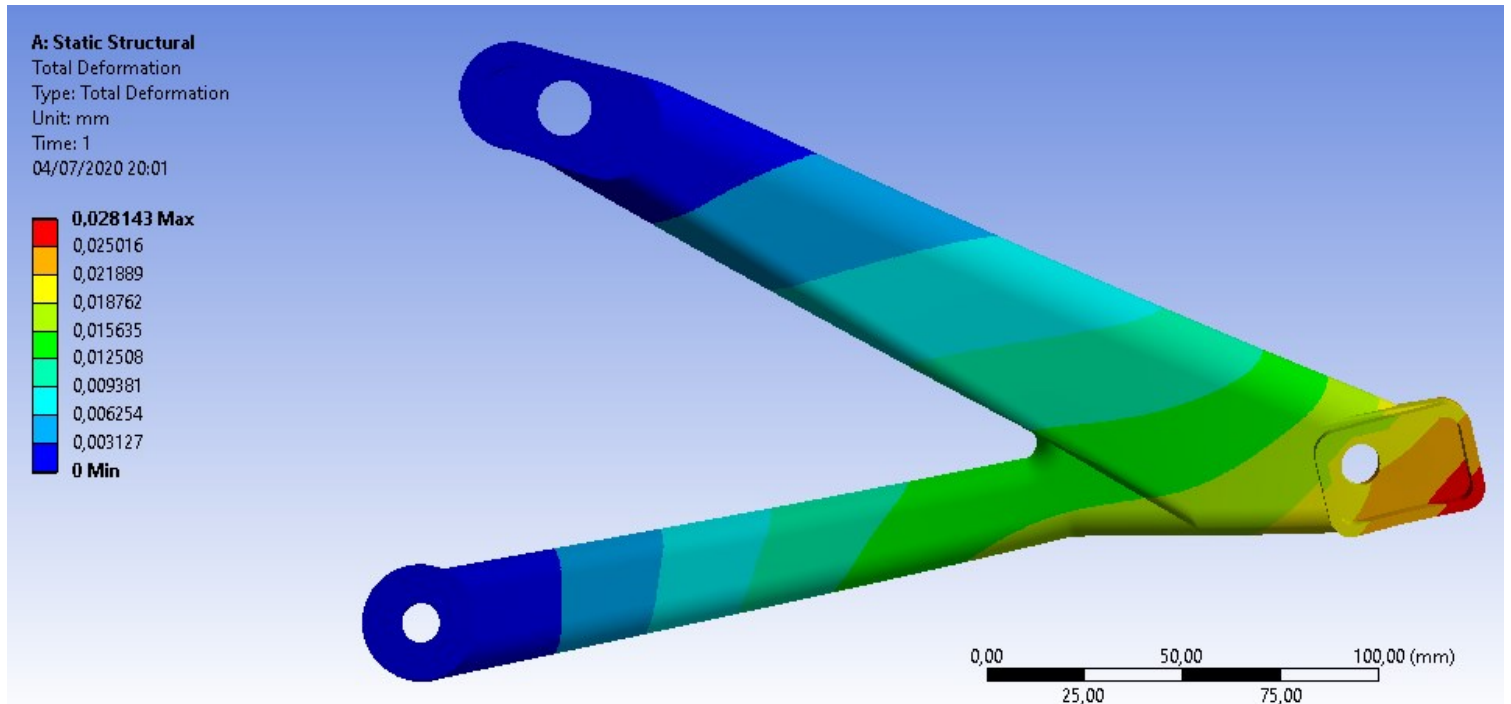


SIMULAZIONI FORCELLA RICOSTRUITA:

