



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Embodiment design ed ottimizzazione topologica
di un componente per rugged display**

**Embodiment design and topological optimization
of a rugged display's component**

Relatore: Chiar.ma
Prof.ssa Maura Mengoni

Tesi di Laurea di
Thomas Agostinelli

Correlatore
Paolo Accattoli

𐎠𐎡𐎴 𐎠𐎢𐎰 𐎠𐎣𐎵 𐎠𐎥𐎱𐎲𐎶
𐎠𐎡𐎴 𐎠𐎢𐎰 𐎠𐎣𐎵 𐎠𐎥𐎱𐎲𐎶

*A chi c'è stato,
e a chi ci sarà sempre.*

Indice

Introduzione	ix
1 Stato dell'arte	1
1.1 I fondamenti dell'approccio sistematico	1
1.1.1 Pianificazione e definizione dei compiti	3
1.1.2 Conceptual Design	3
1.1.3 Embodiment Design	7
1.2 Collaborative virtual prototyping	10
1.2.1 Premessa: il virtual prototyping	10
1.2.2 Cos'è il collaborative virtual prototyping?	12
1.2.3 Architettura del sistema	13
1.3 Ottimizzazione topologica	16
1.3.1 Background	16
1.3.2 L'Homogenization Method	17
1.3.3 Il metodo SIMP	19
1.3.4 I vantaggi del metodo SIMP	22
1.3.5 Il workflow in Fusion 360	24
2 L'ottimizzazione topologica nell'embodiment design	31
3 Progettazione del rugged display: il caso d'uso nel settore delle HMI	35
3.1 Di cosa si occupa Tastitalia?	35
3.2 Il componente	36
3.3 Perché l'ottimizzazione topologica?	36

4	Embodiment design del frame	39
4.1	Step 1: identificazione dei requisiti tecnici	39
4.1.1	Requisiti dimensionali	39
4.1.2	Requisiti relativi alla distribuzione spaziale	39
4.1.3	Requisiti relativi ai materiali	40
4.1.4	Requisiti relativi alla producibilità	40
4.2	Step 2: creazione dei disegni relativi ai vincoli spaziali	40
4.3	Step 3: realizzazione del layout	40
4.3.1	Layout preliminare	40
4.3.2	Layout dettagliato	43
4.3.3	Determinazione del materiale	43
4.3.4	Verifica tecnica: resistenza alle sollecitazioni	44
4.3.5	Ottimizzazione delle dimensioni	46
4.3.6	Ottimizzazione topologica	46
4.4	Ottimizzazione per la produzione mediante additive manufac- turing	53
5	Conclusioni	59
	Bibliografia	63

Elenco delle figure

1.1	Fasi dell'approccio sistematico	2
1.2	Fasi della pianificazione e definizione dei compiti	4
1.3	Fasi del conceptual design	5
1.4	Esempio di black box	5
1.5	Esempio di scomposizione funzionale, primo livello	6
1.6	Esempio di scomposizione funzionale, secondo livello	6
1.7	Esempio di scomposizione funzionale, terzo livello	6
1.8	Fasi dell'embodiment design	9
1.9	Architettura proposta da Lombardo et al.	13
1.10	Influenza del fattore di penalizzazione	21
1.11	Volume di lavoro	25
1.12	Geometria preservata	25
1.13	Piani di simmetria	26
1.14	Definizione di vincoli e carichi	26
1.15	Mesh generata	27
1.16	Definizione degli obiettivi dell'ottimizzazione	27
1.17	Soluzione dell'ottimizzazione	28
1.18	Geometria aggiornata dopo l'ottimizzazione	29
1.19	Validazione finale	29
2.1	Andamento di costi impegnati e costi sostenuti nel ciclo di vita di un prodotto [21]	32
4.1	Vista 3D dei componenti ai quali il frame andrà accoppiato . . .	41
4.2	Sezione sul piano ZX dei componenti accoppiati al frame . . .	41
4.3	Sezione sul piano ZY dei componenti accoppiati al frame . . .	41

4.4	Layout preliminare visto dall'alto	42
4.5	Layout preliminare visto dal basso	43
4.6	Layout dettagliato visto dall'alto	44
4.7	Layout dettagliato visto dal basso	45
4.8	Prima analisi FEM	45
4.9	Frame in seguito all'ottimizzazione delle dimensioni visto dall'alto	47
4.10	Frame in seguito all'ottimizzazione delle dimensioni visto dal basso	48
4.11	Seconda analisi FEM	48
4.12	Il quadrante di frame preso in analisi	49
4.13	Aree preservate dall'azione dell'algoritmo	50
4.14	Carichi e vincoli	50
4.15	Criteri di ottimizzazione	51
4.16	Visualizzazione dell'ottimizzazione topologica	51
4.17	Mesh in uscita dall'ottimizzazione topologica	52
4.18	Quadrante di frame adeguato ai risultati dell'ottimizzazione topologica	52
4.19	Analisi FEM di validazione	53
4.20	Frame ricostruito secondo il layout finale	54
4.21	Frame inserito all'interno dell'assieme	54
4.22	Parte inferiore del frame	56
4.23	Parte superiore del frame	56
4.24	Dettaglio dell'ispessimento filettato	58

Elenco delle tabelle

1.1	Confronto riassuntivo dei metodi di ottimizzazione analizzati .	24
-----	---	----

Introduzione

La presente tesi affronta la progettazione di un componente che andrà montato all'interno di un rugged display seguendo l'approccio proposto da G. Pahl e W. Beitz, nell'ormai lontano 1997, e definito *Approccio sistematico*. Si mostrerà come tale approccio sia efficace nel ridurre il carico di lavoro del progettista, suddividendo la progettazione in più fasi successive ed iterative e suggerendo varie linee guida per affrontare ognuna di esse. Inoltre, si dimostrerà come approcciando la progettazione in maniera sistematica si dia in realtà pieno campo alla creatività del progettista piuttosto che imbrigliarla, perché è il metodo a tener conto di tutta la componente di tracciabilità del lavoro, lasciando alla mente del designer il solo compito di individuare delle soluzioni.

In particolare, tra le varie fasi dell'approccio sistematico si analizzerà l'*embodiment design*, ovvero quella in cui si dà corpo alle idee trovate stabilendo concretamente il layout individuato. Tale embodiment design lo si calerà in una situazione di *Collaborative virtual prototyping*, ovvero in quell'insieme di pratiche (perlopiù proprie dell'ambito digitale e virtuale) grazie alle quali professionisti derivanti da diversi ambiti possono collaborare tra di loro cercando di individuare quanto prima possibili punti deboli del progetto, ed intervenire in una fase dove il costo delle modifiche è ancora contenuto. Si mostrerà come unire il ventennale approccio di Pahl e Beitz a tecniche moderne come l'*ottimizzazione topologica* permetta di raggiungere in tempi brevi degli ottimi risultati senza essere mai usciti dal campo del virtuale e, quindi, senza aver speso risorse economiche per la produzione di diversi prototipi fisici, ai quali sono lasciati soltanto gli ultimi test di validazione. Grazie ad essa, infatti, il designer ha la libertà di esplorare soluzioni diverse

alla ricerca di quella ottimale, essendo conscio del fatto che i suoi tentativi di ricerca non avranno un impatto economico in termini di costi per realizzare prototipi fisici. Il prototipo virtuale, inoltre, contiene al suo interno le informazioni riguardanti altri aspetti del prodotto, oltre a quelli geometrici: finiture superficiali, tolleranze, sul processo produttivo, perfino sulla distinta dei materiali grezzi necessari alla sua realizzazione. Questo aspetto permette di stabilire un flusso di informazioni che viaggia insieme al modello dal design alla produzione, e alle quali chiunque vi sia coinvolto può accedere in qualunque momento.

Si affronterà anche l'aspetto di modifiche più sostanziali, quali l'adattamento di un prodotto pensato fin dall'inizio per una certa tipologia di lavorazioni ad altre più moderne come l'*additive manufacturing*. Ancora una volta, eseguire questo tipo di azioni con il rigore dell'approccio sistematico e nell'ambito del collaborative virtual prototyping non comporta nessun costo aggiuntivo, divenendo quindi possibile anche intraprenderle a solo scopo "esplorativo".

Nel Capitolo 1 si tratterà l'approccio sistematico così come proposto da Pahl e Beitz, si analizzeranno le sue fasi e come l'ottimizzazione topologica possa essere inserita in questo contesto. Si introdurranno il Collaborative virtual prototyping e l'ottimizzazione topologica, affrontandole dal punto di vista teorico e, per la seconda, si illustrerà il workflow seguito nella stesura di questa tesi. Nel Capitolo 2 si analizzeranno più approfonditamente i vantaggi di natura economica e produttiva che l'integrare l'ottimizzazione topologica all'approccio sistematico comporta. Il Capitolo 3 introduce Tastitalia come la realtà aziendale all'interno del quale si è svolto il tirocinio propedeutico alla stesura della presente tesi, oltre a presentare il componente oggetto di studio e spiegare il perché si sia deciso di intraprendere la strada dell'ottimizzazione topologica. Il Capitolo 4 si occupa di illustrare passo passo la procedura di embodiment design seguita, inclusa l'ottimizzazione e l'adeguamento del modello ottimizzato per essere prodotto anche mediante tecniche di additive ed infine, nel Capitolo 5, si traggono le conclusioni.

Capitolo 1

Stato dell'arte

1.1 I fondamenti dell'approccio sistematico

Secondo quanto proposto da G. Pahl e W. Beitz in “Engineering design: a systematic approach” [1], l'attività di progettazione di un componente o di un sistema in generale è più efficiente se svolta mediante un approccio definito, appunto, sistematico. Tale approccio alla progettazione permette quindi di presentare sul mercato prodotti nuovi o nuove varianti di prodotti già esistenti in tempi più rapidi, pur non sacrificandone la funzionalità. Inoltre, si presenta come una metodologia flessibile, applicabile quindi ad una moltitudine di problemi ingegneristici quale che sia il loro ambito di appartenenza, sebbene rimanga comunque pianificabile e suddivisa in step successivi che garantiscono la possibilità di svolgere verifiche in itinere, così da monitorare il lavoro durante il suo svolgimento.

Le fasi che costituiscono l'approccio sistematico sono (figura 1.1 nella pagina seguente):

- Pianificazione e definizione dei compiti;
- Conceptual Design;
- Embodiment Design;
- Detail Design.

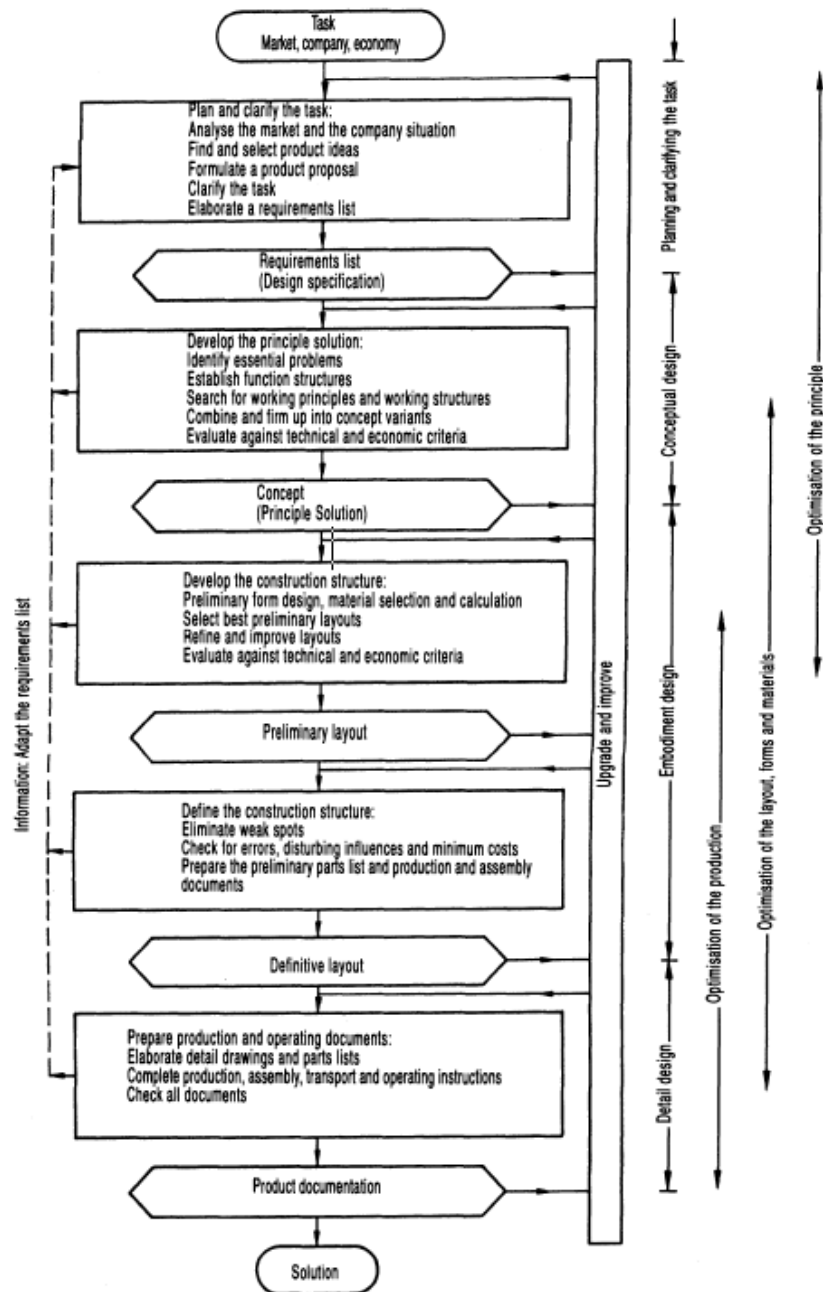


Figura 1.1: Fasi dell'approccio sistematico

1.1.1 Pianificazione e definizione dei compiti

Prima fase, nella quale si individuano i requisiti del prodotto finito. Tali requisiti possono essere individuati mediante la richiesta diretta del cliente di un nuovo prodotto o da ricerche di mercato che mostrano l'esigenza di rinnovare il prodotto che si sta attualmente offrendo o suggeriscono l'ingresso in un nuovo promettente mercato. Gli input sono quindi le demands (richieste da soddisfare ad ogni costo) e wishes (richieste da poter prendere in considerazione) che derivano quindi dalle fonti prima citate e che, mediante l'attività di clarification of task, deve portare alla compilazione di una lista di requisiti base (caratteristiche implicitamente proprie del prodotto, senza le quali non sarebbe possibile neanche l'ingresso nel mercato), tecnici (esplicitamente richiesti ed a volte molto ben specificati in maniera quantitativa) e di attrattiva (caratteristiche che non migliorano necessariamente la funzionalità del prodotto ma che ne aumentano sicuramente l'appetibilità nei confronti del mercato).

1.1.2 Conceptual Design

Nella fase successiva, prendendo in input la lista dei requisiti stilata precedentemente, si procede «mediante l'identificazione e l'astrazione dei problemi essenziali, alla costruzione della struttura funzionale e alla ricerca e la combinazione di appropriati principi risolutivi, definendo il macro-progetto di base (concept)» [Pahl and Beitz]. Durante questa fase, dunque, si produrrà il primo concept del prodotto che ci si è preposti di realizzare: mediante un procedimento di astrazione il designer deve analizzare le specifiche ponendo l'attenzione su ciò che è generale ed essenziale arrivando a formulare il problema in una maniera il più possibile neutra, ovvero indipendente dalle specificità del sistema in esame. Questo "allontanamento" dal problema specifico può sembrare controproducente, ma in realtà fa sì che si possa arrivare a soluzioni anche originali e sicuramente efficienti (questo a patto che il progettista liberi la mente da preconcetti e pregiudizi derivanti da esperienze passate).

