UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

Metodo per la comparazione di geometrie 3D ottenute attraverso ottimizzazione topologica adatte alla fresatura 5 assi

METHOD FOR COMPARING 3D GEOMETRIES OBTAINED THROUGH TOPOLOGICAL OPTIMIZATION SUITABLE FOR 5-AXIS MILLING

Relatore:

Prof. Marco Mandolini

Tesi di laurea di:

Simone Galluzzo

Correlatore:

ING. Cesare Stocchi

Anno Accademico 2022-2023

I. Ringraziamenti

Ci tengo a ringraziare tutte le persone che, in qualche modo, mi hanno aiutato e mi sono state vicine in questo percorso, durato qualche anno di troppo, e fatto di alti e bassi.

Per primo, vorrei ringraziare il professore Marco Mandolini per la pazienza ed il sostegno che mi ha dato durante tutto il percorso di tirocinio. Vorrei inoltre ringraziarlo per avermi dato l'occasione di conoscere e collaborare con il mio correlatore, Cesare Stocchi, senior structural analyst and composite structure designer at Dallara Automobili, e la grande realtà per cui lavora, la Dallara Automobili. Così, ho avuto il grande privilegio di lavorare e studiare per ciò che, fin da piccolissimo, mi appassiona: i motori.

Vorrei poi ringraziare la mia famiglia, per avermi dato l'opportunità di studiare e per avermi sempre sostenuto.

Un ringraziamento speciale va ai miei ormai ex compagni, ma sempre amici, Amedè, che anche ora, probabilmente, sta mangiando rotelle per pranzo, e Elisè, che sta ancora aspettando che la porta (non scorrevole) si apra: grazie perché con voi è sempre sembrato tutto più semplice, e perché i video di ricette alle 8 del mattino non avrei mai potuto guardarli con nessun altro.

Ringrazio anche Gianmà, Bobba e Zac: che durante le pause, grazie al loro "odio" reciproco, hanno reso le giornate meno pesanti.

Ultima, ma come si dice "beati gli ultimi che saranno i primi" e lei ci è riuscita, Irene, che durante questo percorso di alti e bassi, tipo Blue Tornado, mi è sempre stata vicino, con litigate ma soprattutto una grande dose di abbracci, sia nel bene che nel male.

Anche se i nostri confronti il più delle volte non sono proprio pacifici, la ringrazio veramente tanto perché mi ha sempre spronato, e continua a farlo, a dare il meglio, soprattutto nei momenti più difficili. La ringrazio anche per la sua infinita risorsa di pazienza, perché so che sono una persona che la pazienza la fa finire velocemente alle persone che ha intorno. Grazie amore mio.

II. Sommario

I. Ringraziamenti 1

II. Sommario i

III. Elenco delle figure e delle tabelle iii

1 Introduzione 1

2 Stato dell'arte 4

3 Fresatura 5 assi 15

3.1 Confronto tra fresa a 3+2 assi e fresa a 5 assi 16

3.2 Vantaggi e svantaggi fresatura 5 assi 17

4 Strumenti computazionali 18

4.1 LeanCOST 18

4.1.1 Vantaggi e svantaggi di LeanCOST 20

4.2 Ottimizzazione topologica 21

4.2.1 Vantaggi e svantaggi dell'ottimizzazione topologica 23

5 Metodo 24

6 Casi studio 27

6.1 Lavoro svolto su NX 28

6.1.1 Caso studio: prima geometria ottimizzata 28

6.1.2 Caso studio: seconda geometria ottimizzata 42

6.2 Analisi FEM 45

6.2.1 Caso studio: analisi FEM della prima geometria 48

6.2.2 Caso studio: analisi FEM della seconda geometria 53

6.2.3 Caso studio: analisi FEM della geometria originale 55

6.3 Lavoro su LeanCOST 57

6.3.1 Caso studio: analisi LeanCOST della prima geometria ottimizzata 59

6.3.2 Caso studio: analisi LeanCOST della seconda geometria ottimizzata 63

6.3.3 Caso studio: analisi LeanCOST della geometria originale 65

7 Confronto e discussione dei risultati 67

8 Conclusioni 70

9 Bibliografia 72

10 Webgrafia 73

III. Elenco delle figure e delle tabelle

Figura 2-1: Oscillazione della velocità di avanzamento in base al CAM utilizzato 5
Figura 2-2: Influenza angolo di avanzamento su tempo di lavorazione..... 7
Figura 2-3: Angolo di avanzamento 8
Figura 2-4: Profilo di velocità..... 8
Figura 2-5: Diagramma di stima del tempo 9
Figura 2-6: Lunghezza dei segmenti lineari usati per valutare la macchina.....12
Figura 2-7: Incrementi angolari usati per valutare la macchina 12
Figura 2-8: Schema risolutivo 13
Figura 2-9: Velocità di avanzamento massima in funzione al movimento angolare incrementale.....14
Figura 3-1 Rappresentazione degli assi in una macchina CNC a 5 assi.....15
Figura 4-1 Esempio di risultati ottenuti da una simulazione LeanCOST: A) Costi; B) Tempi 19
Figura 4-2 Esempio di geometria ottenuta attraverso ottimizzazione topologica.....22
Figura 6-1: Supporto pedalina utilizzato come caso studio.....27
Figura 6-2: Icona comando solido delimitante.....28
Figura 6-3: Centro di controllo del comando solido delimitante.....29
Figura 6-4: Solido delimitante del supporto originale 30
Figura 6-5: Solidi delimitanti che non sono parte del design space 31
Figura 6-6: Insieme dei solidi delimitanti.....32
Figura 6-7: Viste del design space.....33
Figura 6-8: Icona comando di ottimizzazione topologica 33
Figura 6-9: Finestra di studio dell'ottimizzazione 34
Figura 6-10: Finestra design space.....35
Figura 6-11: Comando solido di costruzione.....36
Figura 6-12: Solidi di costruzione 36
Figura 6-13: Comando vincolo di analisi 37
Figura 6-14: Carichi applicati.....38
Figura 6-15: Vincolo di ottimizzazione 39
Figura 6-16: Prima geometria ottimizzata.....40

Figura 6-17: Prima geometria ottimizzata, in assieme 41
Figura 6-18: Bounding box: A) prima geometria, B) modificato per la seconda geometria....42
Figura 6-19: Seconda geometria ottimizzata....43
Figura 6-20: Seconda geometria ottimizzata, in assieme....44
Figura 6-21: Creazione mesh 3D....49
Figura 6-22: Inserimento carichi e vincoli per analisi FEM....50
Figura 6-23: Icona risolvi analisi FEM....50
Figura 6-24: Navigatore postprocessamento 51
Figura 6-25: Analisi FEM prima geometria: A) spostamento, B) tensione....52
Figura 6-26: Analisi FEM seconda geometria: A) spostamento, B) tensione....54
Figura 6-27: Analisi FEM geometria originale: A) spostamento, B) tensione 56
Figura 6-28: Rappresentazione file STL....57
Figura 6-29: Esportazione file NX in STL....59
Figura 6-30: Geometria importata su LeanCOST 60
Figura 6-31: Importazione geometria in LeanCOST....60
Figura 6-32: Inserimento parametri di input....61
Figura 6-33: Risultati analisi LeanCOST: A) n° operazioni B) tempi di lavorazione....62
Figura 6-34: Geometria importata su LeanCOST 63
Figura 6-35: Risultati analisi LeanCOST: A) n° operazioni B) tempi di lavorazione....64
Figura 6-36: Geometria importata su LeanCOST 65
Figura 6-37: Risultati analisi LeanCOST: A) n° operazioni B) tempi di lavorazione....66
Figura 7-1: Valori di peso, tensione e spostamento....67
Figura 7-2: Tabella di confronto: peso, n° lavorazioni e tempi di lavorazione....68
Figura 7-3: Tabella di confronto: variazione tempo della terza lavorazione al variare dell'utensile 68

1 Introduzione

Ad oggi, ciò che le imprese si pongono come obbiettivo è produrre dei componenti sì di ottima qualità, ma in tempi brevi, cercando dunque di abbattere anche i costi di produzione.

Si è rivelata come fondamentale, quindi, la nascita, ma soprattutto lo sviluppo, di software in grado di aiutare i progettisti, durante la fase di progettazione del pezzo o addirittura della linea di produzione, così che questi possano svolgere il loro lavoro con risultati di sempre maggior qualità e in tempi sempre più brevi.

Partendo da queste considerazioni, lo scopo del lavoro svolto consiste nel verificare come varia il tempo di lavorazione al variare della singola geometria presa in esame, cioè il supporto pedalina di una motocicletta.

Si è partiti quindi, lavorando sul parallelepipedo d'ingombro del pezzo, in particolare sottoponendolo ad ottimizzazione topologica: è tramite questo strumento, infatti, presente oggi in tutti i principali programmi CAD, che si riesce ad ottenere una geometria, a punto, ottimizzata, più funzionale, ovvero capace di resistere agli stessi sforzi ma con meno utilizzo di materiale, permettendo questo alle imprese di produrre di più, in tempi più brevi e con costi minori.

L'ottimizzazione topologica è, sostanzialmente, un metodo matematico per trovare la distribuzione ottimale del materiale in un dato volume sotto stress, guidata da una serie di vincoli che vanno da quelli di massa a quelli di produzione: si generano, così, una serie di geometrie differenti tra loro in base ai parametri settati in fase di ottimizzazione.

Lo scopo di sottoporre ad ottimizzazione il parallelepipedo d'ingombro, e non direttamente un grezzo del supporto pedalina, è quello di alleggerire il lavoro del progettista: così, infatti, il progettista ha il solo compito di inserire nell'ottimizzazione topologica del software CAD utilizzato una geometria d'ingombro, e i carichi e i vincoli a cui questa va sottoposta, così da ottenere poi, tramite il lavoro direttamente svolto dal software, una geometria quasi finale.

È importante dire fin da ora, infatti, che ciò che si ottiene tramite ottimizzazione è una geometria sì molto sviluppata, ma che non corrisponde esattamente a quella reale finale: infatti, da queste simulazioni computerizzate, escono delle geometrie particolari su cui poi il progettista dovrà intervenire, per trasformarle in geometrie NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), affinché possano poi essere analizzate e quindi realizzate tramite programmi CAM.

Lo spunto da cui parte l'intero lavoro è che tutto questo procedimento è estremamente lungo: ecco quindi che si nota l'importanza di software per la preventivazione rapida, che forniscono la stima di tempi, costi e cicli di lavorazione di componenti meccanici a partire dai loro modelli 3D.

In questo senso, il software su cui si è svolto lo studio è LeanCost: il lavoro, svolto in collaborazione con Dallara Automobili, infatti, si prefigge di valutare se l'utilizzo di questo strumento può essere preso in considerazione al fine di stimare costi, tempi e cicli di lavorazione, così da evitare il lungo e dispendioso procedimento realizzato tramite i programmi CAM.

Ciò che si vuole capire dunque è se questo strumento possa essere utilizzato per determinare il tempo di lavorazione di geometrie ottenute tramite ottimizzazione topologica, così da caricare poi nei più precisi programmi CAM solo quelle geometrie, ottenute da ottimizzazione, considerate dai risultati di LeanCost come realizzabili e vantaggiose, sia a livello di costi che di tempi.

I programmi utilizzati per svolgere questa analisi sono: in fase di progettazione, Siemens NX, poi, in fase di analisi, a punto, LeanCost.

Il pezzo che si è analizzato è il supporto pedalina di una motocicletta. Il processo produttivo che si è preso in considerazione, durante l'analisi, è la fresatura 5 assi.

Nella prima parte di questa tesi, si parlerà dell'azienda in collaborazione della quale si è svolto il lavoro, la Dallara Automobili.

Si spiegheranno poi, in generale, i programmi usati (Siemens NX e LeanCOST) e il metodo seguito.

Ci sarà infine l'analisi del caso studio particolare, il supporto pedalina di una moto.

I risultati a cui si è giunti, saranno poi analizzati all'interno delle conclusioni.

2 Stato dell'arte

Nel mondo della progettazione meccanica, in continua evoluzione, la ricerca e lo sviluppo costituiscono elementi fondamentali per il progresso e l'innovazione. L'obiettivo è identificare i fattori che influenzano il tempo di lavorazione, e di conseguenza i costi associati, al fine di agevolare le fasi iniziali di progettazione.

Ad oggi, una volta stimato il tempo di lavorazione, è possibile calcolare il suo costo, in quanto esso dipende direttamente dal tempo di utilizzo della macchina: il costo totale è quindi ottenuto moltiplicando il costo orario della macchina per il tempo di lavorazione, che si ottiene dopo aver pianificato il processo, tenendo conto dei tempi operativi e dei tempi morti.

Tuttavia, questi calcoli possono risultare troppo complessi e protratti per essere pratici durante la fase di progettazione: di conseguenza, e proprio per questo motivo, oltre l'utilizzo di software di preventivazione come LeanCOST, è stata effettuata una ricerca per andare a trovare un metodo parametrico per ottenere una predizione del tempo di lavorazione.

Gli articoli che si sono ritenuti essere rilevanti, si prefiggono di migliorare il metodo di predizione del tempo di lavorazione di una parte, cosa fondamentale in fase di progettazione perché da esso dipendono anche i costi e quindi la produttività dell'azienda.

I software CAD/CAM commerciali attualmente in uso, stimano il tempo di fresatura dividendo la lunghezza del percorso dell'utensile per il valore della velocità di avanzamento impostato dall'utente (tempo = spostamento/velocità); escludendo le limitazioni di elaborazione e l'oscillazione della velocità di avanzamento della macchina CNC, come si può osservare in Figura 2-1.

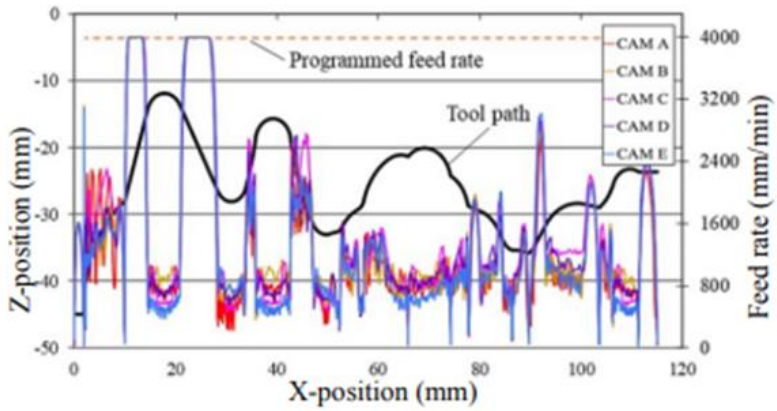


Figura 2-1: Oscillazione della velocità di avanzamento in base al CAM utilizzato

Gli articoli di cui si parlerà, invece, si pongono lo scopo di trovare un metodo parametrico in grado di predire il tempo di lavorazione di una parte.

Ci si è imbattuti in molta letteratura scientifica, ma gli studi che si sono trovati più rilevanti sono sostanzialmente tre:

- Five-axis machining time estimation algorithm based on machining characteristics [1]
- On the role of complexity in machining time estimation [2][1]
- New mechanistic model to predict machining time for milling free form geometries using 4-axis milling [3]**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Nell'articolo [1], viene illustrato un algoritmo di stima del tempo di lavorazione per la fresatura ad alta velocità a cinque assi.

La stima del tempo di lavorazione, come già detto, svolge un ruolo cruciale nella pianificazione dei processi e nella programmazione della produzione in un'officina, andando questa ad impattare sul reale processo di produzione dei singoli pezzi.

Nonostante la rapida evoluzione delle macchine utensili e dei controllers, il calcolo del tempo di lavorazione continua a basarsi su algoritmi semplici, che considerano la lunghezza del percorso dell'utensile diviso dalle velocità di avanzamento dei dati NC, integrati da alcuni fattori basati sull'esperienza.

In questo articolo, viene presentato un algoritmo che si basa sul comportamento delle macchine a cinque assi per fornire stime di tempo di lavorazione più precise.

A questo scopo, si è condotta una preliminare analisi delle caratteristiche operative delle macchine a cinque assi; successivamente, sono stati identificati alcuni fattori determinanti, tra cui l'angolo di avanzamento, considerato come una variabile indipendente che influisce sulla velocità di lavorazione, come si può vedere dalla Figura 2-2.

Sfruttando questi fattori, si è sviluppato un algoritmo di calcolo del tempo di lavorazione che garantisce un'elevata precisione sia nella lavorazione a tre assi, sia nella fresatura ad alta velocità a cinque assi.

Per ottenere il comportamento della lavorazione a cinque assi, va misurato il tempo di lavorazione in base all'angolo di avanzamento sia nel movimento di traslazione che in quello di rotazione: si dimostra quindi che la velocità di elaborazione dei blocchi da parte della macchina, limita la velocità effettiva di lavorazione.