MATERIALE: lega di alluminio

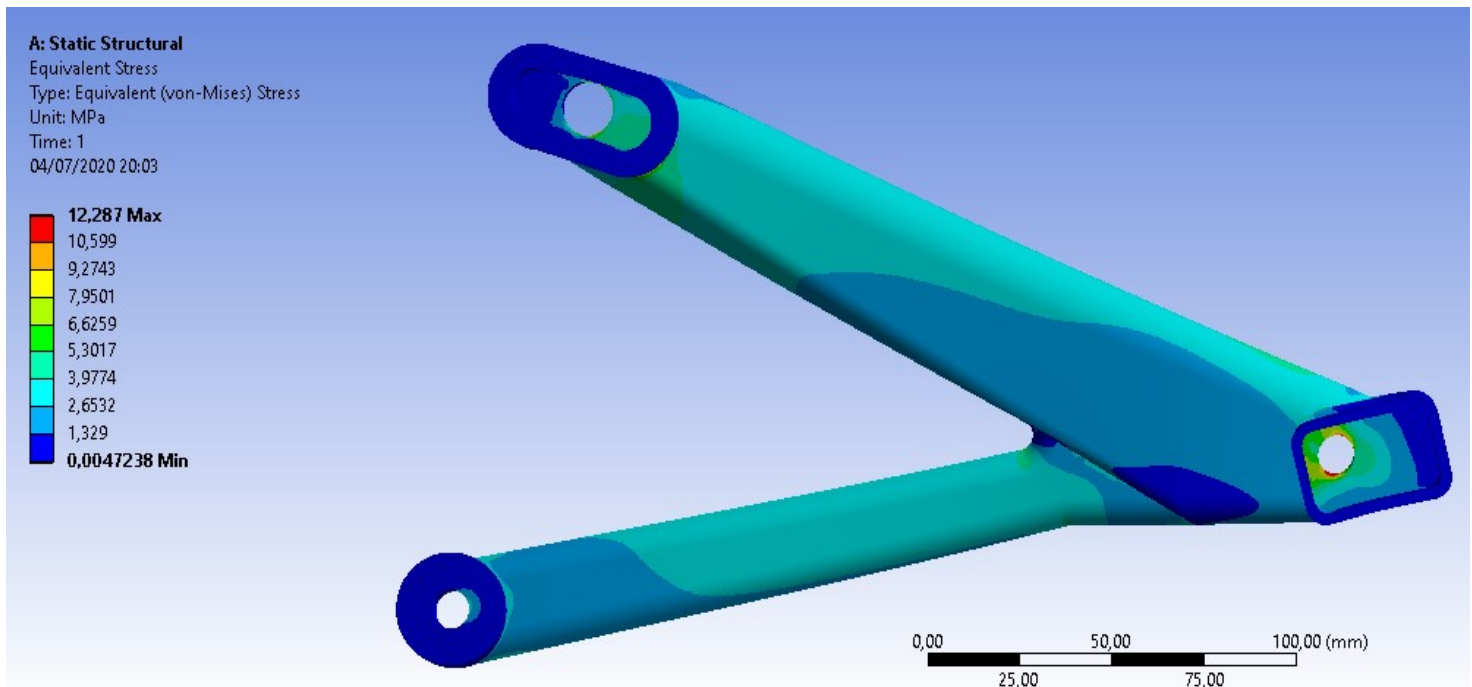
PESO: 0,310 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,028143 mm

TENSIONI:



La tensione massima è di 12,287 Mpa , molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

CONCLUSIONI FINALI PER LEGA DI ALLUMINIO:

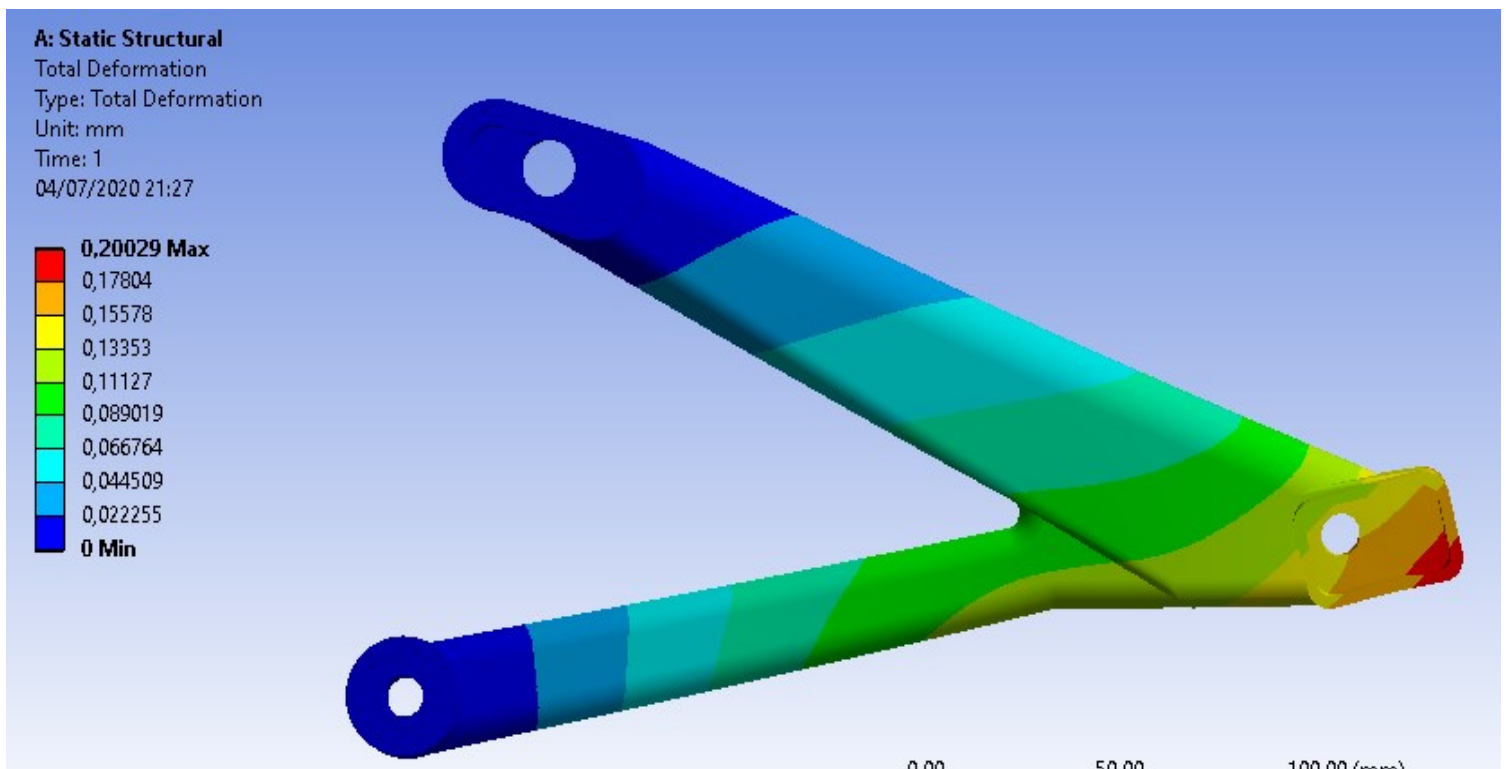
Le simulazioni della forcella ricostruita dimostrano che tramite il software, opportuni tentativi e conoscenze, si è riusciti a riprogettare una forcella che pesi 0,210 kg di meno dell'originale e sia più rigida, infatti lo spostamento massimo arriva a 0,028143 mm confronto lo 0,21959 mm della forcella originale.

Tutto ciò può essere preso in considerazione anche per una futura produzione dell'azienda con tecniche tradizionali.