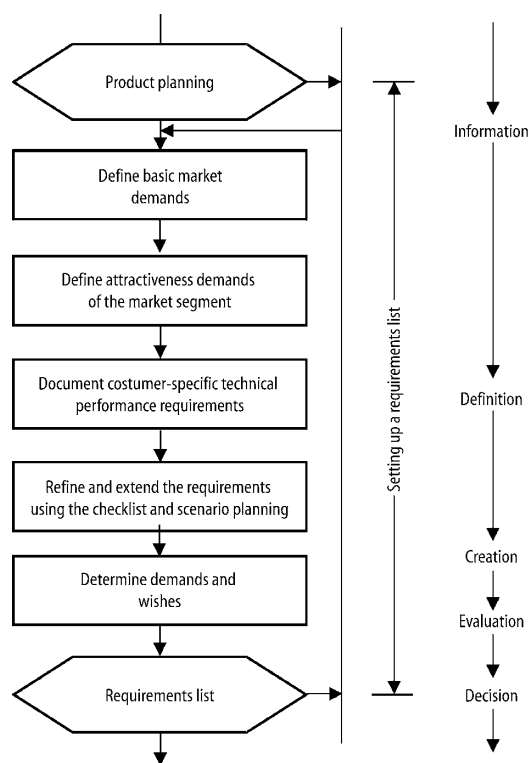


Figura 1.2: Fasi della pianificazione e definizione dei compiti

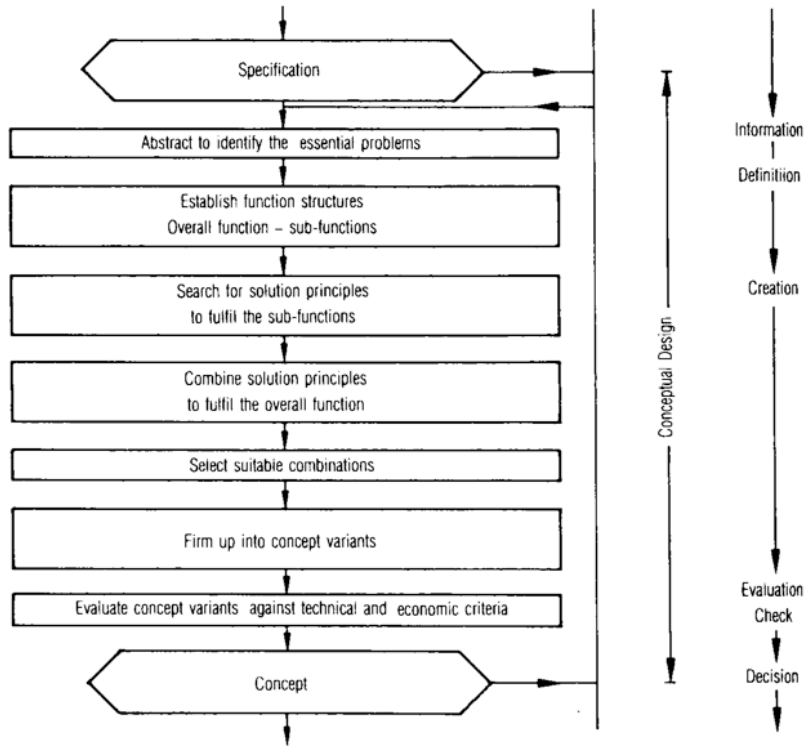


Figura 1.3: Fasi del conceptual design

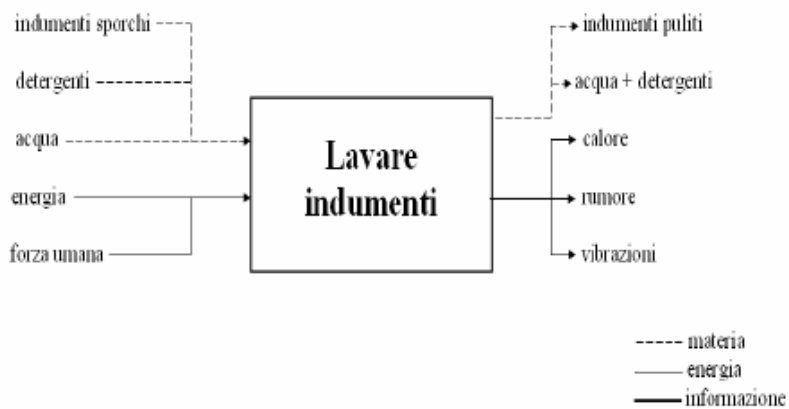


Figura 1.4: Esempio di black box

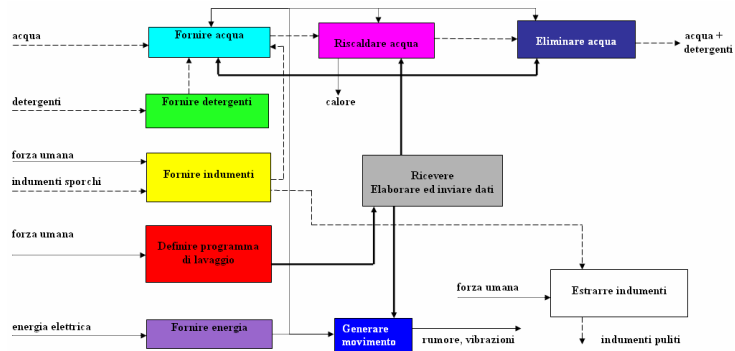


Figura 1.5: Esempio di scomposizione funzionale, primo livello

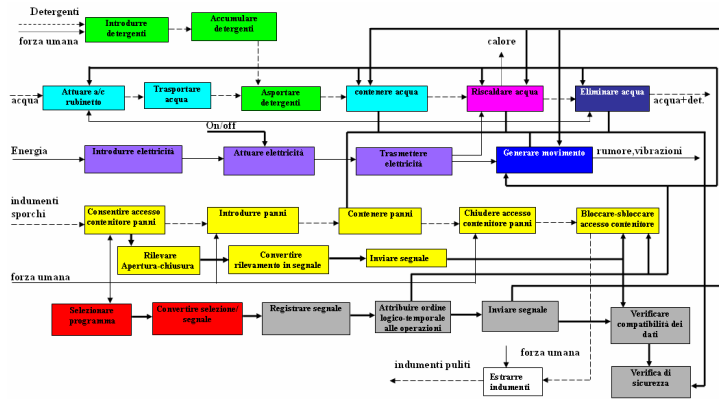


Figura 1.6: Esempio di scomposizione funzionale, secondo livello

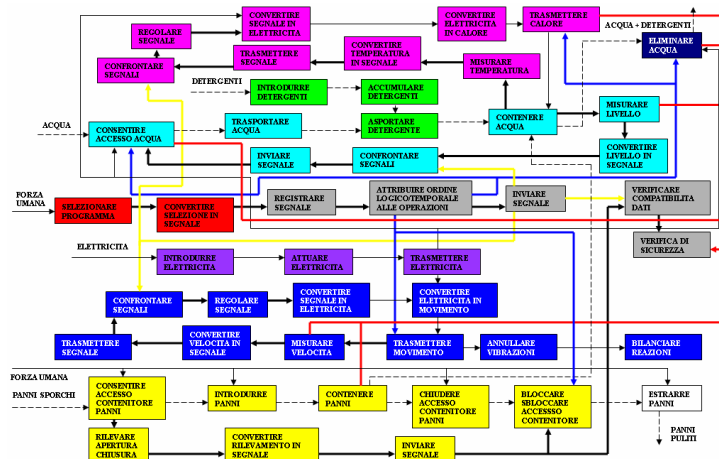


Figura 1.7: Esempio di scomposizione funzionale, terzo livello

A questo punto si può redigere la struttura funzionale del prodotto: in analogia alla teoria dei sistemi si sintetizzano le funzioni del prodotto secondo un grafico che mostra gli input e gli output, così come i flussi interni alla struttura, di materia, energia ed informazione. Partendo dal prodotto rappresentato come una black box (figura 1.4 a pagina 5) con i soli input ed output da e verso l'esterno e dettagliando progressivamente le sotto funzioni (fino a due/tre livelli di scomposizione, figure 1.5 a fronte, 1.6 nella pagina precedente e 1.7 a fronte) si arriva quindi a scomporre il prodotto in moduli, ognuno preposto ad una funzione ben definita.

Infine, non rimane che approcciare ogni modulo funzionale ai fini di identificare un principio risolutivo che risolva il problema specifico di quel modulo. I metodi sono più che vari:

- Metodi convenzionali, quali la ricerca in letteratura (ad esempio mediante metodo TRIZ o DSM), l'analisi di sistemi tecnici esistenti o dei sistemi naturali (ovvero analizzando come la natura ha risolto un problema simile a quello in analisi), per analogie o metafore, tramite misure e simulazioni;
- Metodi intuitivi, grazie alle quali l'idea "arriva" e non viene "forzata", che possono essere rappresentati dal brainstorming o dalla sinettica (brainstorming evoluto che fa pesantemente ricorso alle analogie, per questo più sistematico);
- Metodi digressivi, come lo studio sistematico dei sistemi fisici (ovvero estrapolare le soluzioni analizzando le equazioni alla base di un dato fenomeno fisico) o l'utilizzo dei cataloghi.

Infine, analizzando quali tra i tanti principi risolutivi siano compatibili e quindi combinabili tra loro in un prodotto (mediante tecniche quali l'analisi costi-benefici), si passa alla fase successiva.

1.1.3 Embodiment Design

Arrivati all'embodiment design si sono poste le basi affinché il componente, il prodotto o il sistema possa essere effettivamente ingegnerizzato e

prodotto: si tratta insomma di concretizzare i principi risolutivi fin qui individuati. Si articola in un gran numero di fasi successive ma non per forza sequenziali, ovvero spesso si dovrà ritornare sui propri passi per correggere un problema che si manifesta in una fase successiva: per la loro individuazione si fa un intensivo ricorso ai metodi di identificazione degli errori o a tecniche di Robust Design. L'output della fase sarà un risultato quantitativo, mentre finora si sono trattati soltanto aspetti qualitativi.

L'embodiment design operativamente è composto dalle fasi di (figura 1.8 nella pagina successiva):

- Identificazione dei requisiti tecnici necessari alla progettazione (quali requisiti dimensionali, relativi alla distribuzione spaziale dei soggetti coinvolti, relativi al materiale, alla sicurezza, ergonomia, producibilità ed assemblabilità);
- Creazione di un disegno (2D o 3D), in scala, dei vincoli dimensionali ai quali l'oggetto di progettazione sarà sottoposto;
- Mediante la visualizzazione dei vincoli è a questo punto possibile realizzare il primo vero disegno dell'oggetto, che rappresenti un layout generale e che evidenzi bene le diverse funzioni che dovranno essere assolte;
- A partire dal layout generale si sviluppano più layout preliminari, che andranno in seguito sviluppati approfondendo per ognuno di essi le funzioni ausiliarie così come andranno definiti i dettagli (sia delle funzioni primarie che di quelle ausiliarie) secondo linee guida, normative, calcoli, standard, ecc. . . ;
- Valutazione mediante criteri tecnici, di costo, di compatibilità, di prestazioni ecc. . . ed individuazione del layout che meglio risponde a queste verifiche, che diverrà il layout definitivo;
- Ottimizzazione del layout definitivo per risolverne le debolezze ed esaltarne le performance;

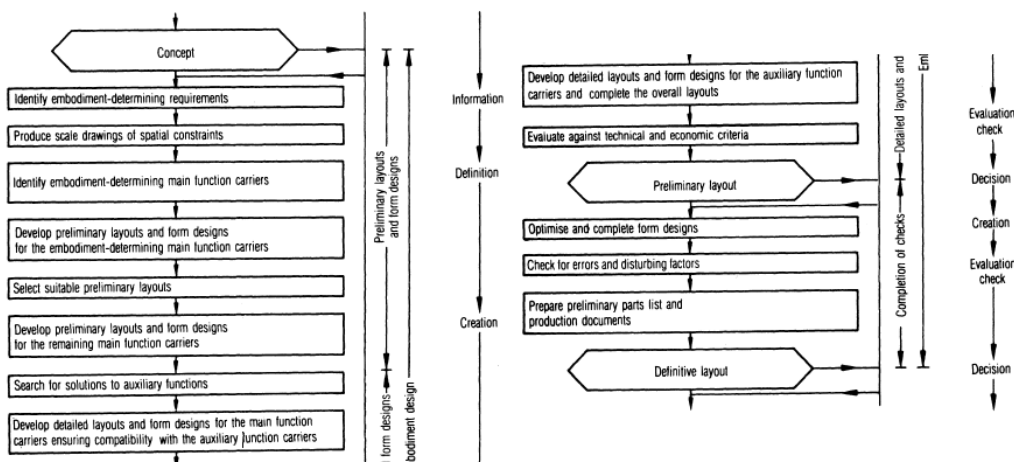


Figura 1.8: Fasi dell'embodiment design

- Analisi della fattibilità tecnica ed economica;
- Preparazione di una lista di componenti e documenti tecnici, necessari alla seguente ed ultima fase di Detail Design, nella quale si redigeranno i disegni costruttivi dei componenti e degli assiemi, così da avviare la produzione.

L'embodiment design, in particolare, è caratterizzato da una triade di caratteristiche che devono guidare il progettista durante tutto lo svolgimento di questa fase. La triade è composta dai tre principi di:

- **Chiarezza**, ovvero deve essere chiaro quale parte svolge quale funzione, ai fini di garantire un'agevole valutazione della prestazione ma anche ad esempio un successivo intervento di manutenzione, una volta che il prodotto venga messo in opera;
- **Semplicità**, che impone di evitare soluzioni eccessivamente complesse che possano rendere oltremodo costosa la produzione di ciò che si sta progettando, come ad esempio l'utilizzo del minor numero possibile di componenti e di superfici dalla forma più elementare possibile, facili quindi da realizzare;

- **Sicurezza**, intesa come protezione tanto dell'utente che dell'ambiente in cui l'apparato opererà, raggiunta sia mediante sicurezza diretta (ovvero l'adozione di misure che prevengano incidenti), indiretta (quando non è possibile eliminare con certezza la possibilità che accadano incidenti, si cerca comunque di farli avvenire in maniera non dannosa) ed infine tramite gli warnings, ovvero dei segnali che avvertano l'utente di un pericolo imminente.

1.2 Collaborative virtual prototyping

1.2.1 Premessa: il virtual prototyping

Il virtual prototyping è un insieme di pratiche e tecnologie che consiste nel creare modelli virtuali 3D dei prodotti e di effettuare test su tali modelli, tramite appositi software, per simulare il comportamento dei prodotti nel mondo reale. Grazie a tali software, dunque, i designer specializzati nel loro utilizzo riescono a simulare molteplici varianti di un prodotto così come le più disparate condizioni ambientali pur rimanendo sempre nell'ambito digitale. Ciò consente di valutare una moltitudine di soluzioni individuando quella che consente di raggiungere il più alto livello di performance, massimizzando quindi la qualità del progetto [2].

Un prototipo virtuale, quindi, non è solo la descrizione geometrica di un oggetto, ma immagazzina al suo interno informazioni aggiuntive quali il materiale, il suo comportamento in accordo a fenomeni fisici o chimici, la finitura superficiale, il colore, la texture, e così via fino ad informazioni la cui rappresentazione in un dominio digitale risulta molto avanzata: ad esempio, il touch and feel restituito dal materiale con cui è modellato l'oggetto può essere simulato nel mondo reale tramite dei sensori aptici. Secondo il prof. G. Wang del Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Manitoba, il prototipo digitale è «una simulazione digitale di un prodotto fisico che può essere presentata, analizzata e testata relativamente agli aspetti del suo ciclo di vita come la progettazione, l'ingegnerizzazione, la manutenzione, il riciclo, come se si trattasse di un modello fisico reale.

La creazione ed il test di un prototipo virtuale è chiamata prototipazione virtuale».

Si intuisce quindi che la prototipazione virtuale elimina la necessità di produrre costosi prototipi fisici, relegandoli alle ultime fasi di validazione del lavoro svolto. Inoltre, permette di simulare l'interazione del prodotto con l'ambiente riuscendo quindi a prevedere problematiche che potranno verificarsi ad esempio durante la produzione o l'utilizzo, permettendo così al designer di intervenire prima che questi problemi si verifichino nel mondo reale con il rischio di bloccare la produzione.

I vantaggi, quindi, a cui il virtual prototyping apre le porte sono, tra i più importanti:

- Riduzione del time-to-market;
- Possibilità di effettuare test precoci o proibitivamente costosi nel dominio reale;
- Maggior sicurezza per gli operatori;
- Maggior agilità dell'azienda;
- Aumento delle possibilità di riuscita del progetto “al primo colpo”;
- Semplificazione dei progetti.

Secondo uno studio della società Aberdeen Group, infatti, le aziende che eccellono nel proprio mercato fanno un uso intensivo del virtual prototyping, con l'86% dei prodotti da esse realizzati che riescono a soddisfare gli obiettivi qualitativi imposti. Mediamente, per progetti complessi il time-to-market si riduce di 158 giorni con un risparmio di 1.9mln \$, mentre si parla di 21 giorni in meno con un risparmio di 21 000 \$ per progetti più semplici.

Il virtual prototyping però, si presta anche ad un altro vantaggio: quello di permettere a più professionisti di lavorare simultaneamente allo stesso progetto, a prescindere dalle barriere geografiche o temporali (fuso orario) che li dividono, ognuno occupandosi della propria area di interesse pur mantenendo una visione di gruppo e condividendo gli obiettivi: una tale attività prende il nome di collaborative virtual prototyping.

1.2.2 Cos'è il collaborative virtual prototyping?

Innanzitutto, è bene specificare il significato che si attribuisce alla parola “collaborative” in questo contesto. Secondo l’Oxford English Dictionary [3], “collaborate” significa “to co-operate, especially in literary, artistic or scientific work”, mentre secondo il Cambridge Dictionary [4] “to work together (with someone) on a piece of work”. Da entrambe le definizioni, traspare quindi il fatto che collaborare significhi lavorare a stretto contatto con qualcuno su un progetto comune, raggiungendo obiettivi non raggiungibili lavorando in maniera solitaria [5]. Per essere di successo, un progetto collaborativo deve chiarire, in partenza, chi appartiene al gruppo, le singole responsabilità ed i compiti di ogni membro, cosa ci si aspetta in output dal lavoro del gruppo e soprattutto assicurarsi che ci sia uno scopo comune a tutti i partecipanti. Alcuni autori suggeriscono un limite di quattro [5] componenti del team di lavoro affinché esso sia efficace, altri hanno preso parte a progetti collaborativi con centinaia di membri [6] se non migliaia, come nel progetto del Boeing 777 [7].

Fatte le dovute premesse terminologiche, si può definire il “collaborative virtual prototyping” come l’estensione del virtual prototyping, nel senso che estende il flusso di lavoro a più professionisti, ognuno esperto di un certo settore, che riescono a lavorare allo stesso progetto con obiettivi comuni fin dall’inizio condividendo continuamente informazioni tra di loro. Questo modo di lavorare sposa alla perfezione l’approccio sistematico di Pahl e Beitz, perché permette di applicare in maniera più efficace i suoi dettami consentendo il ricorso alle simulazioni, di ogni tipo ed in ogni momento del flusso di progettazione. Così facendo, ed abbracciando più discipline, il collaborative virtual prototyping permette al team multidisciplinare di far fronte a tutti i problemi futuri prima che si verifichino, così da lanciare una produzione potenzialmente perfetta e priva di difetti. In un certo senso, si può affermare che nell’affrontare il lavoro di tesi il collaborative virtual prototyping sia stato l’ambiente mentre l’approccio sistematico il metodo. Lo strumento, vedremo in seguito, è l’ottimizzazione topologica.

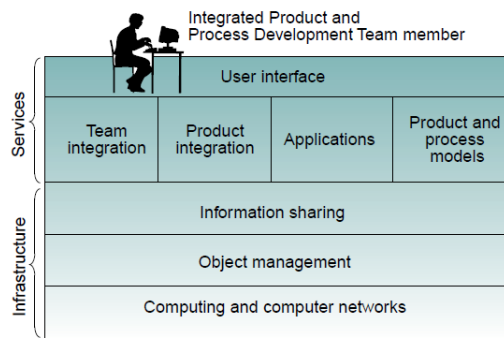


Figura 1.9: Architettura proposta da Lombardo et al.

1.2.3 Architettura del sistema

Un metodo di lavoro così impostato, ovviamente, ha bisogno di una sua infrastruttura affinché sia attuabile. In particolare, quello di cui c'è bisogno è un insieme di software, hardware e protocolli di comunicazione pensati ed implementati appositamente per lo scopo. Un primo esempio, proposto da un lavoro di Lombardo, Milahak ed Osborne [8] nel 1996, suggerisce la tassonomia del collaborative virtual prototyping come suddivisa in due elementi:

- Services, che sono gli strumenti e le tecnologie che interagiscono direttamente con l'utente (il membro del team);
- Infrastructures, che consiste di tutto l'hardware ed il software generalmente invisibile all'utente.

All'interno delle infrastrutture troviamo:

- Computing and computer networks, ovvero la rete fisica di computer ad elevata capacità di calcolo, server di storage dei dati e strumenti di sicurezza informatica;
- Object management, il software che si occupa di gestire le relazioni e le dipendenze tra dati, informazioni e modelli 3D, tutti indistintamente definiti come "objects";

- Information sharing, che invece si occupa di condividere le informazioni tra gli utenti del sistema (es. sistema di notifiche).

