



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Utilizzo di sistemi di ottimizzazione topologica
per migliorare le performance
di strutture meccaniche**

**Use of topological optimization systems
to improve performance
of mechanical structures**

Relatore:

Chiar.mo Prof.
ROSSI MARCO

Tesi di Laurea di:

BADIOLI GIANLUCA

Anno Accademico 2019 - 2020

*“Alla mia famiglia,
che mi ha supportato durante questo percorso,
a me,
che non ha mai mollato e spera di essere d’aiuto alla società”*

INDICE

<u>INTRODUZIONE</u>	4
OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	4
WORKBENCH vs NTOPOLOGY	8
<u>ANALISI STATICA</u>	9
TEORIA BASE	9
<u>APPLICAZIONE DEI CONCETTI SULLA FORCELLA</u>	10
SCHEMA REALE DETTAGLIATO RUOTA POSTERIORE	14
SCHEMA FORZE E REAZIONI VINCOLARI	16
<u>OTTIMIZZAZIONE FORCELLA BI-BRACCIO</u>	20
<u>OTTIMIZZAZIONE MONO-FORCELLONE</u>	28
SCHEMA FORZE E REAZIONI VINCOLARI	30
SPESSORE BRACCIO 15 mm	33
SPESSORE BRACCIO 30 mm	36
SPESSORE BRACCIO 50 mm	38
<u>ANALISI STRUTTURALE MONO-FORCELLONE</u>	40
<u>CONCLUSIONI</u>	45
<u>RINGRAZIAMENTI</u>	49

INTRODUZIONE

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

L'obiettivo, come citato nel titolo, riguarda l'utilizzo di sistemi di ottimizzazione topologica per migliorare le performance di strutture meccaniche, in particolare il confronto tra due programmi differenti: Workbench e nTopology.

OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA

L'ottimizzazione topologica è una tecnica di simulazione al calcolatore 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.

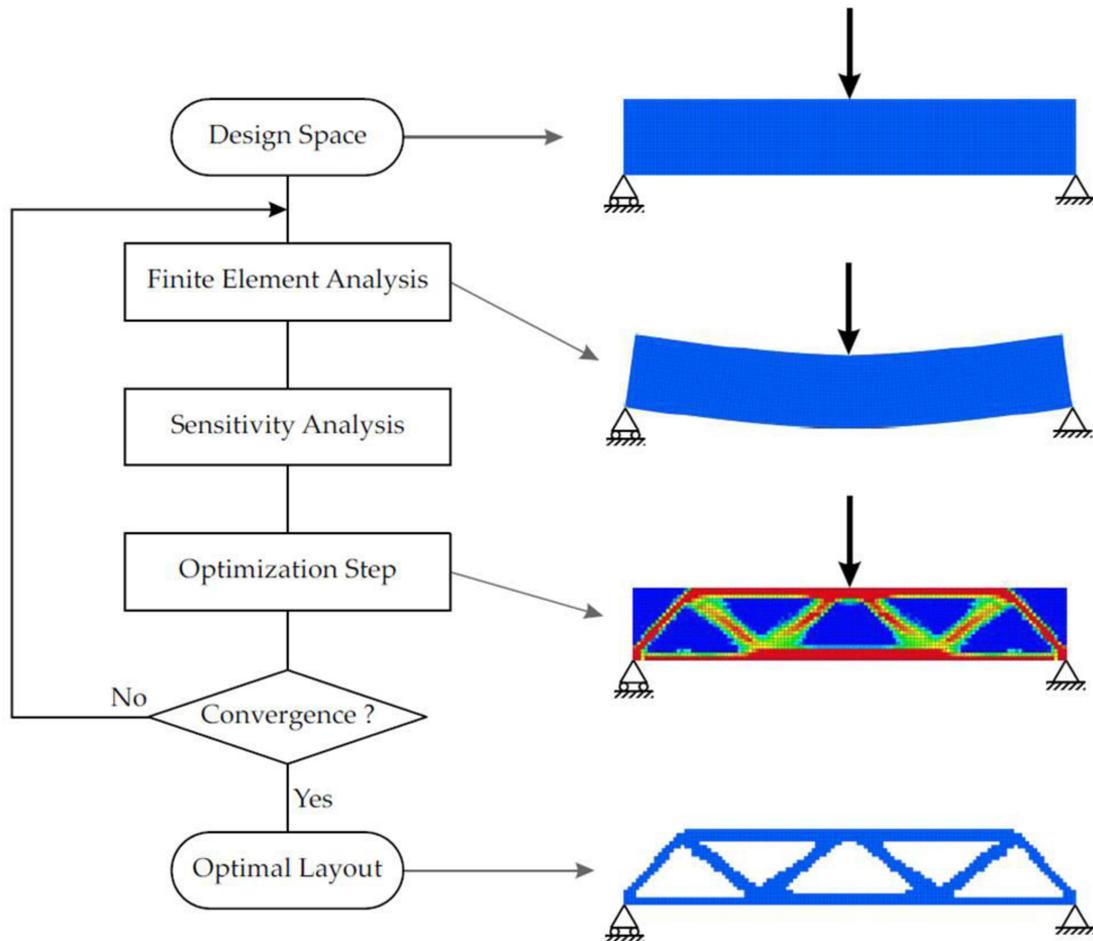
L'ottimizzazione topologica si dimostra uno strumento ideale nella fase concettuale del processo di progettazione che permette di arrivare rapidamente a proposte di forma concettuali abbastanza grossolane, pertanto che richiedono un raffinamento dei dettagli

costruttivi, ma che in ogni caso permette di ridurre drasticamente i tempi di molte iterazioni progettuali e, allo stesso tempo, fornisce indicazioni preziose al progettista su come fare a migliorare il disegno del prodotto.

L'ottimizzazione topologica può essere applicata praticamente in qualsiasi contesto strutturale.

L'obiettivo dell'Ottimizzazione Topologia è quello di trovare il layout ottimale di una struttura all'interno dello spazio disegno specificato, senza richiedere un layout iniziale del progetto. Pertanto, questa classe di algoritmi è in grado di determinare da sola caratteristiche come il numero ottimale di membri strutturali, le posizioni ottimali di fori di alleggerimento, ecc. In letteratura sono stati proposti molti approcci per questo tipo di ottimizzazione e quello più popolare, che risulta implementato nella maggior parte dei software commerciali è il metodo SIMP2.

L'ottimizzazione topologia parte da un modello continuo dello spazio di progettazione. In modo iterativo, il processo di ottimizzazione rimuove, o ri-distribuisce 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, l'Ottimizzazione Topologica a volte può portare a disegni molto sorprendenti.

L'approccio SIMP collega una funzione di densità relativa di elemento ad ogni elemento attivo dello spazio di progetto. La densità relativa degli elementi è una funzione reale che può variare qualsiasi valore compreso tra 0 e 1. Moltiplicando la matrice di rigidità e di massa degli elementi attivi con il valore di densità

relativa, si riesce a variare la distribuzione di rigidità e di massa con continuità.

Utilizzando le densità di elementi come parametro di ottimizzazione, si trasforma l'Ottimizzazione Topologica in un'ottimizzazione continua. Lo svantaggio principale di utilizzare la funzione di densità elemento relativa è che il layout finale che ottiene non è necessariamente un disegno 0-1, ma si potrebbero ricavare delle aree elementi che hanno una densità relativa con un valore intermedio. Tali distribuzioni sono difficili da interpretare fisicamente, e di solito si vuole evitare densità intermedie nel layout finale. Per guidare il layout verso un disegno di tipo 0-1, l'algoritmo SIMP utilizza un fattore di penalità esponenziale $p > 1$ per fare in modo che valori di densità intermedi risultano meno favorevoli in quanto la rigidità che producono è piccola in confronto al costo (volume di materiale). Questo approccio usualmente prende il nome di penalizzazione implicita. Per ottenere un disegno 0-1 usualmente si prende $p > 3$.

Le geometrie ottenute attraverso l'ottimizzazione topologica sono, solitamente, inusuali quindi difficile da realizzare con i metodi classici come l'asportazione di truciolo, la fusione etc. Si opta quindi per due soluzioni:

1. Si ricostruisce la geometria attraverso un software CAD
2. Si utilizza la tecnica dell'additive manufacturing

I vantaggi dell'additive manufacturing risiedono nella possibilità di poter distribuire il materiale in maniera praticamente impossibile con le tecniche di produzione tradizionali, ottenendo componenti

dalla forma estremamente ottimizzata da un punto di vista strutturale. Per contro questa ampia libertà di distribuire il materiale richiede un nuovo approccio alla progettazione in quanto i metodi tradizionali potrebbero limitare i vantaggi dell'additive manufacturing.

L'ottimizzazione topologica si rivela vincente anche nel contesto della produzione additiva in quanto permette di sintetizzare la forma migliore per il prodotto, individuando in automatico le zone nelle quali è necessario prevedere il materiale, da quelle che potrebbero essere scavate o svuotate in quanto il contributo di quel materiale è marginale per il raggiungimento delle prestazioni desiderate. Il tutto senza dover rispettare i vincoli delle tecnologie di produzione tradizionali.

WORKBENCH vs NTOPOLOGY

Workbench è un programma in circolazione e usato da parecchi anni, quindi, è appurato che i risultati ottenuti siano veritieri e applicabili a delle situazioni reali. nTopology è un programma che è sul mercato solamente dal 2018 quindi non ha un background vasto come il primo. La principale differenza tra i due è che la funzione di ottimizzazione topologica in Workbench è stata implementata solamente successivamente e il programma è pensato per svolgere svariati compiti mentre, nTopology, è stato principalmente pensato per compiere ottimizzazioni topologiche e quindi si pensa che sia meglio ottimizzato. Come componente sul

quale eseguire l'ottimizzazione topologica è stato scelto un forcellone motociclistico, con l'obiettivo di ridurre il peso e mantenere una rigidità ragionevole rispetto ad un forcellone già installato e funzionante nella moto.

ANALISI STATICA

TEORIA BASE

Per compiere l'ottimizzazione topologica del nostro modello, come primo passo, si inizia dalla teoria base che c'è dietro così da avere una visione chiara di ciò come si andrà a procedere.

Si presuppone innanzitutto che il sistema da studiare sia in quiete o, al più, si muova a velocità costante.

Le equazioni cardine che stanno alla base dello studio sono le "equazioni cardinali della statica". Le suddette si dividono in:

- 1) I equazione cardinale della statica $\rightarrow \Sigma F = 0$
- 2) II equazione cardinale della statica $\rightarrow \Sigma M = 0$

La prima equazione cardinale della statica impone che la somma di tutte le forze agenti su un sistema sia nulla. Con la parola forze si intendono sia le forze esterne sia le reazioni vincolari.

La seconda equazione cardinale della statica impone che la somma di tutti i momenti, generati dalle forze agenti sul sistema, rispetto ad un polo sia nulla. Quando si verificano queste condizioni si dice che il sistema è in equilibrio.

APPLICAZIONE DEI CONCETTI SULLA FORCELLA

Per trovare le forze agenti sulle nostre forcelle si sono inseriti i dati (reali e ipotizzati) nelle formule precedentemente illustrate. Inizialmente si sono dovuti presupporre diversi dati riguardo al motore, rapporto di trasmissione, al peso del pilota e della moto. Di seguito sono riportati i dati che sono stati utilizzati.