Infatti, è noto che nelle macchine a cinque assi, ciò che influenza la velocità della macchina sono sia la velocità di traslazione che quella di rotazione: per calcolare il tempo di lavorazione dobbiamo quindi stimare la lunghezza del percorso dell'utensile tra blocchi di calcolo numerico successivi.

La lunghezza del percorso dell'utensile, in questo caso, può dunque essere considerata come composta da movimento di traslazione e di rotazione.

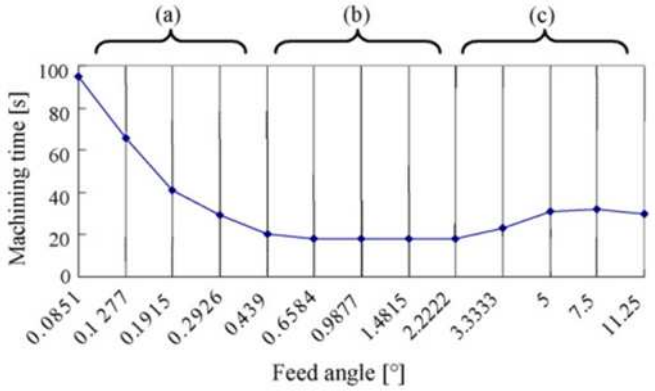


Figura 2-2: Influenza angolo di avanzamento su tempo di lavorazione

I parametri che servono per utilizzare questo algoritmo sono:

- Lunghezza del passo S_i;
- Angolo di avanzamento φ_i , come da Eq. 1;
- Rapporto tra movimento traslazionale e rotazionale H_i, Eq. 3;
- Velocità di elaborazione dei blocchi richiesta N_{NC}, come da Eq. 2;
- velocità di avanzamento in base alla velocità di elaborazione del blocco NC F_1, Eq. 4;
- velocità di avanzamento in base all'accelerazione della macchina F_2, F_3, come si può vedere da Eq. 6, Eq. 7;
- generare il segmento lineare effettivo e la velocità di avanzamento finale, Eq. 8;

Di seguito vengono mostrate le equazioni che servono per ottenere questi parametri:

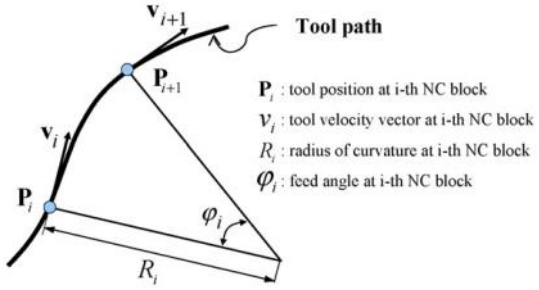


Figura 2-3: Angolo di avanzamento

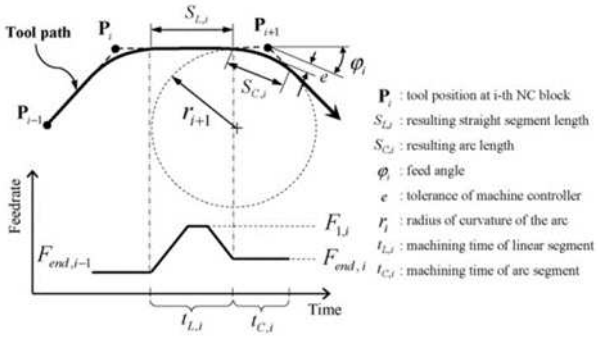


Figura 2-4: Profilo di velocità

Eq. 1: $\varphi_i = \frac{S_i}{R_i} = cos^{-1}(\boldsymbol{v}_i \quad \boldsymbol{v_{i+1}})$

Eq. 2: $N_{NC} = \frac{1}{60}\frac{F_c}{S_i}$

Eq. 3: $H_i = \frac{S_{t,i}}{S_{r,i}} = \frac{\sqrt{\Delta X^2+\Delta Y^2+\Delta Z^2}}{\sqrt{\Delta A^2+\Delta B^2+\Delta C^2}}$

Eq. 4: se ($N_{NC} > N_{CON}$) $F_1 = F_c\frac{N_{CON}}{N_{NC}}$ altrimenti $F_1 = F_c$

Eq. 5: $F_t = \sqrt{\gamma_t a_t} = \sqrt{min(\gamma_{1,t}, \gamma_{2,t})a_t} = \sqrt{min\left(\frac{F_{1,t}^2}{a_t}, \frac{e\,cos(\varphi_t/2)}{1-cos\,cos(\varphi_t/2)}\right)a_t}$

Eq. 6: $F_2 = F_t\sqrt{1 + (1 / H^2)}$

Eq. 7: $F_3 = F_r\sqrt{1 + H^2}$

Eq. 8: $F_{END,i} = \min(F_1, F_2, F_3)$

Quindi, una volta trovati, questi parametri vanno inseriti all'interno dell'algoritmo, seguendo lo schema riportato in Figura 2-5.

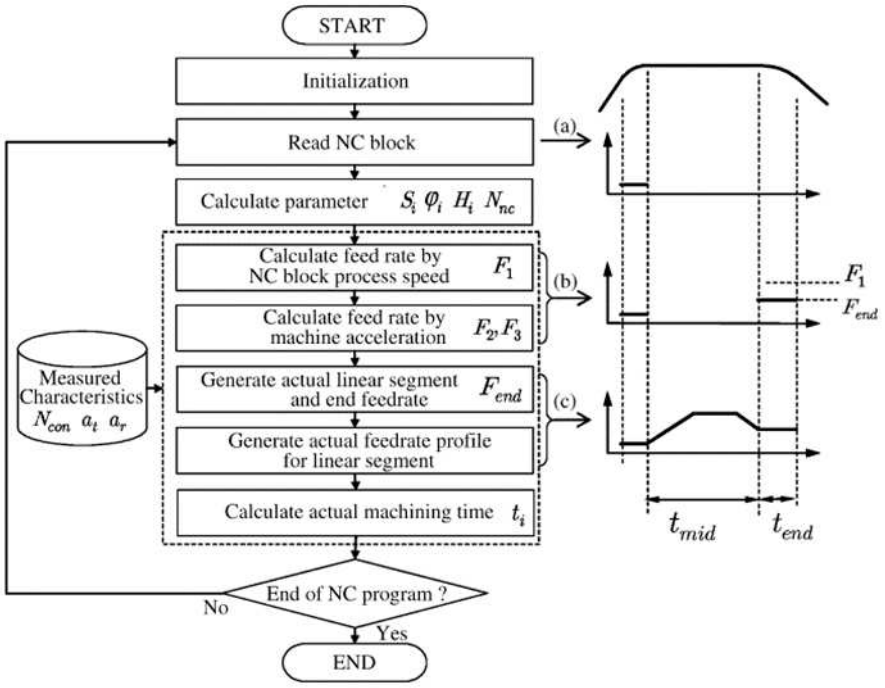


Figura 2-5: Diagramma di stima del tempo

Questo algoritmo può essere molto utile: nello studio si parla di una percentuale di correttezza del calcolo molto elevata.

Anche qui, usando l'algoritmo, verrebbe soppressa una parte del tempo di studio del pezzo, non essendoci più la necessità di usare il software LeanCost, o comunque venendo l'utilizzo del software supportato dall'utilizzo dell'algoritmo, e potendo invece semplicemente prendere i parametri ed inserirli nell'algoritmo.

Un altro articolo trovato rilevante è il [2].

Anche questo studio mira a migliorare il processo di previsione del tempo di lavorazione di una componente attraverso un metodo parametrico.

Questo articolo propone dunque una procedura parametrica per stimare il tempo di lavorazione basandosi sui dati disponibili durante la fase di progettazione: il metodo è stato sviluppato analizzando un campione di 80 componenti insieme ai relativi disegni tecnici, ognuno dei quali è stato prodotto con una stima del tempo di lavorazione ottenuta attraverso un metodo basato sulle features, trovato in letteratura.

Per ogni componente, è stato preso in considerazione un set di possibili fattori da utilizzare come indicatori del modello: la selezione dei fattori predittivi tra i vari input è basata sulla loro maggiore influenza sul tempo complessivo di lavorazione.

Il tempo di lavorazione è suddiviso in tre sotto-tempi:

- Cutting time;
- Non productive time;
- Handling time;

Questi tre sotto-tempi sono influenzati da diverse variabili, tra cui le dimensioni delle features, il tipo di feature, le tolleranze, il materiale, la quantità di features, e le dimensioni complessive della componente.

Un aspetto distintivo di questo metodo è l'introduzione di un parametro particolare: la "complessità", definita come la somma di elementi logaritmici associati alle dimensioni delle features.

Ogni termine nella somma tiene conto del rapporto tra le dimensioni della feature e la precisione richiesta: questo significa che la complessità influenzerà il tempo di taglio e verrà quindi inclusa nell'elenco dei fattori di prevenzione.

La scelta di rappresentare la complessità come una somma logaritmica enfatizza l'importanza del numero di features oltre alle loro dimensioni, tenendo conto anche del tempo non produttivo.

Per riassumere, i fattori predittivi selezionati includono:

- Volume (V);
- Envelope volume (Ve);
- Materiale (Km);
- due variabili di forma;
- numero di dimensioni (Nd);
- operazioni di lavorazione (No);
- area totale (Atot);
- complessità (C);

Una volta identificati questi fattori, è possibile effettuare calcoli basati su analisi di regressione delle stime temporali su un campione di componenti lavorate: tuttavia, è bene chiarire che non è necessario considerare tutti i fattori, poiché ciò renderebbe il calcolo complesso. Inoltre, alcuni di questi fattori sono più influenti di altri.

Pertanto, il metodo consiglia di includere nel calcolo solo volume, area totale, complessità e materiale, al fine di ottenere una formula semplice ed efficace per la rapida stima del tempo di lavorazione, come si può vedere dalla Eq. 9:

Eq. 9: $t = 0.29 \times C^{0.37} \times Atot^{0.26} \times Ve^{0.10} \times Km^{0.15}$

Una volta deciso come valutare il fattore complessità, questa formula può essere usata come strumento di supporto al software LeanCOST per andare a verificare e confrontare i risultati ottenuti.

L'articolo [3] presenta un metodo meccanicistico sviluppato per stimare in modo più accurato il tempo necessario per fresare una geometria free form utilizzando qualsiasi macchina di fresatura 4 assi.

La procedura sperimentale del lavoro è suddivisa in due parti:

- la prima, utilizzando i risultati di alcuni semplici test sperimentali, lineari e non lineari, consiste nello sviluppare un metodo per descrivere la velocità di avanzamento reale considerando i movimenti lineari e angolari
- la seconda, consiste nello sviluppare un algoritmo per utilizzare la velocità di avanzamento reale insieme a un file di codici di calcolo numerico per calcolare il tempo effettivo di fresatura, in base a una specifica macchina CNC

Per arrivare a scrivere l'algoritmo si parte prima di tutto dall'identificare la velocità di avanzamento reale per movimenti lineari ed angolari: per trovare la velocità di avanzamento lineare (v_{fl}), sono stati sviluppati dei codici NC per muovere l'utensile lungo un percorso dritto, discretizzato da piccoli segmenti lineari. Come si può notare dalla Figura 2-6, sono stati eseguiti quattro codici NC ed ognuno di questi aveva una lunghezza dei segmenti lineari (Li) diversa, per completare la lunghezza di 200mm. Inoltre, si è impostata una velocità di avanzamento sufficientemente elevata, in questo caso 6000 mm/min, in modo che la macchina non raggiunga il valore programmato con le lunghezze dei segmenti definite.

Feed rate	**Linear increment (L_i)** [mm]			
6,000 mm/min	0.1	0.2	0.4	0.8

Figura 2-6: Lunghezza dei segmenti lineari usati per valutare la macchina

Così come l'avanzamento lineare, anche l'avanzamento angolare (v_{fa}) è stato studiato testando dei codici NC, suddividendo il percorso circolare di 360° in piccoli incrementi angolari (Ai), come si osserva dalla Figura 2-7:

Feed rate	**Angular increment (A_i)** [°]				
6,000 mm/min	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5

Figura 2-7: Incrementi angolari usati per valutare la macchina

L'algoritmo identifica nel codice NC, separatamente, lo spostamento lineare ed angolare per ogni movimento incrementale (tra due blocchi del file NC) ed utilizza le velocità di avanzamento lineare ed angolare che si sono precedentemente trovate.

Poi, considerando la velocità di avanzamento lineare massima (Eq. 10) e la velocità di avanzamento angolare massima (Eq. 11, Eq. 12) ottenibili per una specifica macchina, e l'avanzamento angolare massimo (v_{famax}), si ottiene il tempo corrispondente ad ogni spostamento.

Infine, l'algoritmo identifica il tempo maggiore tra spostamenti lineari ed angolari, e lo assume come il tempo che la macchina impiegherà per effettuare lo spostamento.

Questa operazione viene poi ripetuta per tutti i blocchi di calcolo NC in modo da trovare il tempo totale. Lo schema utilizzato da questo algoritmo è rappresentato in Figura 2-8:

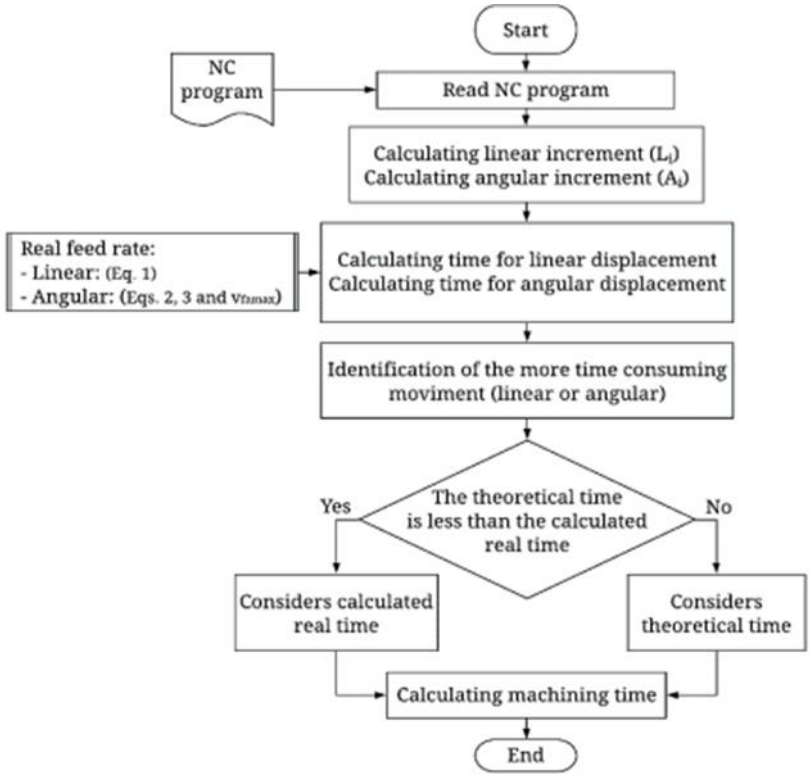


Figura 2-8: Schema risolutivo

Prendendo come esempio una fresatrice ROMI-D600 con controllo numerico Ge-Fanuc 0i-MC:

Eq. 10: $v_{fl} = 7500 \times L_i$

dove il coefficiente lineare rappresenta il tempo di risposta lineare della macchina.

Mentre per quanto riguarda i movimenti angolari, questi non hanno un comportamento univoco ma si possono distinguere tre casi, come da figura

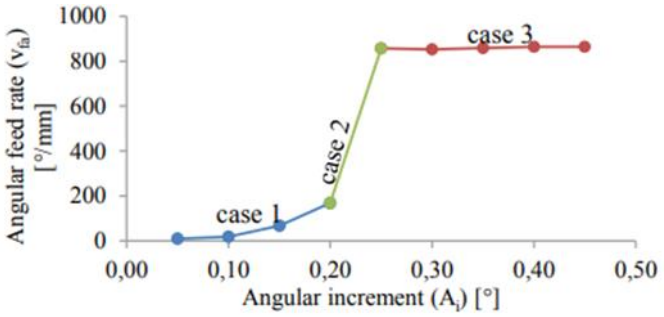


Figura 2-9: Velocità di avanzamento massima in funzione al movimento angolare incrementale

Si ha che:

Eq. 11: $v_{fa1} = 35378\, A_i^3 - 4273\, A_i^2 - 285\, A_i$

Eq. 12: $v_{fa2} = 13768\, A_i - 2585$

Mentre nella zona 3 la macchina ha raggiunto il suo limite di velocità di avanzamento angolare ed è una costante e viene presa come v_{famax}.

Il lavoro, e quindi l'algoritmo, riguardano, in questo studio, per ora, solo la fresatura a 4 assi: gli autori affermano, però, che intendono sviluppare un algoritmo simile per la fresatura a 5 assi: in futuro, dunque, qualcuno si potrà interessare e capire se questo metodo potrà essere usato per questo altro tipo di fresatura.