All'interno dei servizi invece troviamo:

- Team integration, che include strumenti di condivisione multimediale ed interdisciplinari, per favorire il processo di decision making, così come il riunire insieme i dati provenienti dalle diverse aree (es. strutturale, termodinamica, elettronica, ecc. . .) ai fini di eseguire simulazioni multi-fisiche;
- Product integration, include qualsiasi strumento che permette all'utente di interagire con il modello, dal semplice CAD alle stanze di virtual reality (CAVE);
- Applications, ovvero librerie di modelli e dati accessibili ad ogni membro riguardanti aspetti come l'ingegnerizzazione (es. materiali disponibili in azienda), la produzione (es. produttività di una certa macchina), i costi (es. costo orario di una certa lavorazione), e che costituisce il database del know how aziendale;
- Product and process models, un database che racchiude le informazioni necessarie alla produzione del prodotto. Costituisce l'output del team di lavoro.

Un'architettura simile è stata proposta da Yuan et al. [9], nel 2009. In questo lavoro però, forti di 13 anni di innovazioni tecnologiche ed informatiche, gli autori hanno focalizzato l'attenzione sul processo di creazione del prototipo virtuale stesso. Un software sviluppato per gestire un prototipo virtuale, quindi, deve far fronte alle attività di:

- Modeling, ovvero definire la geometria del prototipo, così come le finiture superficiali o i rivestimenti, il colore, il materiale, la texture. Deve permettere di definire i vincoli all'interno degli assiemi così da definire le relazioni tra i componenti che formano il prodotto, così come le caratteristiche funzionali sia meccaniche che estetiche del prodotto in

modo da poter simulare il funzionamento dello stesso. Un campo in notevole sviluppo è la simulazione delle interfacce uomo-macchina, in quanto questo aspetto sta divenendo sempre più centrale nei prodotti in commercio al giorno d'oggi;

- Simulation, quindi fornire la capacità di eseguire simulazioni strutturali, dinamiche, termo-fluidodinamiche. Alcune tecnologie emergenti permettono ad esempio, come accennato in precedenza, di simulare il touch and feel del prodotto simulando l'interazione con l'utente mediante dispositivi aptici. In questo modo è possibile simulare l'attrito tra superfici o le forze applicate da alcune parti del prodotto sull'utente, potendo prevedere in anticipo problematiche di carattere ergonomico;
- Rendering, cioè occuparsi di visualizzare il prototipo nella maniera più realistica possibile. Sebbene un rendering fotorealistico real time non sia sempre possibile, ci si sta spingendo verso visualizzazioni grafiche stereoscopiche o ottenute mediante dispositivi che tracciano la posizione della testa e degli occhi dell'utente in un ambiente virtuale, fornendo l'illusione di immersività nell'ambiente. Il rendering è ovviamente anche di natura uditiva ed, ancora una volta, tattile;
- Control, infine, significa occuparsi di registrare e decodificare gli input dell'utente per trasformarli in azioni eseguite sul prototipo virtuale.

Durante lo svolgimento del tirocinio collegato a questa tesi, il collaborative virtual prototyping è stato fondamentale. Innanzitutto, date le circostanze imposte dall'attuale pandemia di COVID-19, è stato impossibile collaborare di persona con le persone coinvolte, e gli strumenti informatici hanno fornito un supporto vitale. Inoltre, la necessità di collaborare con i progettisti dell'azienda, con il collega Davide Vitali impegnato in un tirocinio parallelo e con gli esperti di additive dell'Università Politecnica delle Marche ha imposto che si definissero dei protocolli di comunicazione in comune così come dei formati accettati da tutti i coinvolti per condividere i modelli 3D. Infine, è stato grazie alle simulazioni strutturali ed all'ottimizzazione topologica che

è stato possibile raggiungere i risultati sperati in due mesi e mezzo in meno di quanto preventivato.

1.3 Ottimizzazione topologica

1.3.1 Background

L'ottimizzazione topologica è un metodo di design computazionale, il cui obiettivo è quello di ottimizzare la distribuzione del materiale in un dato volume di progettazione, tenendo conto di vincoli e carichi applicati al volume e, contemporaneamente, massimizzando le performance [10].

E' uno strumento che è stato sviluppato per ridurre lo sforzo richiesto agli ingegneri nel compiere un processo di sintesi ed analisi iterativo nella ricerca della soluzione ottima, all'interno di una pletera di possibili soluzioni, così come per incentivare la creatività, suggerendo soluzioni alle quali l'ingegnere non avrebbe spontaneamente pensato.

L'ottimizzazione topologica prende parte a quell'insieme di tecnologie ed algoritmi definito ottimizzazione strutturale. All'interno di quest'ultima, rientrano anche l'ottimizzazione dimensionale e quella delle forme: la prima opera modificando alcune delle dimensioni (ovvero quelle indicate al sistema come variabili del problema) mentre la seconda cerca di modificare la forma del componente. Entrambe hanno gli stessi obiettivi dell'ottimizzazione topologica. Il presupposto affinché queste due tecniche siano attuabili è l'impiego di una modellazione parametrica fin dall'inizio, poiché è sui parametri che queste due metodologie vanno ad agire. Ciò restringe il campo d'uso all'interno dello stesso CAD nel quale si svolge la modellazione, che deve integrare tale funzionalità permettendo, tuttavia, una risoluzione del problema di ottimizzazione in maniera computazionalmente veloce e poco esosa di risorse.

Il vantaggio dell'ottimizzazione topologica rispetto alle tecniche sorelle, infatti (nonostante nel corso di questa tesi si sia fatto ricorso anche all'ottimizzazione dimensionale, quindi non sono mutualmente esclusive), è che non richiede in input un modello parametrico per operare [11]. E' sufficiente

definire un volume di lavoro entro il quale operare, che rappresenterà, quindi, il confine del problema, per poter eseguire un'ottimizzazione topologica. Presenta, inoltre, il vantaggio di poter aggiungere o rimuovere elementi al design in esame o, addirittura, introdurre regioni vuote in tale volume, ma ad un costo: la richiesta di risorse di calcolo per questa tecnica è nettamente superiore alle altre due.

Introdotta nel 1989 da un lavoro di Bendsøe [12], il metodo Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) è il più diffuso a livello commerciale (il CAD utilizzato durante questo lavoro, Fusion 360 by Autodesk, non fa eccezione ed integra il metodo SIMP) e basa il suo approccio su una struttura ad elementi finiti. Tuttavia, sono stati proposti in letteratura altri metodi basati su un approccio discreto come l'Optimization Microstructure with Penalization (OMP) o il NonOptimal Microstructures (NOM). Essendo il SIMP il metodo integrato nel CAD di riferimento di questa tesi, esso verrà più avanti approfondito a livello matematico e sarà fornito un excursus sul workflow da adottare per realizzare un'ottimizzazione topologica in Fusion 360.

1.3.2 L'Homogenization Method

Il metodo SIMP è, in realtà, l'evoluzione di un metodo più basilare, definito Homogenization Method [13]. Per spiegare il SIMP, dunque, è necessario prima affrontare l'Homogenization Method. Affinché una qualsiasi ottimizzazione topologica possa introdurre vere modifiche alla topologia di un design, è necessario svincolare l'azione del metodo dal modo di descrivere il volume di lavoro. Ad esempio, procedendo all'ottimizzazione topologica di un cubo solido al 100 %, se il suo confine è descritto mediante nodi posti negli spigoli e connessi tra loro da segmenti, il risultato finale sarà comunque un prisma a base rettangolare solido al 100 % (non necessariamente un cubo) senza la possibilità per l'algoritmo di introdurre vuoti o cavità, perché mancava in origine la topologia necessaria a descriverli.

Bendsøe, dunque, propose questa semplice ma efficace idea, che permetteva al tempo stesso di "erodere" la topologia iniziale e di risparmiare sulle risorse di calcolo necessario. Descrivendo il materiale come un materiale com-

posito, formato da aree solide e microcavità, si sposta il problema dall'ottimizzazione della forma all'ottimizzazione della densità del volume in esame, modulando la dimensione di queste microcavità. Pertanto, da una questione apparentemente difficile, ci si è ricondotti ad un più semplice problema di ottimizzazione dimensionale, dove le dimensioni target sono la dimensione dei lati della microcavità (spesso descritta come quadrata, ad un solo parametro, o rettangolare a due parametri) ed il suo orientamento sul piano. Stabiliti i parametri da controllare, bisogna specificare come le microcavità popoleranno il dominio continuo. Immaginando di dover risolvere un problema 2D su un piano (per non appesantire la trattazione), il dominio potrebbe essere discretizzato con i metodi propri degli elementi finiti, suddividendolo, quindi, con una griglia a celle quadrate e ponendo una microcavità (rettangolare) all'interno di ogni cella della griglia. In tal modo il volume risulterebbe popolato di microcavità e la sua densità potrebbe essere modulata da 0 (vuoto) ad 1 (solido).

Posta pari ad 1 la dimensione del lato della cella unitaria, la cavità rettangolare al suo interno sarà descritta dalla larghezza a e dall'altezza b , così come l'orientamento dell'intera cella rispetto ad una terna di assi di riferimento è θ . Detto u il tensore degli spostamenti, lo scopo dell'ottimizzazione è quello di trovare la struttura con la massima rigidità globale o, viceversa, la minima flessibilità o, più in generale, la massima energia potenziale $\Pi(u)$. Definiti poi:

- \bar{V}_s , il limite superiore imposto al volume, utilizzato come criterio di stop;
- N , il numero di celle unitarie;
- a_i, b_i , e θ_i, v_i , rispettivamente la larghezza, l'altezza, l'orientamento ed il volume della cella unitaria i –esima;

il problema si definisce come:

- Massimizzare l'energia potenziale globale

$$\Pi(u) \tag{1.1}$$

- Nei limiti in cui il volume totale sia minore del limite superiore imposto

$$\sum_{i=1}^N (1 - a_i b_i) v_i - \bar{V}_s \leq 0 \quad (1.2)$$

- E facendo sì che le dimensioni delle microcavità non superino quelle delle celle che li ospitano nè divengano negative

$$\begin{aligned} a_i - 1 &\leq 0 \\ -a_i &\leq 0 \\ b_i - 1 &\leq 0 \\ -b_i &\leq 0, \forall i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (1.3)$$

Questo metodo si dimostra ottimo nel trovare soluzioni ma presenta uno svantaggio: a volte introduce alcune zone con densità parziale nel volume che, sebbene fisicamente ammissibili [14], sono spesso praticamente impossibili, o quasi, da realizzare. Qualora, comunque, si adottassero le moderne tecniche manifatturiere, quali l'additive manufacturing, e queste aree con densità parziale risultassero producibili, una soluzione che presenti aree univocamente solide o vuote è maggiormente auspicabile. È qui che si inserisce il SIMP.

1.3.3 Il metodo SIMP

Lo scopo del SIMP, quindi, come accennato sopra, è quello di produrre soluzioni che non presentino aree “grigie” ma soltanto “bianche” o “nera”, ovvero vuoti o pieni [15]. Anziché, quindi, descrivere le microcavità con due (o tre, come nell'esempio precedente) parametri, le si descrive con un solo parametro, una densità “artificiale” ρ_i compresa tra il valore massimo 1 (la densità del materiale reale) ed il valore minimo ρ_{min} (diverso da 0 per assicurare una stabilità numerica alla soluzione)

$$0 < \rho_{min} \leq \rho_i \leq 1, \forall i = 1, \dots, N \quad (1.4)$$

così che il volume globale sia dato da

$$V = \sum_{i=1}^N v_i \rho_i \quad (1.5)$$

Così, come formulato fin qui, applicando poi lo stesso problema di ottimizzazione visto in precedenza, non otterremo risultati differenti. La vera svolta è l'introduzione di un fattore di penalizzazione (“*with Penalization*”, figura 1.10 a fronte) che porti l'algoritmo ad optare per aree piene o vuote, tralasciando quelle intermedie: sapendo che il modulo elastico dell'elemento i -esimo può essere calcolato a partire da quello originale E_i^0 mediante la formula

$$E_e = \rho_i^p E_i^0 \quad (1.6)$$

con p il fattore di penalizzazione, si può ora procedere ad un'analisi strutturale agli elementi finiti per valutare il lavoro svolto. La procedura si ripete, quindi, in maniera iterativa, ogni volta incrementando di un Δp il fattore di penalizzazione (tipicamente, si parte da $p = 1$ per arrivare a $p = 3/5$), finché il problema non converga a soluzione.

Il fattore di penalizzazione p , quindi, opera in questo modo: aumentando in modo progressivo il modulo elastico man mano che aumenta la densità da ρ_{min} ad 1, il risolutore si troverà a che fare con elementi finiti o troppo rigidi rispetto al volume che occupano (abbassandone la densità nell'iterazione successiva, finché il valore non sia pari al minimo ammissibile) o troppo flessibili (attuando un comportamento opposto). La soluzione non parte subito da valori del fattore di penalizzazione alti per evitare che il problema converga prematuramente a soluzioni date da minimi locali, consentendo di arrivare in maniera più graduale ad una soluzione ottimale.

Combinando il fattore di penalizzazione al fatto che vengono tenuti in conto anche i carichi applicati al volume (diversamente dall'Homogenization Method) si capisce che la soluzione trovata non solo rispetterà il criterio di arresto

$$V = \sum_{i=1}^N v_i \rho_i \leq \bar{V}_s \quad (1.7)$$

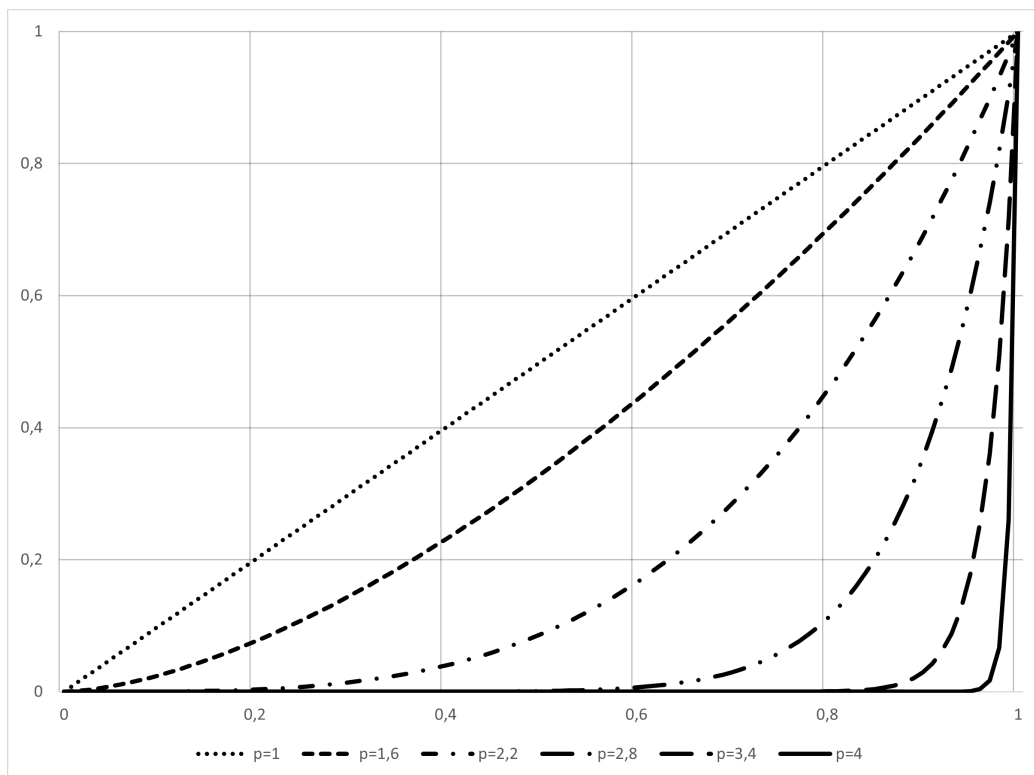


Figura 1.10: Influenza del fattore di penalizzazione

ma sarà in grado di reggere ai carichi imposti, sottostando alla condizione

$$\left[\sum_{i=1}^N \rho_i^p K_i \right] \{u\} = \{F\} \quad (1.8)$$

dove K_i è la matrice di rigidità del problema ed F il tensore dei carichi imposti. A questo punto, l'obiettivo del problema è massimizzare l'espressione

$$c(\rho_i) = \{F\}^T(u) \quad (1.9)$$

che è un'altra formulazione dell'energia potenziale.

1.3.4 I vantaggi del metodo SIMP

Oltre al metodo SIMP sono stati proposti almeno altri due metodi nel corso degli anni il cui obiettivo è lo stesso, ovvero produrre topologie “bianche o nere”. Nonostante questi tentativi però, il SIMP si è sempre dimostrato superiore ad essi per i vantaggi che verranno di seguito discussi.

Il primo dei metodi proposti è stato l'OMP (Optimization Microstructures with Penalization) [16], nel quale la prima soluzione è calcolata usando, per ogni elemento finito, una microstruttura ottimale imposta a priori dall'operatore sulla base del tipo di problema da affrontare. In seguito, l'ottimizzazione procede come per il SIMP, ma è necessario introdurre un ulteriore fattore di penalizzazione (ad esempio basata sul costo di fabbricazione delle aree con densità intermedia) in quanto la microstruttura da sola non è sufficiente a garantire un risultato finale soltanto pieno o vuoto.

Il secondo metodo è invece il NOM (NonOptimal Microstructures), che non fa invece uso di penalizzazioni e non richiede l'imposizione di una microstruttura iniziale ottimale. La penalizzazione è invece ottenuta sfruttando proprio il fatto che la microstruttura sia non ottimale, portando quindi l'algoritmo a penalizzare le aree non ottimizzate, escludendole dalla soluzione, sebbene non con la stessa efficacia del SIMP. In confronto a questi due metodi, esso [17]:

- è computazionalmente più efficiente, dovendo gestire un solo parame-

tro contro i tre dell'OMP (lunghezza, larghezza ed orientamento della microcavità, come discusso in precedenza) ed un numero variabile, ma sempre maggiore di uno, del NOM;

- è maggiormente robusto in quanto garantisce una soluzione per qualsiasi tipo di problema (l'OMP non riesce a gestire problemi in cui il volume finale sia un obiettivo);
- permette che il fattore di penalizzazione possa essere aggiustato affinché sia più o meno aggressivo, ed i suoi effetti quindi modulabili (parametro affatto presente nel NOM) anche aggiungendo fattori di penalizzazione ulteriori (come nell'OMP);
- partendo da un fattore $p = 1$, il SIMP porta sempre ad una soluzione seppure ci si allontani dalla soluzione esatta a mano a mano che si aumenta p (a vantaggio però della realizzabilità dell'oggetto). OMP e NOM invece non garantiscono matematicamente l'esistenza della soluzione;
- non richiede l'omogenizzazione finale, ovvero quella procedura matematica che permette di calcolare le proprietà meccaniche dell'intero a partire da quelle degli N elementi finiti, ognuno con i propri valori.