MASSA			
Massa Moto [Kg]	Massa pilota [Kg]	Massa totale [Kg]	Peso [N]
22	80	102	1000,62

RAPPORTO DI TRSMISSIONE		
Denti pignone	Denti corona	Rapporto di trasmissione
6	60	0,1

MOTORE			
Cilindrata [cc]	Tipologia motore	Potenza [kw]	Potenza [cv]
50	Monocilindrico	13,2	18
Numero di giri pignone a regime massimo [rpm]			16000
Velocità angolare pignone a regime massimo [rad/s]			1675,52

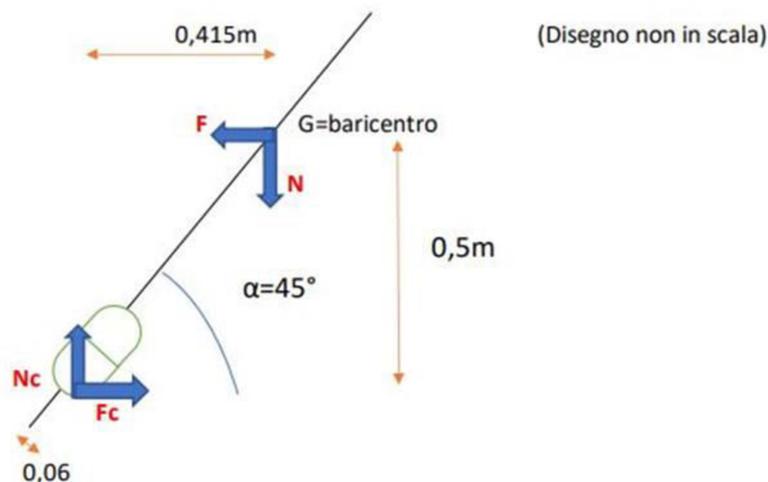
Ruota posteriore e mozzo	
Numero di giri ruota a regime massimo [rpm]	1600
Velocità angolare ruota a regime massimo [rad/s]	167,47
Raggio ruota [m]	0,15

Le caselle con sfondo giallo contengono tutti i dati che sono stati ipotizzati mentre quelle con sfondo azzurro contengono tutti dati presi da componenti reali.

Per effettuare i calcoli delle forze agenti sulle nostre forcelle è stato preso in considerazione solamente la condizione a moto piegata di 45° perché è il caso in cui, il sistema, è soggetto a maggiori sollecitazioni.

IPOTESI:

- Curva a velocità costante
- Angolo di piega $\alpha = 45^\circ$
- Distanza tra baricentro e punto di appoggio gomma
 $\hat{i} X = 0,415 \text{ m}$
 $\hat{j} Y = 0,5 \text{ m}$
- Distanza da punto di appoggio gomma-asfalto a retta baricentrica $d = 0,06 \text{ m}$



Avendo supposto che si sta effettuando la curva a velocità costante, non ci sarà un trasferimento di carico sul posteriore (fase di accelerazione) o sull'anteriore (fase di decelerazione) quindi il peso, precedentemente ipotizzato, sarà ripartito equamente.

$$\begin{cases} N_c = N \\ F_c = F \\ N_c \cdot X - F_c \cdot Y = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} N_c = N = 500,31 \text{ N} \\ F_c = F \\ F_c = \frac{N_c \cdot X}{Y} = 415,26 \text{ N} \end{cases}$$

Avendo supposto la curva a velocità costante, sulla forcella agirà anche una forza dovuta al tiro della catena. Per poter calcolare tale forza, si sono dovute ricavare la coppia generata dal motore e, successivamente, la si è trasportata sul mozzo utilizzando il raggio della corona.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{13200 \text{ [w]}}{167,4 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]} = 78,822 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

$$T_m = \frac{M}{R_{corona}} = \frac{78,822 [N \cdot m]}{0,07 [m]} = 11256 N$$

REAZIONI VINCOLARI

$$N_c = 500,31 N$$

$$F_c = 415,26 N$$

In questa configurazione ci potrebbero essere degli scivolamenti laterali della ruota dovuti alla forza tangenziale F_c , rendendo inutili tutti i calcoli effettuati, poiché gli scivolamenti assorbirebbero gran parte della forza o, nella peggiore delle ipotesi, la renderebbero anche nulla in caso di caduta. Di conseguenza si procede alla verifica della stabilità laterale.

IPOTESI:

- Coefficiente di attrito $\mu = 1$

Verifico che $N_c > \frac{F_c}{\mu}$

$$500,31 > \frac{415,26}{1} \rightarrow \text{Verificato}$$

Per completezza si procede con il calcolo dell'accelerazione laterale $(a)^*$ e il rapporto rispetto all'accelerazione gravitazionale $(g)^{**}$.

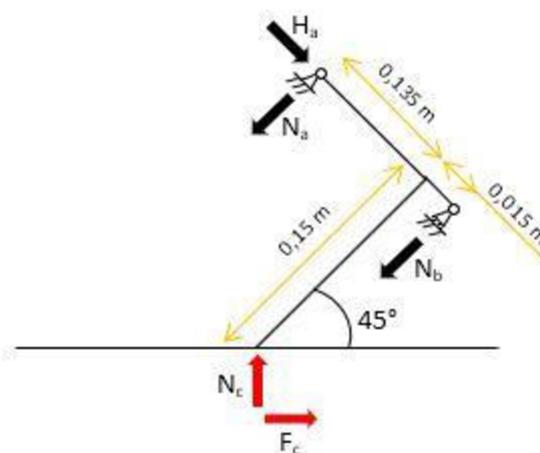
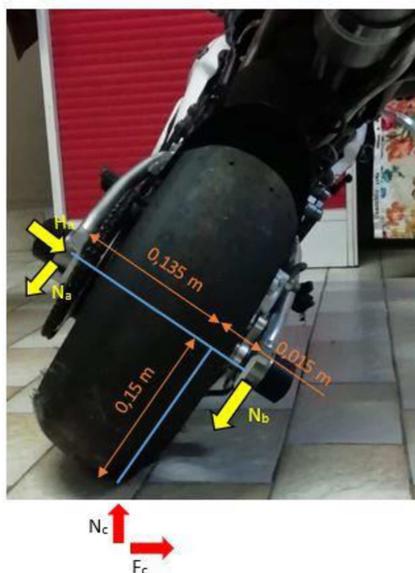
$$* a = \frac{F_c}{m} = \frac{415,26}{102} = 4,0712 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Dal precedente risultato si può notare che è presente un rapporto costante V^2/R pari a quel valore dove V è la velocità della moto e R è il raggio della curva che sta affrontando.

$$** \frac{a}{g} = \frac{4,0712}{9,81} = 0,415 \text{ [adimensionale]}$$

SCHEMA REALE DETTAGLIATO RUOTA POSTERIORE

Calcolati quali sono i valori delle forze N_c e F_c , applicati sulla gomma e, tenendo conto dell'angolo di piega di 45° , si possono ricavare quali sono le forze agenti sulle due forcelle. Tenendo in considerazione il fatto che la moto ha una piega di 45° il punto di appoggio non sarà nella mezzeria dello pneumatico bensì sarà spostato verso il lato della piega di un certo valore (60 mm). Per questo motivo, l'asse della ruota non è centrato rispetto l'asse del mozzo ma è spostato verso destra.



$$\begin{cases} F_c + H_a \cos 45^\circ - N_a \cos 45^\circ - N_b \cos 45^\circ = 0 \\ N_c - (N_b + N_a + H_a) \sin 45^\circ = 0 \\ N_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 - \cos 45^\circ \cdot 0,15) + F_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 + \cos 45^\circ \cdot 0,15) + \\ - N_b \cdot 0,15 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_c + H_a \cos 45^\circ - N_a \cos 45^\circ - N_b \cos 45^\circ = 0 \\ N_c - (N_b + N_a + H_a) \sin 45^\circ = 0 \\ N_b = \frac{N_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 - \cos 45^\circ \cdot 0,15) + F_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 + \cos 45^\circ \cdot 0,15)}{0,15} \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_c + H_a \cos 45^\circ - N_a \cos 45^\circ - N_b \cos 45^\circ = 0 \\ N_a = \frac{N_c}{\sin 45^\circ} - N_b - H_a \\ N_b = 522,6 \text{ N} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{F_c}{\cos 45^\circ} + H_a - \frac{N_c}{\sin 45^\circ} + N_b + H_a - N_b = 0 \\ N_a = \frac{N_c}{\sin 45^\circ} - N_b - H_a \\ N_b = 522,6 \text{ N} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_a = \left(\frac{N_c}{\sin 45^\circ} - \frac{F_c}{\cos 45^\circ} \right) = 60,13 \text{ N} \\ N_a = \frac{N_c}{\sin 45^\circ} - N_b - H_a \\ N_b = 522,6 \text{ N} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_a = 60,13 \text{ N} \\ N_a = 124,81 \text{ N} \\ N_b = 522,6 \text{ N} \end{cases}$$

Quindi le forze che agiscono sulle forcelle sono:

$$\left. \begin{array}{l} N_a = 124,81 \text{ N} \\ H_a = 60,13 \text{ N} \end{array} \right\} \text{ Agenti nella forcella sinistra}$$

$$N_b = 522,6 \text{ N} \left. \vphantom{N_a} \right\} \text{ Agente nella forcella destra}$$

SCHEMA FORZE E REAZIONI VINCOLARI

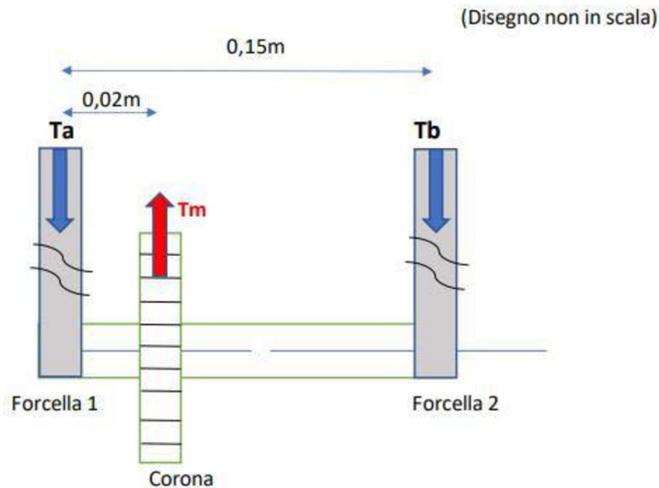
RUOTA POSTERIORE

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 0 \\ -T_a + T_m - T_b = 0 \\ T_b \cdot 0,15 - T_m \cdot 0,02 = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 0 \\ -T_a + T_m - T_b = 0 \\ T_b = \frac{T_m \cdot 0,02}{0,15} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 0 \\ T_a = T_m - T_b \\ T_b = 150,14 \text{ N} \end{array} \right.$$

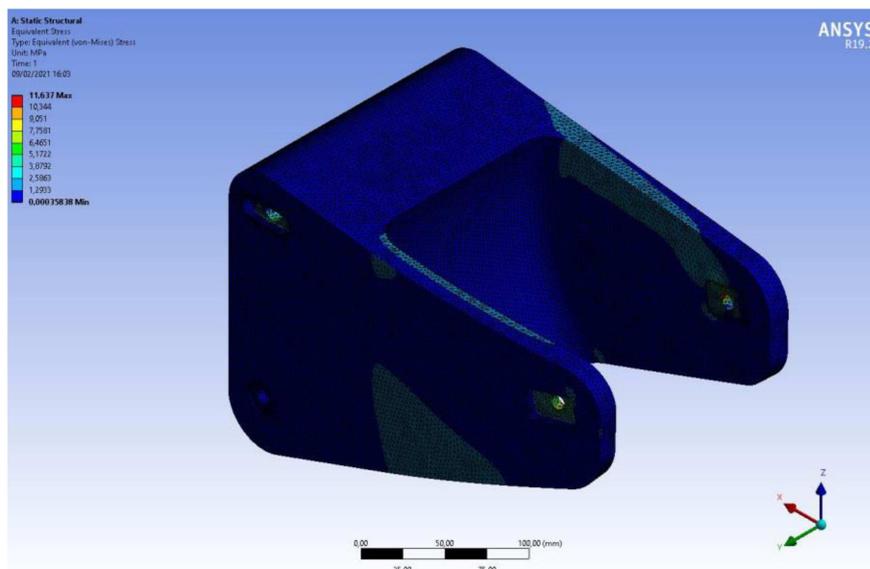
$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 0 \\ T_a = 975,89 \text{ N} \\ T_b = 150,14 \text{ N} \end{array} \right.$$

