



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA

COMPARAZIONE SISTEMATICA E
VALUTAZIONE DI SISTEMI CAD 3D BASATI
SU IA PER LA MODELLAZIONE
GENERATIVA IN SUPPORTO ALLA
PROGETTAZIONE MECCANICA

SYSTEMATIC COMPARISON AND EVALUATION OF
AI-BASED 3D CAD SYSTEMS FOR GENERATIVE
MODELING IN SUPPORT OF MECHANICAL DESIGN

RELATORE:

PROF. MARCO MANDOLINI

TESI DI LAUREA DI:

NICCOLÒ CANCELLIERI

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Mentre andiamo senza meta... ma con il serbatoio pieno

I. Sommario

I. Sommario	i
II. Elenco delle figure	iii
III. Elenco delle tabelle	iv
Abstract	1
1 Introduzione	2
2 Stato dell'arte	4
2.1 Evoluzione della modellazione generativa	4
2.2 Ingresso dell'IA nella modellazione 3D	4
2.3 Applicazioni industriali emergenti	5
2.4 Limiti attuali dei sistemi CAD basati su IA	6
2.5 Direzioni di ricerca e sviluppi futuri	6
3 Metodo	8
3.1 Software utilizzati	9
3.2 Modelli scelti	11
3.3 Work flow	12
4 Caso studio	13
4.1 Prima fase	13
4.1.1 Ricerca dei software	13
4.1.2 Ricerca dei parametri e delle formule di valutazione	15
4.1.3 Scelta dei modelli su cui eseguire le prove	17
4.2 Seconda fase - work flow del prompt testuale	18
4.2.1 OpenSCAD	18
4.2.2 Zoo Design Studio	21
4.2.3 CADAM.AI	24
4.3 Terza fase - work flow dell'immagine	27
4.3.1 OpenSCAD	27
4.3.2 Zoo Design Studio	30
4.3.3 CADAM.AI	33
5 Risultati e discussione	36
5.1 Discussione risultati del work flow del prompt testuale	40
5.2 Discussione risultati del work flow dell'immagine	41

6	Conclusioni	42
7	Bibliografia	44
8	Appendice	45
8.1	Codice OpenSCAD flangia da prompt testuale	45
8.2	Codice OpenSCAD biella da prompt testuale	46
8.3	Codice OpenSCAD supporto da prompt testuale	48
8.4	Codice OpenSCAD flangia da immagine	50
8.5	Codice OpenSCAD biella da immagine	51
8.6	Codice OpenSCAD supporto da immagine	53
8.7	Modelli creati con il work flow del prompt testuale	55
8.8	Modelli creati con il work flow dell'immagine	56

II. Elenco delle figure

Figura 3.1. Schema struttura metodologica	8
Figura 4.1. Modelli scelti: (A) flangia; (B) biella; (C) supporto.....	17
Figura 4.2. Modello 3D della flangia da prompt testuale su OpenSCAD.....	18
Figura 4.3. Modello 3D della biella da prompt testuale su OpenSCAD	19
Figura 4.4. Modello 3D del supporto da prompt testuale su OpenSCAD	20
Figura 4.5. Modello 3D della flangia da prompt testuale su Zoo Design Studio.....	21
Figura 4.6. Modello 3D della biella da prompt testuale su Zoo Design Studio	22
Figura 4.7. Modello 3D del supporto da prompt testuale su Zoo Design studio	23
Figura 4.8. Modello 3D della flangia da prompt testuale su CADAM.AI	24
Figura 4.9. Modello 3D della biella da prompt testuale su CADAM.AI.....	25
Figura 4.10. Modello 3D del supporto da prompt testuale su CADAM.AI	26
Figura 4.11. Modello 3D della flangia da immagine su OpenSCAD	27
Figura 4.12. Modello 3D della biella da immagine su OpenSCAD	28
Figura 4.13. Modello 3D del supporto da immagine su OpenSCAD	29
Figura 4.14. Modello 3D della flangia da immagine su Zoo Design Studio.....	30
Figura 4.15. Modello 3D della biella da immagine su Zoo Design Studio	31
Figura 4.16. Modello 3D del supporto da immagine su Zoo Design Studio	32
Figura 4.17. Modello 3D della flangia da immagine su CADAM.AI	33
Figura 4.18. Modello 3D della biella da immagine su CADAM.AI	34
Figura 4.19. Modello 3D del supporto da immagine su CADAM.AI.....	35
Figura 5.1. Foglio di calcolo Excel per calcolare i voti dei parametri	38