È grazie a tali vantaggi che il metodo SIMP è stato utilizzato durante il lavoro per la stesura di questa tesi: innanzitutto, accettando in input qualsiasi tipo di formato solido presenta un vantaggio non da poco sui metodi concorrenti essendo "CAD-indipendente". In secondo luogo, la sua facilità ed immediatezza d'uso, la certezza di arrivare ad una soluzione e l'universalità d'impiego a prescindere dal dato problema (a differenza di altri metodi che cercano di arrivare ad una topologia "bianco o nero") lo hanno reso lo standard *de facto* dell'industria e la scelta naturale come metodo da impiegare durante la presente tesi.

	SIMP	OMP	NOM
N° di parametri liberi per elemento	1	3	>1
Utilizzabile per	qualsiasi problema	massimizzazione della rigidità	qualsiasi problema
Penalizzazione standard adeguata	si	si	no
Certezza della soluzione	si	no	no
Necessità di omogeneizzazione finale	no	si	si

Tabella 1.1: Confronto riassuntivo dei metodi di ottimizzazione analizzati

1.3.5 Il workflow in Fusion 360

Per mostrare il workflow necessario in Fusion 360 al fine di eseguire un'ottimizzazione topologica (molto simile, comunque, ad altri applicativi), la geometria d'esempio impiegata è una trave di dimensioni 30 x 20 x 1 mm, con un foro al centro di diametro 5 mm (per un volume di 580.37 mm³), caricata ad un estremo con un carico di -0.001 N lungo l'asse z e fissata all'altro estremo. Il modello è stato interamente modellato all'interno del CAD in esame, ma, in realtà, non dipendendo il metodo SIMP da una modellazione parametrica si sarebbe potuto importare un file STEP realizzato con qualsiasi altro CAD (situazione effettivamente verificatasi con il caso di studio presentato in questa tesi). Una volta importato o modellato il volume (figura 1.11 nella pagina successiva, che rappresenta il volume di lavoro, quindi i limiti entro i quali l'ottimizzazione avrà luogo) si passa a definire l'eventuale geometria da preservare (figura 1.12 a fronte): come impostazione di default il programma preserva le geometrie sottoposte a carichi o vincoli, ma è possibile indicare altre aree di eventuale interesse (è il caso del foro centrale, inserito proprio a questo scopo). Inoltre, è possibile specificare gli eventuali piani di simmetria presenti nel modello (figura 1.13 a pagina 26), così che siano rispettati dall'algoritmo.

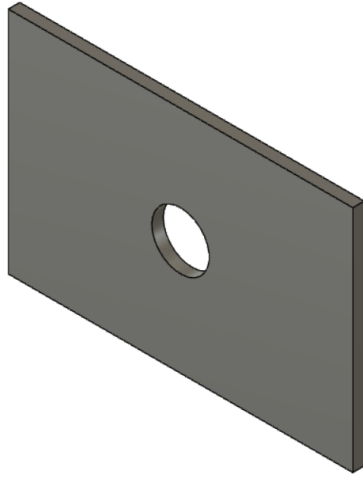


Figura 1.11: Volume di lavoro

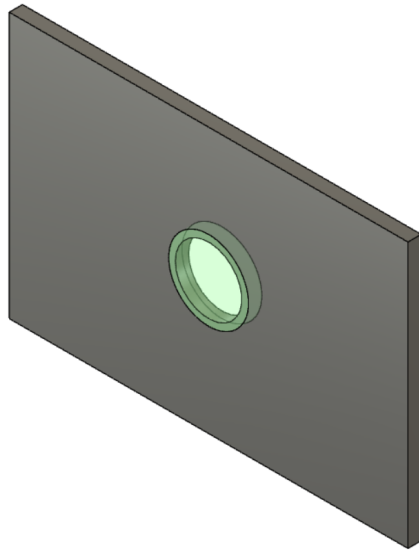


Figura 1.12: Geometria preservata

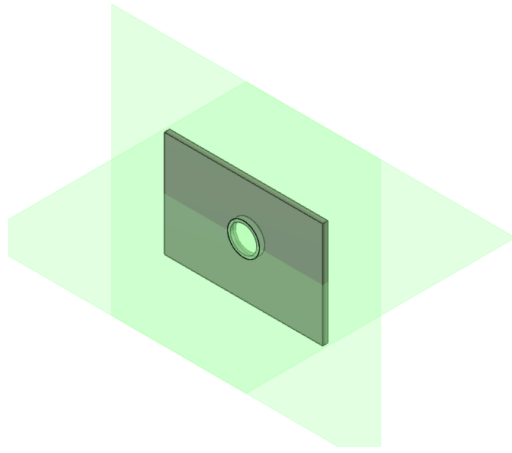


Figura 1.13: Piani di simmetria

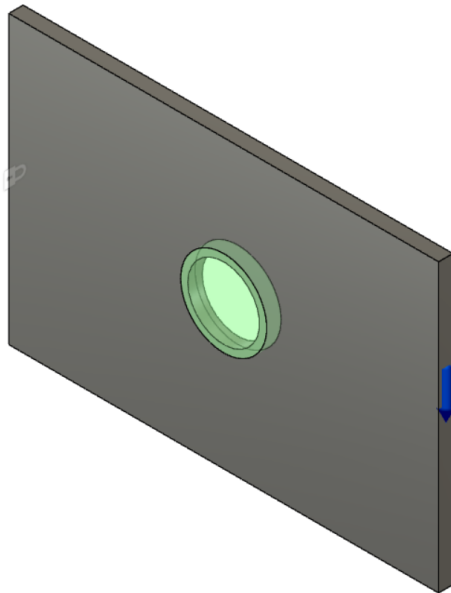


Figura 1.14: Definizione di vincoli e carichi

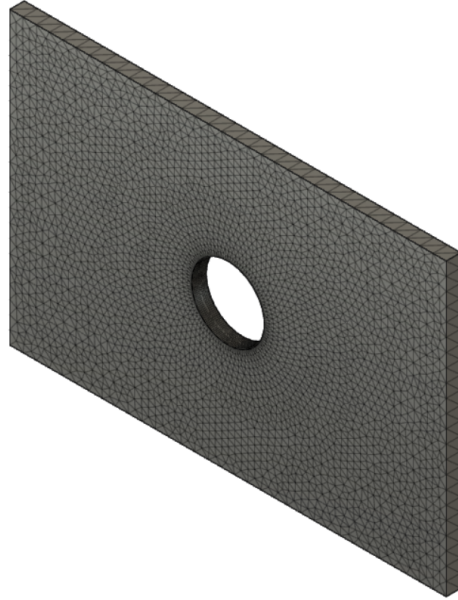


Figura 1.15: Mesh generata

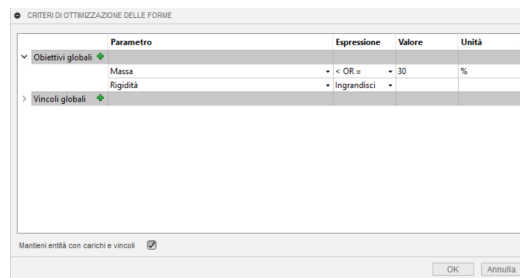


Figura 1.16: Definizione degli obiettivi dell'ottimizzazione

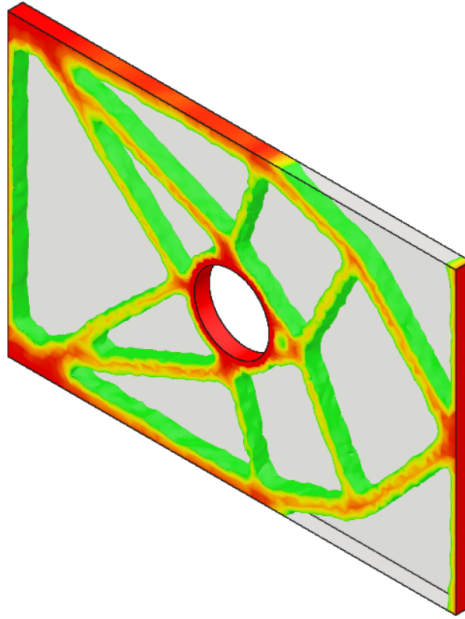


Figura 1.17: Soluzione dell'ottimizzazione

In seguito, una volta applicati carichi e vincoli (figura 1.14 a pagina 26), si passa alla generazione della mesh (figura 1.15 nella pagina precedente) ed alla definizione degli obiettivi (figura 1.16 nella pagina precedente, in questo caso un volume pari massimo al 30% del volume iniziale ed una rigidità massima) per poi proseguire con la risoluzione del problema (figura 1.17).

Finita l'ottimizzazione, si esporta la mesh risultante in un ambiente di modellazione e si adegua la geometria iniziale ai risultati dell'ottimizzazione (figura 1.18 a fronte), ottenendo una geometria che sia producibile (nel caso in esame, il volume finale è di 266.26 mm³). Infine, per validare la procedura, si esegue un'analisi strutturale per verificare che la geometria ottenuta sia conforme a vincoli e carichi (figura 1.19 nella pagina successiva).

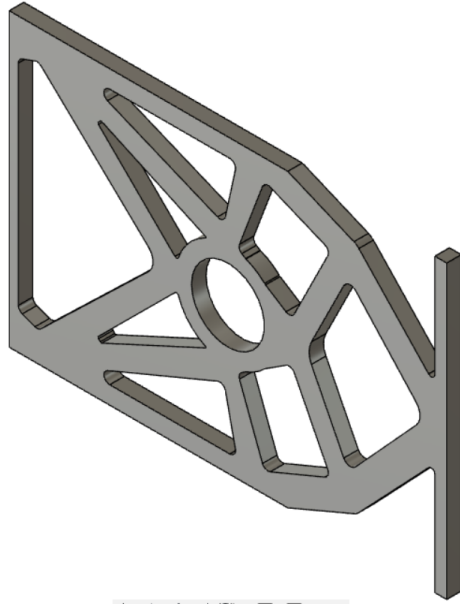


Figura 1.18: Geometria aggiornata dopo l'ottimizzazione

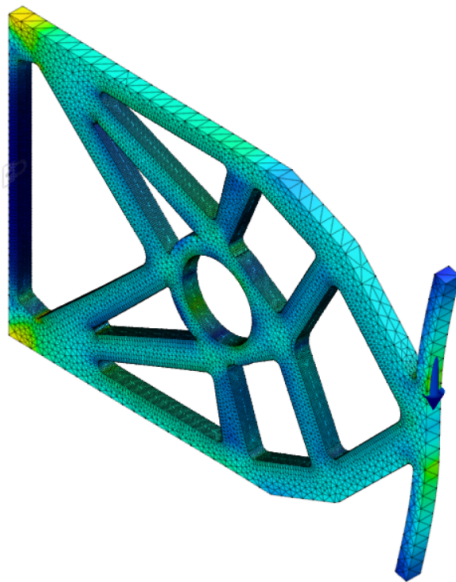


Figura 1.19: Validazione finale

Capitolo 2

L'ottimizzazione topologica nell'embodiment design

Come discusso precedentemente, l'embodiment design si preoccupa di concretizzare le idee, in un certo senso astratte, concepite nel conceptual design. Va evidenziato, quindi, come sia questa fase quella che peserà più di tutti a livello economico nella vita di un prodotto. Il costo di realizzazione di un prodotto, infatti, dipende anche e soprattutto dalle scelte riguardanti il processo di produzione selezionato per produrre il componente, così come sarà influenzato dalle procedure di assemblaggio, anch'esse figlie dell'embodiment design.

Cruciale diventa a questo punto un processo di decision making che tenga conto di questi aspetti, in quanto secondo il paradosso dei costi tra il 70% e l'80% dei costi impegnati per produrre un componente è determinato dal lavoro iniziale di progettazione [18–20], che occupa circa il 20% dei costi sostenuti (figura 2.1 nella pagina seguente). In altre parole, investire quanto più possibile tempo ed energie nella ricerca della soluzione più ottimale possibile nelle fasi iniziali del lavoro permette di ridurre la restante quota di costi, fondamentale nella determinazione del prezzo.

Pahl e Beitz, consci di ciò, hanno previsto che nell'embodiment design si tengano già conto degli aspetti deboli della progettazione legati, tra le altre, a questioni economiche e di producibilità. Le valutazioni economiche possono

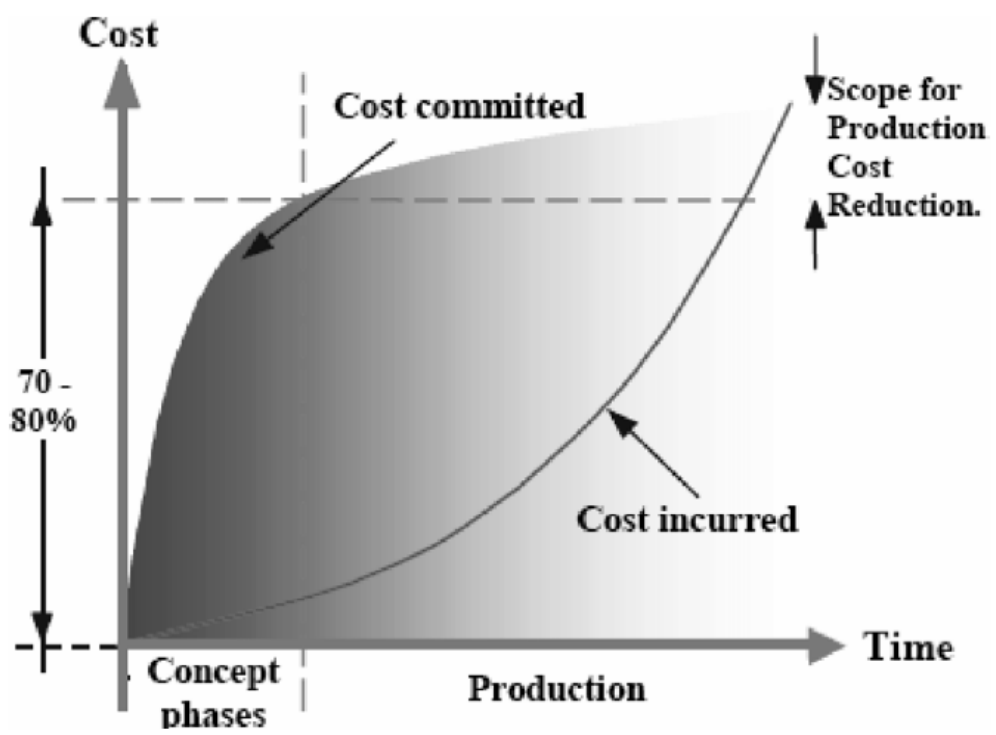


Figura 2.1: Andamento di costi impegnati e costi sostenuti nel ciclo di vita di un prodotto [21]

essere condotte in una fase in cui il layout è soltanto abbozzato, all'inizio dell'embodiment design, ma soprattutto poco prima di entrare nella fase di Detail Design. Nel momento in cui si iniziano a valutare questi *weak spot* si inizia a parlare di Robust Design, ovvero quelle tecniche di progettazione che puntano alla massima ottimizzazione possibile di tutti i punti che concorrono ad un buon design quali performance, costi, producibilità, ecc. . . tra le quali spiccano il Generative design e l'Ottimizzazione topologica.

In particolare, l'ottimizzazione topologica è un importante strumento di controllo dei costi in quanto permette di agire sui punti deboli del design mediante un approccio controllato, ripetibile, in larga parte automatizzato grazie all'informatica e, a meno di selezionare il giusto metodo matematico, dalla soluzione certa. Come sarà ben illustrato più avanti nel corso della presente tesi, il campanello di allarme che ha fatto propendere per un'ottimizzazione topologica è stato il riscontro di scarse performance meccaniche nel componente progettato: ciò non significa soltanto costruire un componente che pesi più di quanto necessario, ma soprattutto aggiungere ai costi di produzione il costo di una frazione del materiale che può essere eliminato.

L'aggiunta di tasche di alleggerimento nel componente analizzato, collocate secondo i risultati dell'ottimizzazione topologica, ha permesso un notevole risparmio di materiale ma aumentando le lavorazioni necessarie in un processo produttivo per asportazione di truciolo, processo che era inizialmente stato selezionato data la forma iniziale essenzialmente prismatica. Ciò ha posto il problema quindi dell'aumento dei costi di lavorazione a fronte di una diminuzione del costo del materiale, ed è qui che fa il suo ingresso un vantaggio accessorio dell'ottimizzazione topologica: avendo reso un oggetto inizialmente troppo massivo un componente più snello si è aperta la strada dell'additive manufacturing, prima impraticabile, e che ha condotto ad un'ulteriore diminuzione in massa del frame, oltre ad un'ottimizzazione quasi assoluta dell'utilizzo di materia prima, innegabile vantaggio della così detta "stampa 3D".

Capitolo 3

Progettazione del rugged display: il caso d'uso nel settore delle HMI

3.1 Di cosa si occupa Tastitalia?

Tastitalia è un'azienda italiana impegnata nel settore delle HMI (Human-Machine Interfaces) ovvero nella realizzazione di tutto ciò che deve consentire una comunicazione efficace tra utente e macchina. Azienda nata dall'esigenza di realizzare circuiti flessibili, si è nel tempo evoluta andando a coprire diversi settori industriali (Ho.Re.Ca, Difesa, Aerospaziale, Navale, Medicale, Industriale, Automotive, Elettrodomestico) per i quali realizza tastiere, touch panel ed altre interfacce, sviluppando tecnologie proprietarie o sondando nuove strade (loro è la prima introduzione in Italia, nel 2007, della tecnologia di feedback aptico per restituire il feeling tipico dei comandi meccanici anche interagendo con pannelli capacitivi). Ponendo al centro dell'attenzione il cliente ed i suoi bisogni fornendogli ampie possibilità di personalizzazione, mediante un know how ben consolidato, la valorizzazione delle skills delle risorse, il lavoro di squadra ed un'attenzione particolare per l'ambiente (l'azienda è certificata ad impatto zero) sono riusciti ad affermarsi come uno dei maggiori player del mercato HMI.

E' in quest'ottica che si inserisce il presente lavoro di tesi, mirato alla progettazione ed ottimizzazione di un componente le cui caratteristiche saranno

ora discusse.