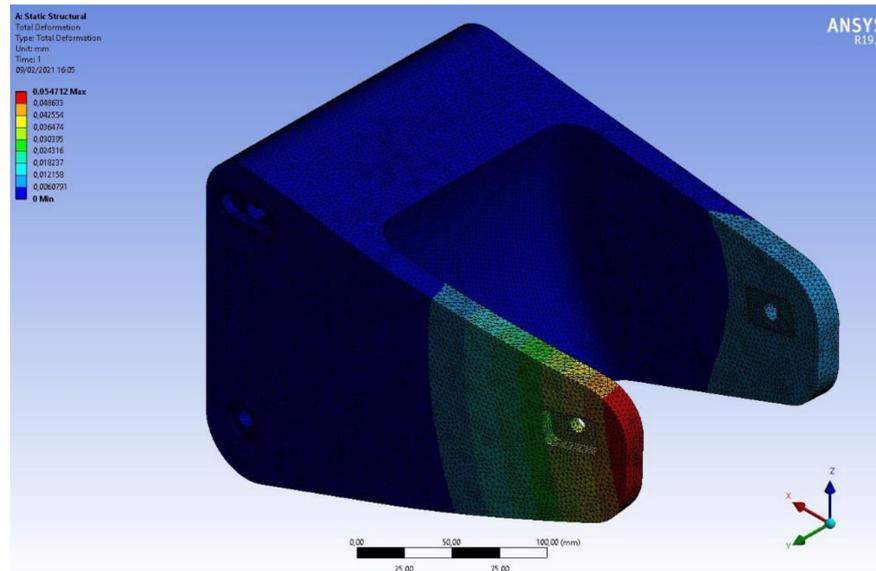


Come si può notare la corona, essendo a sinistra della mezzeria, fa caricare più la forcella sinistra rispetto quella destra.

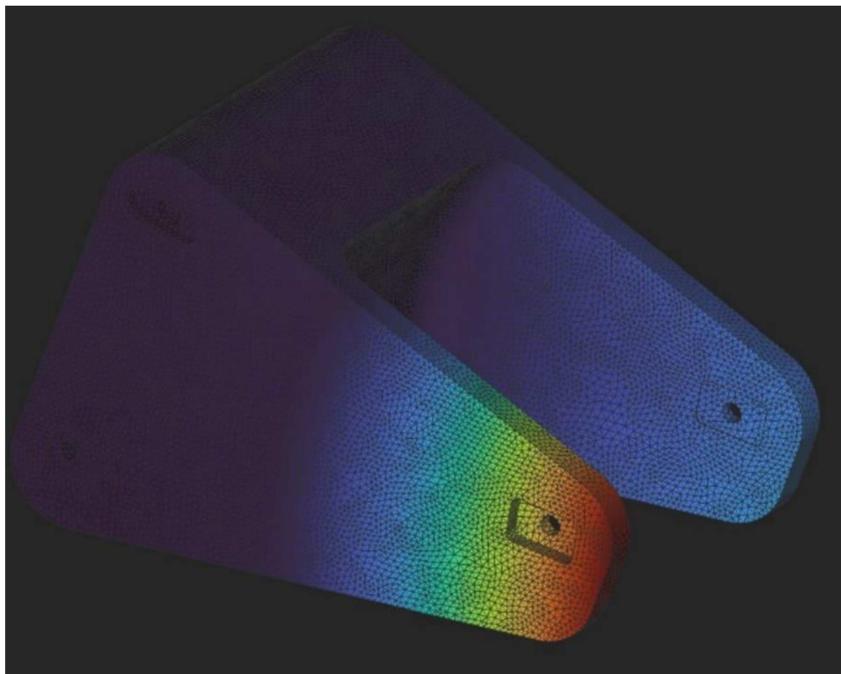
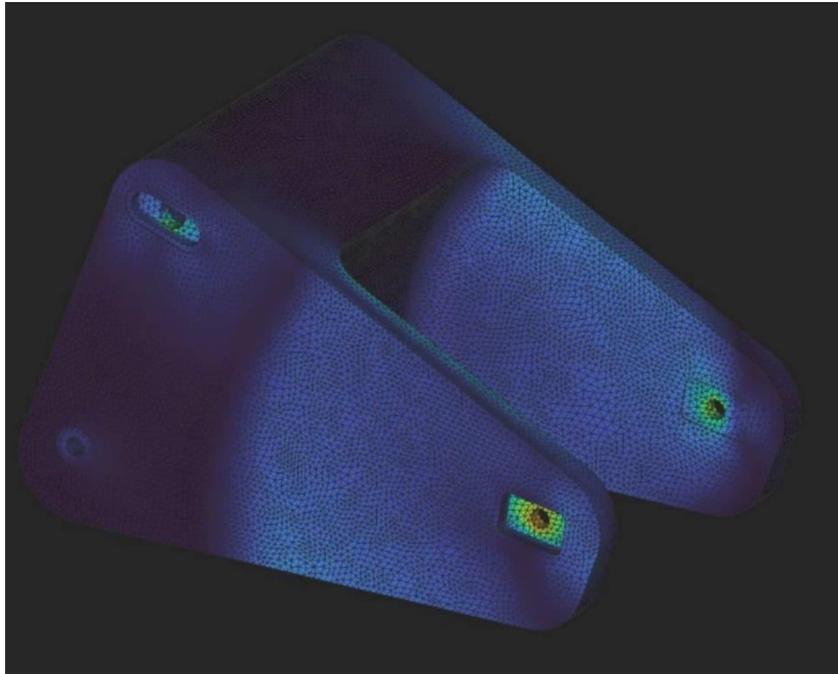
Riassumendo, sulla forcella di sinistra agiscono la forza peso N_a , H_a e la forza T_a , e sulla forcella di destra agiscono le forze N_b e T_b . Si ricorda che N_b e $T_{a/b}$ sono ortogonali tra loro.

Effettuando l'analisi strutturale del componente grezzo si otterranno dei dati di partenza da confrontare con quelli ottenuti dalle ottimizzazioni topologiche.





La massa del grezzo è di 11,126 kg. Si può facilmente notare che la tensione massima è pari a 11,637 MPa ed è in prossimità dei fori dove vengono applicate le forze mentre lo spostamento massimo è di 0,0547 mm nella forcella di sinistra. Dalla distribuzione delle tensioni si può vedere che, il componente, è per la maggiore di colore blu, dimostrando che non è quasi per nulla sollecitato quindi c'è un ampio margine di ottimizzazione. La stessa analisi strutturale è stata effettuata con nTopology e si sono ottenuti gli stessi risultati.



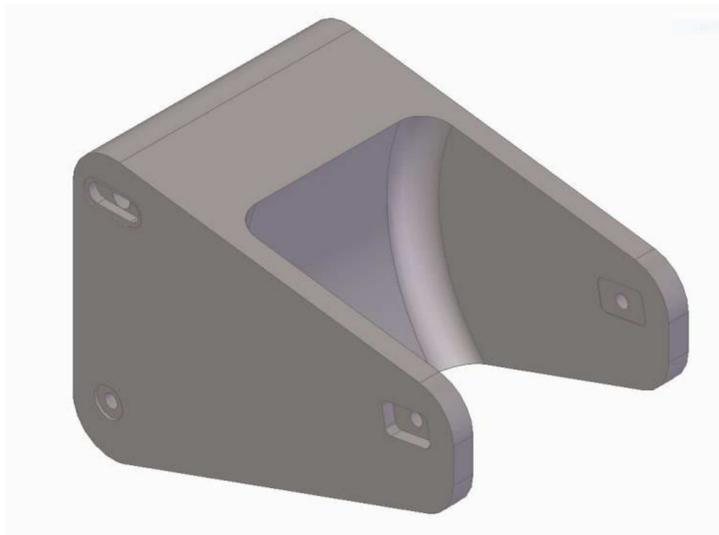
OTTIMIZZAZIONE FORCELLA

BI-BRACCIO

Ora che sono note tutte le forze, di può procedere con l'ottimizzazione della forcella bi-braccio.

Inizialmente si è costruito, tramite l'utilizzo di "Solid Edge", il grezzo della forcella. Questo primo provino comprende la forcella destra e la forcella sinistra (di spessore pari a 15 mm ognuna) unite insieme in modo da formare un unico corpo, così, attraverso il risultato che è ottenuto, si può capire se la configurazione a forcelle singole, la quale è stata applicata alla minimoto, è quella più efficace. Gli unici vincoli che sono stati imposti nel disegnare il grezzo sono stati:

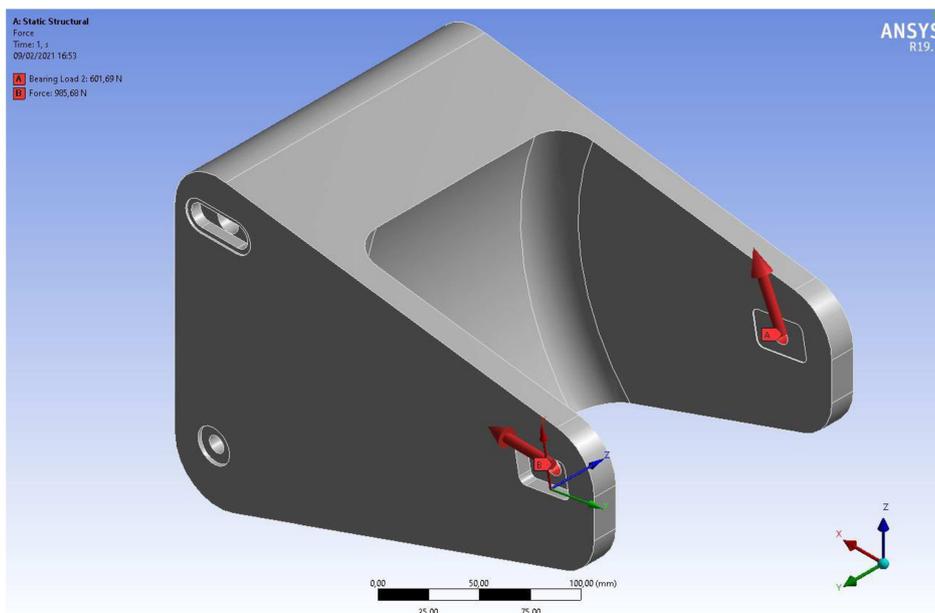
la posizione dei fori, delle asole e gli ingombri in modo da evitare eventuali interferenze con altri componenti.