3 Fresatura 5 assi

La fresatura 5 assi è un'operazione che viene effettuata attraverso una macchina CNC (Computer Numerical Control): questa è una macchina che ha, all'interno, un dispositivo elettronico.

Questo dispositivo elettronico ha la funzione di comandare i movimenti e le funzioni della macchina durante la lavorazione, in base al programma di lavoro precedentemente definito.

Questa lavorazione si svolge, come si può immaginare già dalla denominazione, lungo 5 assi: questi rappresentano i percorsi lungo i quali gli utensili e le parti in lavorazione possono spostarsi contemporaneamente.

Questi 5 assi sono definiti dagli assi:

- X, Y, Z, che sono quelli traslazionali
- A e B, che sono quelli rotazionali, rispettivamente attorno agli assi X e Y,

come si può vedere in Figura 3-1.

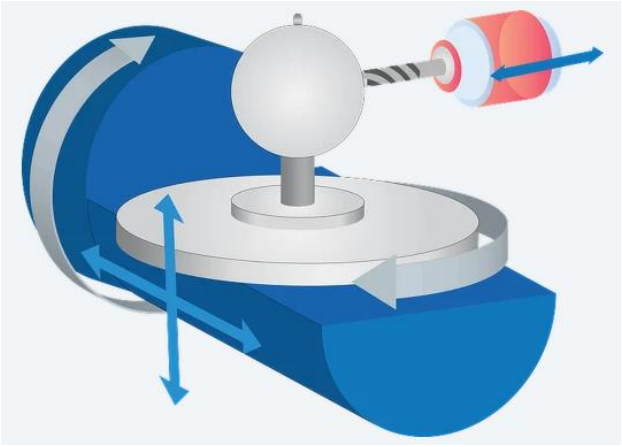


Figura 3-1 Rappresentazione degli assi in una macchina CNC a 5 assi

3.1 Confronto tra fresa a 3+2 assi e fresa a 5 assi

La fresa a 5 assi permette la contemporaneità della lavorazione di tutti e 5 gli assi: questo significa che l'operatore può intervenire sulla regolazione di tutti gli assi in ogni momento, consentendo una maggiore rapidità di esecuzione.

Inoltre, un altro aspetto caratterizzante della lavorazione, è che la macchina può eseguire una lavorazione continua con regolazioni in tempo reale dell'utensile: in questo modo, l'utensile può essere mantenuto perpendicolarmente alla superficie del pezzo per tutta la lavorazione, cosa che riduce di molto i tempi di lavorazione.

Diversamente, nella fresatura 3+2, sono coinvolti:

- tre assi di movimento durante la lavorazione
- due assi che vengono bloccati, o indicizzati, in posizioni fisse.

Questo fa sì che, nella fresatura 3+2, la lavorazione avvenga secondo passaggi discreti con l'utensile posizionato secondo una determinata angolazione: dunque, la macchina deve essere riprogrammata per ciascun angolo di lavoro.

Ciò comporta che, ad ogni riorientamento dell'utensile, bisogna fermarsi e poi ripartire, con un grande dispendio di tempo.

3.2 Vantaggi e svantaggi fresatura 5 assi

La fresatura a 5 assi, dunque, offre, con tempi di lavorazione comunque ridotti, più opportunità e meno vincoli progettuali, permettendo così di ottenere parti che altrimenti non si potrebbero realizzare o che comunque si farebbe più fatica a realizzare.

Inoltre, con questo tipo di lavorazione, avremo una riduzione delle vibrazioni, una minore pressione sulla fresa e una finitura superficiale maggiore, dovute alla presenza di utensili da taglio più corti che permettono l'abbassamento della testa per orientare la fresa.

Avremo così anche una percentuale di errore minima, in quanto con un unico set up iniziale della macchina si può iniziare e terminare la lavorazione, proprio perché, come si è detto sopra, non ci sarà la necessità di riposizionare il pezzo andando a ridurre la precisione di allineamento.

Dopo averne spiegato gli aspetti positivi, va anche sottolineato l'aspetto negativo legato a questo tipo di lavorazione.

Le macchine per la fresatura a 5 assi, infatti, sono molto costose, sia al momento dell'acquisto, sia per quanto riguarda la manutenzione: questo perché, a causa della loro complessità, hanno un livello di usura maggiore e dunque richiedono una maggiore e più frequente manutenzione.

Inoltre, presentando questo tipo di macchina una maggiore complessità di programmazione, si richiede un maggiore livello di competenza da parte del programmatore.

4 Strumenti computazionali

Come già anticipato, ad oggi, l'ingegneria moderna, fa sempre più affidamento sulla potenza di calcolo avanzata degli strumenti computazionali.

Questi strumenti non solo guidano ma anche collaborano con i progettisti in tutte le fasi, progettazione, sviluppo e produzione, del pezzo.

In questo capitolo, si fornirà una visione d'insieme, esaminando i programmi specifici utilizzati nel lavoro svolto e analizzando i benefici e gli svantaggi associati a ciascuno di essi.

4.1 LeanCOST

LeanCOST è un software di proprietà dell'azienda informatica Hyperlean S.r.l.

La funzione di questo strumento è quella di generare, in maniera automatica, un preventivo dove, seguendo la migliore strategia produttiva possibile, vengono indicati i costi e i tempi di lavorazione.

Il procedimento parte dall'inserimento di un modello CAD 3D, già progettato dal soggetto che se ne occupa, in modo da semplificare tutte le operazioni da seguire per determinare il costo di realizzazione di un componente meccanico.

Il software riesce dunque a riconoscere automaticamente la struttura del prodotto, andando così a generare la BOM, Bill of Materials.

La BOM, in italiano "distinta base", è la lista, l'elenco, degli elementi necessari alla realizzazione del prodotto, tra cui materie prime, componenti e semilavorati.

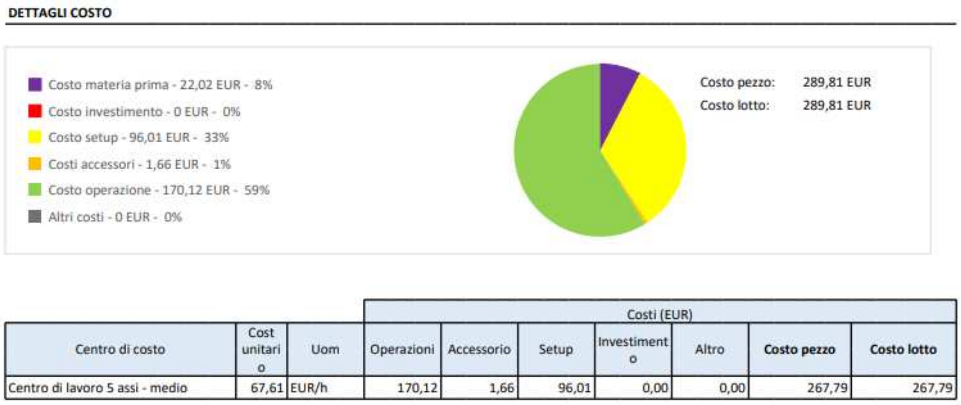
Vanno poi inseriti nel programma, in input, altri parametri, come materiale, rugosità, tolleranze ecc.

A questo punto, il software crea il ciclo di lavorazione, fornendo come output la stima dei costi e dei tempi di produzione, come si può vedere in Figura 4-1.

Fondamentale è interrogarsi sulla fruibilità del software in quanto a soggetti che possono utilizzarlo: infatti, LeanCOST può essere utilizzato da tutte le figure aziendali che svolgono il lavoro di gestione dei costi di produzione.

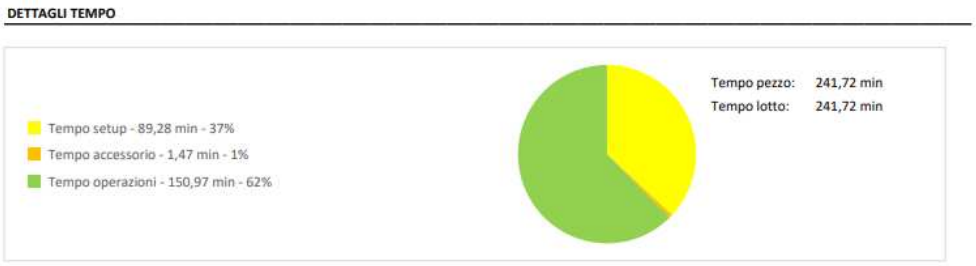
In particolare, questo strumento può essere utilizzato da quattro funzioni aziendali differenti: progettazione, industrializzazione, ufficio acquisti e ufficio commerciale.

Ognuno di questi reparti utilizzerà poi il software con diversi livelli di dettaglio e funzionalità.



			Costi (EUR)						
Centro di costo	Cost unitario	Uom	Operazioni	Accessorio	Setup	Investimento	Altro	**Costo pezzo**	**Costo lotto**
Centro di lavoro 5 assi - medio	67,61	EUR/h	170,12	1,66	96,01	0,00	0,00	267,79	267,79

A



	Tempo (min)				
Centro di costo	Operazioni	Accessorio	Setup	**Tempo pezzo**	**Tempo lotto**
Centro di lavoro 5 assi - medio	150,97	1,47	89,28	241,72	241,72

B

Figura 4-1 Esempio di risultati ottenuti da una simulazione LeanCOST: A) Costi; B) Tempi

4.1.1 Vantaggi e svantaggi di LeanCOST

L'utilizzo di questo software permette di ridurre i tempi di preventivazione e ne standardizza le procedure, andando a migliorare il controllo dei costi tra i diversi reparti aziendali.

Inoltre, LeanCOST consente la personalizzazione dei parametri e dei processi in base esigenze di ogni specifica azienda.

È importante sottolineare infine che il programma si integra con tutti i sistemi PDM (Product Data Management)/PLM (Product Lifecycle Management), così da evitare la perdita dei dati e garantire la sicurezza delle informazioni.

Passando all'affidabilità del programma per quel che riguarda la stima di tempi e costi di produzione, bisogna sottolineare che, tramite varie sperimentazioni, ciò che risulta è che la precisione dei dati ottenuti mediante la simulazione è minore rispetto a quella ottenuta mediante sistemi CAM (Computer Aided Manufacturing).

LeanCOST si presenta definitivamente come un software molto semplice da usare, con tempi di elaborazione dei dati molto brevi: l'intero procedimento si caratterizza dunque per la sua rapidità e accessibilità.

Questi aspetti postivi sono però controbilanciati dalla minor precisione dei risultati ottenuti tramite le simulazioni rispetto a quelli ottenuti in output dai sistemi CAM.

Va anche sottolineato, però, che nel software si possono settare dei parametri, quali ad esempio la precisione dell'algoritmo e la minima dimensione di discretizzazione, così da arrivare a dei risultati più precisi, cosa che però, ovviamente, influisce sui i tempi di elaborazione, rendendoli più lunghi.

Questo, dunque, significa che LeanCOST si presenta come uno strumento molto innovativo, in grado di supportare la classica stima dei tempi e dei costi di produzione tramite i sistemi CAM, ma, al momento, non totalmente in grado di sostituirla.

4.2 Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica (TO, Topology Optimization) è un metodo di ottimizzazione della forma che fa uso di modelli algoritmici per ottimizzare il layout dei materiali in un dato spazio, definito dall'utente, per un dato set di carichi, vincoli e condizioni.

In un contesto di progettazione, l'analisi topologica esamina le relazioni geometriche dei componenti per raggiungere specifici obiettivi di ottimizzazione.

Questi obiettivi possono includere, ad esempio, il bilanciamento tra peso e rigidità, la minimizzazione della massa, definendo infatti la migliore distribuzione del materiale possibile, si potrà arrivare ad avere una riduzione del peso, che però non comporterà in alcun modo una lesione delle prestazioni dell'intero sistema, o la riduzione dello spostamento massimo.

Tutti questi obbiettivi vengono perseguiti e raggiunti sempre tendendo conto di vincoli specifici, tra cui, esemplari, sono quelli imposti dal processo di produzione utilizzato.

Per utilizzare l'ottimizzazione topologica, lo step principale consiste nel fornire i dati relativi al progetto.

Esempi di dati da fornire possono essere:

- lo spazio del progetto;
- i carichi applicati;
- i vincoli;
- le condizioni al contorno;
- il metodo di produzione previsto.

Dopo aver fornito questi dati, dunque, è possibile consentire all'algoritmo di generare automaticamente una mesh dello spazio di progettazione: a questo punto, l'algoritmo eseguirà il ciclo di ottimizzazione richiesto per sviluppare la geometria ottimizzata del progetto avente minor peso ma con le stesse prestazioni dell'intero sistema, come si può notare dalla Figura 4-2.

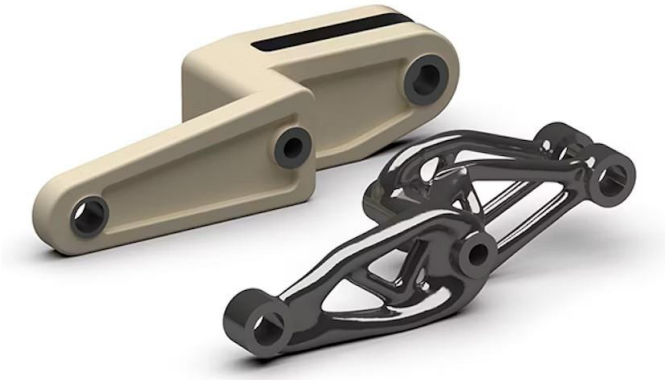


Figura 4-2 Esempio di geometria ottenuta attraverso ottimizzazione topologica

4.2.1 Vantaggi e svantaggi dell'ottimizzazione topologica

Il modello ottenuto attraverso l'ottimizzazione topologica può essere utilizzato come punto di inizio o di riferimento, potendo quindi così evitare di investire tempo per la creazione di un modello.

Così facendo risulta chiaro dunque come si vada, in questo modo, a risparmiare tempo e ad ottimizzare le prestazioni.

Quindi, come già detto, il compito dell'ottimizzazione topologica è quello di generare una versione migliore, in termini di peso, del componente meccanico, seguendo i vincoli strutturali e tecnologici definiti in fase di ottimizzazione. Questo però senza andare ad influenzare in maniera negativa le prestazioni del sistema.

Il processo di ottimizzazione topologica viene sempre più utilizzato, grazie alle elevate prestazioni, nel settore aerospaziale, automobilistico, medico e meccanico.

Il suo punto debole, tuttavia, è la complessità delle geometrie ottenute, le quali possono essere risolte con l'utilizzo di tecnologie innovative o possono essere considerate come idee di spunto in fase di progettazione.

5 Metodo

Questo studio parte come necessario prosieguo di uno studio già effettuato in precedenza, indicato in [4], che si basava sull'andare a verificare il funzionamento di LeanCOST: si è studiato il funzionamento del programma, andando ad analizzare dei solidi di forma semplice, in particolar modo 3 cubi, ognuno con una diversa lavorazione.

Svolta questa analisi, si è quindi voluto, con questo studio, passare ad analizzare su LeanCOST delle geometrie reali: il caso studio preso in considerazione è quello di un supporto pedalina di una motocicletta.

L'obiettivo del seguente studio, dunque, come dice lo stesso titolo, è quello di ottenere più geometrie 3D ed andarle a comparare in termini di tempi e costi di realizzazione con il componente originale: con lo studio, si vuole capire come il processo di realizzazione, quindi i tempi, i costi e le lavorazioni, cambia con il cambiare della geometria.

Per fare questo si sono utilizzati due software:

- Siemens NX
- LeanCOST

Tramite il primo software si sono andate a creare le geometrie, utilizzando la funzione di ottimizzazione topologica, mentre attraverso il secondo software, si è ricavata una stima dei tempi, costi e cicli di fabbricazione di quello specifico componente.

Prima ancora di andare a ricavare le geometrie attraverso l'ottimizzazione topologica, si è svolto il lavoro di analisi sul pezzo originale: come primo step, si è sottoposto il pezzo ad analisi FEM (Finite Element Method).

Sottoporre un pezzo ad analisi FEM significa sottoporlo ai carichi e vincoli di progetto a cui è soggetto, per ottenere i valori di tensione e spostamento massimi.

Dopo averlo analizzato, si è importato il pezzo originale su LeanCOST come file .STL e, una volta indicati i parametri di input, quali:

- Materiale
- Rugosità
- Strategia di lavorazione

ed i parametri di LeanCOST:

- Precisione algoritmo
- Minima dimensione di discretizzazione

si è effettuata la simulazione.

A questo punto, i dati raccolti sono stati inseriti in una tabella e sono stati usati come riferimento per le successive analisi.

Effettuata questa prima analisi sul componente originale, si è quindi andati su NX per sviluppare le altre geometrie attraverso l'ottimizzazione topologica.