3.2 Il componente

Il componente, denominato frame, si inserisce in un assieme più ampio: l'azienda, dopo aver individuato nel mercato dei Rugged Display destinati al settore della Difesa un'interessante opportunità di investimento, ha iniziato a progettare una serie di display, partendo dal modello con schermo da 12.1" presentato in questa tesi.

Tali display, detti appunto rugged, sono sottoposti a condizioni estreme durante il loro servizio: ad essi è richiesto che siano resistenti in immersione, alla polvere, all'attacco di agenti chimici, ad un range operativo di temperature estreme, alla depressurizzazione in alta quota e non ultimo a sollecitazioni meccaniche elevatissime, fino a 20G, derivanti dagli shock a cui il veicolo sui quali sono installati può andare incontro.

Il componente preso in analisi in questa tesi, il frame, ha la funzione di mantenere in posizione il pacchetto display LCD + touchscreen così come le tastiere collocate lungo i quattro lati del display. Tramite il pretensionamento delle viti di montaggio ci si assicura non solo che i componenti siano mantenuti in posizione, ma anche e soprattutto che vengano premuti contro il frontale del display dove, per mezzo dell'interposizione di apposite guarnizioni, si garantisce la tenuta stagna ad acqua e polvere. Inoltre, il frame funge da supporto alla piastra in FR4 che è a sua volta il supporto per le schede elettroniche deputate al controllo delle funzioni display. Scopo della tesi è quindi la progettazione del frame, nella sola fase dell'embodiment design, affinché soddisfi con elevate performance le gravose condizioni a cui è chiamato a sottostare.

3.3 Perché l'ottimizzazione topologica?

Ad un certo punto dell'embodiment, ci si è resi conto che nonostante l'ottimizzazione di alcune delle dimensioni "libere" il frame risultava comunque

ottimizzabile. Le analisi FEM mostravano chiaramente il sovradimensionamento del frame, ed è inoltre noto come le accelerazioni elevate producano più danni su un componente pesante che non su uno leggero ma, nonostante ciò, non era possibile ridurre ancora delle quote in quanto vincolate dall'accoppiamento con gli altri componenti.

Le strade da percorrere rimanevano due: o la riprogettazione dell'intero componente, vanificando il lavoro svolto fin lì, o la realizzazione di fori e tasche di alleggerimento per limitare quanto più possibile la massa. Scelta la seconda strada, piuttosto che procedere mediante una metodologia trial and error, si è deciso di affidarsi ai “suggerimenti” di un algoritmo che proponesse la collocazione e l'entità di tali fori e/o tasche pur mantenendo intatta la capacità di resistere alle sollecitazioni imposte: il miglior strumento individuato a tale scopo è stata appunto l'ottimizzazione topologica.

Capitolo 4

Embodiment design del frame

4.1 Step 1: identificazione dei requisiti tecnici

4.1.1 Requisiti dimensionali

- Accogliere un display LCD + Touchscreen da 12.1", con dimensioni 261 x 204.6 x 7.2 mm;
- Supportare un insieme di schede elettroniche montate su un supporto in FR4 avente un footprint totale di 262 x 206.6 x 1.5 mm tramite 13 punti di ancoraggio;
- Scaricare il pretensionamento delle viti di montaggio (10 x M3) sul touchscreen e sulle tastiere poste lungo i lati dello schermo, allo scopo di premerli contro il frame garantendo l'impermeabilità dell'insieme.

4.1.2 Requisiti relativi alla distribuzione spaziale

- Supporto in FR4 e dorso del LCD sono posti a circa 8.5/9 mm per permettere il passaggio dei cavi elettrici;
- Tra il dorso del touchscreen e quello delle tastiere c'è un dislivello di 5.2 mm.

4.1.3 Requisiti relativi ai materiali

- Necessità di resistere a sollecitazioni impulsive di 20G della durata di 11 ms in tutte le direzioni;
- Necessità di resistere alla pressione di un eventuale liquido quando in immersione;
- Necessità di resistere ad un range operativo di temperature di -46/+65 °C ed un range di temperature di stoccaggio di -51.1/+71.1 °C.

4.1.4 Requisiti relativi alla producibilità

- Dati i lotti di produzione ridotti (centinaia di pezzi) sono da evitare le tecniche di produzione di massa, puntando su lavorazioni per asportazione di truciolo o additive manufacturing.

4.2 Step 2: creazione dei disegni relativi ai vincoli spaziali

Essendo già presenti i disegni 3D relativi ai componenti ai quali il frame andrà accoppiato (visibili nelle figure 4.1 nella pagina successiva, 4.2 a fronte e 4.3 nella pagina successiva), questi sono stati utilizzati come disegni indicanti i vincoli spaziali da rispettare.

4.3 Step 3: realizzazione del layout

4.3.1 Layout preliminare

È stato realizzato a questo punto un layout preliminare (figure 4.4 a pagina 42 e 4.5 a pagina 43), successivamente da dettagliare, che assolvesse alle funzioni determinate tramite i requisiti dimensionali.

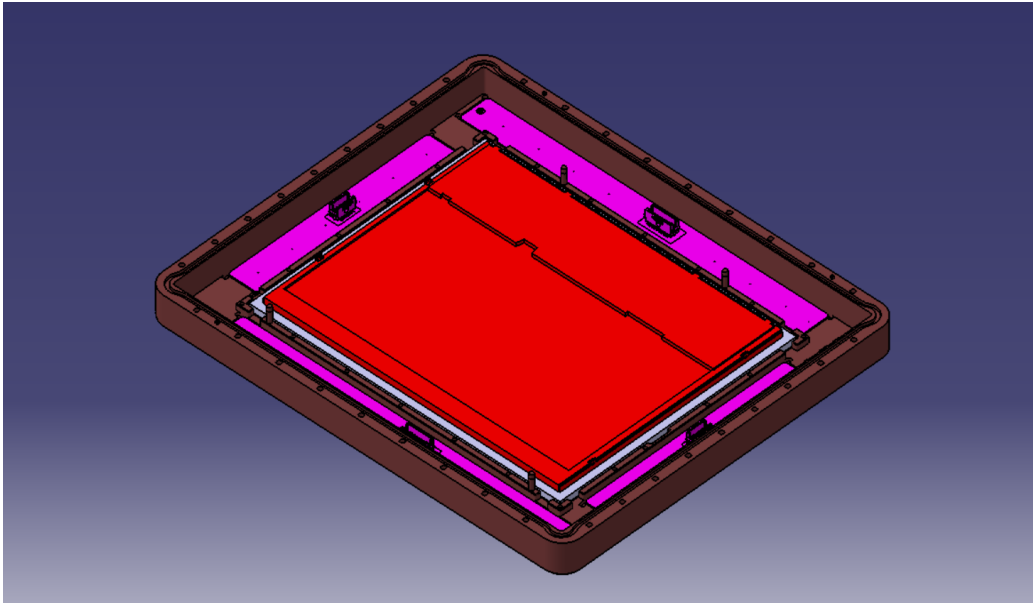


Figura 4.1: Vista 3D dei componenti ai quali il frame andrà accoppiato

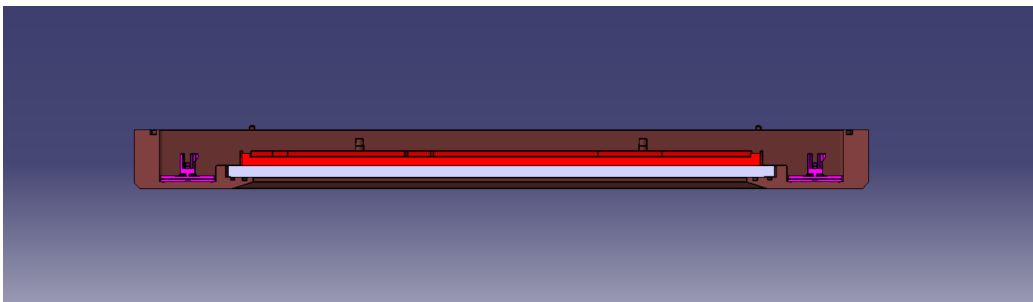


Figura 4.2: Sezione sul piano ZX dei componenti accoppiati al frame

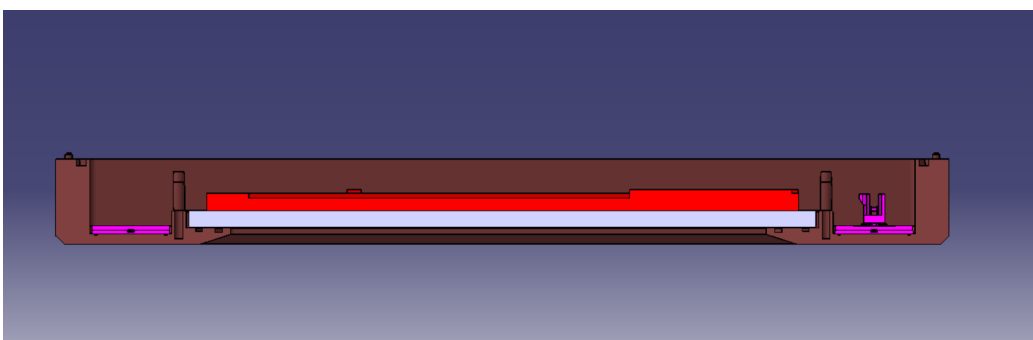


Figura 4.3: Sezione sul piano ZY dei componenti accoppiati al frame

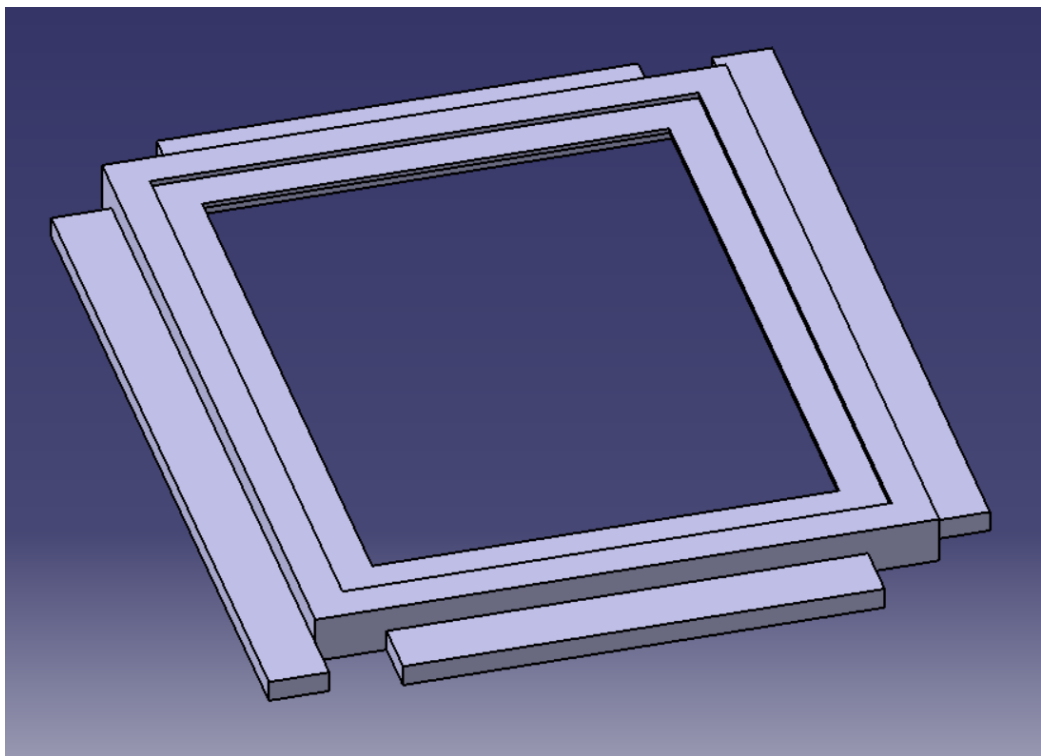


Figura 4.4: Layout preliminare visto dall'alto

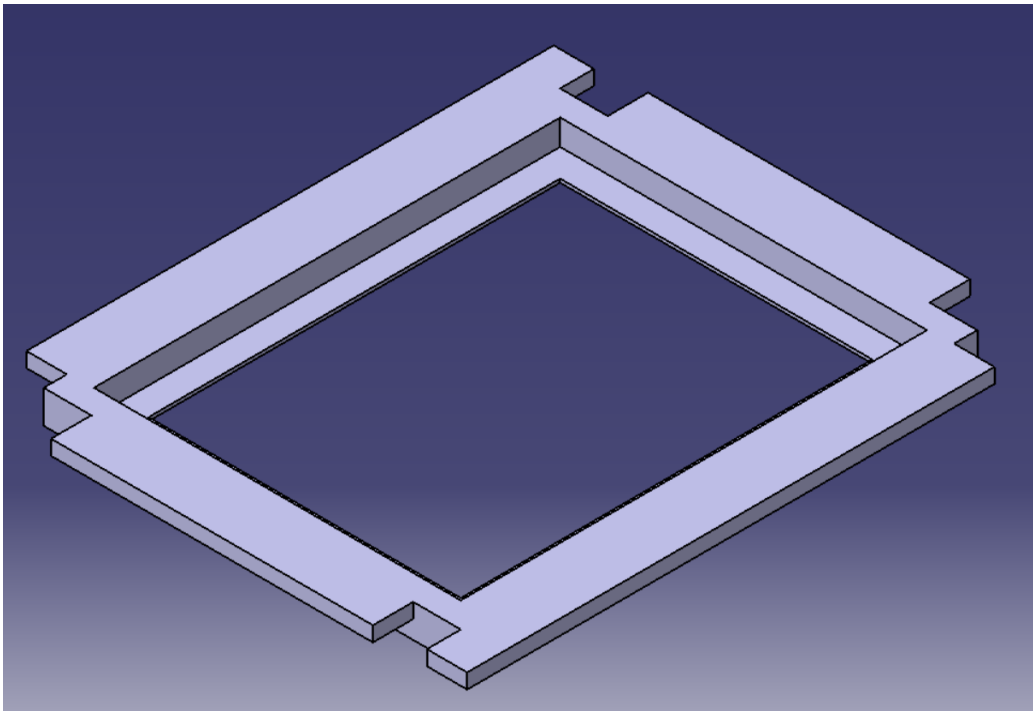


Figura 4.5: Layout preliminare visto dal basso

4.3.2 Layout dettagliato

A questo punto il layout preliminare è stato dettagliato (figure 4.6 nella pagina seguente e 4.7 a pagina 45), aggiungendo le sedi per le viti di montaggio, le sedi per il montaggio dei PEM (necessari al fissaggio del supporto in FR4), fori per l'accoppiamento con le spine di allineamento presenti sul front cover, così come vari fori e cavità necessari per il passaggio dei cavi elettrici.

4.3.3 Determinazione del materiale

Una volta determinato il layout, considerati i requisiti richiesti al materiale ed i carichi a cui esso dovrà essere sottoposto, si è deciso di realizzare il frame in lega d'alluminio, mediante lavorazioni per asportazioni di truciolo alle macchine utensili.

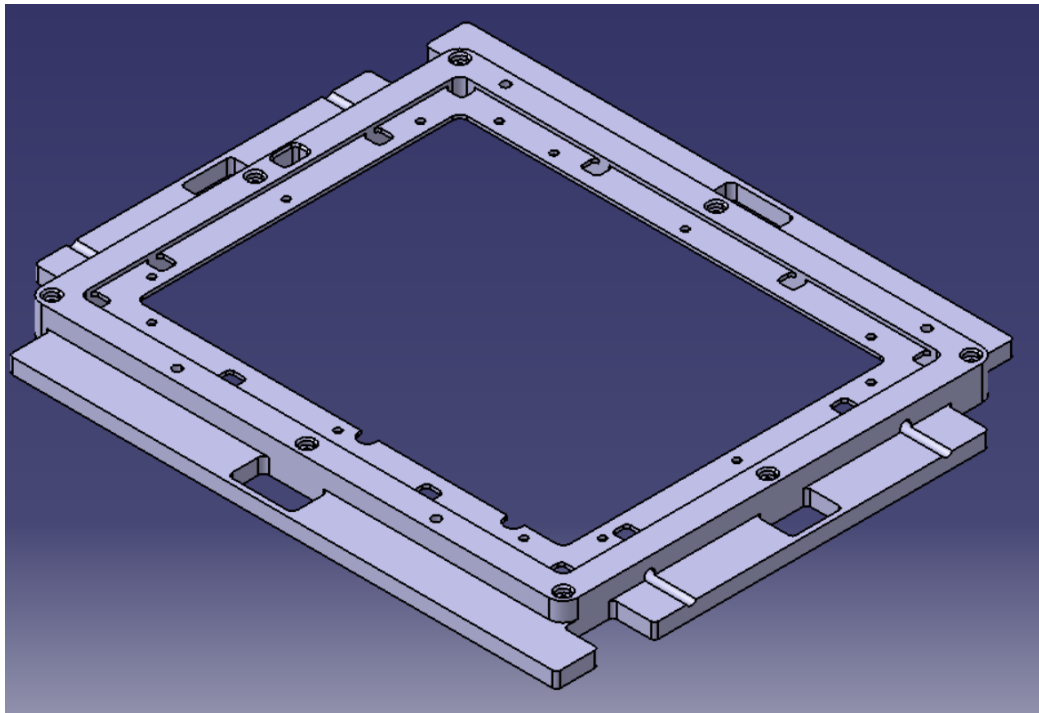


Figura 4.6: Layout dettagliato visto dall'alto

4.3.4 Verifica tecnica: resistenza alle sollecitazioni

Determinato il materiale, è stato possibile eseguire un'analisi agli elementi finiti necessaria a stabilire le performance del componente fin qui disegnato. Va fatto notare che le dimensioni fin qui adottate sono dimensioni di massima, non dettate da nessun calcolo, quanto piuttosto estrapolate dall'esperienza del progettista per non andare incontro a failure. L'analisi FEM (figura 4.8 a fronte), sebbene ci mostri che il componente resista alle sollecitazioni, mette in evidenza un problema: il componente è decisamente sovradimensionato e quindi l'utilizzo del materiale è poco efficiente (sollecitazione massima di 58.2 MPa per un fattore di sicurezza di 4,7). Seguiranno nelle successive fasi diversi interventi di ottimizzazione volti a massimizzare tale efficienza, al fine di individuare un design ottimo.