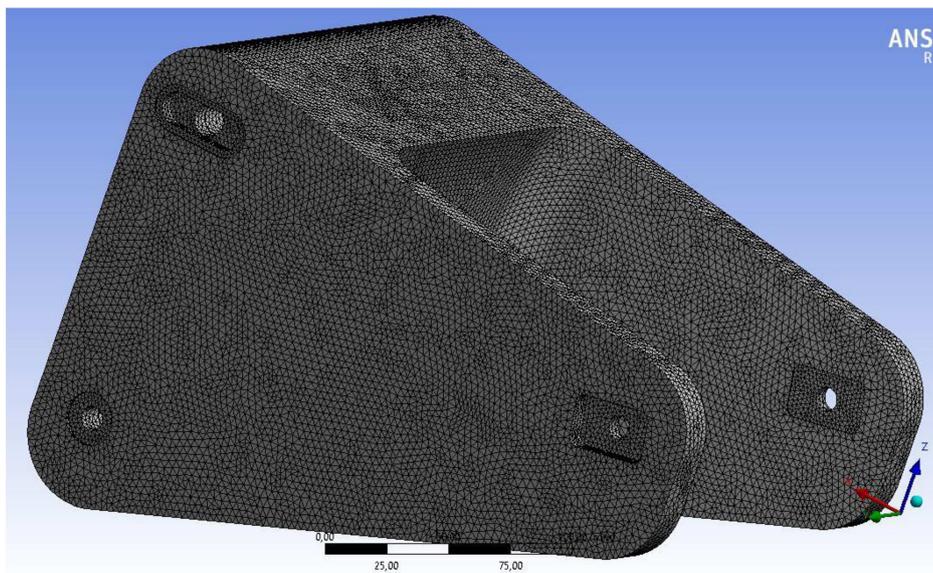
Importando il file CAD nel formato .step all' interno di Workbench; e selezionando il materiale con il quale verrà realizzata la forcella che, in questo caso, è una lega di alluminio che ha le seguenti proprietà:

- Densità: 2700 kg/m^3
- Modulo di Young (E): 70000 MPa
- Coefficiente di Poisson: $0,33$
- Modulo di elasticità tangenziale: 25000 MPa
- Carico di snervamento a trazione: 400 Mpa

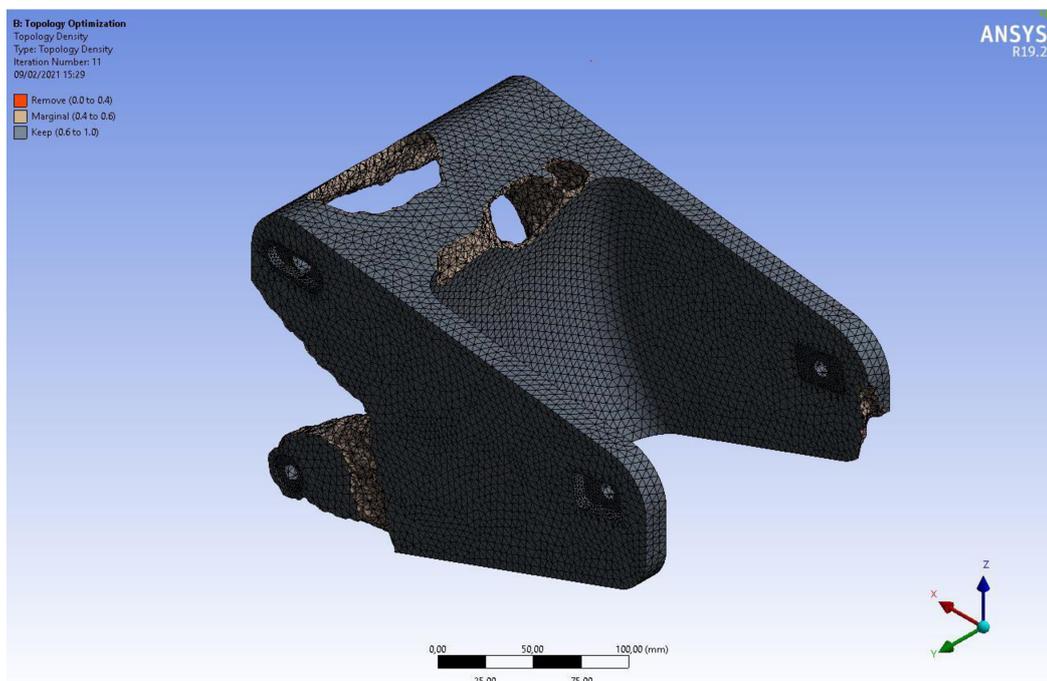
Il sistema di riferimento del programma non è quello più ottimale per permettere una facile e chiara impostazione delle forze nel componente. Si è creato quindi, un altro sistema di riferimento che ha origine nella superficie inferiore al foro del mozzo asse X ortogonale a essa, asse Y rivolto verso il retro ed asse Z rivolto verso l'interno della forcella.



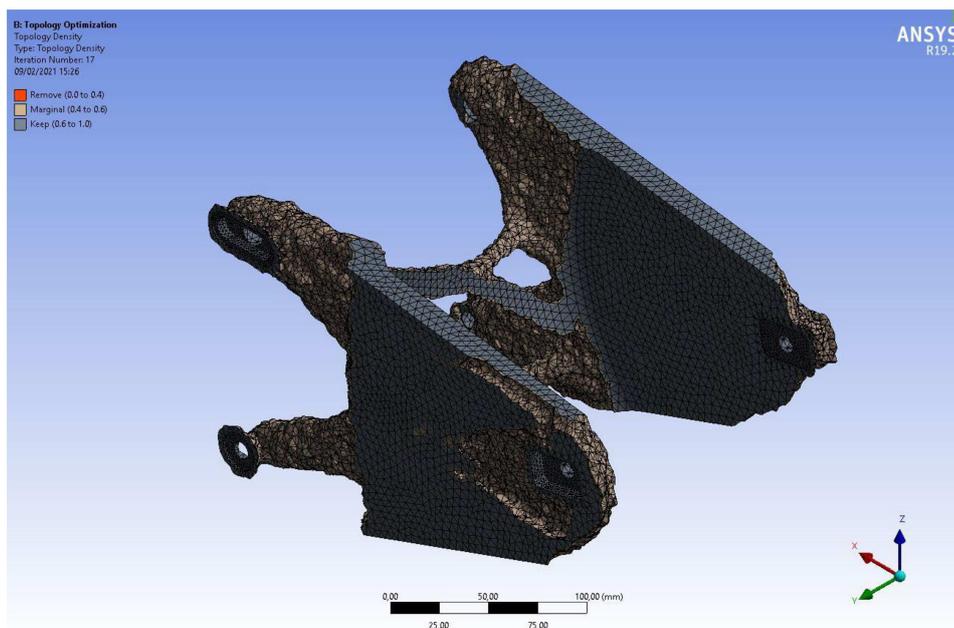
Utilizzando una mesh di 3 mm per l'intero componente e aumentando la sua risoluzione fino a 2 mm nelle superfici più complesse come quelle di collegamento tra forcella-telaio e forcella-mozzo. La scelta della dimensione della mesh è dettata dalle limitazioni dell'hardware con il quale sono effettuate le ottimizzazioni. Scegliendo diversamente una mesh con dimensione minore, il tempo computazionale per generarle sarebbe diventato troppo elevato. Successivamente, vengono imposte le forze che sono state applicate nei fori dove va inserito il perno della ruota. La forcella è stata vincolata in 3 direzioni (x, y, z) nei 4 fori di collegamento con il telaio.



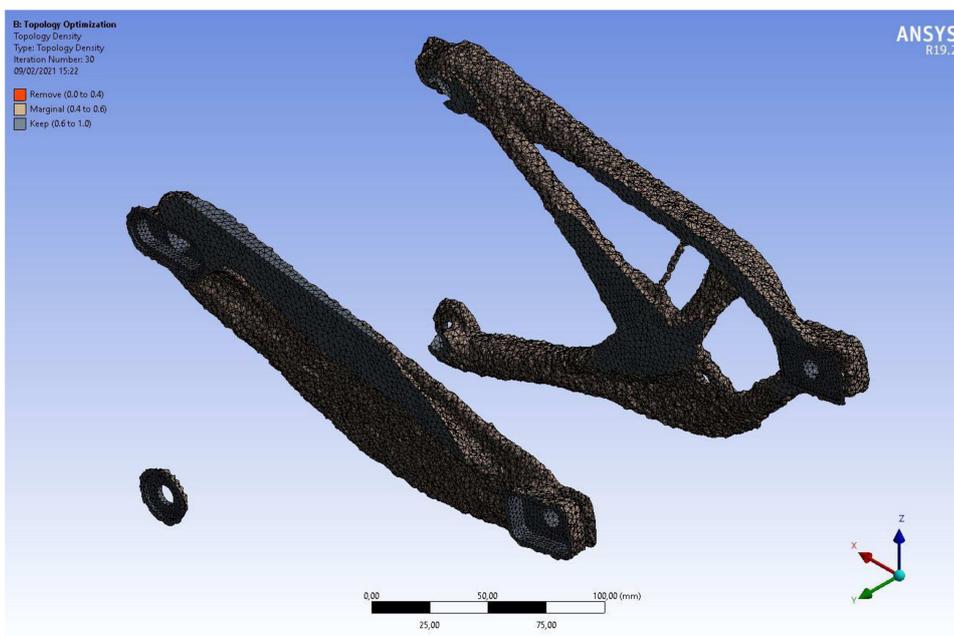
Workbench ottimizza l'intero volume del componente in analisi ma, in questo caso, escludendo le regioni non interessate all'ottimizzazione topologica. Le superfici escluse sono quelle appartenenti ai collegamenti tra forcella-telaio e forcella-ruota perché, se modificate, sarebbe venuto a mancare l'accoppiamento tra i vari componenti. Infine, imponendo al programma di conservare il 50% della massa iniziale, è stata avviata l'ottimizzazione topologica.



Si può notare che Workbench ha rimosso poco materiale quindi si è avvia un'altra ottimizzazione topologica al 20% della massa iniziale.



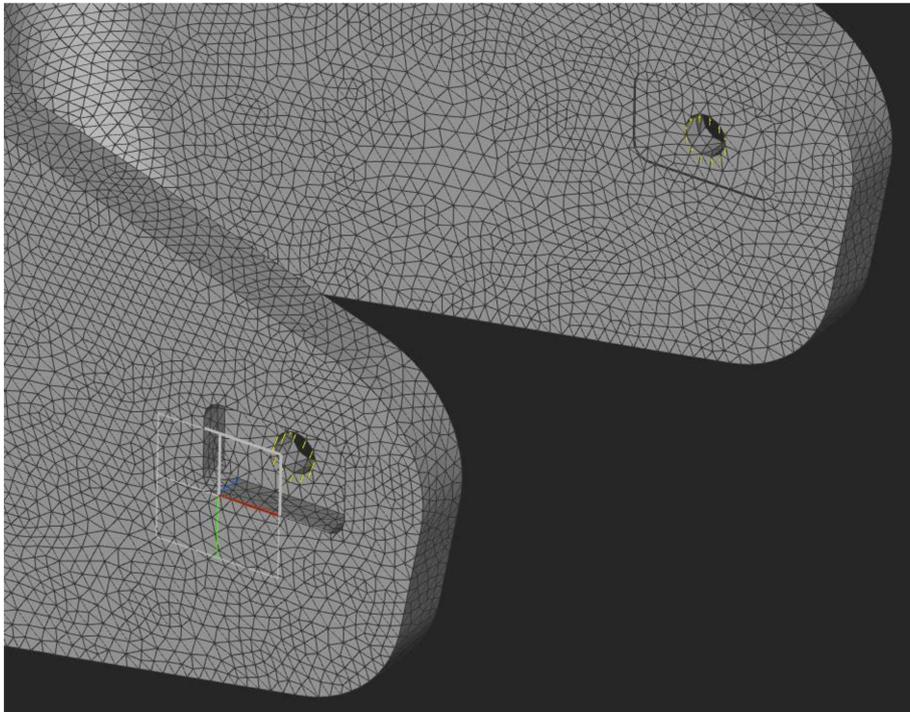
Dal risultato si nota che il programma ha fatto un tentativo di collegamento tra le due forcelle tramite due aste. Simultaneamente, c'è ancora margine di asportazione di materiale quindi si avvia un'altra ottimizzazione topologica al 5% della massa iniziale.