III. Elenco delle tabelle

Tabella 4.1 Tabella parametri e formule	16
Tabella 5.1 Tabella dati dei modelli creati da prompt testuale	37
Tabella 5.2 Tabella dati dei modelli creati da immagine	37
Tabella 5.3 Tabella voti dei modelli creati da prompt testuale	39
Tabella 5.4 Tabella voti dei modelli creati da immagine	39

Abstract

“Il lavoro dell’ingegnere meccanico nell’ambito della progettazione di modelli 3D può essere sostituito o aiutato da sistemi CAD basati su IA che creano modelli a partire da prompt testuali o immagini?”; questa è la domanda da cui si è partiti per lo sviluppo di questa tesi.

Per dare una risposta precisa è stata fatta una ricerca di sistemi CAD che corrispondessero ai criteri cercati, quindi software gratuiti, utilizzabili tramite applicazione o tramite web e in cui fosse possibile inserire un input testuale o un’immagine ricevendo come output un modello 3D scaricabile in formato .STL o .STEP.

Si è posto come obiettivo quello di fare una comparazione sistematica di questi software analizzandoli attraverso due work flow differenti: il primo inserendo come input una descrizione testuale del modello richiesto, il secondo inserendo come input un’immagine che rappresentasse il modello.

L’analisi dell’output fornito è stata resa oggettiva e sistematica grazie alla scelta di alcuni parametri che consentono di valutarlo in maniera “meccanica”, ovvero attraverso le dimensioni e le feature del modello creato, valutando se corrispondono a quelle del modello richiesto tenendo anche in considerazione il tempo utilizzato per la creazione e le eventuali modifiche da apportare.

Si avrà una valutazione numerica per ogni parametro data da una formula coerente con il grado di precisione richiesto nella progettazione meccanica.

Lo studio è stato svolto su tre modelli differenti (flangia, biella, supporto) con grado di complessità crescente valutato in base al numero e alla forma delle superfici, presenza di fori, asole, filettature e presenza di smussi e raccordi.

Per ogni software sono stati creati i tre modelli con i due work flow e sono stati analizzati seguendo i parametri, così da poter dare una valutazione finale oggettiva, valutando se il software in questione potesse rispondere in maniera positiva alla domanda posta inizialmente.

1 Introduzione

Negli ultimi anni l'integrazione dell'intelligenza artificiale nei processi di progettazione meccanica ha introdotto un cambiamento significativo nel modo in cui i modelli tridimensionali vengono concepiti, generati e ottimizzati.

Accanto ai tradizionali sistemi CAD parametrici, si stanno affermando piattaforme basate su tecniche di modellazione generativa che consentono di creare geometrie 3D a partire da descrizioni testuali, schizzi o immagini.

Questa trasformazione apre nuove prospettive per l'automazione delle fasi preliminari della progettazione, riducendo i tempi di modellazione e ampliando le possibilità esplorative del progettista.

Nonostante il crescente interesse industriale e accademico, manca ancora una valutazione sistematica delle reali capacità di questi strumenti, soprattutto in relazione alle esigenze specifiche dell'ingegneria meccanica, dove precisione geometrica, coerenza dimensionale, controllabilità del modello e tempi di realizzazione sono requisiti imprescindibili.

La letteratura attuale si concentra prevalentemente sugli aspetti algoritmici della generazione 3D, mentre risulta meno approfondito il confronto diretto tra software disponibili online e utilizzabili da progettisti e aziende.

Questa tesi si propone di colmare tale lacuna attraverso una comparazione sistematica di tre software di modellazione generativa basati su IA, che sono:

- OpenSCAD [1];
- Zoo Design Studio [2];
- CADAM.AI [3].

L'obiettivo è valutare in modo oggettivo la loro efficacia nel supportare la progettazione meccanica analizzando i risultati ottenuti tramite l'utilizzo di sei parametri:

- Accuratezza geometrica di dimensione;
- Accuratezza geometrica di forma;
- Efficienza;
- Modificabilità;
- Comprensione input;
- Coerenza.