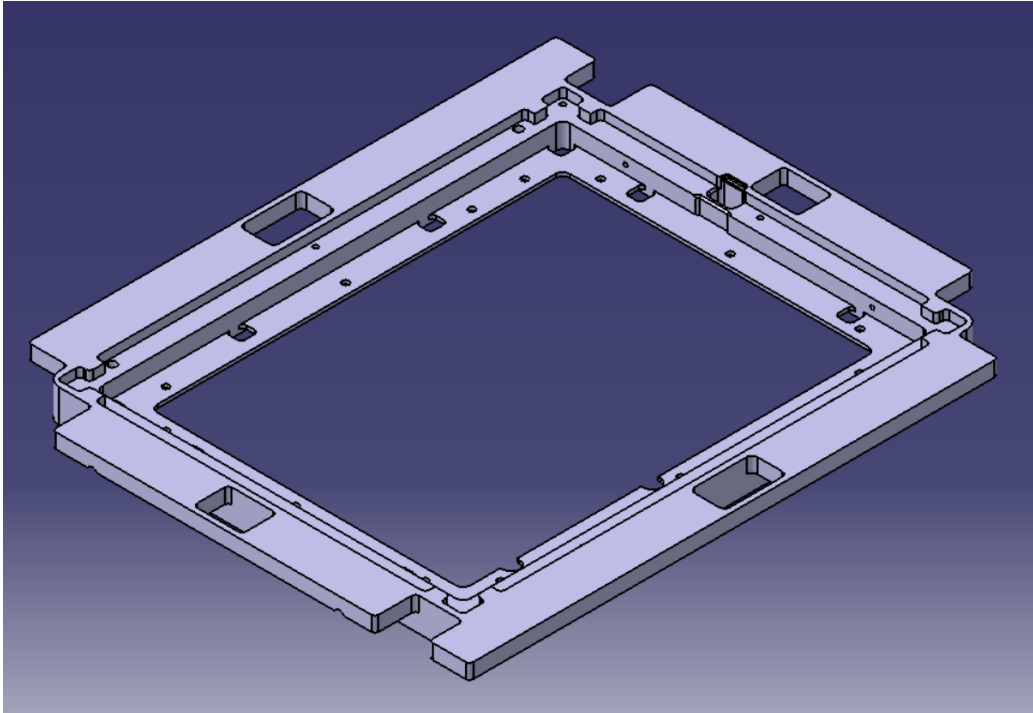


Figura 4.7: Layout dettagliato visto dal basso

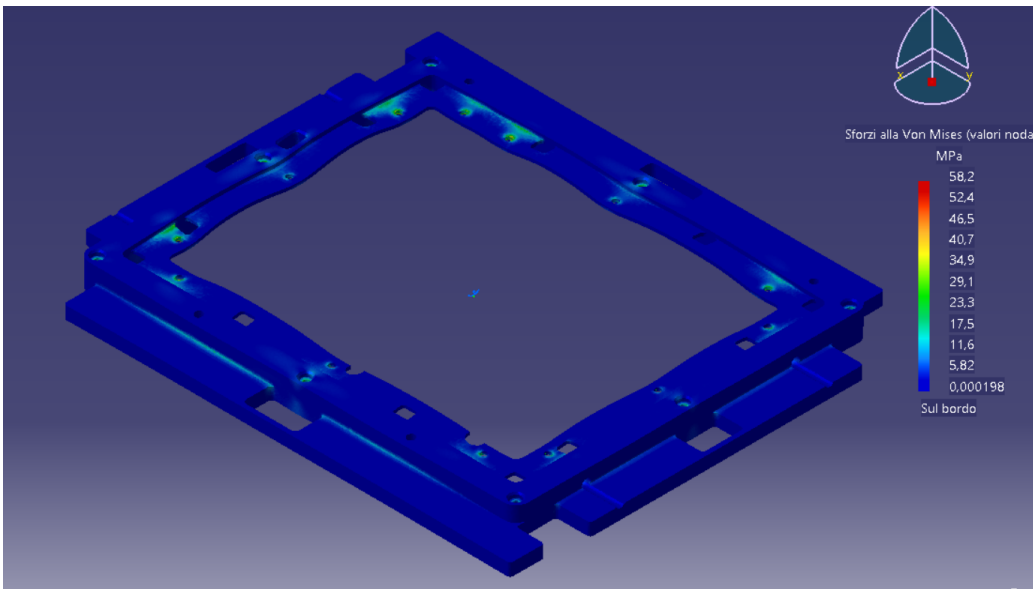


Figura 4.8: Prima analisi FEM

4.3.5 Ottimizzazione delle dimensioni

La prima ottimizzazione eseguita è stata quella sulle dimensioni: le dimensioni prese in esame, ovvero quelle non vincolate da accoppiamenti con altri componenti, sono stati lo spessore del frame, lo spessore delle alette premi-tastiera, lo spessore del labbro che sorregge il supporto in FR4 e la sua profondità. Tale ottimizzazione è stata svolta mediante il modulo Product Engineering Optimizer presente in CATIA V5R20. Come obiettivo dell'ottimizzazione è stata imposta la ricerca del minimo volume possibile mediante la modifica delle dimensioni sopra citate.

L'ottimizzatore ha portato ai seguenti risultati (figure 4.9 nella pagina successiva e 4.10 a pagina 48):

- Spessore del frame, da 18.68 mm a 17.05 mm;
- Spessore delle alette premi-tastiera, da 8.4 mm ad 1 mm;
- Spessore del labbro reggi supporto, da 2 mm a 1.032 mm;
- Profondità del labbro reggi supporto, da 15.554 mm a 14 mm;
- Massa, da 1.074 kg a 0.584 kg;

portando ad un risparmio in massa del 45%.

In seguito all'ottimizzazione è stata eseguita una seconda analisi FEM (figura 4.11 a pagina 48) per verificare se siano avvenuti dei miglioramenti: da essa si evince che c'è stato un netto miglioramento di prestazioni (138 MPa di picco, per un fattore di sicurezza di 1.99), raddoppiando di fatto l'efficienza del componente.

4.3.6 Ottimizzazione topologica

Volendosi spingere ancora più in là con l'ottimizzazione, si è deciso di intraprendere infine la strada dell'ottimizzazione topologica in ambiente Fusion 360 by Autodesk. Da questo momento in poi, per sopperire alla mancanza di potenza di calcolo sul PC in uso (data la grande richiesta di risorse di un procedimento simile) si è deciso di analizzare soltanto un quarto del frame

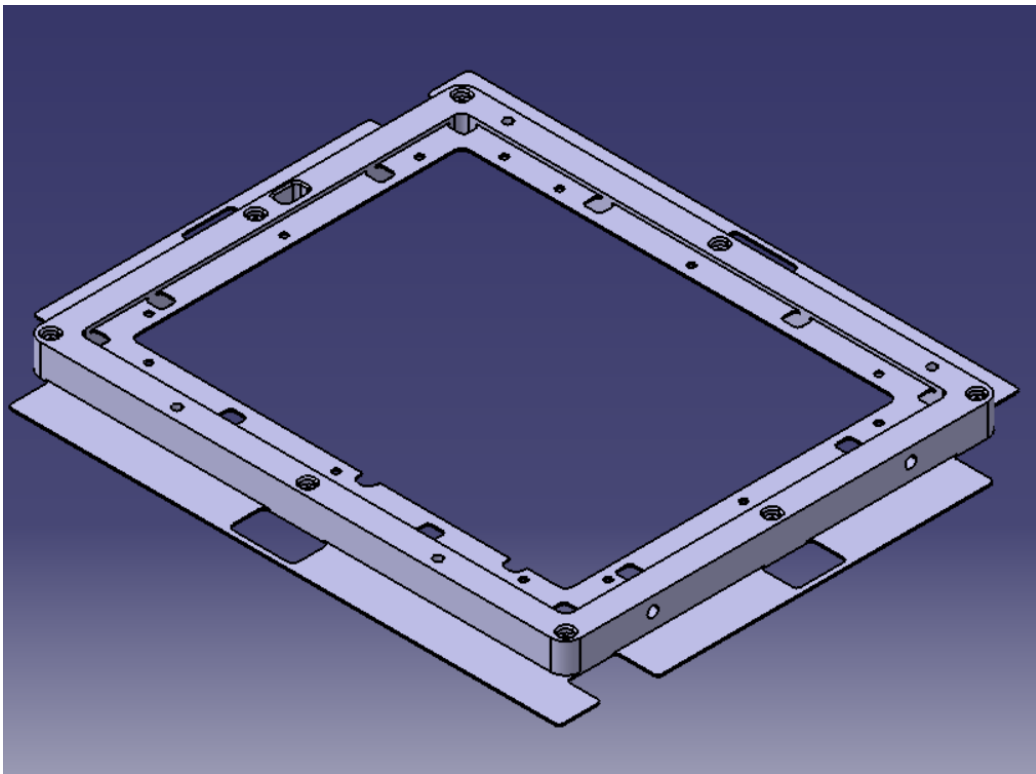


Figura 4.9: Frame in seguito all'ottimizzazione delle dimensioni visto dall'alto

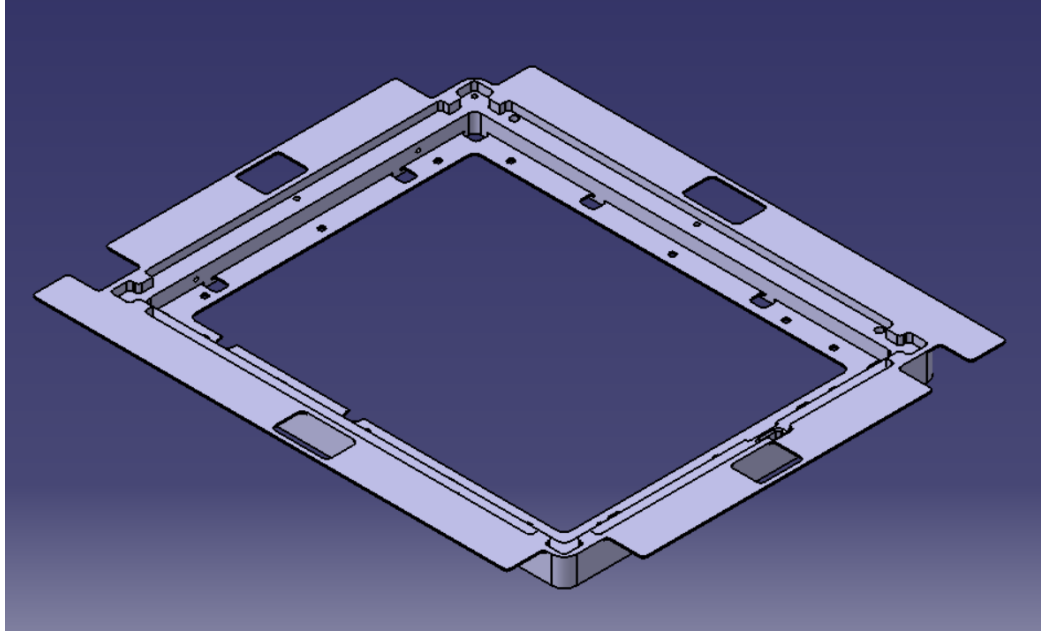


Figura 4.10: Frame in seguito all'ottimizzazione delle dimensioni visto dal basso

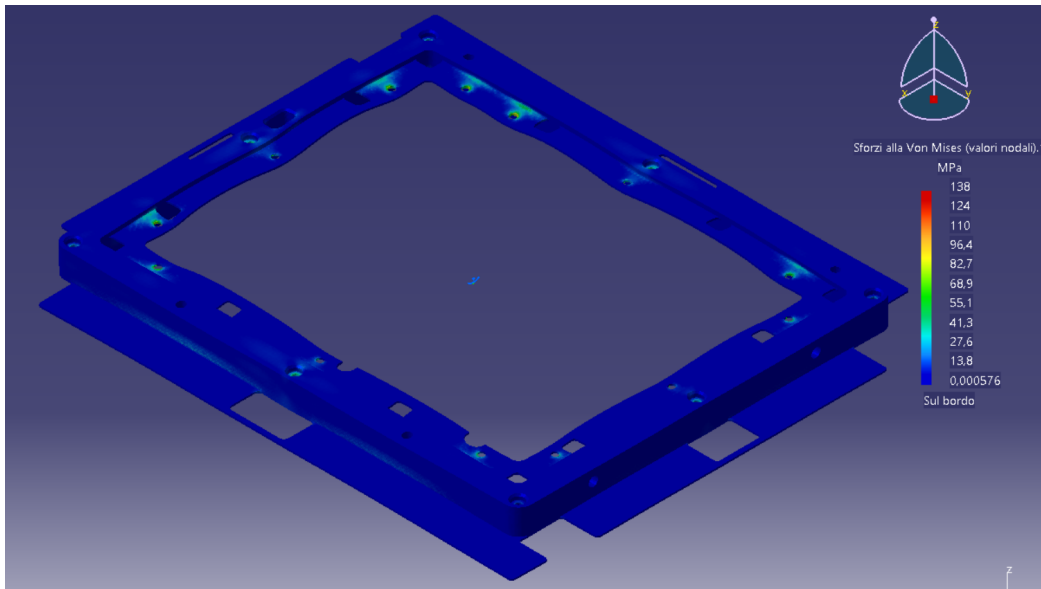


Figura 4.11: Seconda analisi FEM

(figura 4.12): sebbene esso non sia perfettamente simmetrico, i carichi lo sono, e pertanto si è analizzato il quadrante più penalizzato del frame (quello che presenta più fori). Alla fine, il componente verrà ricostruito nella sua interezza.

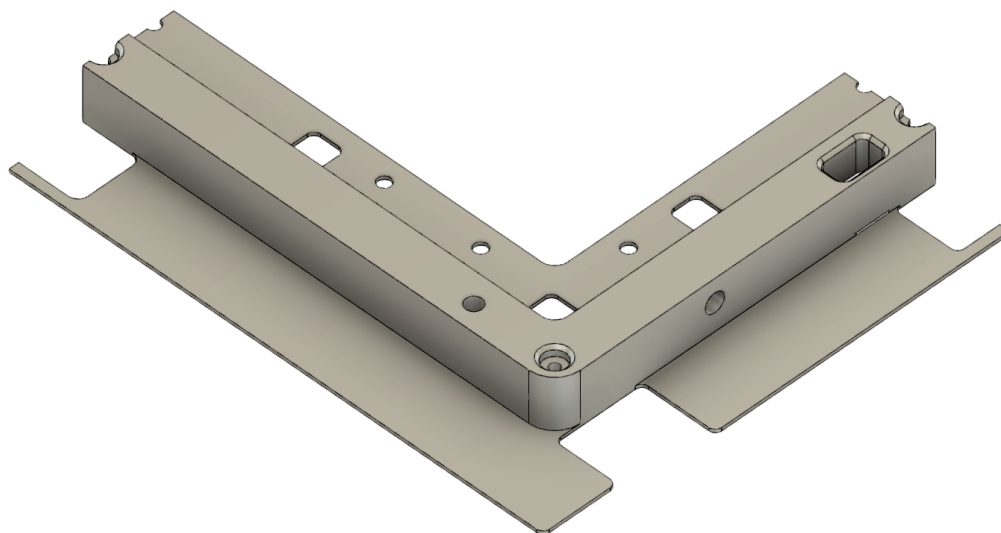


Figura 4.12: Il quadrante di frame preso in analisi

Una volta definite le aree da preservare dall'azione dell'algoritmo (perché sedi per le viti di montaggio o riscontri per altre superfici, fig 4.13 nella pagina successiva) così come i carichi (figura 4.14 nella pagina seguente) ed imposto infine come obiettivo un volume finale pari o minore al 60% dell'originale (figura 4.15 a pagina 51), il software ha dato come output i risultati visibili nelle figure 4.16 a pagina 51 e 4.17 a pagina 52.

Com'è evidente dalle immagini, la mesh ottenuta come output, sebbene soddisfi l'obiettivo preposto presenta una forma molto articolata che poco si presta ad una realizzazione mediante lavorazioni per asportazione di truciolo. Perciò, usando i pieni ed i vuoti della mesh si è proceduto a "razionalizzare" tali forme, ottenendo il risultato visibile in figura 4.18 a pagina 52.