Si osserva che non c'è alcun tipo di collegamento tra le due forcelle e il materiale asportato è ragionevole quindi si prende come percentuale di ottimizzazione topologica da applicare anche alle successive quella del 5% della massa iniziale. La geometria delle due forcelle non rispecchia i canoni classici dell'ingegneria e le aste che le compongono non formano triangoli, dimostrando che la struttura potrebbe non essere molto rigida. Per poter effettuare un ulteriore confronto tra i due programmi, si ricavano, attraverso l'uso di HW monitor, le percentuali di utilizzo delle componenti del computer, il numero di iterazioni compiute da ciascun software e il tempo impiegato per l'ottimizzazione topologica partendo da quest'ultima.

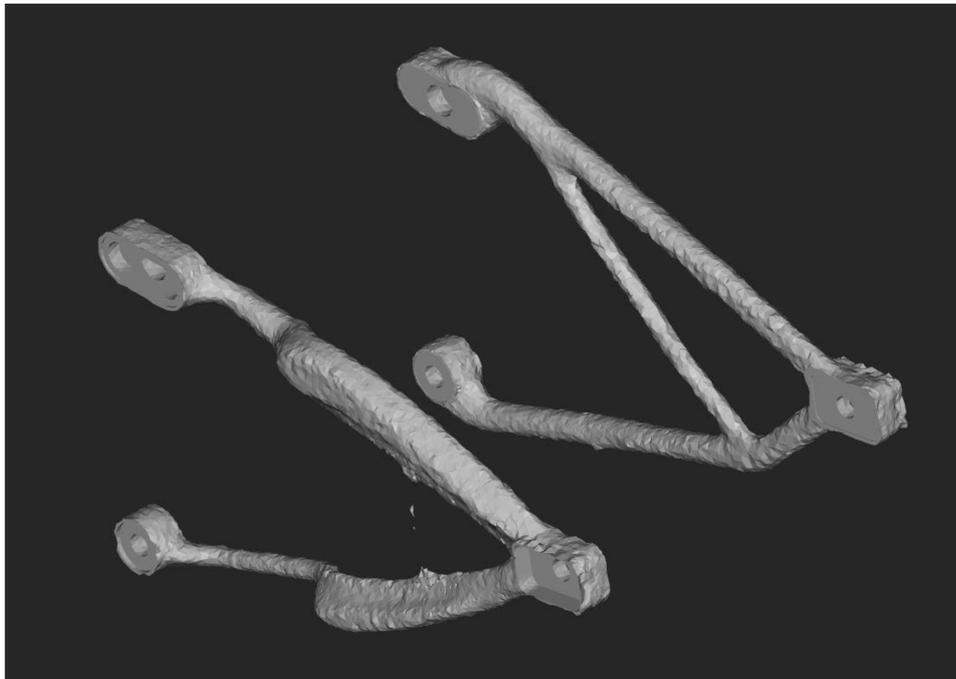
Workbench	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Bibraccio (15 mm)	0	99	0	3	25	99	73	9h 37min

Lo stesso provino è ottimizzato con nTopology, importando lo stesso CAD di partenza in formato .step; e impostate le medesime caratteristiche del materiale con il quale verrà realizzata la forcella. In questo programma, si è generato un altro sistema di riferimento perché quello di partenza non era adatto alle esigenze. Per permettere il confronto tra Workbench e nTopology, si utilizza una mesh di 3 mm per l'intero componente.



Impostate le forze che sono state applicate nei fori dove va inserito il perno della ruota; la forcella è vincolata in 3 direzioni (x, y, z) nei quattro fori di collegamento con il telaio. nTopology ottimizza l'intero volume del componente in analisi quindi, per le stesse motivazioni descritte in precedenza, si è dovuto escludere alcune regioni. La differenza sostanziale nella selezione delle aree da escludere dall'ottimizzazione topologica, tra Worckbench e nTop, è che nel primo è permesso scegliere delle superfici che non verranno ottimizzate, diversamente nel secondo, non è permesso selezionare delle superfici, ma si devono obbligatoriamente individuare dei volumi che non verranno interessati nell'ottimizzazione. Per realizzare quanto detto, si importa un file CAD in formato .step

contenete solo le regioni che saranno escluse dall'ottimizzazione topologica e generare la mesh di tali volumi. Infine, attraverso il blocco dell'ottimizzazione topologica, si impone al programma di conservare il 5% della massa iniziale, avviandolo.

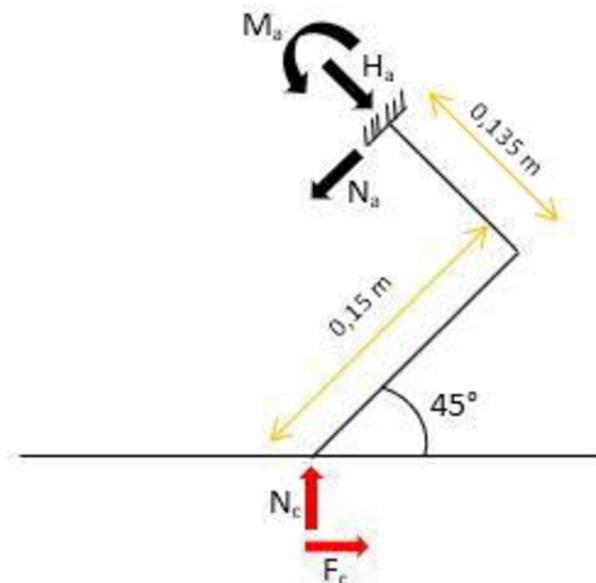


Dal risultato si nota che, anche nTopology, non connette le due forcelle ma le aste che le compongono formano triangoli e quindi costituiscono probabilmente una struttura rigida. Di seguito le percentuali di utilizzo delle componenti del computer, il numero di iterazioni e il tempo impiegato.

nTopology	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Bibraccio (15 mm)	0	100	0	30	36	70	58	1h 13min

OTTIMIZZAZIONE MONO-FORCELLONE

In seguito, procedendo con il togliere un braccio della forcella si otterrà un mono forcellone. Togliendo il braccio destro perché sollecitato lungo Y, si dà più enfasi alle forze agenti in due direzioni sulla forcella sinistra. Così facendo viene meno un vincolo, di conseguenza, per non rendere la struttura labile, si ipotizza che il vincolo sulla forcella sinistra si un incastro. Riprendendo i valori di N_c e F_c , si effettuano nuovamente i calcoli delle reazioni vincolari H_a , N_a e M_a tenendo sempre conto dell'angolo di piega di 45° .



$$\begin{cases} F_c + H_a \cos 45^\circ - N_a \cos 45^\circ = 0 \\ N_c - (N_a + H_a) \sin 45^\circ = 0 \\ N_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 - \cos 45^\circ \cdot 0,15) + \\ + F_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 + \cos 45^\circ \cdot 0,15) - M_a = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_c + H_a \cos 45^\circ - N_a \cos 45^\circ = 0 \\ N_c - (N_a + H_a) \sin 45^\circ = 0 \\ M_a = N_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 - \cos 45^\circ \cdot 0,15) + \\ + F_c (\sin 45^\circ \cdot 0,135 + \cos 45^\circ \cdot 0,15) \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_c + H_a \cos 45^\circ - N_a \cos 45^\circ = 0 \\ N_a = \frac{N_c}{\sin 45^\circ} - H_a \\ M_a = 78,38 \text{ N} \cdot \text{m} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{F_c}{\cos 45^\circ} + H_a - \frac{N_c}{\sin 45^\circ} + H_a = 0 \\ N_a = \frac{N_c}{\sin 45^\circ} - H_a \\ M_a = 78,38 \text{ N} \cdot \text{m} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_a = \left(\frac{N_c}{\sin 45^\circ} - \frac{F_c}{\cos 45^\circ} \right) = 60,13 \text{ N} \\ N_a = \frac{N_c}{\sin 45^\circ} - H_a \\ M_a = 78,38 \text{ N} \cdot \text{m} \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_a = 60,13 \text{ N} \\ N_a = 647,41 \text{ N} \\ M_a = 78,38 \text{ N} \cdot \text{m} \end{cases}$$

Quindi le forze e il momento che agiscono sulle forcelle sono:

$$N_a = 647,41 \text{ N}$$

$$H_a = 60,13 \text{ N}$$

$$N_b = 522,6 \text{ N} \cdot \text{m}$$

SCHEMA FORZE E REAZIONI VINCOLARI

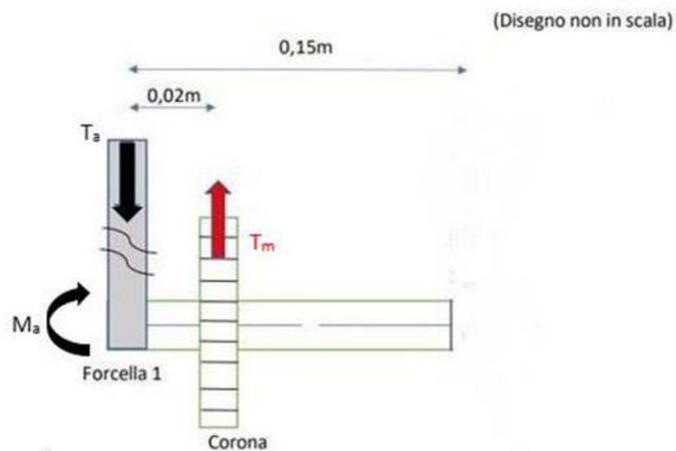
RUOTA POSTERIORE

$$\begin{cases} 0 = 0 \\ -T_a + T_m = 0 \\ M_a - T_m \cdot 0,02 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = 0 \\ -T_a + T_m = 0 \\ M_a = T_m \cdot 0,02 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = 0 \\ T_a = 1126 \text{ N} \\ M_a = 22,52 \text{ N} \cdot \text{m} \end{cases}$$

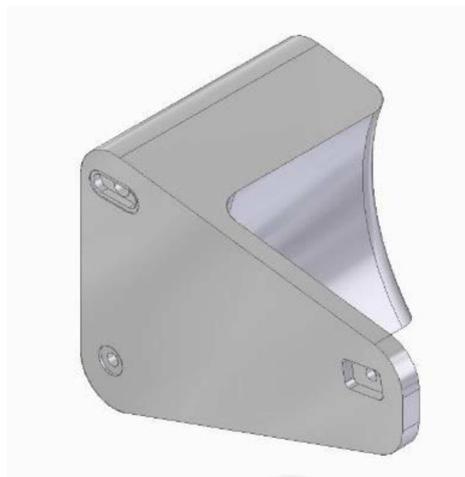
La forcella è sollecitata da una forza di stessa direzione, modulo e verso opposto del tiro della catena e il momento generato dal tiro della catena.



Ottenute le forze e il momento che agiscono sulla forcella, si procede con l'ottimizzazione del mono-braccio. Ottimizzando tre spessori differenti della forcella: 15 mm, 30 mm, 50 mm con l'obiettivo di vedere eventuali differenze nell'ottimizzazione.

Tutte le ottimizzazioni topologiche si effettuano sia con Workbench sia con nTopology. I successivi settaggi sono gli stessi per tutti i vari spessori.

Inizialmente si costruisce, tramite l'utilizzo di "Solid Edge", il grezzo della mono- forcella. Questo primo provino comprende la forcella sinistra (dei differenti spessori) unite ai fori di collegamento di destra in modo da formare un unico corpo. Gli unici vincoli che si sono imposti nel disegnare il grezzo sono: la posizione dei fori, delle asole e gli ingombri in modo evitano interferenze con le altre componenti.