MATERIALE: Carbon PA

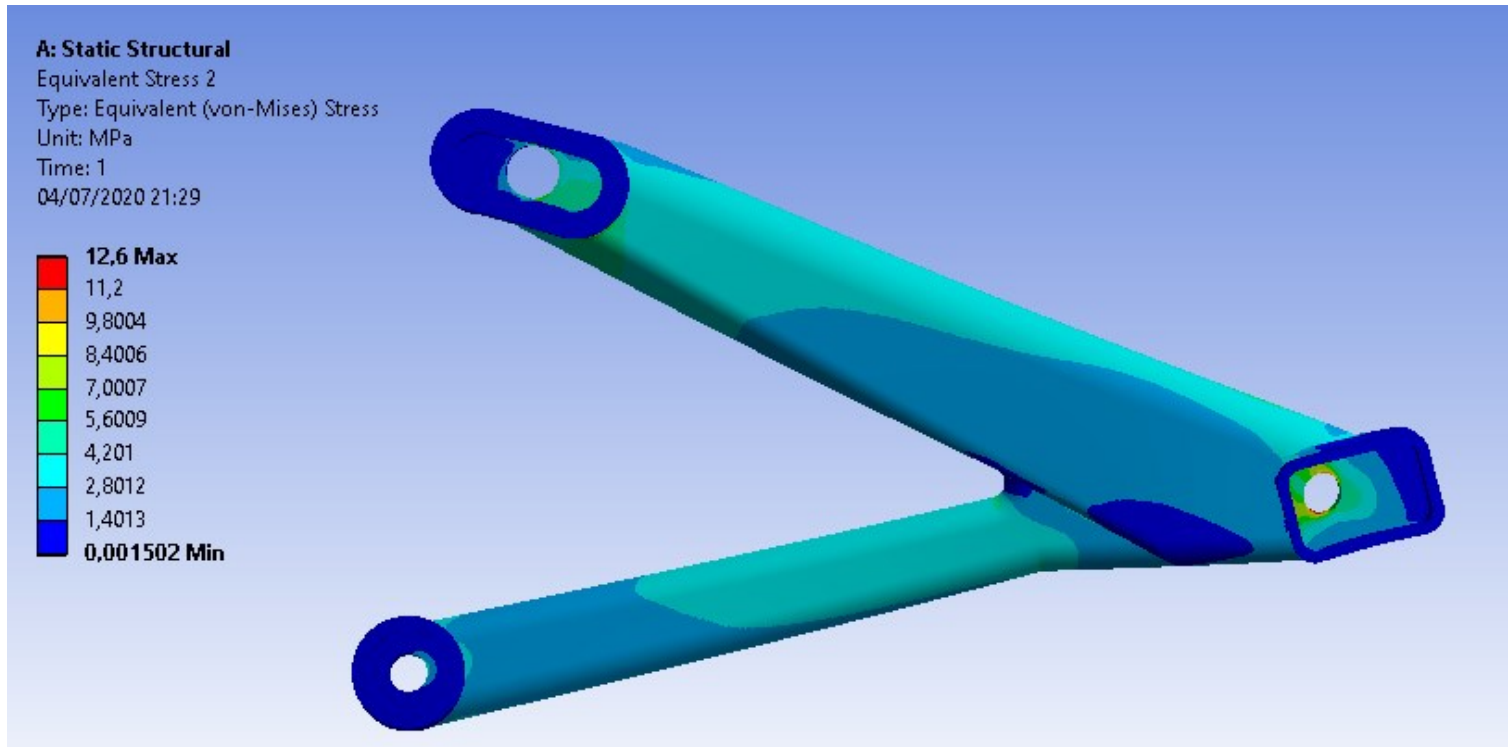
PESO: 0,134 kg

SPOSTAMENTI:



Dove lo spostamento massimo arriva a 0,20029 mm

TENSIONI:



La tensione massima è di 12,6 Mpa , molto al di sotto della tensione di rottura e snervamento.

CONCLUSIONI FINALI PER CARBON PA:

In questa ricostruzione simulata con il Carbon PA siamo riusciti ad ottenere il massimo delle performance , perché il peso è di 0,134 kg, cioè 0,396 kg in meno rispetto alle originali, lasciando lo spostamento massimo pressochè invariato. Questi dati dimostrano che i materiali per l'Additive Manufacturing stanno facendo dei grandi passi avanti e in un futuro sicuramente si arriverà a materiali di altissima tecnologia super resistenti, che lasceranno indietro le tecniche tradizionali di produzione, avendo anche il vantaggio di creare geometrie complicate o addirittura impossibili per quest'ultime.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Wikipedia , “Produzione additiva”.
- 2) Joseph E. Shigley, Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett
“Progetto e costruzione di macchine“ (2020).
- 3) Roboze: “Carbon PA”
- 4) Pierangelo Andreini
“Manuale dell’ingegnere meccanico” (2019)
- 5) Smart Cae: “Ottimizzazione Topologica”

RINGRAZIAMENTI

Innanzitutto un particolare ringraziamento va al prof. Marco Rossi e al dott. Mattia Utzeri, che sono riusciti a seguirmi impeccabilmente durante l'evoluzione del lavoro svolto.

Sembrerà strano, ma già da quando avevo 10 anni scrissi su un tema in 5^a elementare (conservato tutt'ora) che da grande volevo fare l'ingegnere meccanico. Questo sogno finalmente si sta realizzando anche se so già che il percorso d'ora in poi sarà ancora lungo e tortuoso. In tutto questo tempo ci sono state delle persone che mi hanno sempre supportato e alle quali devo tanto: la mia famiglia. Vorrei ringraziare mio fratello Alessandro, mia sorella Fabrizia, i miei genitori Lorella e Lorenzo, mia nuora Francesca, mio cognato Christopher e i miei nipoti, che mi hanno aiutato e non hanno mai smesso di credere in me.

Grazie anche tutti i miei amici e parenti che hanno dato anche loro il contributo a rialzarmi e a farmi divertire in momenti nei quali pensavo di non farcela, in particolare un grande grazie va al mio amico d'infanzia Fabio che è la persona con cui condivido maggiormente la passione per la meccanica e con la quale abbiamo in serbo progetti futuri.

Grazie.