Tramite la forma mostrata nell'immagine precedente, si è raggiunta una massa totale di 0.393 kg, riducendo così del 63% la massa rispetto al componente originario. Ovviamente, tale ottimizzazione va sottoposta ad un'ulter-

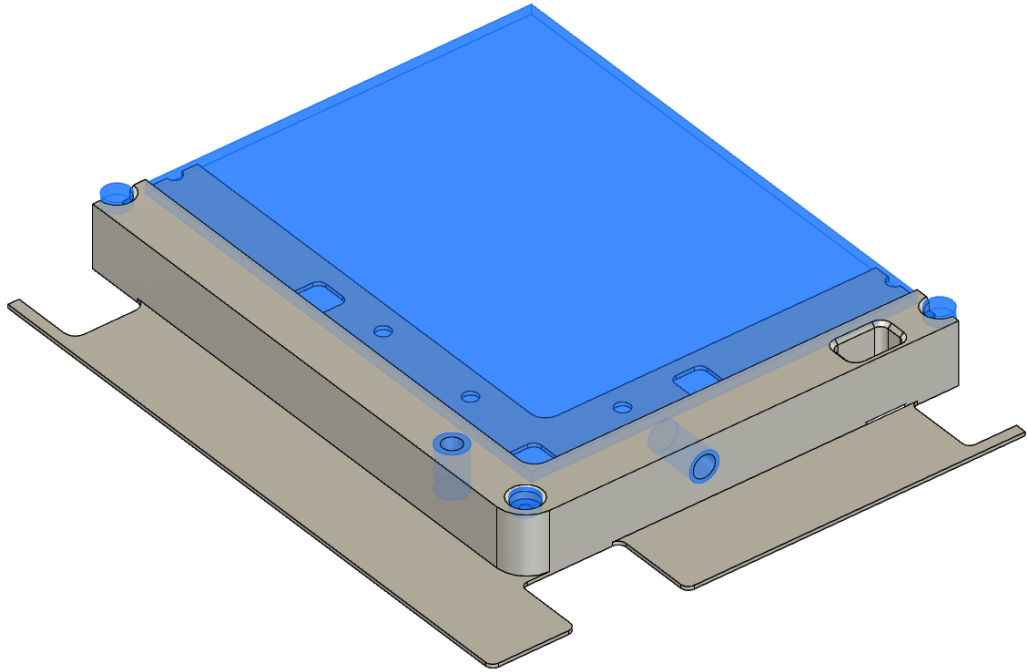


Figura 4.13: Aree preservate dall'azione dell'algoritmo

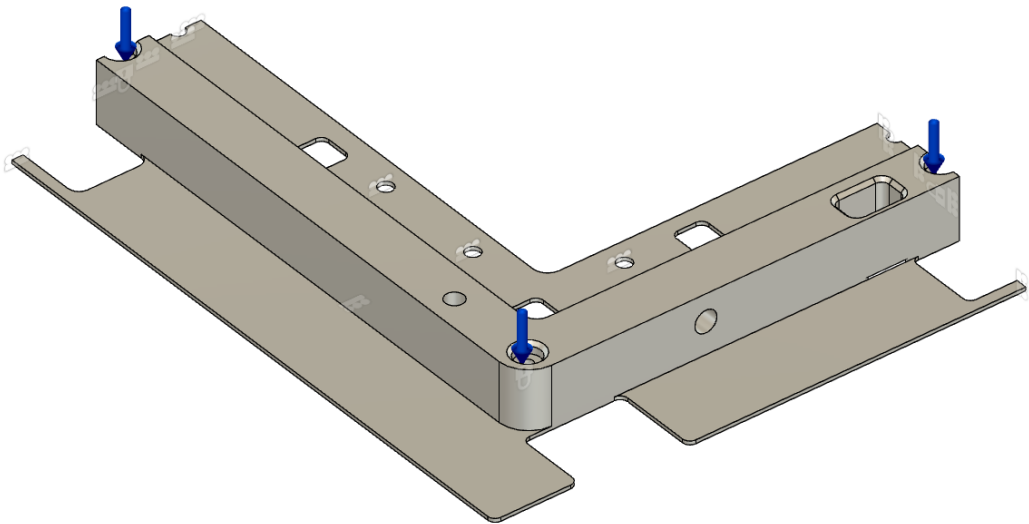


Figura 4.14: Carichi e vincoli

● CRITERI DI OTTIMIZZAZIONE DELLE FORME

	Parametro	Espressione	Valore	Unità
▼ Obiettivi globali +				
	Massa	< OR =	60	%
	Rigidità	Ingrandisci		
▼ Vincoli globali +				
	Mantieni contorno 1	N/A		
	Mantieni contorno 4	N/A		
	Mantieni contorno 5	N/A		
	Mantieni contorno 8	N/A		
	Mantieni contorno 9	N/A		
	Mantieni contorno 10	N/A		
		N/A		

Mantieni entità con carichi e vincoli

OK Annulla

Figura 4.15: Criteri di ottimizzazione

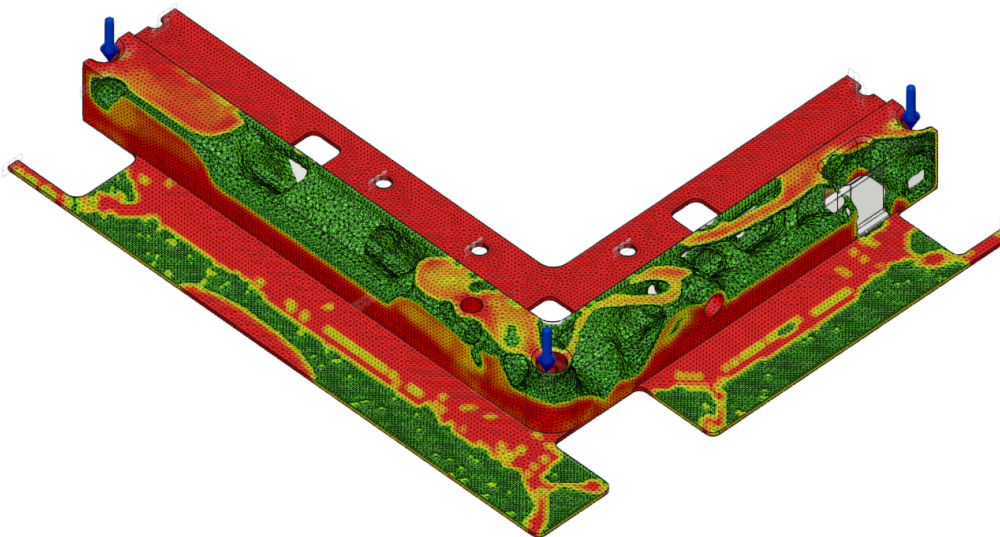


Figura 4.16: Visualizzazione dell'ottimizzazione topologica

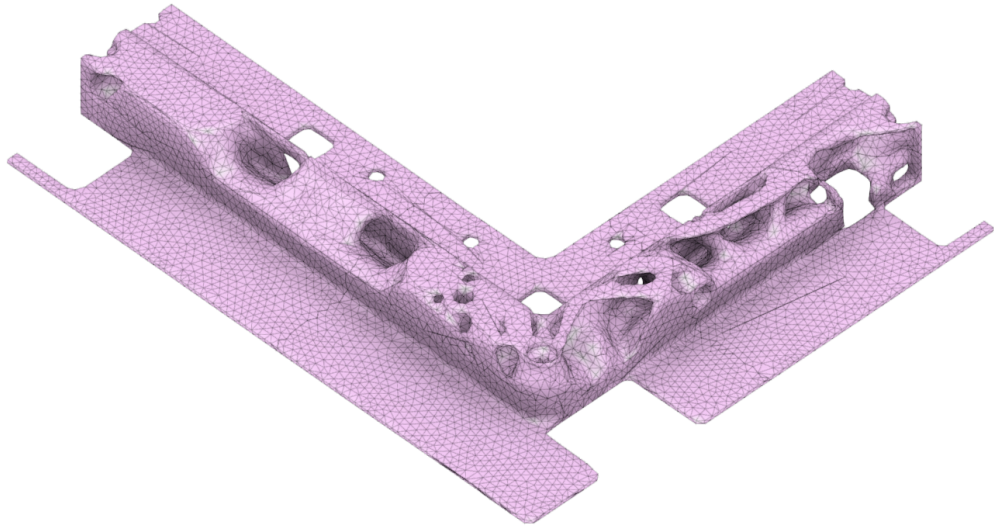


Figura 4.17: Mesh in uscita dall'ottimizzazione topologica

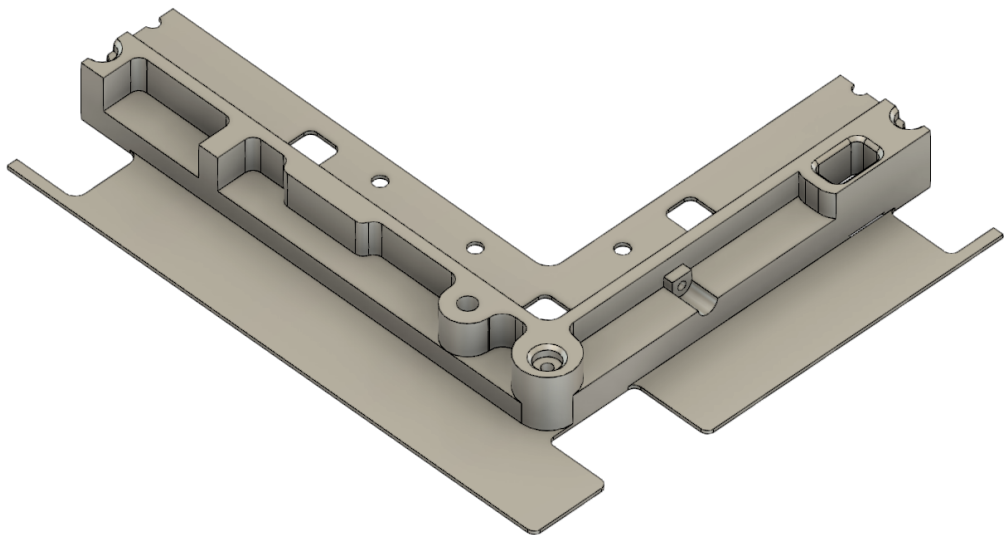


Figura 4.18: Quadrante di frame adeguato ai risultati dell'ottimizzazione topologica

riore analisi FEM (figura 4.19 a pagina 53) che serve a garantire la tenuta dello stesso anche in seguito all'alleggerimento: con una tensione di picco di 206.4 MPa (coefficiente di sicurezza di 1.332), l'ottimizzazione risulta validata.

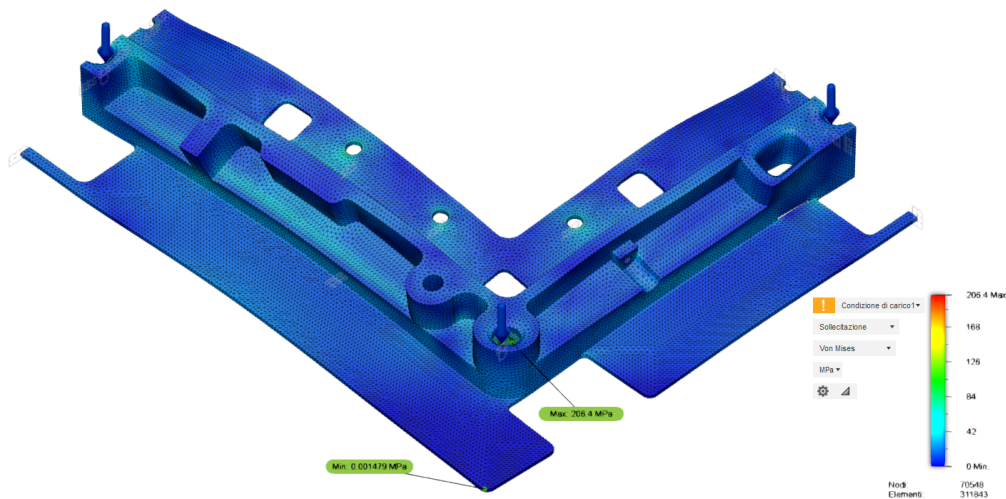


Figura 4.19: Analisi FEM di validazione

A questo punto è possibile ricostruire il modello nella sua interezza per ottenere il layout finale del componente (figure 4.20 nella pagina seguente e 4.21 nella pagina successiva).

4.4 Ottimizzazione per la produzione mediante additive manufacturing

Arrivati a questo punto, il componente risulta già producibile con le tecniche di asportazione di truciolo per le quali è stato progettato. In particolare, si è tenuto conto di queste tecniche di lavorazione nella fase in cui, disponendo della geometria in uscita dall'ottimizzazione topologica, si sono realizzate le tasche di alleggerimento: come si può ben notare le geometrie sono state mantenute semplici e non si è seguito uno ad uno la mesh di riferimento. In

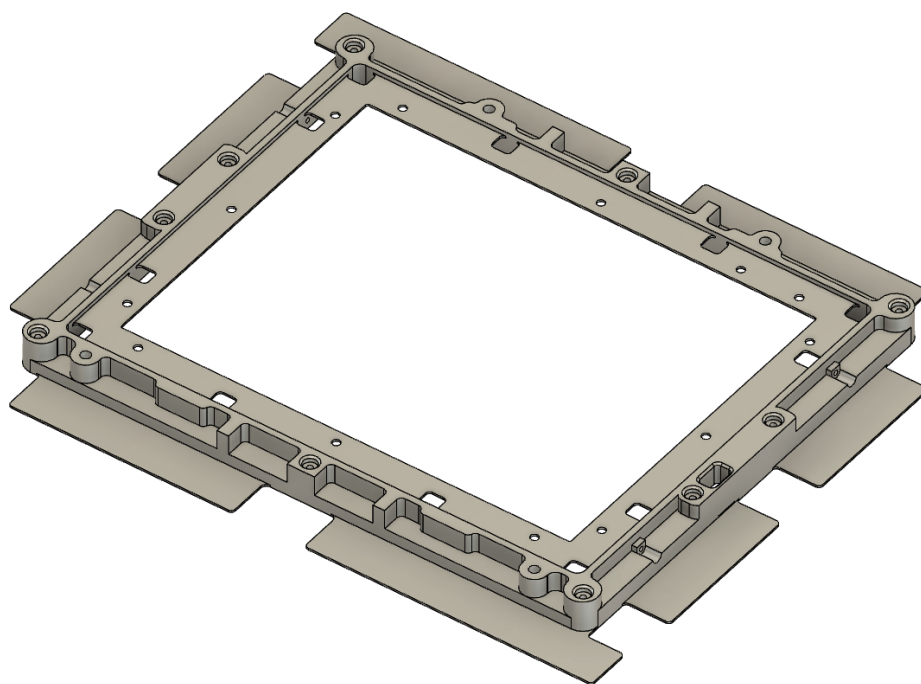


Figura 4.20: Frame ricostruito secondo il layout finale

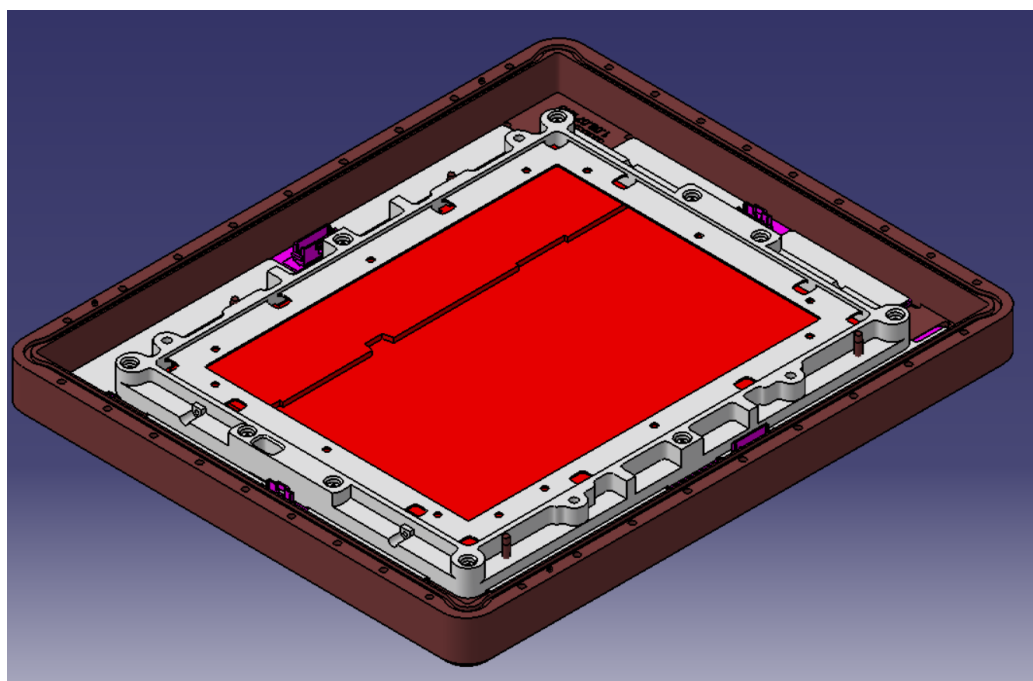


Figura 4.21: Frame inserito all'interno dell'assieme

questo modo le lavorazioni di alleggerimento rimangono eseguibili mediante una fresa a tre assi, che, unitamente al fatto che siano presenti soltanto su una faccia del componente e non siano, quindi, necessarie reorientazioni del pezzo, mantiene bassi i costi.

In un secondo momento però, si è voluta intraprendere la strada dell'additive manufacturing, ed è qui che entra in gioco il fondamentale vantaggio del collaborative virtual prototyping: la possibilità di intraprendere modifiche anche importanti al layout, seguendo le richieste di altri soggetti coinvolti in altre fasi del progetto, senza però intaccare i fondi destinati a quel progetto perché si sta ancora lavorando in virtuale. Così, seguendo le richieste del collega Davide Vitali, impegnato in una tesi parallela sulla fattibilità economica del componente sia mediante tecniche tradizionali che mediante additive manufacturing, sono state apportate delle modifiche necessarie a sfruttare al massimo questo nuovo processo produttivo, e che verranno di seguito illustrate.

In primo luogo, è stato necessario affrontare il problema dei supporti eccessivamente presenti. I supporti, strutture usate nei processi di additive quando bisogna supportare, appunto, la realizzazione di sottosquadri o parti sporgenti e con pareti inclinate più di 45° rispetto alla verticale, sono un male necessario. La loro presenza, infatti, consente di realizzare il tipo di caratteristiche appena citate quando altre tecniche non lo permetterebbero affatto (si pensi ai sottosquadri, irrealizzabili in processi di fonderia e realizzabili soltanto tramite costosi utensili specializzati nelle lavorazioni per asportazione di truciolo), ma impongono allo stesso tempo di eseguire lavorazioni accessorie necessarie alla loro rimozione, aumentando i tempi ed i costi di lavorazione, oltre al consumo di materiale.