Si è partiti andando a realizzare il bounding box del pezzo da realizzare, così da avere le dimensioni di ingombro: lo si è poi andato a modificare, andando a togliere materiale per creare i fori, così da permettere l'inserimento dei bulloni.

Dopo questa prima modifica, quindi, si è andato ad inserire il bounding box in ottimizzazione, indicandolo come design space su cui andare ad applicare i carichi e i vincoli di progetto.

Una volta terminata l'ottimizzazione, si è analizzato il risultato ottenuto attraverso l'analisi FEM, così da trovare i valori di tensione e spostamento massimi a cui il componente è sottoposto applicando gli opportuni carichi e vincoli.

Una volta finita la realizzazione e l'analisi della prima geometria ottimizzata, attraverso il software NX si è provveduto a creare una seconda geometria, modificando il solido da utilizzare come design space.

Una volta modificato il pezzo, lo si è sottoposto agli stessi carichi e vincoli del precedente e si è effettuata l'ottimizzazione.

Ottenuto il solido ottimizzato, questo è stato sottoposto allo stesso workflow dell'altro componente: quindi, lo si è analizzato attraverso analisi FEM, ricavando, anche qui, come per la geometria originale e per la prima geometria ottimizzata, i valori di tensione e spostamento massimi.

Questi ultimi valori sono stati, a questo punto, confrontati sia con i valori del pezzo precedentemente ottimizzato, sia con i valori del componente originale: si è proceduto quindi a paragonare non solo i valori di tensione e spostamento massimi, ma anche il peso di ciascuno dei tre componenti.

Infine, anche il secondo componente ottimizzato è stato inserito in LeanCOST come file .STL e, dopo aver settato i vari parametri, è stata mandata la simulazione.

Ottenuti i dati dello studio, questi sono stati comparati con i risultati ricavati per il primo componente ottimizzato e per il componente originale.

Si è deciso infine di focalizzarsi, in particolare, sul tempo di realizzazione del prodotto: questo risulta infatti essere un fattore di rilevanza primaria, importantissimo da tenere in considerazione in fase di progetto, in quanto estremamente impattante sui costi di realizzazione.

6 Casi studio

Lo scopo di questo lavoro è quello di utilizzare geometrie reali ottenute attraverso ottimizzazione topologica e di andarle ad analizzare utilizzando il software LeanCOST, per vedere come cambia il tempo di lavorazione in base alla geometria fornita come input per la simulazione.

Il caso di studio preso in considerazione da questa tesi è quello di un supporto pedalina di una moto, rappresentato in Figura 6-1:

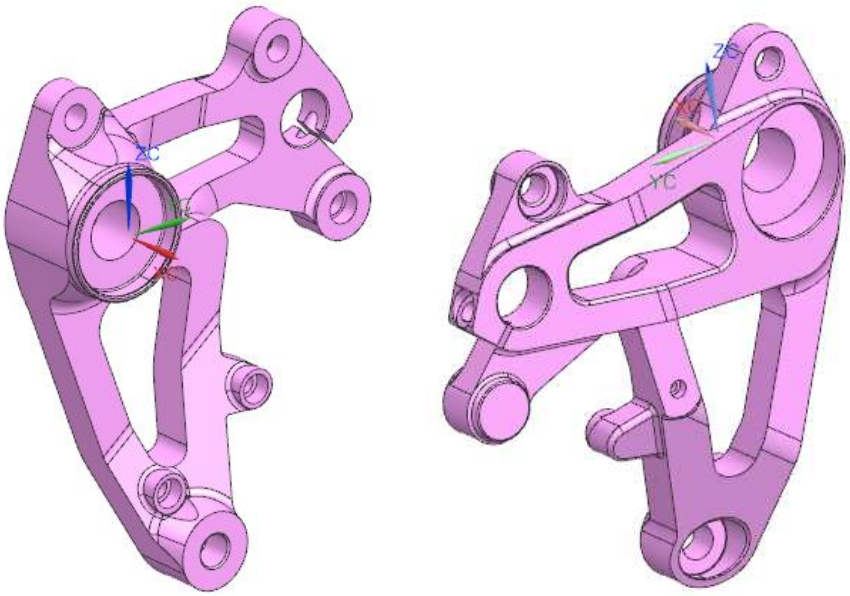


Figura 6-1: Supporto pedalina utilizzato come caso studio

Questo componente è stato utilizzato come riferimento per poi andare a realizzare delle altre geometrie.

6.1 Lavoro svolto su NX

6.1.1 Caso studio: prima geometria ottimizzata

Il primo caso studio che si andrà a presentare è quello della prima geometria del pezzo supporto pedalina di una moto, ottenuta tramite ottimizzazione topologica,

Il primo passo di questo studio è quello di andare a ricavare la geometria ottimizzata attraverso l'utilizzo del software NX.

Come primo passo è stato realizzato il bounding box del componente originale, in modo da avere un riferimento per quelle che sono le dimensioni di ingombro da rispettare.

Per ottenere il bounding box si utilizza l'apposito comando di NX indicato come "solido delimitante", Figura 6-2, Figura 6-3.



Figura 6-2: Icona comando solido delimitante

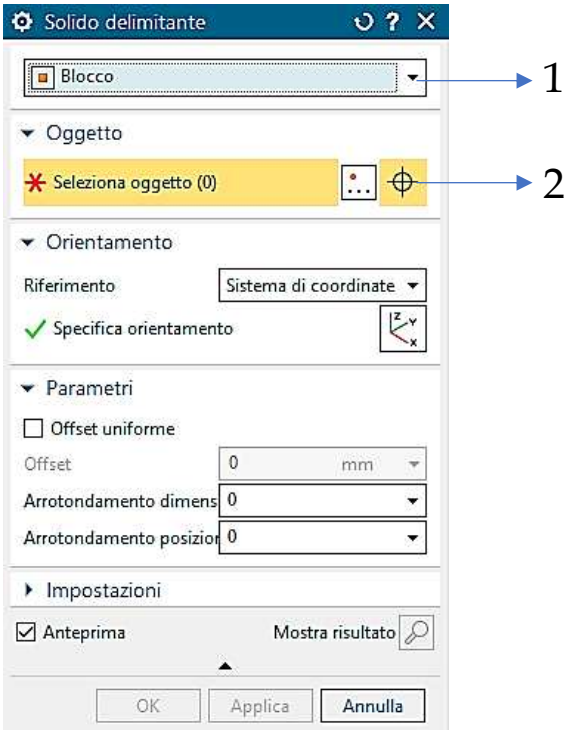


Figura 6-3: Centro di controllo del comando solido delimitante

Come si può vedere dalla Figura 6-3, per prima cosa si va a selezionare il tipo di solido delimitante, ovvero: un blocco, in caso si voglia come bounding box un parallelepipedo, oppure si può selezionare la voce cilindro.

Successivamente si va a selezionare il solido di cui si vuole costruire il solido delimitante.

Una volta completati questi passaggi si preme "ok" e si va automaticamente ad ottenere il solido voluto, come si può osservare dalla Figura 6-4:

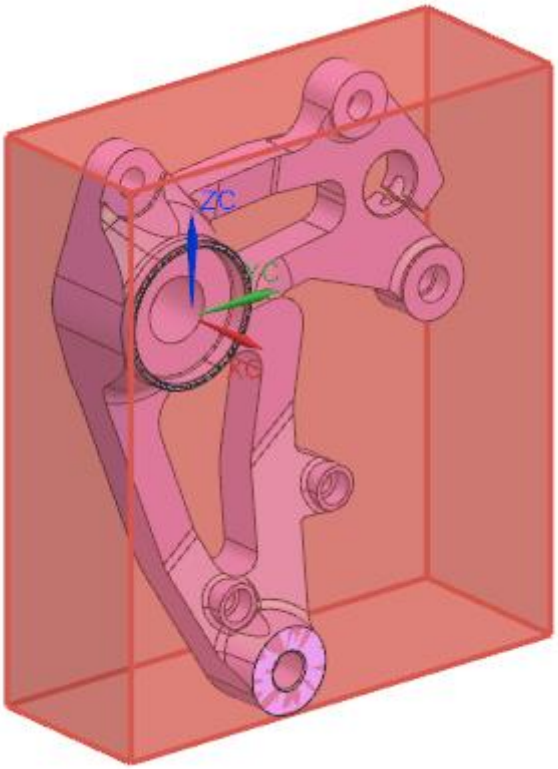


Figura 6-4: Solido delimitante del supporto originale

Una volta ottenuto il parallelepipedo di ingombro del componente, si vanno a creare i vari bounding boxes di tutti gli altri componenti, come mostrato in Figura 6-5, utilizzando la forma cilindrica per le viti, mentre il parallelepipedo per tutti gli altri componenti, così da avere automaticamente sia tutti i riferimenti riguardanti le dimensioni e le posizioni dei fori, sia le dimensioni di ingombro dei solidi che poi non dovranno essere considerati nel design space, come, ad esempio, la pompa del freno.

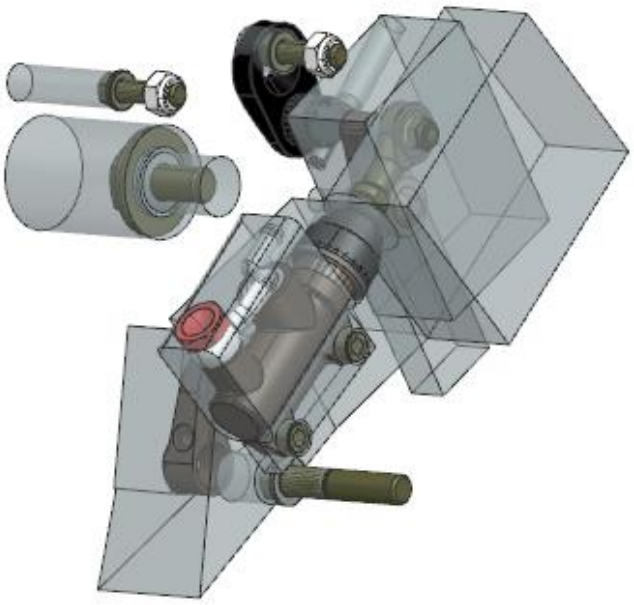


Figura 6-5: Solidi delimitanti che non sono parte del design space

Una volta realizzati tutti i solidi delimitanti, si è arrivati ad avere tutto l'insieme di questi solidi, come in Figura 6-6.

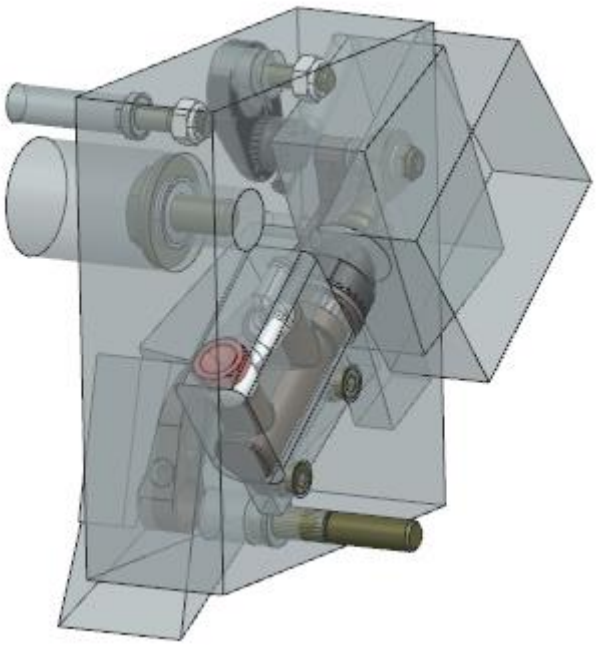


Figura 6-6: Insieme dei solidi delimitanti

Il passo successivo è stato quello di andare a modificare il soldo delimitante principale per ottenere una forma il più vicino possibile a quella da realizzare.

Per fare ciò si sono utilizzati i diversi comandi di NX come, ad esempio, sottrai e sformo e si è arrivati ad avere una geometria come quella presente in Figura 6-7.

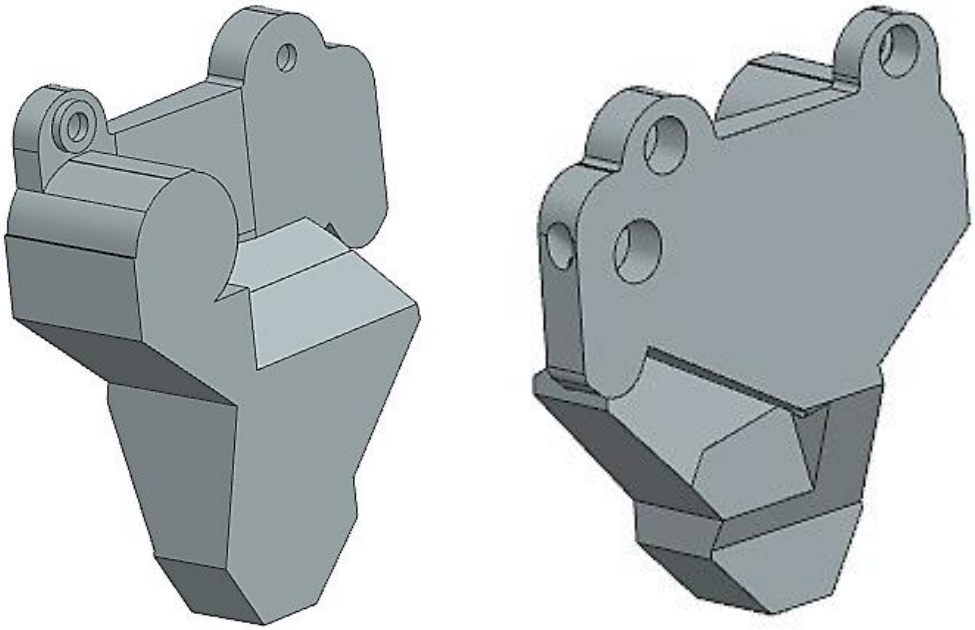


Figura 6-7: Viste del design space

Una volta realizzata questa geometria, si è entrati nella sezione di ottimizzazione topologica di NX attraverso l'apposito comando (Figura 6-8).



Figura 6-8: Icona comando di ottimizzazione topologica

Una volta dentro la sezione di ottimizzazione topologica si è seguito il seguente workflow:

1. Si va ad indicare il tipo di analisi (strutturale, vibrazione), l'obiettivo di simulazione (aumentare rigidezza o ridurre massa o volume al minimo) ed infine si va ad indicare la precisione della soluzione, come mostrato in Figura 6-9:

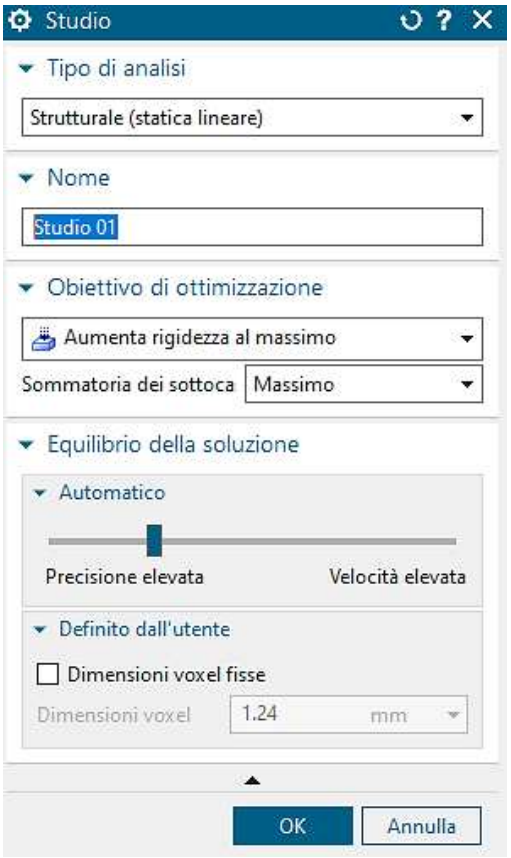


Figura 6-9: Finestra di studio dell'ottimizzazione

Nel caso in esame si è effettuata un'analisi strutturale con obiettivo quello di aumentare la rigidezza. Inoltre, si è scelto di effettuare una simulazione più precisa a discapito di una minore velocità e quindi di maggior tempo di simulazione, con dimensioni voxel di 1.24 mm.

Un voxel è l'equivalente tridimensionale di un pixel. Il termine "voxel" deriva dalla contrazione delle parole "volume" e "pixel". In informatica e grafica computerizzata, un pixel rappresenta l'unità più piccola di un'immagine bidimensionale, mentre un voxel rappresenta l'unità più piccola in uno spazio tridimensionale.

2. Si definisce il design space andando ad assegnare anche il materiale, Figura 6-10:



Figura 6-10: Finestra design space

In questo caso come solido si è selezionato il bounding box precedentemente modificato, assegnando come materiale l'Al 6061.