Successivamente, si importa il file CAD nel formato .step all'interno di Workbench. Selezionando il materiale con il quale verrà realizzata la mono-forcella, una lega di alluminio con le seguenti proprietà:

- Densità: 2700 kg/m^3
- Modulo di Young (E): 70000 MPa
- Coefficiente di Poisson: $0,33$
- Modulo di elasticità tangenziale: 25000 MPa
- Carico di snervamento a trazione: 400 Mpa

Il sistema di riferimento del programma non è quello più ottimale per permettere una facile e chiara impostazione delle forze e dei momenti nel componente, quindi si crea un altro sistema di riferimento che ha origine nella superficie inferiore al foro del mozzo asse X ortogonale a essa, asse Y rivolto verso il retro ed asse Z rivolto verso l'interno della forcella. Utilizzando una mesh di 3 mm per l'intero componente e aumentando la sua risoluzione fino a 2 mm nelle superfici più complesse come quelle di collegamento tra forcella-telaio e forcella-mozzo. La scelta della dimensione della mesh è dettata dalle limitazioni dell'hardware con il quale sono effettuate le ottimizzazioni. Scegliendo diversamente una mesh con dimensione minore, il tempo computazionale per generarle sarebbe diventato troppo elevato. Successivamente, vengono imposte le forze che sono state applicate nei fori dove va inserito il perno della ruota. La forcella è stata vincolata in 3 direzioni (x, y, z) nei 4 fori di collegamento con il telaio.

Workbench ottimizza l'intero volume del componente in analisi ma, in questo caso, escludendo le regioni non interessate all'ottimizzazione topologica. Le superfici escluse sono quelle appartenenti ai collegamenti tra forcella-telaio e forcella-ruota perché, se modificate, sarebbe venuto a mancare l'accoppiamento tra i vari componenti.

Infine, imponendo al programma di conservare il 5% della massa iniziale, è stata avviata l'ottimizzazione topologica. Di seguito riporto i risultati ottenuti con spessori differenti.

SPESSORE BRACCIO 15 mm

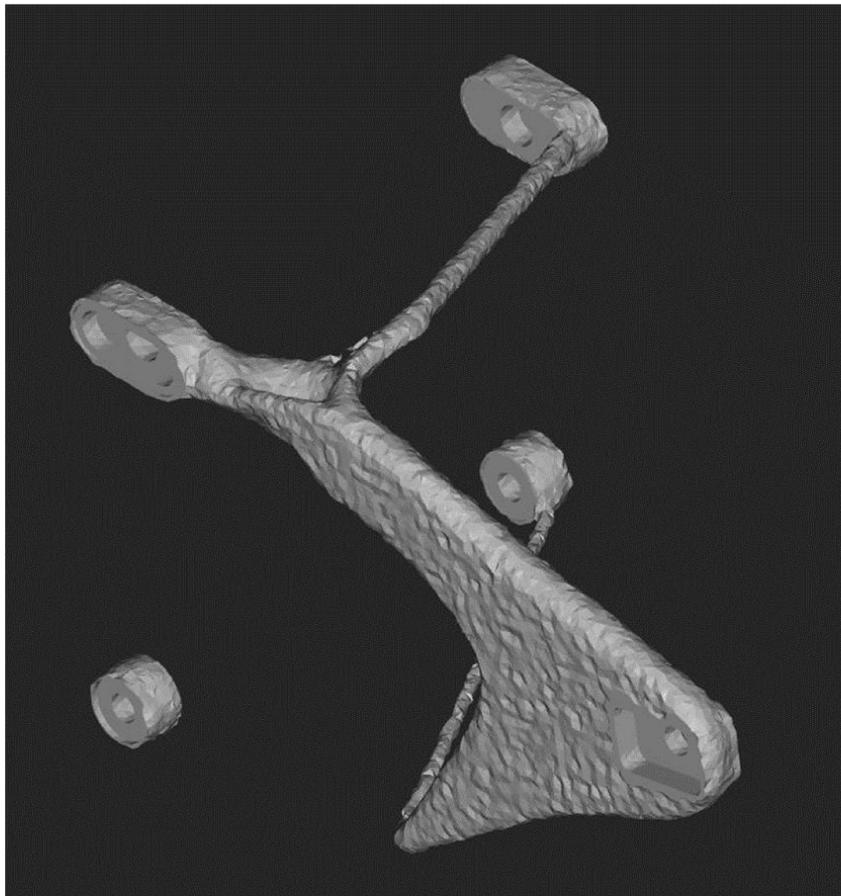


Si nota che Workbench non fa alcun tentativo di collegamento con i supporti opposti alla forcella e il materiale asportato da essa è veramente poco, si dimostra che che lo spessore di 15 mm è troppo basso per le tensioni che si creano all'interno del provino. Di seguito le percentuali di utilizzo delle componenti del computer, il numero di iterazioni e il tempo impiegato.

Workbench	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Monobraccio (15 mm)	0	96	0	4	15	97	21	2h 6min

Gli stessi provini sono ottimizzati con nTopology, importando lo stesso CAD di partenza in formato .step; e impostate le medesime caratteristiche del materiale con il quale verrà realizzata la forcella. In questo programma, si è generato un altro sistema di riferimento perché quello di partenza non era adatto alle esigenze. Per permettere il confronto tra Workbench e nTopology, si utilizza una mesh di 3 mm per l'intero componente. Impostate le forze che sono state applicate nei fori dove va inserito il perno della ruota; la forcella è vincolata in 3 direzioni (x, y, z) nei quattro fori di collegamento con il telaio. nTopology ottimizza l'intero volume del componente in analisi quindi, per le stesse motivazioni descritte in precedenza, si è dovuto escludere alcune regioni. La differenza sostanziale nella selezione delle aree da escludere dall'ottimizzazione topologica, tra Worckbench e nTop, è che nel primo è permesso scegliere delle superfici che non verranno ottimizzate, diversamente nel secondo, non è permesso selezionare

delle superfici, ma si devono obbligatoriamente individuare dei volumi che non verranno interessati nell'ottimizzazione. Per realizzare quanto detto, si importa un file CAD in formato .step contenete solo le regioni che saranno escluse dall'ottimizzazione topologica e generare la mesh di tali volumi. Infine, attraverso il blocco dell'ottimizzazione topologica, si impone al programma di conservare il 5% della massa iniziale, avviandolo.



Differentemente da Workbench, nTopology posiziona due aste di collegamento tra la forcella e i supporti opposti ma nessuna connessione con il supporto inferiore della forcella stessa. Il materiale asportato, a prima vista, risulta sicuramente maggiore ma, allo stesso tempo, ne è stato rimosso una piccola quantità in corrispondenza del foro del perno della ruota nel quale sono applicate le forze. Di seguito le percentuali di utilizzo delle componenti del computer, il numero di iterazioni e il tempo impiegato.

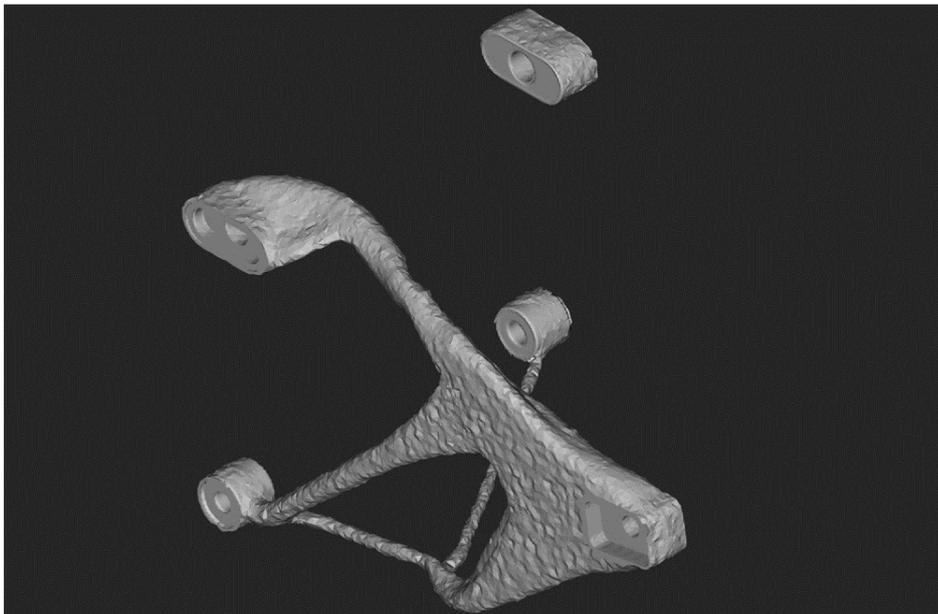
nTopology	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Monobraccio (15 mm)	0	100	0	31	31	74	49	58min

SPESSORE BRACCIO 30 mm



Aumentando lo spessore della forcella da 15 mm a 30 mm si inizia a delineare una forma più vicina all'ingegneria classica; tendono a formarsi delle geometrie triangolari e viene confermato che non c'è alcun tipo di collegamento tra la forcella e i supporti di destra. Di seguito le percentuali di utilizzo delle componenti del computer, il numero di iterazioni e il tempo impiegato.

Workbench	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Monobraccio (30mm)	0	100	0	5	15	99	31	3h 50min



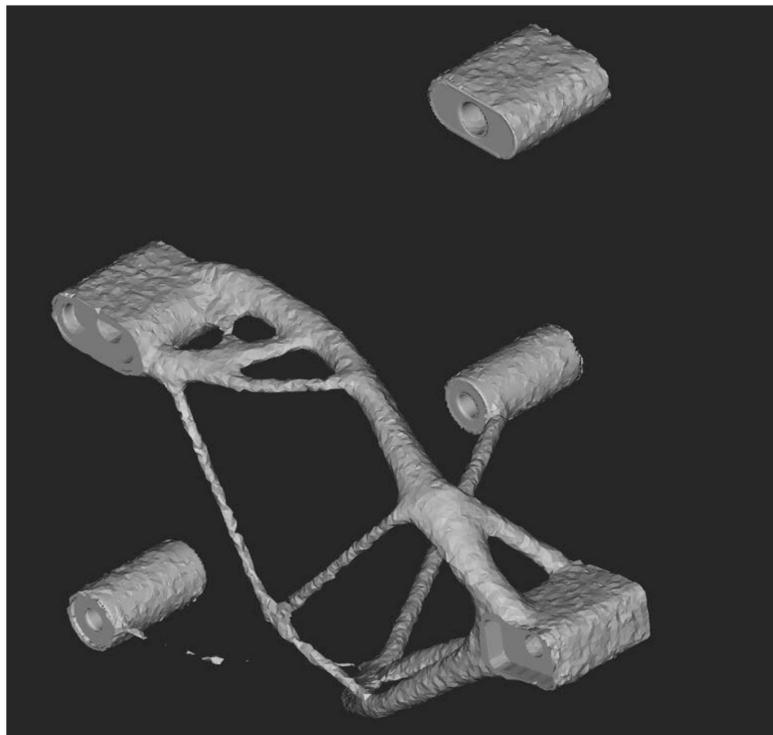
nTopology continua a mantenere l'asta di collegamento, si intravede una struttura triangolare formata da aste ma, il materiale in vicinanza al foro di collegamento risulta essere molto presente. Il collegamento superiore tra la forcella e il supporto opposto è scomparso mentre quello inferiore rimane con l'aggiunta di un'asta

inferiore nella forcella. Di seguito le percentuali di utilizzo delle componenti del computer, il numero di iterazioni e il tempo impiegato.

nTopology	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Monobraccio (30mm)	0	100	0	39	25	69	56	1h 26min

SPESSORE BRACCIO 50 mm

Con l'hardware a disposizione, non è possibile effettuare l'ottimizzazione topologica del mono forcellone con spessore 50 mm attraverso Workbench perché risulta un errore di insufficienza di RAM, di conseguenza, si esegue solo tramite nTopology.



nTopology mantiene ancora il collegamento tra la forcella e i supporti opposti, ha aumentato lo spessore dell'asta superiore, eliminando quella inferiore. Di seguito le percentuali di utilizzo delle componenti del computer, il numero di iterazioni e il tempo impiegato.