L'approccio adottato per portare avanti questo studio è partito dalla ricerca dei software disponibili online scegliendo solamente quelli che avessero tutte le caratteristiche richieste per poter affrontare il nostro caso studio; dopo la scelta dei software si è passati all'analisi di come quest'ultimi funzionassero capendo come muoversi al loro interno.

Il passo seguente è stato la ricerca, tramite articoli online, di parametri con cui si potessero valutare i modelli creati da questi software facendo in modo di avere una valutazione oggettiva che potesse essere presa in considerazione da altri progettisti.

La ricerca ha portato alla scelta dei sei parametri citati in precedenza che vanno a valutare complessivamente ogni aspetto fondamentale della progettazione meccanica per quanto riguarda l'output fornito.

Per fare in modo di avere una valutazione coerente ed equilibrata è stata creata una formula per definire il voto di ogni parametro.

Dopo aver trovato un modo per analizzare gli output si è passati alla scelta e alla realizzazione dei modelli tramite i software; i modelli scelti sono flangia, biella e supporto, ognuno di complessità crescente.

Per realizzare i modelli sono stati adottati due work flow differenti in modo da ampliare l'analisi e comprendere più casi studio; il primo è stato fatto creando i modelli attraverso una loro descrizione testuale completa e contenente tutte le quote necessarie, il secondo attraverso un'immagine che rappresentasse il modello da una certa angolazione e aggiungendo solamente qualche quota del pezzo per valutare se nel complesso il modello creato fosse proporzionato come nell'immagine.

Successivamente è stata fatta una valutazione, tramite le formule di ogni parametro, per ogni modello così da ottenere un voto ed avere la possibilità di analizzare se quel software sia utile nella creazione di modelli con la tipologia di work flow utilizzata.

2 Stato dell'arte

2.1 Evoluzione della modellazione generativa

La modellazione generativa nasce come estensione della modellazione algoritmica e rappresenta una delle principali trasformazioni nel campo della progettazione assistita dal calcolatore.

L'introduzione di strumenti di modellazione algoritmica ha permesso di superare l'approccio puramente manuale tipico dei CAD tradizionali, introducendo la possibilità di generare geometrie tramite regole, vincoli e script parametrici.

Nel settore meccanico questo paradigma si è integrato con i sistemi CAD basati su feature, nei quali l'intento progettuale è codificato attraverso relazioni geometriche, parametri e dipendenze.

La letteratura concorda sul fatto che la parametricità sia un elemento chiave per garantire modificabilità, riusabilità e robustezza del modello, soprattutto in contesti industriali caratterizzati da iterazioni frequenti e cicli di sviluppo rapidi.

2.2 Ingresso dell'IA nella modellazione 3D

Negli ultimi anni l'IA ha introdotto un nuovo livello di automazione: la generazione automatica di modelli 3D a partire da input testuali, immagini o schizzi tecnici.

Nell'articolo [4] è stata analizzata questa evoluzione, spiegando come sia stata resa possibile grazie all'emergere di modelli generativi tridimensionali basati su:

- **Diffusion Models 3D:** generano mesh o forme complesse e realistiche ma senza precisione metrica. Funzionano "raffinando" progressivamente una forma iniziale casuale fino ad ottenere un modello coerente e dettagliato. Le limitazioni sono i tempi di generazione lunghi e la mancanza di precisione nelle dimensioni e nei vincoli ingegneristici;
- **Neural Radiance Fields (NeRF):** rappresentano la geometria come corpo volumetrico continuo, quindi senza superfici e feature. Inizialmente nati per ricostruire scene 3D da fotografie, attualmente utilizzati anche per la generazione di nuovi oggetti e ambienti. Hanno la capacità di mantenere coerenza tra diverse viste, producendo superfici continue e realistiche. La limitazione è che non permettono un controllo parametrico richiesto in ambito CAD;

- **Large Language Models (LLM):** utilizzati per interpretare descrizioni tecniche e tradurle in istruzioni geometriche. Sono fondamentali per generare script parametrici, creare mesh a partire da descrizioni testuali, comprendere vincoli e relazioni tra le parti di un oggetto. Tuttavia possiedono ancora una comprensione geometrica poco profonda, senza garantire precisione metrica e vincoli ingegneristici;
- **Signed Distance Fields (SDF):** rappresentano la geometria come una funzione che, per ogni punto dello spazio, indica la distanza dalla superficie dell'oggetto. Permettono di ottenere superfici molto lisce e dettagliate, soprattutto per quanto riguarda forme organiche o superfici complesse. Hanno limitazioni come la mancanza di parametricità e la difficoltà nel rappresentare feature tecniche.