3. Si definiscono i solidi di costruzione ed in base alla funzione del solido nel design space si va a definire il metodo (mantieni all'interno, all'esterno oppure applica uno svuotamento), andando ad indicare anche l'offset, Figura 6-11:

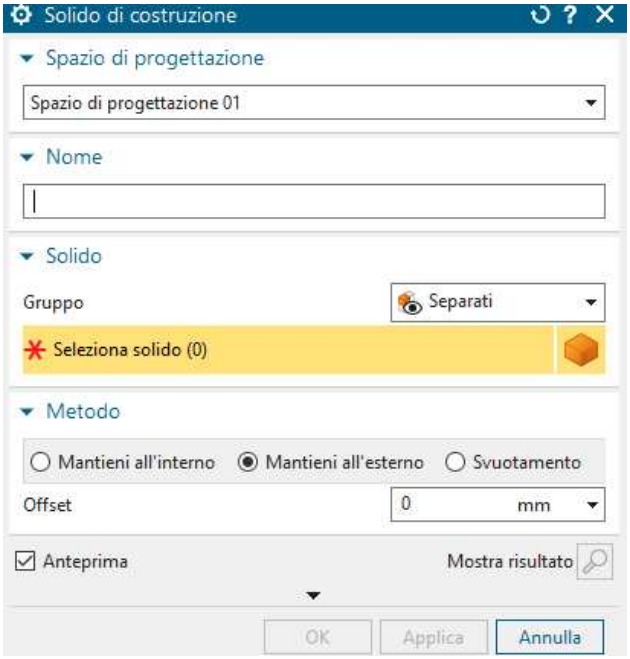


Figura 6-11: Comando solido di costruzione

Nel seguente studio, come mostrato in Figura 6-12, si sono indicati come solidi di costruzione da mantenere all'esterno quelli in rosso, assegnando ad ognuno un diverso offset per lasciare dello spazio tra i componenti, in modo che, quando poi si va ad assemblare il tutto non si hanno problemi di intersezione.

Mentre si sono indicati in giallo i solidi di costruzione su cui effettuare uno svuotamento, andando ad assegnare lo spessore delle pareti. Questi solidi sono quelli utilizzati per la creazione dei fori.

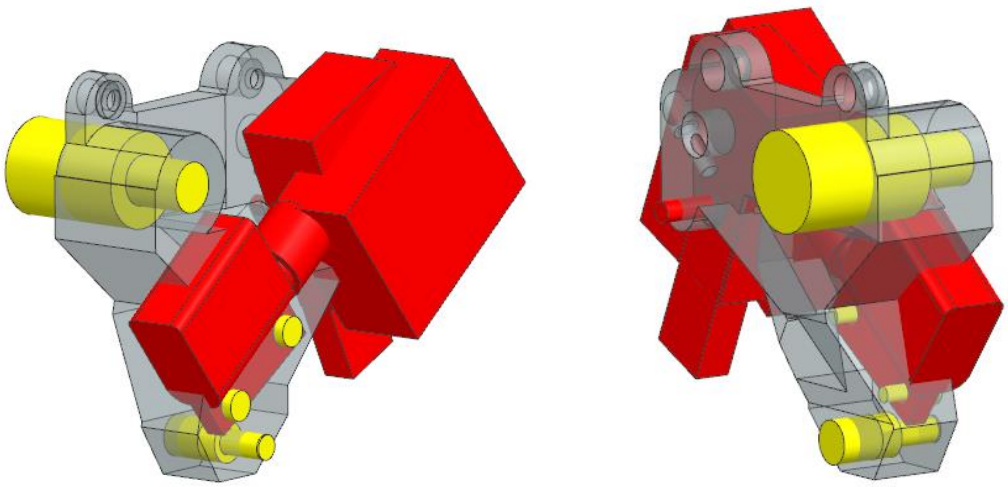


Figura 6-12: Solidi di costruzione

4. Si determinano i vincoli di analisi (fisso, agganciato, dispositivo di scorrimento agganciato, dispositivo di scorrimento lineare, dispositivo di scorrimento planare). Come mostrato in Figura 6-13:

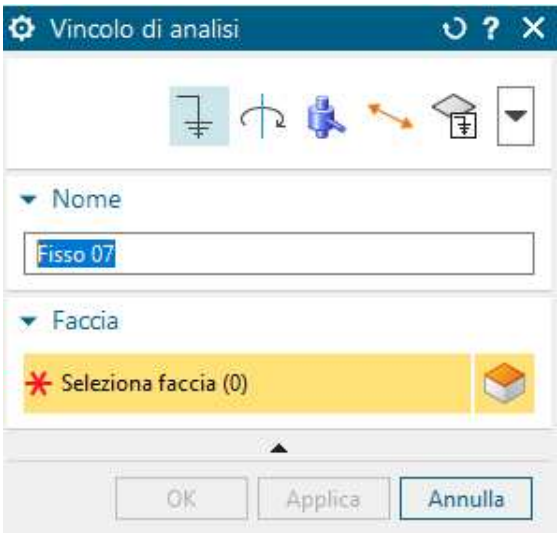


Figura 6-13: Comando vincolo di analisi

Nel caso preso in considerazione si sono andati ad indicare come vincoli fissi i fori che poi, a punto, vengono fissati al telaio.

5. Si determinano i carichi, che possono essere forze, carichi di cuscinetto, pressione e momenti di forza. Si va così a specificare sia la faccia a cui i carichi devono essere applicati, sia la direzione e l'intensità del carico, come mostrato in Figura 6-14

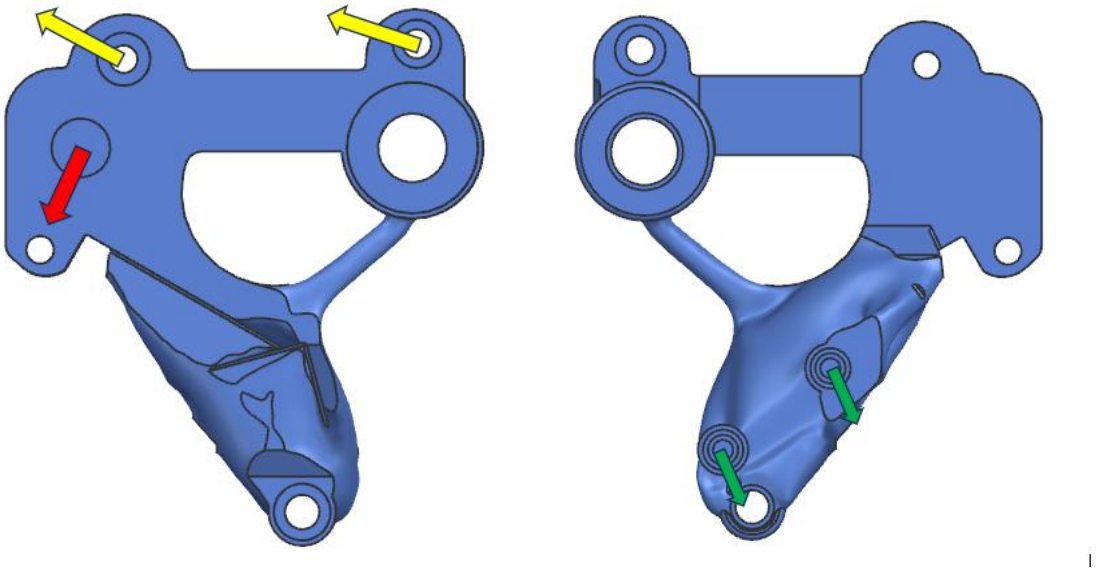


Figura 6-14: Carichi applicati

Per determinare il carico in rosso, quello applicato direttamente alla pedalina, si è fatto riferimento allo studio [5][5]: in questo studio si afferma che uno dei principali fattori che caratterizzano il carico sulle pedane posteriori di una moto è il peso del passeggero. Quando il passeggero si trova seduto, il peso viene distribuito tra le pedane destra e sinistra e la sella: tuttavia, se il passeggero si solleva per cambiare posizione, una parte maggiore del peso sarà sostenuta dalle pedane stesse, poiché il corpo non è più a contatto con la sella.

Inoltre, un altro scenario da considerare riguarda la salita del passeggero sulla motocicletta: la cosa più comune, infatti, è mettere un piede su una delle due pedane e poi salire.

In questo caso, quindi, la maggior parte del peso sarà sostenuta da solo una delle pedane, essendo questa la parte su cui si poggiano il piede e la gamba del passeggero.

Va per di più detto che anche la semplice azione di essere seduti sulla moto può comportare un aumento del carico sulle pedane: la motocicletta può infatti affrontare asperità sulla strada o altre situazioni che comportano sollecitazioni aggiuntive sulle pedane. Per l'ottimizzazione topologica e la verifica mediante modelli FEM, la Ducati Motor Holding ha fornito uno specifico LC (carico limite) di 1700N nella direzione Z negativa: tale specifica è stata determinata come un valore di riferimento per garantire la resistenza e la sicurezza delle pedane posteriori durante l'utilizzo della motocicletta.

I fori a cui sono applicati i carichi in giallo, invece, sono quelli in cui verrà poi montato il silenziatore: per valutare questi carichi, si è stimato un peso di 9 kg del silenziatore e lo si è moltiplicato per un fattore di sicurezza pari a 5, ottenendo 45 kg.

Dividendo questo peso per due, che sono i fori, si è ottenuto un peso di 22,5 kg per foro, che comporta quindi un carico di 225 N su ogni foro.

Infine, per i carichi verdi, si è considerato un peso del sistema della pompa del freno di 3 kg, moltiplicati anch'essi per un fattore di sicurezza pari a 5. Si è così ottenuto un totale di 15 kg che, divisi per due fori, sono 7.5 kg per foro.

Così facendo si ottiene un carico di 75 N applicato su ciascun foro.

6. Si va quindi ad impostare il vincolo di ottimizzazione, che può essere limite della massa massima, destinazione della massa, limite di tensione massima e limite di spostamento massimo, come si può vedere dalla Figura 6-15:

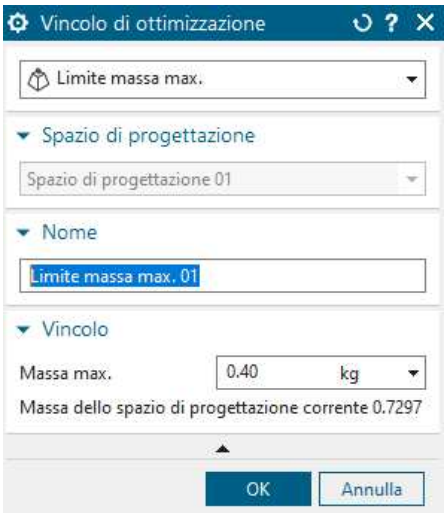


Figura 6-15: Vincolo di ottimizzazione

In questo studio si è impostato come vincolo di ottimizzazione il limite di massa massima ovvero il solido del design space non deve superare la massa indicata, in questo caso 0.40 kg.

Si arriva infine quindi a mandare l'ottimizzazione topologica: si ottiene così la geometria mostrata in Figura 6-16.

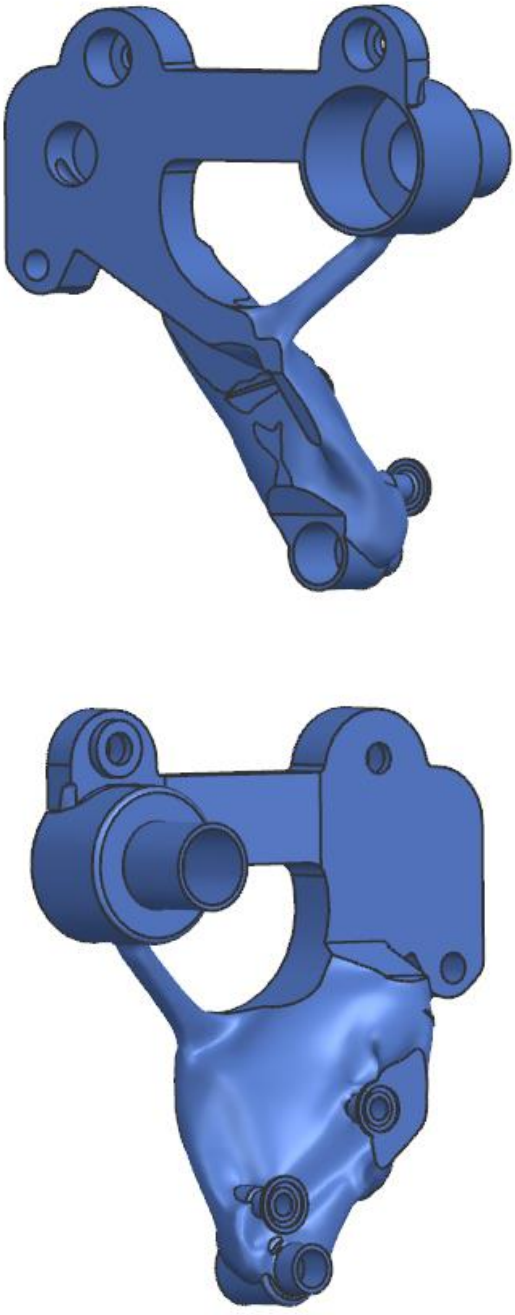


Figura 6-16: Prima geometria ottimizzata

In assieme, Figura 6-17 :



Figura 6-17: Prima geometria ottimizzata, in assieme

6.1.2 Caso studio: seconda geometria ottimizzata

Per ottenere la seconda geometria, si è partiti modificando il bounding box già utilizzato per la prima geometria, in moda da avere un input diverso in fase di ottimizzazione: ovvio è che i carichi ed i vincoli cui il pezzo è sottoposto sono gli stessi già analizzati per la prima geometria.

Le modifiche che si sono apportate al bounding box si possono vedere dalla Figura 6-18Figura 6-18:

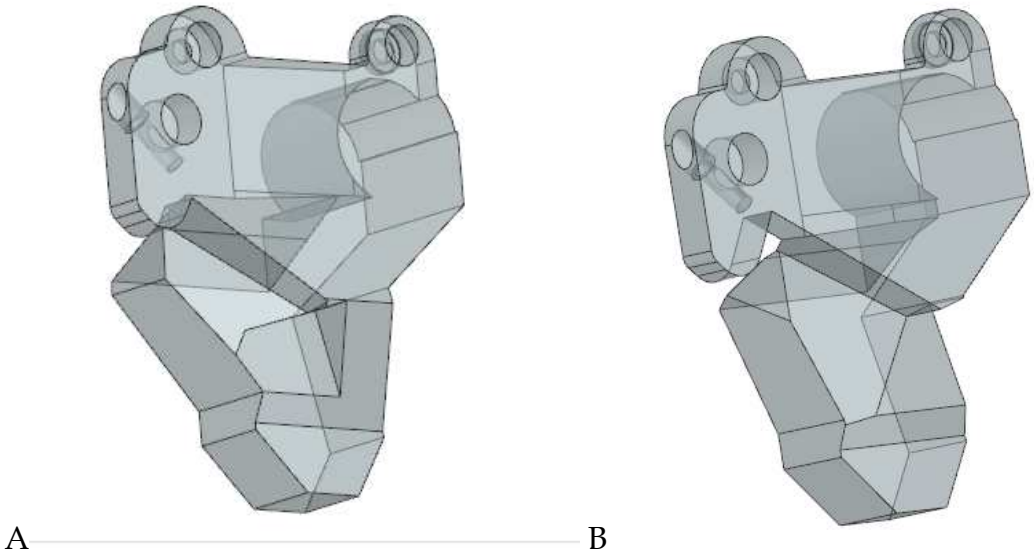


Figura 6-18: Bounding box: A) prima geometria, B) modificato per la seconda geometria

Il procedimento di ottimizzazione poi è lo stesso già spiegato sopra, a cui è stata sottoposta la prima geometria.