Come si vede dalla figura 4.20 a fronte, qualunque sia l'orientazione scelta, saranno sempre necessari un gran numero di supporti. La soluzione adottata, dunque, e che evita di stravolgere eccessivamente la geometria, è quella suddividere il componente in due parti, una inferiore e una superiore. La parte inferiore (figura 4.22 nella pagina successiva), con le alette premi-tastiera, viene stampata appoggiata sulle alette e dal basso verso l'alto, eliminando del tutto la necessità di supporti; la parte superiore (figura 4.23 nella pagi-

na seguente) verrà stampata anch'essa dal basso verso l'alto, richiedendo i supporti soltanto in presenza del labbro che funge da base per la lastra di FR4. Si è passati così da circa 0.05 m^2 di area richiedente un supporto a 0.037 m^2 , un risparmio del 26%. Inoltre, si è deciso di sfruttare un altro

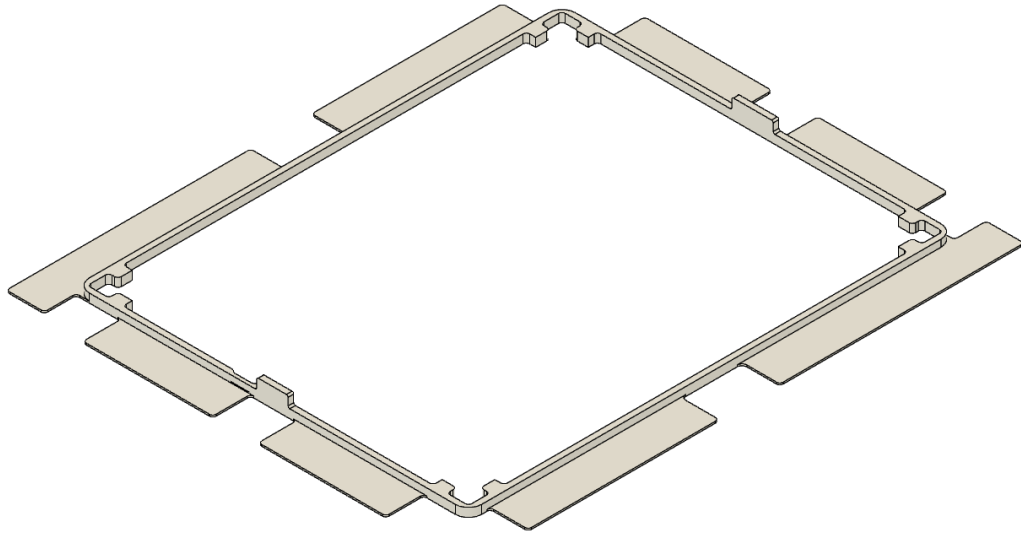


Figura 4.22: Parte inferiore del frame

dei grandi vantaggi dell'additive manufacturing, ovvero la realizzazione in sede di più feature su un unico componente: ciò permette, in un'ottica di Design to Assembly, di ridurre il numero di componenti presenti in un assieme, riducendo tempi e costi di assemblaggio, o comunque di mantenere lo stesso numero di componenti ma semplificando le operazioni necessarie al loro montaggio. In particolare, si è deciso di eliminare i PEM che venivano utilizzati per montare la lastra di FR4 sul frame. Un PEM è un componente filettato che viene inserito a pressione, tramite uno stampo realizzato ad hoc e montato su una pressa, su delle lamiere sottili in cui sono stati praticati dei prefori. Grazie ad essi, quindi, è possibile realizzare filettature portanti anche su lamiere sottili sulle quali non sarebbe stato possibile realizzarle altrimenti, ma al costo di soddisfare certi dimensionamenti sullo spessore minimo della lamiera e sul diametro e distanza minima da altre pareti del foro (imposti dal produttore del PEM), oltre a dover acquistare lo stampo per la pressa

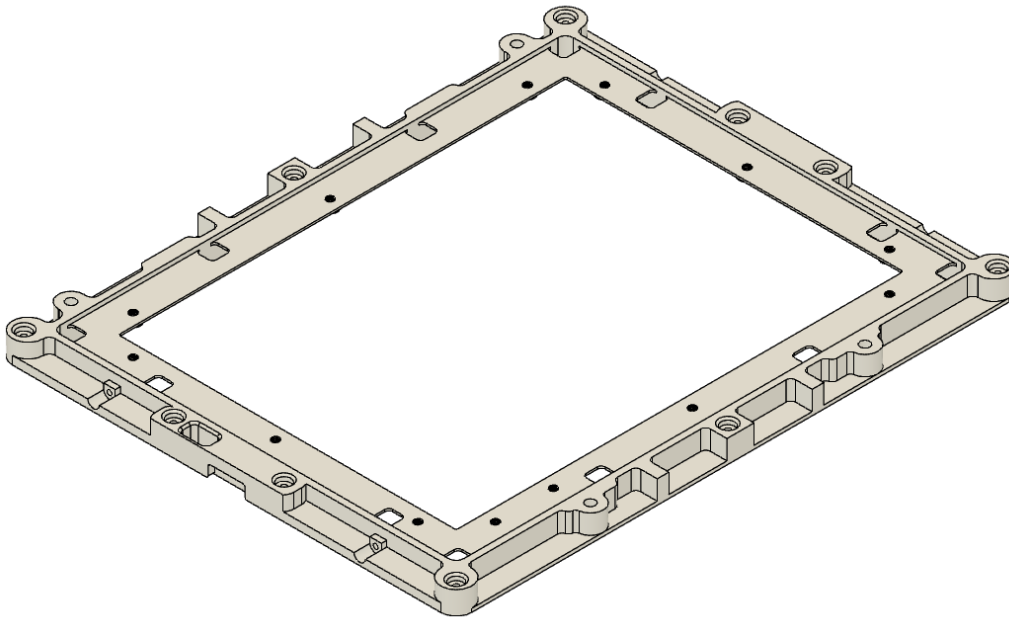


Figura 4.23: Parte superiore del frame

citato in precedenza. Grazie all'additive, invece, si possono realizzare in corrispondenza di questi fori degli inspessimenti filettati (che verranno stampati in loco con la filettatura già presente, eliminando la necessità di realizzarla in un secondo momento, figura 4.24 nella pagina successiva) sui quali l'operatore dovrà soltanto avvitare un grano di lunghezza adeguata. Cambiando l'operazione dall'inserimento di un componente costoso mediante attrezzaggio specifico all'avvitamento di un comune grano M3, tramite un altrettanto comune avvitatore elettrico, il risparmio in termini economici e di tempi di assemblaggio è evidente, soprattutto se si pensa che tale operazione va ripetuta tredici volte per frame e dalle dieci alle cento volte per lotto. Infine, intraprendere la strada dell'additive manufacturing unitamente alla scelta di considerare per la realizzazione un polimero tecnico ad alte prestazioni in luogo dell'alluminio scelto inizialmente, ha permesso di raggiungere una massa di appena 0.146 kg (risparmiando fino al 86% rispetto all'originale) pur mantenendo inalterate le caratteristiche meccaniche. Al momento della stesura di questa tesi un prototipo fisico è ancora in fase di studio e non

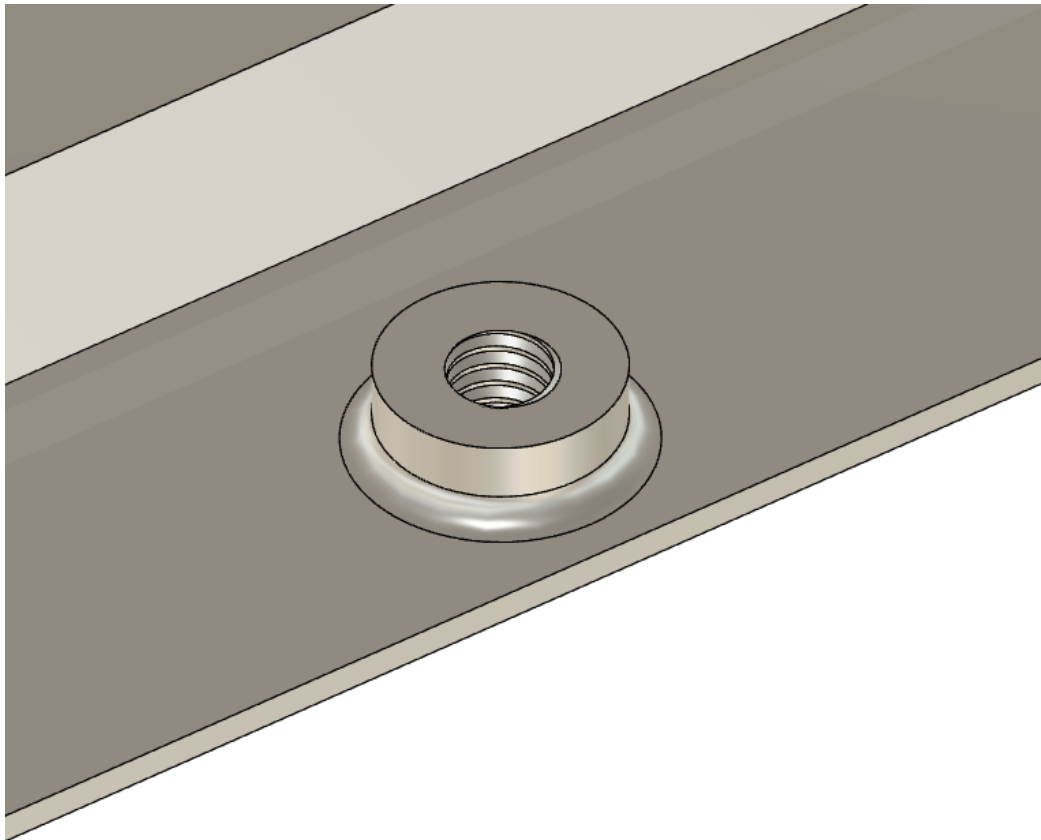


Figura 4.24: Dettaglio dell'inspessimento filettato

disponibile per i test, ma c'è fiducia nel fatto che garantirà ottimi risultati.

Capitolo 5

Conclusioni

Arrivati a questo punto, è il momento di tirare le somme su quanto fin qui illustrato. Tradizionalmente, le tecniche di prototipazione fisica sono le preferite, specialmente nell'ambito del tessuto industriale italiano e soprattutto marchigiano, fatto di piccole e medie imprese. Questo perché il prototipo fisico è immediato nella "lettura": chiunque, anche un non esperto, sarebbe in grado di riconoscere la rottura di un pezzo sottoposto ad un qualsivoglia test di natura meccanica. Questa immediatezza, in realtà solo apparente, apre la strada ad una serie di problematiche delle quali si è già accennato, quali:

- lentezza del processo di test e validazione, in quanto è necessario attendere che il prototipo fisico venga fisicamente realizzato;
- lentezza nell'introdurre modifiche al design, dato che le cause che le rendono necessarie insorgono soltanto una volta effettuati i test;
- preclude le porte ad una possibile soluzione *out of the box* di un qualsiasi problema, in quanto realizzare un prototipo soltanto per "vedere se funziona" potrebbe essere economicamente rischioso;

Di conseguenza, affidarsi a regole di progettazione empiriche, se da un lato permette di approssicare un layout preliminare in maniera rapida (ovviamente l'esperienza dei progettisti non va mai cestinata, anzi dovrebbe essere uno dei

valori più gelosamente custoditi dalle aziende) dall'altra ostacola il raggiungimento del layout dettagliato che sia il più ottimizzato possibile. Il designer, come anche la dirigenza, può soltanto ottenere vantaggi nell'approcciare un problema di design seguendo i dettami dell'approccio sistematico unito agli strumenti forniti dal mondo della prototipazione virtuale: l'approccio di Pahl e Beitz ha l'innegabile vantaggio di "prendere per mano" i soggetti coinvolti nella progettazione e condurli sulla strada della soluzione (a patto che non si facciano condizionare dai pregiudizi pregressi) lasciando loro soltanto il compito di far lavorare la creatività ed attingere dal proprio bagaglio di esperienze e conoscenze. Va detto, per onestà, che molto spesso chi progetta da parecchi anni si trova ad applicare quanto teorizzato dai due autori tedeschi pur senza rendersene conto, ed ovviamente non con la sistematicità propria del metodo: per questo introdurre tale metodologia richiederebbe uno sforzo esiguo, non una rivoluzione culturale.

Impiegare poi un prototipo virtuale nell'affrontare una progettazione secondo l'approccio sistematico, in un ambito tra l'altro collaborative, comporta un secondo vantaggio. Si è già discusso in precedenza di come un ambiente di lavoro di questo tipo permetta di prevedere già durante il design eventuali e costosi problemi che potrebbero sorgere in fase di produzione (o, peggio, in fase d'uso), grazie all'apporto di professionisti di diversi settori; di come l'approccio sistematico imponga spesso di fermarsi a valutare le soluzioni che si stanno considerando e se necessario di tornare sui propri passi, "prima che sia troppo tardi". A questo punto, dunque, dovrebbe essere chiaro come queste due necessità possano essere sintetizzate in maniera efficiente mediante l'adozione di uno strumento tecnico: il prototipo virtuale. Esso, immagazzinando al suo interno tutte le possibili informazioni che possono interessare il ciclo di vita di un prodotto, permette al contempo l'accesso facilitato a tali informazioni a chi interessato (ovvero ai professionisti del team collaborative) ed al ricorso alle simulazioni in luogo dei test fisici, così da soddisfare contemporaneamente i requisiti di una progettazione moderna ed efficace.

Un'obiezione spesso sollevata da chi si vede proporre l'utilizzo dei software per la prototipazione virtuale è che essi siano strumenti estremamente costosi e di difficile utilizzo, difficilmente implementabili nel workflow di una piccola

azienda. Non lo si può negare, gli strumenti software utilizzati dalle più grandi industrie mondiali leader dei propri settori (ad esempio automobilistico, aerospaziale, biomedicale, ecc. . .) rappresentano senz'altro investimenti non sottovalutabili. Ma la tecnologia, com'è noto, corre estremamente rapida: quelle che erano funzioni avanzatissime come l'ottimizzazione topologica, integrate fino ad anche due o tre anni fa soltanto in software top di gamma ora si trovano implementati anche in applicativi meno costosi e più facili da usare, alla portata di tutti. Per convincersene, basta una veloce ricerca su YouTube per rendersi conto dei lavori, ottimizzati anche mediante l'ottimizzazione topologica e la prototipazione virtuale in generale, di alcuni esponenti del movimento *makers*, sia italiani che internazionali: il fatto che la maggior parte di essi non possieda un background ingegneristico la dice lunga sulla facilità d'uso di questi software. Ovviamente mancheranno dell'estrema versatilità tipica degli strumenti avanzatissimi, ma già così sono in grado di garantire all'azienda che li impieghi quei vantaggi, magari anche minimi se presi singolarmente, ma sostanziali nell'arco di un'intera produzione, che possono fare la differenza rispetto ai competitors.

La velocità a cui viaggia la tecnologia però è anche uno svantaggio: l'azienda dovrà essere pronta ad afferrare velocemente le migliori introdotte anno per anno o mese per mese, pena la perdita di quel vantaggio che l'adozione iniziale della prototipazione virtuale garantiva. Le capacità di calcolo richieste da questi software aumentano di pari passo con quella offerta dai PC, che raddoppia ogni circa 18 mesi in accordo con la legge di Moore [22]. Non a caso, nell'affrontare il case study mostrato nella presente tesi è stato necessario ridurre ad un quarto il volume di lavoro, pena un rallentamento vistoso del PC in uso a causa della difficile gestione di una mesh con un elevato numero di facce. Ancora una volta però, la possibile soluzione ci viene offerta dalla tecnologia: lo sfruttamento di tecniche come il cloud computing permette di spostare il problema della capacità di calcolo su potenti server gestiti dall'azienda che ha realizzato il software, lasciando al PC all'interno dell'azienda soltanto il compito di fungere da interfaccia grafica per l'utente. Ciò al momento è quanto avviene ad esempio in Fusion 360 per quanto riguarda la fase di calcolo dell'analisi, ma non per quella di setup o soprattutto

di gestione del file STL, motivo per il quale si è resa necessaria la riduzione del volume di lavoro citata sopra. Nasce chiaramente la necessità di proteggere il segreto industriale, in quanto di fatto si affidano i propri design ai server di un'azienda esterna, e si solleva quindi una questione di sicurezza informatica: non è sicuramente scopo di questa tesi affrontare tale argomento, ma appartiene senza dubbio ai contro da annoverare.

In definitiva, chi scrive crede fortemente nell'impiego delle tecnologie digitali a supporto delle attività di progettazione inserite in un contesto di gestione del flusso di lavoro che sia sistematico, perché i tempi stanno cambiando ad un passo così veloce che non è più permesso alle aziende di sopravvivere, e la linea di demarcazione tra successo e fallimento è sempre più sottile. Lo scopo del presente lavoro non è senz'altro quello di suggerirne un uso esclusivo e smodato, quanto piuttosto preponderante ma con le dovute attenzioni ed in sinergia con le precedenti pratiche di progettazione dell'azienda, che come già affermato rappresentano un valore assoluto da salvaguardare, sperando di ispirare designer ed imprenditori di oggi e di domani.

Bibliografia

- [1] Pahl G., Beitz W., 1996, Engineering design: a systematic approach, Springer-Verlag, London, U.K.
- [2] CADLOG, 18:29, November 4, 2020, <https://www.cadlog.it/prototipazione-virtuale/>.
- [3] Kvan T., 2000, "Collaborative design: what is it?", Automation in Construction, 9, pp. 409-415.
- [4] Cambridge Dictionary, 18:37, November 4, 2020, <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english-italian/collaborate/>.
- [5] Steiner I.D., 1972, Group Process and Productivity, Academic Press, New York, NY, U.S.A.
- [6] Sudweeks F., Rafaeli S., 1996, "How do you get a hundred strangers to agree: computer mediated communication and collaboration", Computer Networking and Scholarship in the 21st Century University, Harrison T.M., Stephen T.D., eds., SUNY Press, pp. 115-136.
- [7] Abarbanel R.M., Brechner E., McNeeley W., 1997, "Fly through of the Boeing 777", Preprints Formal Aspects of Collaborative CAD, Maher M.L., Gero J.S., Sudweeks F., eds., University of Sidney, Sidney, Australia, pp. 3-9.
- [8] Lombardo J.S., Mihalak E., Osborne S.R., 1996, "Collaborative virtual prototyping", John Hopkins APL Techincal Digest, 17:3, pp. 295-304.

- [9] Yuan Q.K., Guo C.R., Li S.J., Liu D.H., 2009, "A products integrated & collaborative design methodology based on virtual product prototypes", Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation, Zhuhai/Macau, China, June 22-25.
- [10] Vlah, D., Žavbi, R., Vukašinović, N., 2020, "Evaluation of topology optimization and generative design tools as support for conceptual design", Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1, pp. 451-460.
- [11] Rozvany, G.I.N., 2000, "The SIMP method in topology optimization - Theoretical background, advantages and new applications", 8th Symposium on Mutidisciplinary Analysis and Optimization, Long Beach, CA, U.S.A., September 6-8.
- [12] Bendsøe, M.P., Nikuchi, N., 1988, "Generating optimal topologies in structural design using a Homogenization Method", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71, pp. 197-224.
- [13] Querin, O.M., Victoria, M., Alonso, C., Ansola, R., Marti, P., 2017, Topology Design Methods for structural Optimization, Academic Press.
- [14] Rozvany, G.I.N., 2001, "Aims, scope, methods, history and unified terminology of computer-aided topology optimization in structural mechanics", Struct Multidisc Optim, 21, pp. 90-108.
- [15] Bruns, T.E., 2005, "A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid-void topology optimization", Struct Multidisc Optim, 30, pp. 428-436.
- [16] Allaire, G., 1997, "The homogenization method for topology and shape optimization", Topology optimization in structural mechanics, Rozvany, G.I.N., eds., Springer-Verlag Wien, New York, NY, U.S.A., pp. 101-133.
- [17] Rozvany, G.I.N., 1997, Topology Optimization in Structural Mechanics, Springer-Verlag Wien, New York, NY, U.S.A.

- [18] Dowlatshahi S., 1992, "Product design in a concurrent engineering environment: an optimization approach", *International Journal of Production Research*, 30:8, pp. 1803-1818.
- [19] Hundal M., 1993, "Rules and models for low cost design", *ASME Design for Manufacturability Conference*, Chicago, IL, U.S.A., March 8-10.
- [20] Mileham A.R., Curie G.C., Miles A.W., Bradford D.T., 1993, "Computer based cost estimating for conceptual design", *Proceedings of International Forum on Design for Manufacture and Assembly*, Newport, RI, U.S.A., June.
- [21] Rush C., Roy R., 2000, "Analysis of cost estimating processes used within a concurrent engineering environment throughout a product life cycle", *CE2000 Conference*, Lyon, France, July 17-20.
- [22] Wikipedia, 16:23, November 10, 2020, https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Moore.