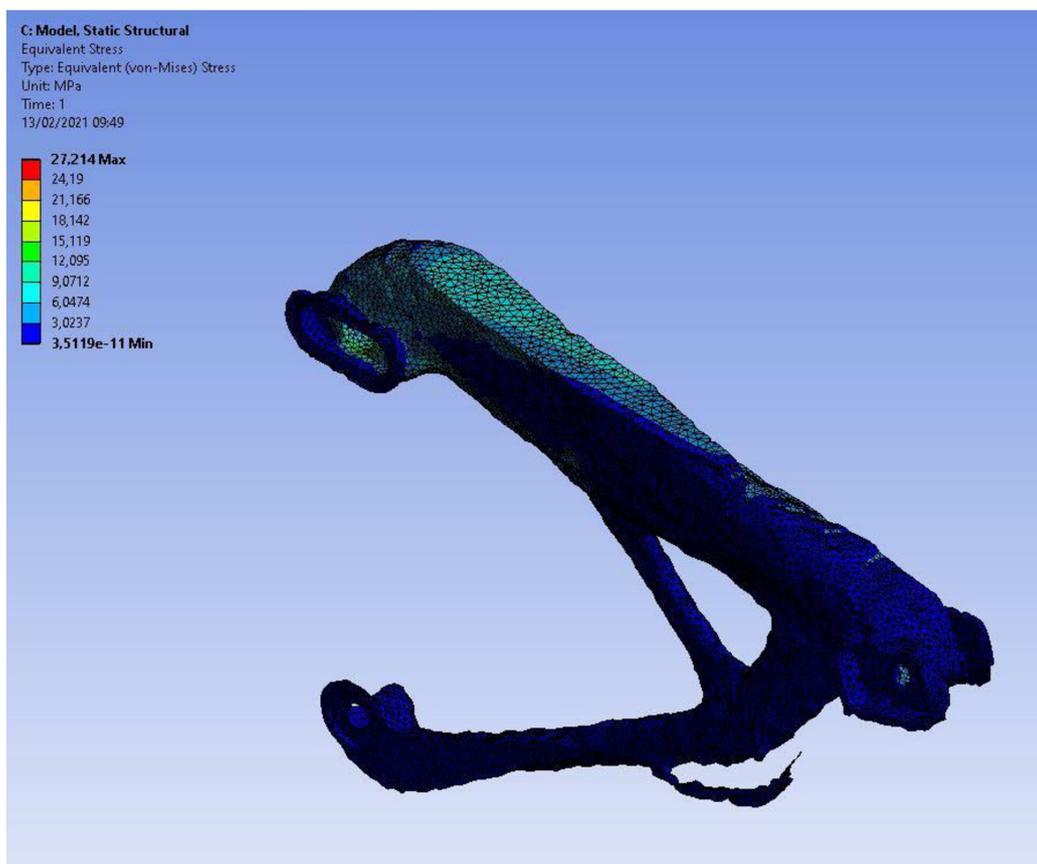
nTopology	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Monobraccio (50mm)	0	100	0	51	26	74	56	1h 39min

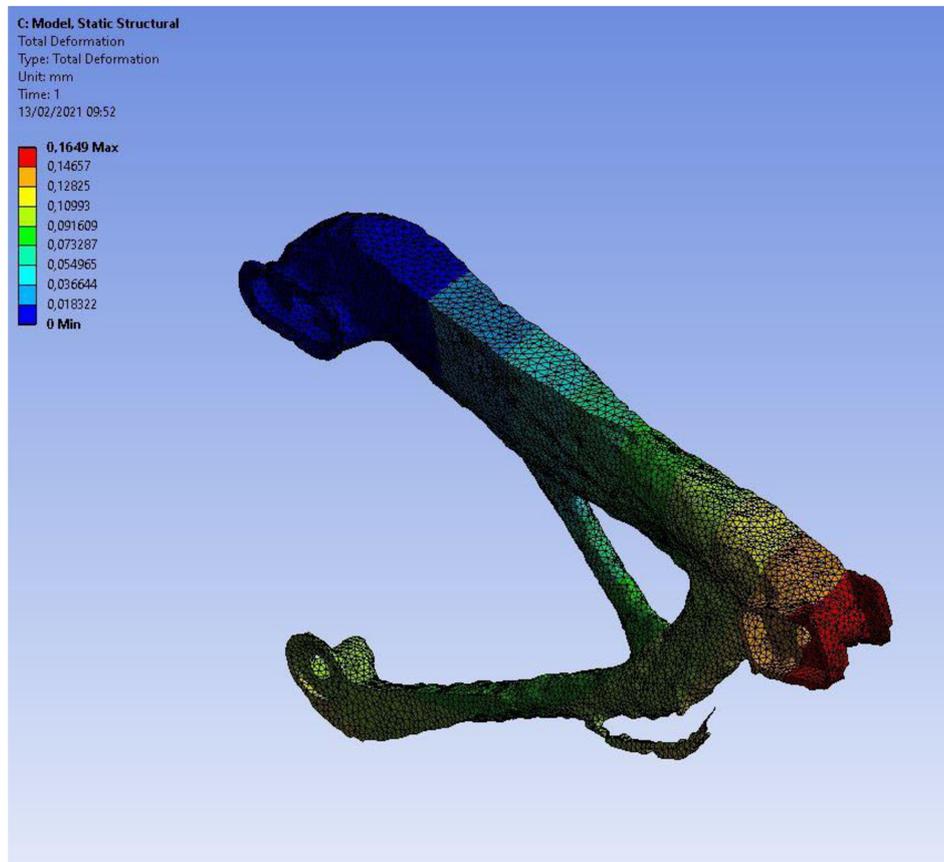
ANALISI STRUTTURALE

MONO-FORCELLONE

SPESSORE BRACCIO 30 mm

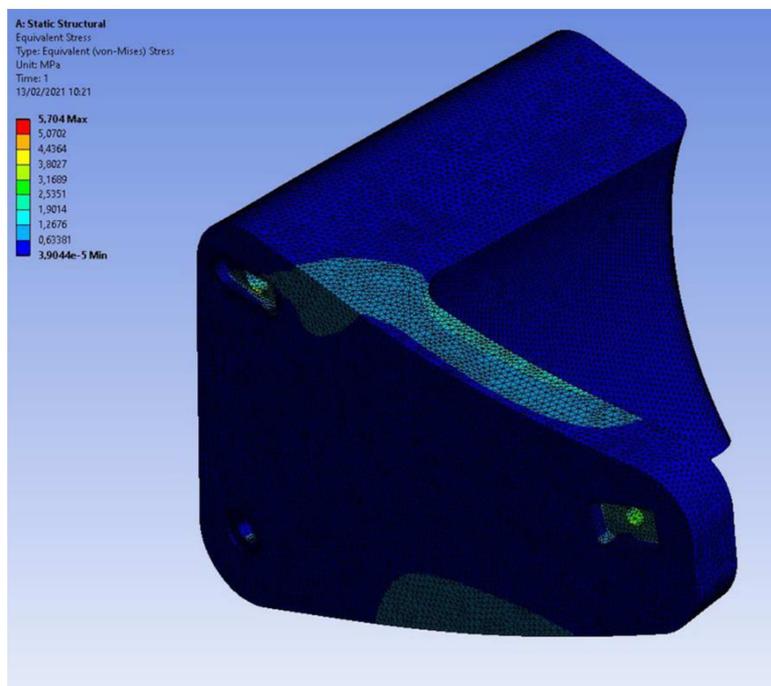
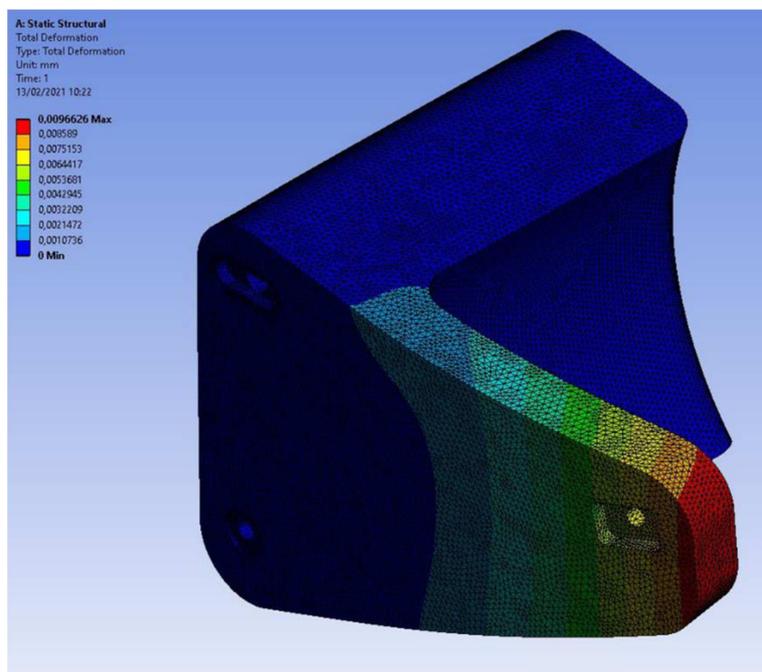
La verifica dei risultati delle ottimizzazioni svolte, la si effettua prendendo l'ottimizzazione del mono-forcellone di spessore 30 mm e si esegue l'analisi strutturale facendo uso di entrambi i programmi, impostando le stesse forze e gli stessi vincoli nelle medesime posizioni. I risultati sono i seguenti.