La seconda geometria ottenuta attraverso ottimizzazione è mostrata in Figura 6-19Figura 6-19:

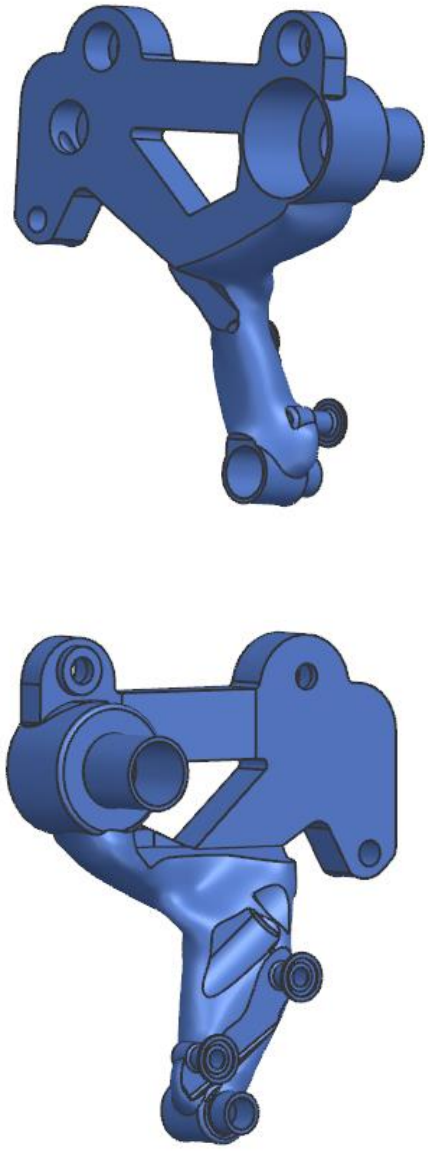


Figura 6-19: Seconda geometria ottimizzata

In assieme, Figura 6-20:



Figura 6-20: Seconda geometria ottimizzata, in assieme

6.2 Analisi FEM

L'analisi FEM è un metodo di ingegneria numerica che viene utilizzato per risolvere problemi fisici: questo permette di calcolare il comportamento strutturale di un sistema, scomponendo oggetti complessi in numerosi componenti più semplici da risolversi.

Il metodo FEM, metodo degli elementi finiti, dunque, è una tecnica utilizzata per analizzare un modello geometrico suddividendolo in piccoli elementi calcolabili tramite una griglia geometrica chiamata mesh: questi elementi sono individuati in modo da rappresentare accuratamente la geometria del sistema strutturale in esame.

Ogni elemento viene quindi considerato separatamente e le soluzioni parziali per ciascun elemento vengono sommate insieme per ottenere la soluzione finale del problema.

Grazie a questo tipo di analisi, è possibile valutare, tramite calcoli, i possibili spostamenti, le deformazioni e/o le tensioni presenti nella struttura.

Il processo di analisi FEM si sviluppa in tre fasi principali:

- prima fase, pre-processing: si definisce il modello ad elementi finiti. Questo implica la scelta dell'analisi da utilizzare, come la statica, dinamica, termica, lineare…

  Si devono anche specificare la tipologia di elementi finiti da utilizzare, i parametri dei materiali assegnati, i vincoli e i carichi: durante questa fase, il modello iniziale viene scomposto in una serie di piccoli elementi di forma ridotta, riducendo così la complessità del problema. Questa analisi di elementi finiti si basa sulla creazione di una griglia, o mesh, con forme elementari come quadrati, cerchi o triangoli; è inoltre necessario studiare il comportamento di ogni singolo elemento, osservando come questo reagisce allo stress e come si deforma. La soluzione del problema su ogni elemento viene espressa come una combinazione lineare di funzioni di base o funzioni di forma.

- seconda fase, processing: è la fase centrale e decisiva del processo. Durante questa fase, il software utilizzato per il calcolo strutturale con solutore FEM integrato risolve in modo discreto e approssimato i sistemi di equazioni alle derivate parziali sul dominio computazionale precedentemente discretizzato.
  È proprio in questa fase che si ottengono i risultati del calcolo strutturale.
- terza ed ultima fase, post-processing: questa fase consiste nell'elaborazione e nella visualizzazione grafica dei risultati ottenuti. Si è in grado, ora, di valutare se il design scelto per l'applicazione specifica soddisfa i requisiti progettuali, tenendo conto anche dei vincoli e dei carichi definiti.
  Nel caso in cui il design non soddisfi i requisiti, è possibile tornare indietro e ripetere l'analisi fino a quando il design non rispecchia appieno i requisiti progettuali.

Effettuare un'analisi FEM in modo accurato è molto difficile: durante il processo, infatti, possono sorgere molte insidie che possono compromettere i risultati ottenuti. Infatti, ad esempio, può essere difficile modellare geometrie particolarmente complesse o può essere difficile applicare i vincoli corretti che riflettono le vere condizioni della struttura.

Per arrivare a dei risultati maggiormente soddisfacenti risulta quindi necessario fare affidamento su software professionali specializzati nel calcolo strutturale, che offrano non solo analisi avanzate, ma anche la possibilità di risolvere eventuali problematiche che possono sorgere durante l'analisi.

Risulta poi fondamentale, durante il processo di analisi FEM, considerare una serie di sviluppi e chiarimenti per ottenere risultati accurati e affidabili: a questi fini, risulta quindi essenziale effettuare una corretta discretizzazione della struttura, ovvero suddividerla in elementi finiti, in modo da poter rappresentare in modo accurato il comportamento della struttura reale.

È altresì importante considerare adeguatamente i carichi e le condizioni di contorno, come ad esempio la presenza di vincoli o forze esterne, per ottenere risultati rappresentativi del reale comportamento della struttura.

Infine, è necessario verificare e validare il modello FEM utilizzato, confrontando i risultati ottenuti con dati sperimentali o con risultati analitici noti: questa verifica può infatti aiutare a identificare eventuali discrepanze o errori nel modello e a garantire che i risultati siano accurati e affidabili.

Il calcolo strutturale FEM, dunque, offre diversi vantaggi, fondamentali per la progettazione e la produzione del pezzo:

- precisione nella realizzazione di un oggetto;
- riduzione del tempo di progettazione e prototipazione;
- miglioramento del design in correlazione alla struttura;
- possibilità di creare prototipi virtuali risparmiando tempo e soldi;
- aumento della produttività e delle entrate.

6.2.1 Caso studio: analisi FEM della prima geometria

Per fare l'analisi FEM, si va sulla sezione applicazione di NX e si seleziona il comando progetto, come mostrato in figura.

A questo punto, come si può vedere dalla figura, si apre automaticamente una finestra, in cui bisogna selezionare il solido di cui si vuole effettuare l'analisi: si aprirà allora la finestra soluzione in cui si va ad indicare il tipo di analisi, strutturale o termica, ed il tipo di soluzione.

In questo caso, si è fatta un'analisi strutturale del pezzo con una soluzione statica lineare.

Si va allora a premere l'apposito comando "crea soluzione" e si assegna il materiale al solido: è stato utilizzato il materiale Al 6061.

Successivamente, si crea la mesh 3D del pezzo, andando a selezionare il solido su cui si sta lavorando ed impostando i parametri riguardanti la mesh, , come mostrato in Figura 6-21Figura 6-21:

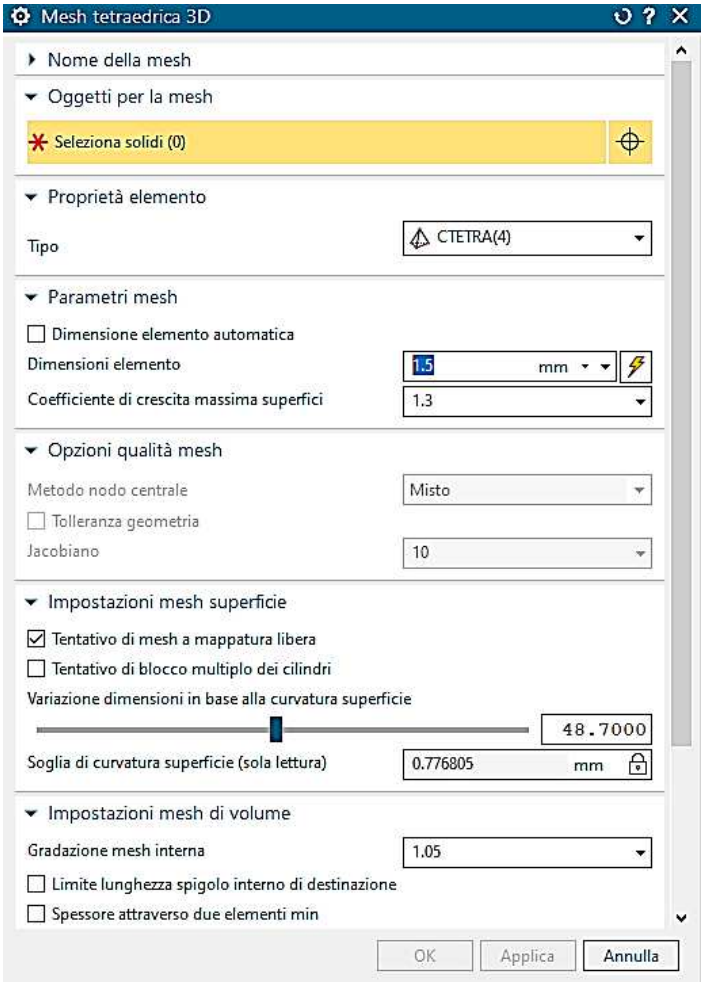


Figura 6-21: Creazione mesh 3D

Si indicano allora il tipo di carico ed il tipo di vincolo, come indicato in Figura 6-22: si va quindi a risolvere, tramite l'apposito comando risolvi, che presenta l'icona mostrata in Figura 6-23Figura 6-23.

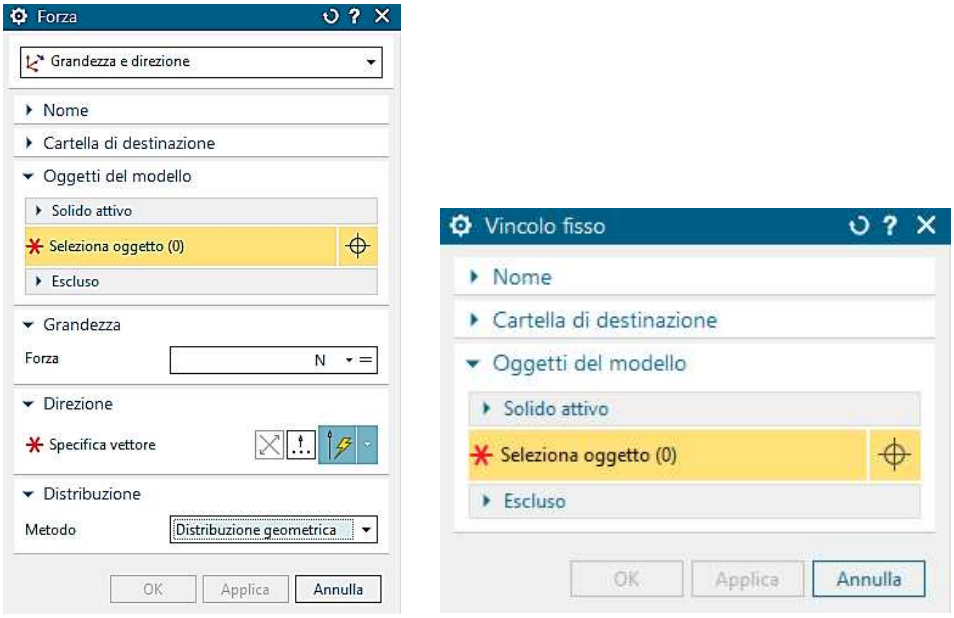


Figura 6-22: Inserimento carichi e vincoli per analisi FEM



Figura 6-23: Icona risolvi analisi FEM

Si va quindi sul navigatore post processamento, che si può vedere dalla Figura 6-24Figura 6-24: qui avremo tutte le soluzioni, con i valori relativi ai parametri di interesse.

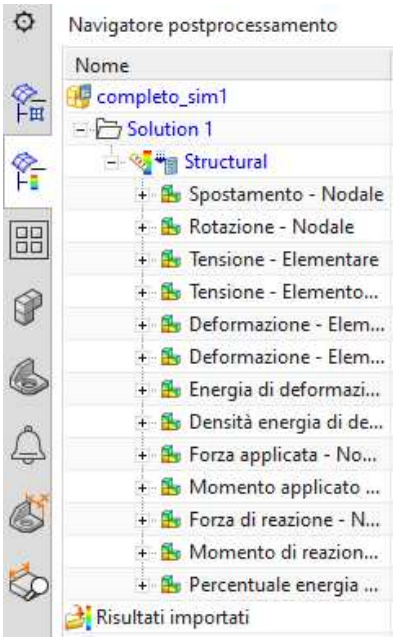
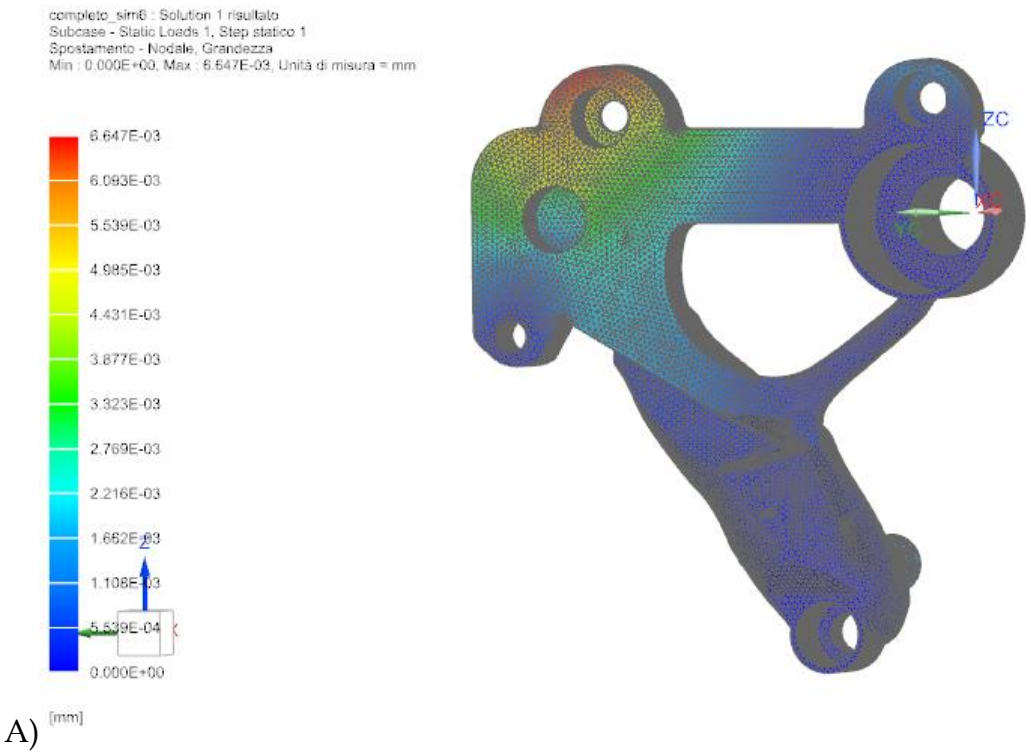


Figura 6-24: Navigatore postprocessamento

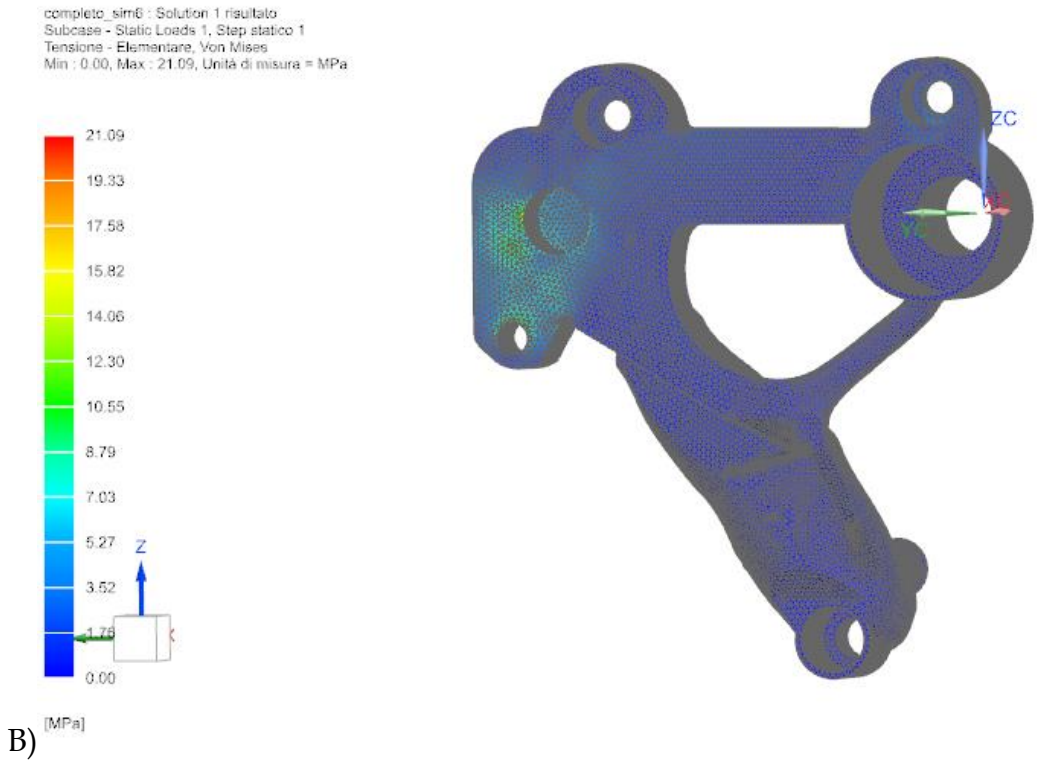
I risultati ottenuti dunque sono, per la prima geometria ottimizzata:

- spostamento: 6,647E-03 mm
- tensione: 21,09 MPa

Come mostrato in Figura 6-25.



A)



B)

Figura 6-25: Analisi FEM prima geometria: A) spostamento, B) tensione

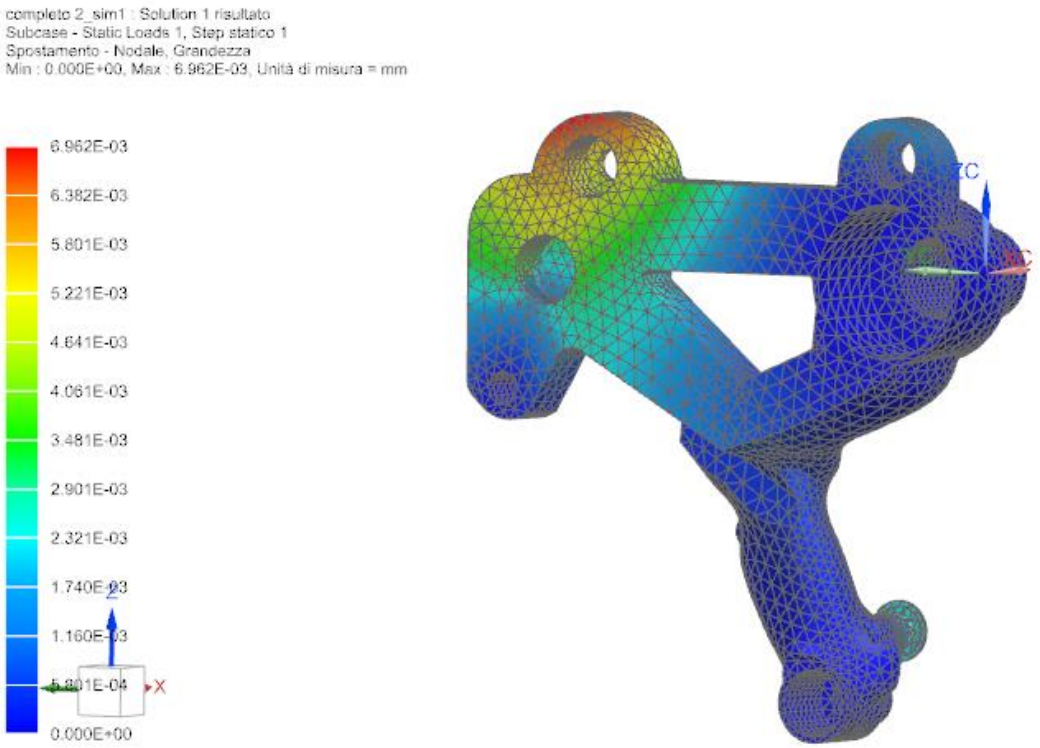
6.2.2 Caso studio: analisi FEM della seconda geometria

Per la seconda geometria, si è sottoposta anche questa ad analisi fem.

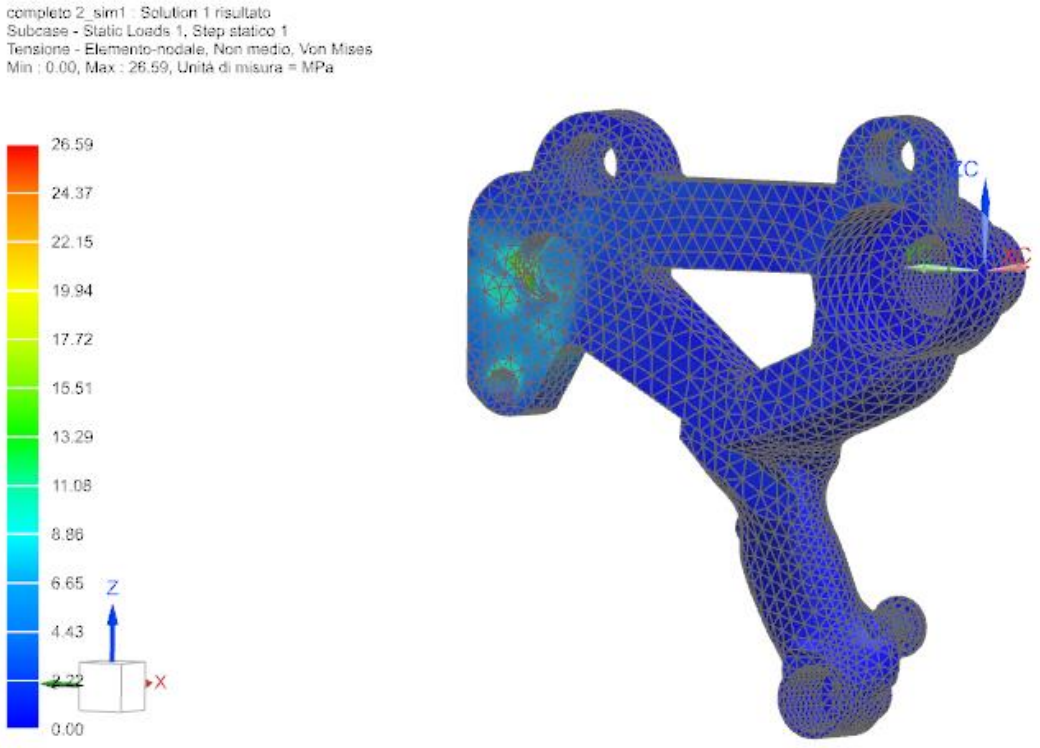
I passaggi seguiti sono quelli già illustrati sopra per la prima geometria.

Come si può vedere in Figura *6-26*, i risultati ottenuti sono:

- spostamento: 6.96E-03 mm
- tensione: 26.59 MPa



A)



B)

Figura 6-26*: Analisi FEM seconda geometria: A) spostamento, B) tensione*

6.2.3 Caso studio: analisi FEM della geometria originale

Anche la geometria originale è stata sottoposta ad analisi FEM in modo da ottenere i dati di spostamento e tensione massima di riferimento da confrontare poi con i risultati precedentemente ottenuti per le altre due geometrie.

Anche per questa geometria il workflow seguito è quello delle geometrie precedenti e i risultati ottenuti sono mostrati in Figura 6-27:

- Spostamento: 0.217 mm
- Tensione: 134.96 MPa

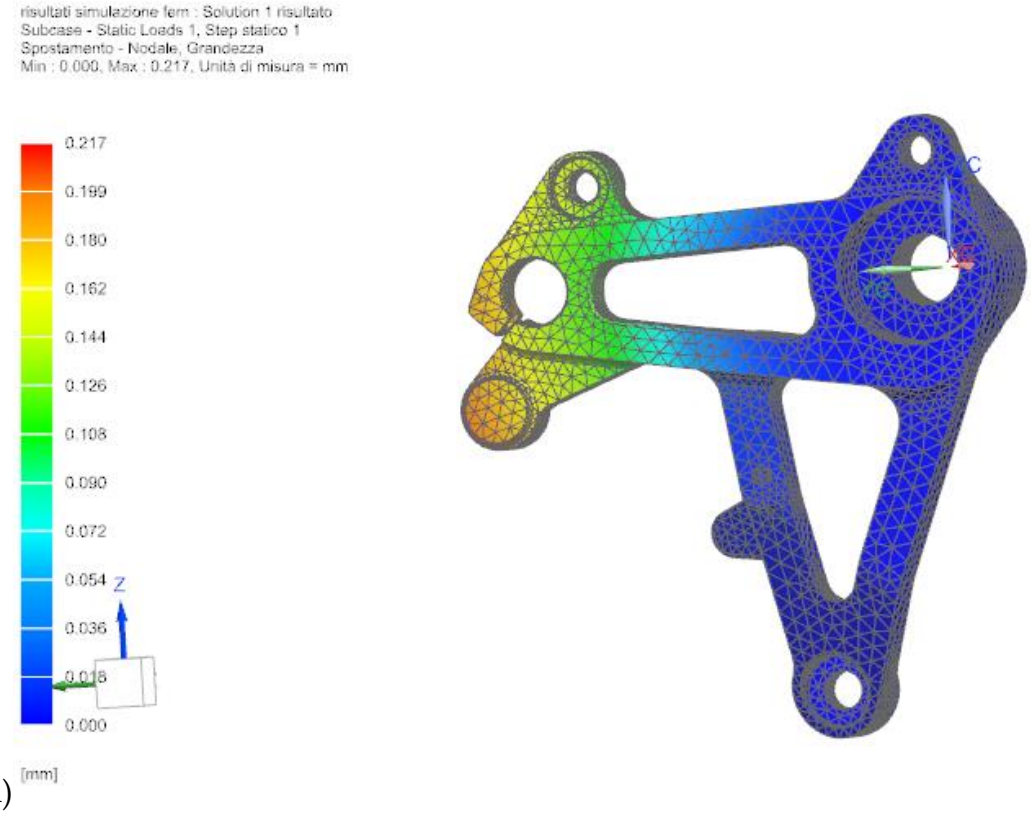


Figura 6-27: Analisi FEM geometria originale: A) spostamento, B) tensione

6.3 Lavoro su LeanCOST

Una volta ottenuto il componente ottimizzato, lo si inserisce su LeanCOST.

Per fare questo si esporta il componente da NX come file .STL.

Un file STL, acronimo di Standard Triangulation Language oppure Standard Tasselation Language, è un formato di file binario utilizzato molto nella prototipazione rapida. Esso rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in tanti triangoli, le cui dimensioni dipendono dalla precisione richiesta in fase di salvataggio (Figura 6-28). Esso consiste delle coordinate X,Y,Z di ciascun vertice di ogni triangolo, con un vettore per descrivere l'orientazione della normale alla superficie del triangolo. Questo formato presenta dei vantaggi come la semplicità, in quanto risulta molto facile sia da generare che da processare, mentre a suo sfavore presenta una geometria approssimata.

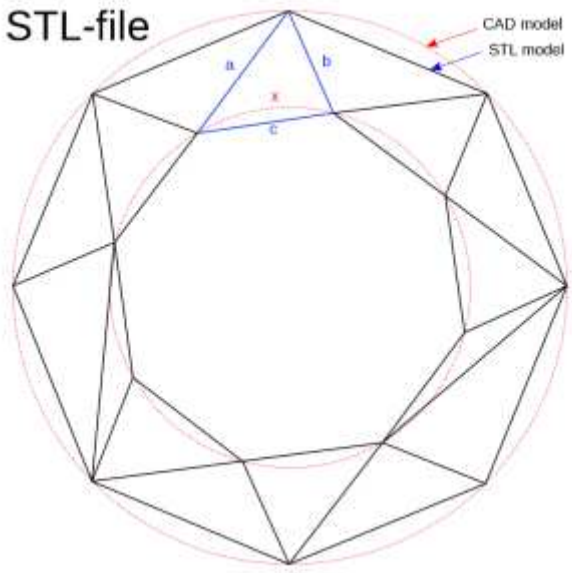


Figura 6-28: Rappresentazione file STL

Durante questa fase, in cui la geometria NURBS viene trasformata in una mesh, si possono settare dei parametri per guidare la discretizzazione della geometria a seconda della precisione che si desidera ottenere, questi parametri sono: la tolleranza cordale e la tolleranza angolare, che rappresentano la massima deviazione lineare normale (perpendicolare) consentita dalla superficie del modello 3D così come progettato e dalla faccia triangolare del STL risultante, e l'angolo massimo consentito tra le normali di 2 triangoli vicini che compongono la mesh.

6.3.1 Caso studio: analisi LeanCOST della prima geometria ottimizzata

Si comincia il lavoro esportando il componente da NX come file .STL, indicando i valori di tolleranza cordale e tolleranza angolare, come mostrato in Figura 6-29: per questa geometria, si sono scelti i valori di tolleranza standard di NX, ovvero tolleranza cordale pari a 0,08 mm e tolleranza angolare pari a 18°.

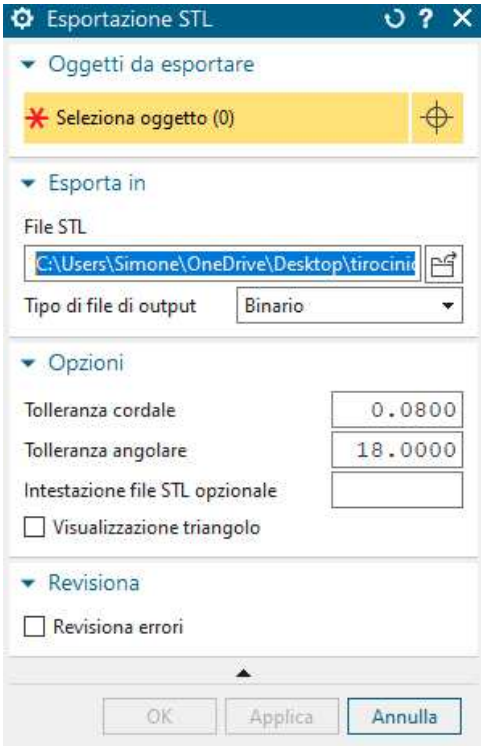


Figura 6-29: Esportazione file NX in STL

A questo punto, si importa il pezzo su LeanCOST (Figura 6-30), con l'apposito comando "importa file .STL", che si può vedere in Figura 6-31; si vanno allora ad inserire i parametri di input, mostrati in Figura 6-32, che sono:

- rugosità
- materiale
- strategia di lavorazione

Nel caso di cui si sta trattando, si è scelto come materiale l'Alluminio - EN AW- 7075 [Al Zn5 5MgCu] - Ergal 55, con una rugosità generale di 25 µm ed una strategia di lavorazione che è quella del blocco fresato dal pieno freeform.

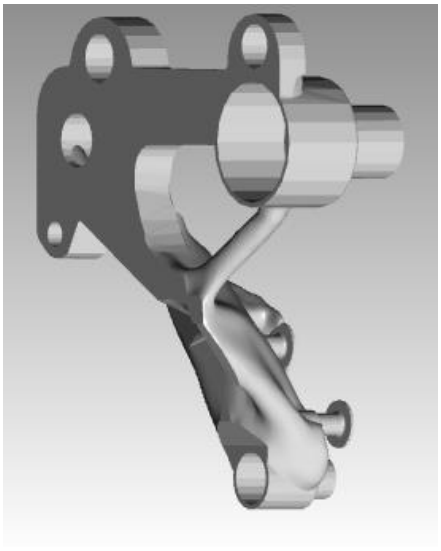


Figura 6-30: Geometria importata su LeanCOST



Figura 6-31: Importazione geometria in LeanCOST

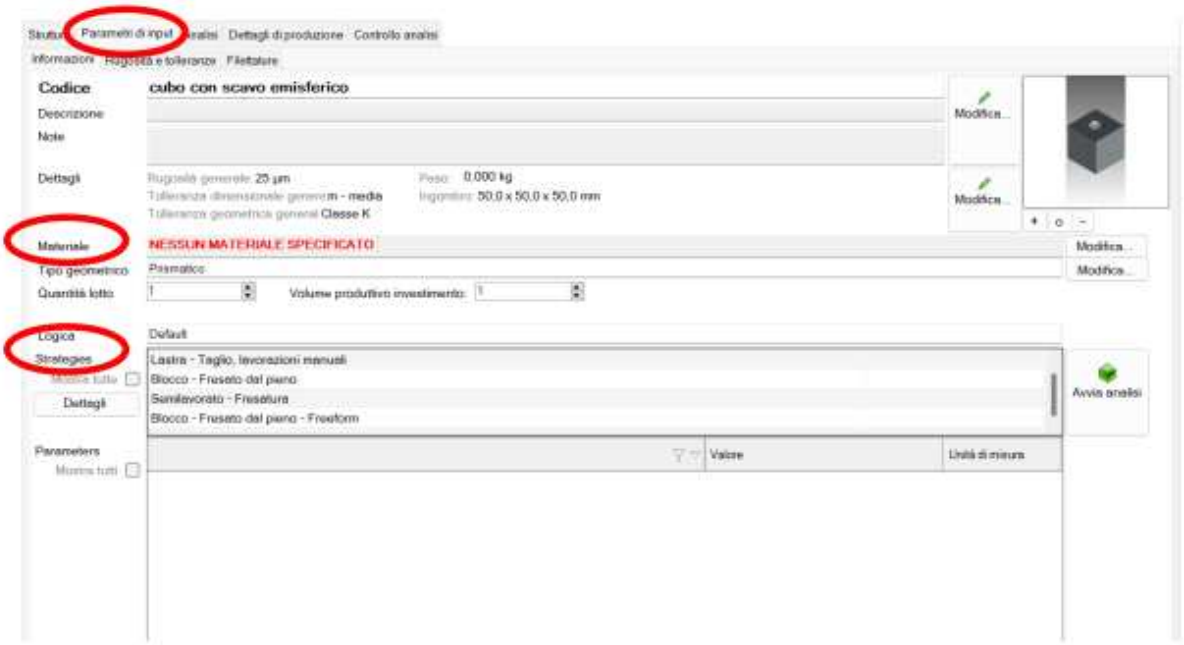


Figura 6-32: Inserimento parametri di input

Si procede dunque con l'analisi: dopo che questa analisi iniziale è conclusa, si va nella sezione analisi di LeanCOST e si seleziona il grezzo di partenza. Si vanno così a definire i valori di precisione dell'algoritmo e di minima dimensione di discretizzazione: nello studio, i parametri utilizzati sono stati 10 per quanto riguarda la precisione dell'algoritmo e 0,1 mm per la minima dimensione di discretizzazione.