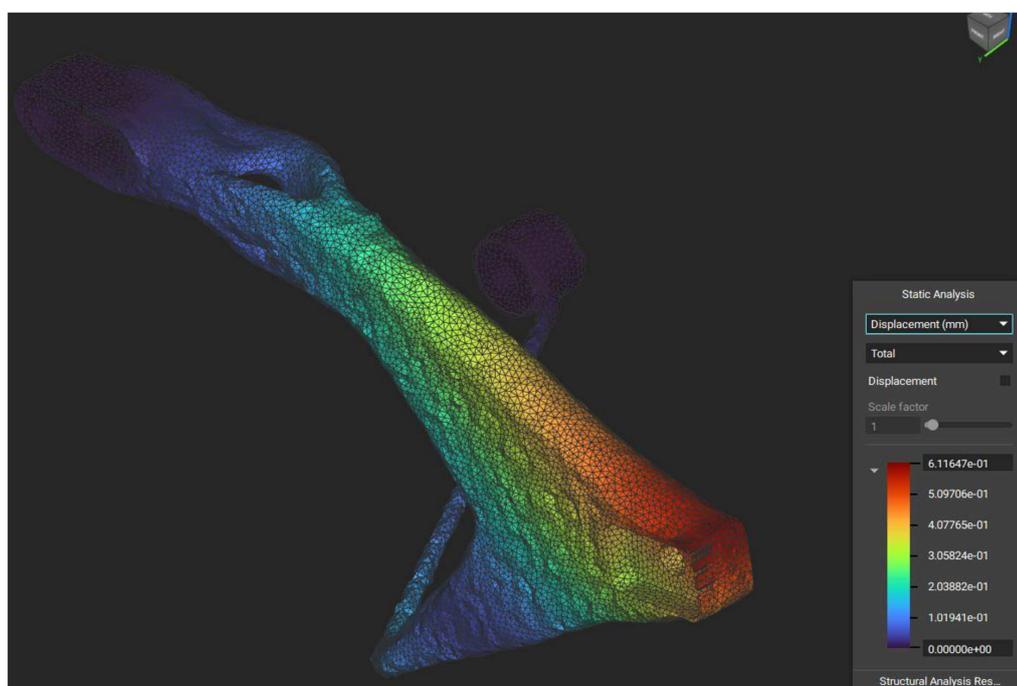
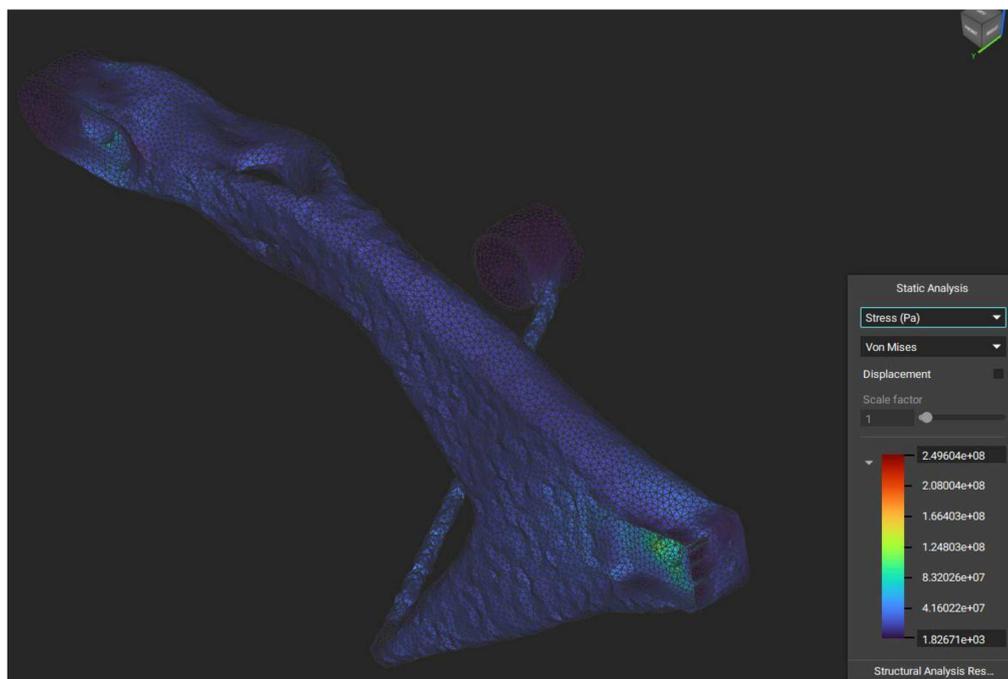


Nel risultato ottenuto con Workbench, si nota che il forcellone è verificato perché prendendo un Alluminio che ha la tensione di snervamento pari a 400 MPa è notevolmente minore della tensione massima nella forcella di 27,214 MPa, le tensioni sono abbastanza uniformi in tutto il componente mentre lo spostamento massimo in corrispondenza del foro di collegamento tra forcella e mozzo è pari a 0,16 mm. Confrontando questa analisi strutturale con quella del provino grezzo, si osserva che si riduce la massa del 95% (massa iniziale 12,616 kg massa finale 0,645 kg), lo spostamento massimo iniziale era pari a 0,008 mm quindi è notevolmente aumentato.

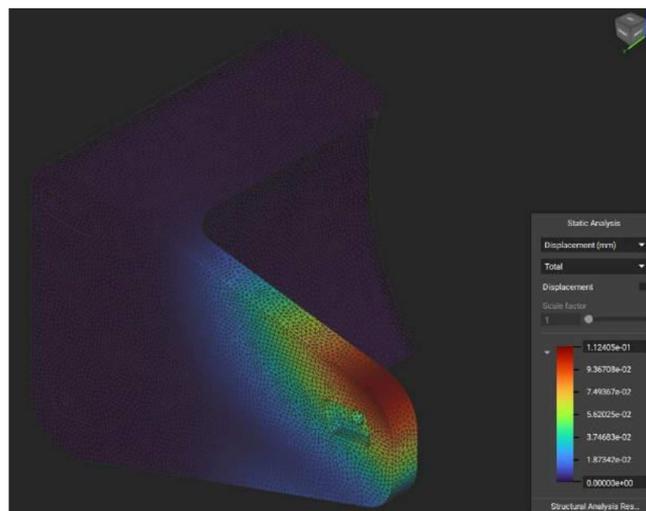
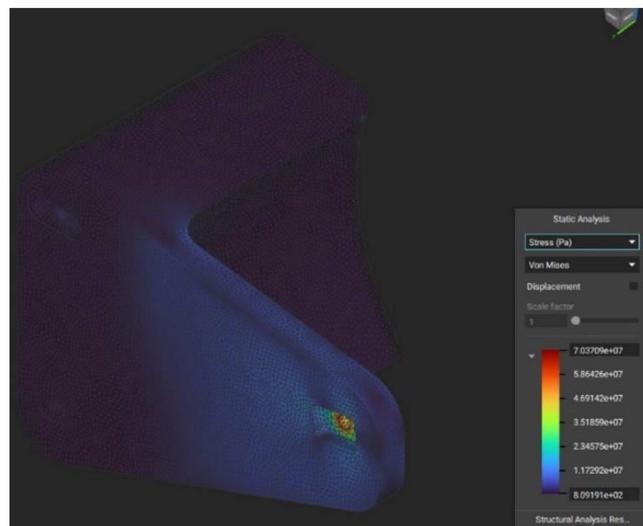
Tale dimostrazione non è sempre negativa, dipende dalle applicazioni (un forcellone si deve flettere).



Allo stesso modo, viene realizzata l'analisi strutturale dell'ottimizzazione topologica ottenuta tramite nTopology.



Si nota che la tensione massima pari a 249 MPa è inferiore rispetto a quella di snervamento dell'alluminio (400 MPa), la forcella è verificata. Il risultato dell'ottimizzazione ha una colorazione uniforme ciò significa che le tensioni sono ben distribuite. Lo spostamento massimo è pari a 0,611 mm mentre nel provino grezzo è di 0,112 mm quindi c'è stato un incremento seppur minimo delle deformazioni. La massa iniziale del provino è di 12,616 kg mentre quella finale è di 0,484 kg con una riduzione percentuale del 94%.



CONCLUSIONI

Programmi come Workbench e nTopology nell'ottimizzazione topologica, raggiungono risultati differenti dall'ingegneria classica, ricavando delle forme inusuali realizzabili solamente tramite additive manufacturing se non ricostruite attraverso software di modellazione 3D. In particolar modo, si può facilmente provare, che Workbench a primo impatto è più semplice da iniziare a utilizzare poiché è in circolazione da tanto tempo e sul Web è possibile reperire parecchio materiale, come video tutorial, che spiegano il modo in cui è pensato il software e come utilizzarlo. nTopology, essendo sul mercato solamente dal 2018, non mette a disposizione la giusta quantità di materiale ha tutto questo materiale disponibile per apprendere l'utilizzo dei comandi ma, a suo favore, è possibile dire che hanno un forum gestito dagli sviluppatori veramente efficiente. Se ci si sofferma sul lato pratico dei due Software, mettendosi dal punto di vista dell'azienda che dovrebbe comprarli e poi utilizzarli, dai risultati ottenuti tramite le ottimizzazioni topologiche svolte sul forcellone è possibile dire che nTopology è nettamente più efficiente rispetto a Workbench.

nTopology	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Bibraccio (15 mm)	0	100	0	30	36	70	58	1h 13min
Forcellone Monobraccio (15 mm)	0	100	0	31	31	74	49	58min
Forcellone Monobraccio (30mm)	0	100	0	39	25	69	56	1h 26min
Forcellone Monobraccio (50mm)	0	100	0	51	26	74	56	1h 39min

Workbench	CPU (%)		GPU (%)		RAM (%)		Iterazioni (nr.)	Tempo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
Forcellone Bibraccio (15 mm)	0	99	0	3	25	99	73	9h 37min
Forcellone Monobraccio (15 mm)	0	96	0	4	15	97	21	2h 6min
Forcellone Monobraccio (30mm)	0	100	0	5	15	99	31	3h 50min
Forcellone Monobraccio (50mm)	/	/	/	/	/	/	/	/

Oltre ad uno stress dell'Hardware del computer minore da parte di nTopology, si può notare che a pari di modello di partenza, condizioni di vincolo e di carico, stessa grandezza della mesh e stessi vincoli di ottimizzazione, Workbench effettua un numero minore di iterazioni (tranne che nel forcellone Bibraccio) in un tempo almeno doppio rispetto a nTopology. Derivante dal fatto che nTopology fa un utilizzo maggiore di GPU rispetto a Workbench e quindi sfrutta maggior potenza di calcolo. La Ram impiegata è inferiore in nTopology a differenza del primo. Tutte queste considerazioni, dal punto di vista di una azienda, si traducono in un costo minore per il raggiungimento di uno stesso risultato o addirittura migliore utilizzando nTopology. La fattibilità di realizzazione dei due risultati ottenuti, si può dire che entrambi sono verificati essendo che le tensioni generate all'interno di esse sono inferiori della tensione di snervamento. Le masse sono state ridotte, gli spostamenti massimi sono aumentati ma, allo stesso tempo, sono piccoli. Un minor spostamento non è, soprattutto in questa struttura la quale è applicata su una minimoto, per forza un pregio. Dalle geometrie finali si deduce che l'ottimizzazione topologica effettuata con Workbench è di più facile realizzazione

rispetto a quella di nTopology, ciò però non preclude il fatto di una minor efficacia del risultato di nTopology, Sicuramente è più pratica, per un utilizzo frequente, il forcellone monobraccio ricavato con Workbench.

BIBLIOGRAFIA

- Progettazione e costruzione di macchine – Richard g.Budynas, J. Keith Nisbett – Mc Graw Hill – III edizione
- Elementi di meccanica classica per l'ingegneria – Lucio Demeio – Città Studi Edizioni – 2016
- Smart CAE.com : Ottimizzazione topologica per generare forme innovative del prodotto

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato, desidero menzionare tutte le persone, senza le quali questo lavoro di tesi non esisterebbe nemmeno.

In particolar modo la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto, appoggiando ogni mia decisione, fin dalla scelta del mio percorso di studi.

Ringrazio il Professor Marco Rossi e il dott. Mattia Utzeri per avermi seguito, con la loro infinita disponibilità, in ogni step della realizzazione dell'elaborato, fin dalla scelta dell'argomento.

Ringrazio tutti i miei amici che hanno creduto in me.

Ringrazio i miei due colleghi Lorenzo e Alessandro con i quali, oltre ad essere due persone fantastiche, ho condiviso questo percorso e le gioie per i traguardi raggiunti.

Un ultimo ringraziamento doveroso va a me. Grazie di non aver mai mollato la presa. Grazie di non aver rinunciato. Grazie per esserti sempre rialzato. Grazie per non aver dato peso a chi non credeva in te. Grazie per essere arrivato a testa alta in questo giorno speciale. Grazie di puntare sempre alle stelle.

Vorrei concludere con questi versi, che mi diano la forza di andare avanti e raggiungere i miei obiettivi:

“...So don't stop me now

Don't stop me

'Cause I'm having a good time

Having a good time

I'm a shooting star leaping through the sky

Like a tiger defying the laws of gravity

I'm a racing car passing by like Lady Godiva

I'm gonna go go go

There's no stopping me...”

Don't Stop Me Now - Queen