Si procede quindi con una seconda analisi, al termine della quale avremo i risultati di analisi definitivi, mostrati in Figura 6-33.

Essendo il focus dello studio l'analisi dei tempi di lavorazione, le voci di maggior interesse sono proprio quelle riguardanti il tempo di lavorazione e il numero e il tipo di lavorazioni necessarie.

SCAVI (7)			
1 Scavo volumetrico dimensioni= 156,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	6,77	7,63
1 Fresatura freeform (Sgrossatura)	N° 1	6,77	7,63
1 Scavo volumetrico dimensioni= 151,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	8,05	9,08
1 Fresatura freeform (Semifinitura)	N° 2	8,05	9,08
1 Scavo volumetrico dimensioni= 150,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	122,18	**137,68**
1 Fresatura freeform (Semifinitura)	N° 3	122,18	137,68
1 Scavo volumetrico dimensioni= 155,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	0,52	0,59
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 4	0,52	0,59
1 Scavo volumetrico dimensioni= 148,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	0,74	0,84
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 5	0,74	0,84
1 Scavo volumetrico dimensioni= 150,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	26,62	**29,99**
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 6	26,62	29,99
1 Scavo volumetrico dimensioni= 150,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	39,9	**44,96**
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 7	39,9	44,96

A)

DETTAGLI TEMPO



	Tempo (min)				
Centro di costo	Operazioni	Accessorio	Setup	**Tempo pezzo**	**Tempo lotto**
Centro di lavoro 5 assi - medio	183,76	1,40	99,75	284,91	284,91

B)

Figura 6-33: Risultati analisi LeanCOST: A) n° operazioni B) tempi di lavorazione

6.3.2 Caso studio: analisi LeanCOST della seconda geometria ottimizzata

La seconda geometria, come la prima, è stata a questo punto esportata da NX come file in formato .STL, con gli stessi parametri di tolleranza cordale e tolleranza angolare.

Successivamente, si è importato il pezzo su LeanCOST (Figura 6-34) e si sono andati ad inserire gli stessi parametri di input e gli stessi valori delle variabili di LeanCOST usati per la prima geometria e illustrati precedentemente.

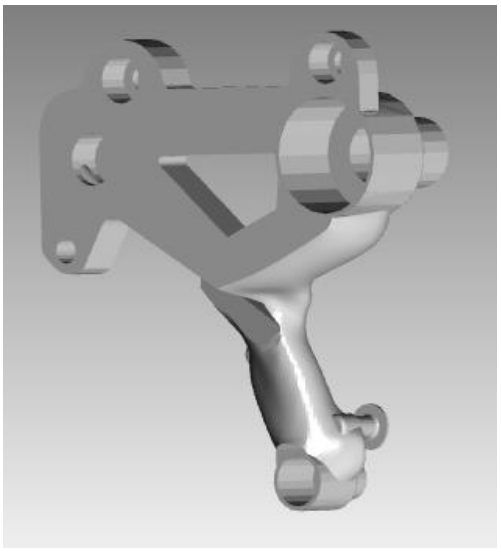


Figura 6-34: Geometria importata su LeanCOST

Una volta svoltasi l'analisi, i risultati ottenuti sono quelli mostrati in Figura 6-35: anche in questo caso, le voci di maggior interesse per questo studio sono quelle riguardanti il tempo di lavorazione e il numero e tipo di lavorazioni necessarie.

SCAVI (7)			
1 Scavo volumetrico dimensioni= 156,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	6,84	7,71
1 Fresatura freeform (Sgrossatura)	N° 1	6,84	7,71
1 Scavo volumetrico dimensioni= 151,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	8,48	9,56
1 Fresatura freeform (Semifinitura)	N° 2	8,48	9,56
1 Scavo volumetrico dimensioni= 150,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	108,16	**121,88**
1 Fresatura freeform (Semifinitura)	N° 3	108,16	121,88
1 Scavo volumetrico dimensioni= 155,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	0,46	0,52
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 4	0,46	0,52
1 Scavo volumetrico dimensioni= 148,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	0,73	0,82
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 5	0,73	0,82
1 Scavo volumetrico dimensioni= 150,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	23,22	**26,16**
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 6	23,22	26,16
1 Scavo volumetrico dimensioni= 150,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	35,87	**40,43**
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 7	35,87	40,43

A)

DETTAGLI TEMPO



	Tempo (min)				
Centro di costo	Operazioni	Accessorio	Setup	**Tempo pezzo**	**Tempo lotto**
Centro di lavoro 5 assi - medio	204,78	1,40	106,48	312,66	312,66

B)

Figura 6-35: Risultati analisi LeanCOST: A) n° operazioni B) tempi di lavorazione

6.3.3 Caso studio: analisi LeanCOST della geometria originale

La geometria originale, come la due geometrie ottimizzata, è stata infine esportata da NX come file in formato .STL, con gli stessi parametri di tolleranza cordale e tolleranza angolare già usati e analizzati sopra per le due geometrie ottimizzate.

A seguire, si è importata la geometria su LeanCOST, mostrata in Figura 6-36 e si sono inseriti gli stessi parametri di input e gli stessi valori delle variabili di LeanCOST usati per la prima e la seconda geometria ottimizzate, illustrati precedentemente.



Figura 6-36: Geometria importata su LeanCOST

Svoltasi e finita l'analisi, i risultati ottenuti sono quelli in Figura 6-37.

Anche in questo caso, come per tutto lo studio, le voci su cui si è maggiormente concentrata l'attenzione sono quelle riguardanti il tempo di lavorazione e il numero e il tipo di lavorazioni necessarie.

SCAVI (7)			
1 Scavo volumetrico dimensioni= 157,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	8,59	**9,68**
1 Fresatura freeform (Sgrossatura)	N° 1	8,59	9,68
1 Scavo volumetrico dimensioni= 149,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	6,18	6,97
1 Fresatura freeform (Semifinitura)	N° 2	6,18	6,97
1 Scavo volumetrico dimensioni= 148,...	Fresatura freeform (sgrossatura) (*)	79,14	**89,18**
1 Fresatura freeform (Semifinitura)	N° 3	79,14	89,18
1 Scavo volumetrico dimensioni= 156,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	0,52	0,59
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 4	0,52	0,59
1 Scavo volumetrico dimensioni= 147,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	0,55	0,62
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 5	0,55	0,62
1 Scavo volumetrico dimensioni= 149,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	19,28	**21,73**
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 6	19,28	21,73
1 Scavo volumetrico dimensioni= 148,...	Fresatura freeform (finitura) (*)	36,7	**41,35**
1 Fresatura freeform (Finitura)	N° 7	36,7	41,35

A)

DETTAGLI TEMPO



	Tempo (min)				
Centro di costo	Operazioni	Accessorio	Setup	**Tempo pezzo**	**Tempo lotto**
Centro di lavoro 5 assi - medio	150,97	1,47	89,28	241,72	241,72

B)

Figura 6-37: Risultati analisi LeanCOST: A) n° operazioni B) tempi di lavorazione

7 Confronto e discussione dei risultati

Si procede ora, in questa sezione, a confrontare ed analizzare i risultati ottenuti.

Si inizia dai risultati ottenuti tramite l'analisi FEM, ovvero tensione e spostamento massimi: da questi, mostrati nella tabella in Figura 7-1, si può vedere che i valori di tensione e spostamento massimi dei pezzi ottenuti attraverso ottimizzazione topologica sono nettamente inferiori dei valori del componente originale, a parità di materiale, carichi e vincoli applicati.

	pezzo originale	primo pezzo ottimizzato	secondo pezzo ottimizzato
peso [Kg]	0,309	0,329	0,368
tensione [MPa]	134,96	21,09	26,59
spostamento [mm]	0,217	6,647E-03	6,96E-03

Figura 7-1: Valori di peso, tensione e spostamento

Questo significa che i pezzi ottenuti tramite ottimizzazione topologica sono più resistenti, a danno, però, del peso: infatti, sono leggermente più pesanti rispetto al pezzo originale.

La differenza di peso tra i pezzi, originale e ottenuti tramite ottimizzazione, è molto inferiore rispetto alla differenza tra i valori di tensione e spostamento: il dato sul peso potrebbe quindi essere ritenuto superfluo a fronte di un netto miglioramento della resistenza.

Passando poi ai risultati ottenuti tramite analisi LeanCOST, i valori presi in considerazione per effettuare il confronto sono:

- peso
- numero di lavorazioni
- tempo di lavorazione

Questi valori sono stati, come possiamo vedere in Figura 7-2, tabellati: da questa tabella, possiamo notare che i tempi di lavorazione sono abbastanza differenti tra loro, nonostante il numero ed il tipo di operazioni che si vanno a svolgere durante il ciclo di lavorazione sono le stesse.

	originale	primo pezzo	secondo pezzo
peso [kg]	0,309	0,329	0,368
lavorazioni [n°]	7	7	7
tempo [min]	150,97	204,78	183,86

Figura 7-2: Tabella di confronto: peso, n° lavorazioni e tempi di lavorazione

Si è dunque pensato che questa differenza possa derivare dai parametri delle lavorazioni e dagli utensili utilizzati: si sono quindi andate a vedere e confrontare le singole operazioni, che sono sette per ogni componente, e da questo confronto si è notato che sia gli utensili utilizzati sia i parametri tecnologici sono uguali per ogni pezzo in ogni operazione. Inoltre, si è osservato che l'operazione che più influenza il tempo di lavorazione è la terza, semifinitura con fresa integrale a testa sferica di diametro 1 mm.

Una prova che si è fatta, allora, è stata quella di cambiare utensile e passare ad una fresa integrale con testa sferica di diametro 3 mm: si è così notato sia un drastico calo del tempo della singola lavorazione per ogni singolo pezzo, sia un assottigliamento della differenza del tempo della singola lavorazione tra i vari pezzi, come mostrato dalla tabella in Figura 7-3:

utensili	originale	primo pezzo ottimizzato	secondo pezzo ottimizzato
fresa integrale a testa sferica di diametro 1mm	79,141 min	122,177 min	108,162 min
fresa integrale a testa sferica di diametro 3mm	5,252 min	8,109 min	7,179 min

Figura 7-3: Tabella di confronto: variazione tempo della terza lavorazione al variare dell'utensile

Si noti però comunque come questa differenza dei tempi di lavorazione tra i vari pezzi non diventi mai nulla: questo significa che ci sarà sempre, nella produzione dei pezzi ottenuti tramite ottimizzazione, un maggior dispendio di tempo.

Questo maggior dispendio di tempo potrebbe però bilanciarsi con il fatto che, come si può vedere dalla differenza tra i valori di tensione e spostamento, i pezzi ottimizzati sono molto più resistenti: questo potrebbe significare, in un'ottica produttiva, produrre meno pezzi oggi nello stesso lasso di tempo, ma garantire una maggiore sicurezza di utilizzo, con una minor probabilità di rottura del pezzo.

Potrebbe essere quindi, per l'azienda, una politica che nel lungo periodo potrebbe rivelarsi come positiva.

Allo stato dei risultati attuali, però, essendo la lavorazione che il programma indica di utilizzare quella con fresa integrale a testa sferica di diametro 1 mm, si può sostenere che le geometrie che si sono create sono, per quanto riguarda il tempo di lavorazione, sconvenienti da produrre o comunque da considerare come spunto per un ulteriore progetto.

8 Conclusioni

L'obbiettivo di questo lavoro di tesi era quello di analizzare il variare dei risultati dell'analisi LeanCOST al variare della geometria ottenuta tramite ottimizzazione che si sta analizzando.

Dai risultati ottenuti durante lo studio, appare chiaro che le geometrie ottimizzate sono meno appetibili dal punto di vista della produzione: infatti, la produzione di questa comporta un maggior tempo di lavorazione rispetto al pezzo originale.

Rimandando alla trattazione che si è fatta sopra riguardo ai risultati ottenuti, è comunque necessario dire che, in un'ottica diversa da quella tenuta in questo studio, che si è focalizzata solo sul tempo di lavorazione, le geometrie ottenute tramite ottimizzazione topologica potrebbero essere ritenute come delle valide alternative al pezzo originale.

Una delle modifiche che potrebbero apportarsi, in uno studio futuro e consequenziale, in modo da poter usare meno materiale, e quindi avere una diminuzione di peso e di costi e di tempi di lavorazione, potrebbe essere quella di modificare il materiale utilizzato, andando ad esempio ad usare l'Al 7075, comunemente detto Ergal.

Uno dei problemi riscontrati durante lo studio, è stato quello relativo all'ottimizzazione topologica su NX: infatti, si è dovuto porre come limite massimo di massa, come vincolo di ottimizzazione, 0,4 kg, in quanto, dopo aver provato a porre come limite massimo di massa 0,3 kg, che è la mass del pezzo originale, si è notato che il materiale non veniva distribuito in maniera uniforme su tutta la geometria.

Per ovviare a questo problema, si è quindi posto un limite massimo di massa più elevato, cosa che ha portato a delle geometrie leggermente più pesanti rispetto al componente originale.

Anche in questo caso, un'idea per un futuro studio potrebbe essere quella di andare ad ottimizzare direttamente una geometria grezza, invece che un parallelepipedo di ingombro, o di utilizzare una diversa strategia di ottimizzazione, indicando un diverso vincolo di ottimizzazione o un differente obbiettivo di ottimizzazione.

In conclusione, quindi, lo studio è stato portato a termine con la reazione di due geometrie che hanno entrambe presentato dei tempi di lavorazione maggiori rispetto al pezzo originale, cosa che, senza guardare ad altri valori, le rende poco adatte alla realizzazione tramite fresatura a 5 assi.

Ciò che si potrebbe fare con questo lavoro, in futuro, potrebbe essere realizzare effettivamente i pezzi e vedere se il tempo di lavorazione stimato dal software LeanCOST corrisponde ai tempi di lavorazione reali, per verificare l'efficienza del software.

Inoltre, sarebbe interessante provare ad utilizzare gli algoritmi presentati nel capitolo riguardante lo stato dell'arte, analizzarne i risultati e, anche per questi, verificarne la corrispondenza con i risultati reali.

9 Bibliografia

[1] B.S. So, Y.H. Jung, J.W. Park, D.W. Lee, Five-axis machining time estimation algorithm based on machine characteristics, Journal of Materials Processing Technology, 187–188, 2007, 37-40

[2] A. Armillotta, On the role of complexity in machining time estimation. J Intell Manuf 32, 2281–2299 (2021)

[3] A. F. de Souza, L. G. Camargo, H. da Silva Gaspar, F. Marin, A. C. Ochoa, L. N. L. de Lacalle, New mechanistic model to predict machining time for milling free form geometries using 4-axis milling, Procedia CIRP, 101, 2021, 34-37

[4] Tesi di Laurea di Cesari Arturo, Università Politecnica delle Marche, a.a. 2021-2022

[5] PKM Garnes, Design and Optimization for Additive Manufacturing of Rear Footpeg Bracket, NTNU, 2020

10 Webgrafia

- https://www.mafram.it/lavorazioni-meccaniche/fresatrice-cnc-5-assi/
- https://www.weerg.com/it/guide/cos%C3%A8-la-lavorazione-cnc-a-5-assi#:~:text=La%20lavorazione%20a%205%20assi,una%20finitura%20superficiale%20pi%C3%B9%20liscia.
- https://www.engineering.com/story/the-what-why-and-how-of-5-axis-cnc-machining
- https://www.celag.it/caratteristiche-e-vantaggi-della-lavorazione-5-assi-cnc/
- https://hyperlean.eu/pagina-leancost/
- https://www.tech-value.com/hyperlean-soluzioni-per-la-costificazione/leancost/
- https://tesi.univpm.it/retrieve/ee89d8eb-b670-4a5c-86f9-ae6b1e3dcff2/Tesi_Marco_Pizzi.pdf
- https://formlabs.com/it/blog/ottimizzazione-topologica/
- https://www.solidworld.it/magazine/magazine-solidworld/news/solidworks-simulation-ottimizzazione-topologica/
- https://biblus.acca.it/analisi-fem/
- https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2781677?show=full&locale-attribute=en