Viene evidenziato come i modelli generativi stiano trasformando il modo in cui vengono create, modificate ed ottimizzate le geometrie tecniche, ma sottolinea anche limiti strutturali come la mancanza di parametricità, la scarsa controllabilità e la difficoltà nel rispettare vincoli ingegneristici.

Nell'articolo [5] vengono analizzate le applicazioni dei LLM nei CAD; viene mostrato come questi modelli vengano utilizzati per generare dati sintetici, descrizioni testuali e annotazioni utili alla costruzione di dataset.

Una delle applicazioni più studiate è la generazione di codice CAD a partire da testo naturale, immagini o schizzi: gli LLM producono script parametrici o sequenze operative che vengono poi eseguite e corrette iterativamente.

Un'altra direzione emergente è la generazione parametrica, in cui il modello produce rappresentazioni strutturate che descrivono passo dopo passo la costruzione del modello.

Questo articolo evidenzia come gli LLM non generano ancora geometrie 3D complete in modo diretto, ma operano attraverso rappresentazioni intermedie che richiedono ulteriori passaggi di elaborazione, mentre l'utilizzo di pipeline multimodali che combinano testo, immagini e altre forme di input stanno diventando lo standard per migliorare la comprensione geometrica e ridurre le ambiguità.

Strumenti come OpenSCAD, Zoo Design Studio, CADAM.AI dimostrano come l'IA stia diventando parte integrante del processo di modellazione.

La ricerca recente evidenzia che questi sistemi sono in grado di produrre modelli 3D coerenti con descrizioni qualitative, pur mostrando limiti significativi nella gestione di tolleranze, vincoli geometrici e specifiche dimensionali.

2.3 Applicazioni industriali emergenti

Oltre alla generazione di geometrie, l'IA sta assumendo un ruolo crescente in altre fasi del ciclo di vita del prodotto:

- **Controllo qualità** tramite riconoscimento automatico di difetti su modelli CAD o scansioni 3D;

- **Generazione di dataset sintetici** per addestrare sistemi di visione industriale;
- **Ottimizzazione topologica automatizzata** basata su vincoli strutturali;
- **Integrazione con sistemi PLM** per automatizzare la classificazione e il recupero di componenti.

Queste applicazioni mostrano come l'IA non sia più un semplice supporto alla modellazione, ma un elemento trasversale che interessa progettazione, produzione e manutenzione.

L'articolo [6] analizza l'impatto dell'IA generativa nei processi di progettazione industriale ed approfondisce come quest'ultima possa accelerare le fasi di concept design, migliorare l'esplorazione delle alternative e supportare processi decisionali complessi, ma evidenzia anche che l'integrazione con i sistemi CAD parametrici rimane un problema aperto.

2.4 Limiti attuali dei sistemi CAD basati su IA

Si può vedere come i sistemi CAD basati su IA presentino limiti chiave come:

- **Accuratezza geometrica insufficiente:** i modelli generati possono avere dimensioni e forme non corrette;
- **Assenza di parametricità:** i modelli generati sono spesso mesh non modificabili, privi di feature e relazioni;
- **Ambiguità nell'interpretazione del prompt:** l'IA fatica a comprendere descrizioni tecniche, riferimenti normativi, tolleranze e simboli;
- **Qualità topologica non garantita:** superfici non manifold, triangolazioni irregolari, compenetrazioni;
- **Scarsa riproducibilità:** modelli generati con lo stesso prompt possono differire significativamente.

Questi limiti rendono l'IA attuale inadatta alla produzione diretta di modelli CAD meccanici utilizzabili in contesti industriali, ma ne confermano il potenziale come strumento di supporto creativo e generativo.

2.5 Direzioni di ricerca e sviluppi futuri

L'evoluzione dell'Intelligenza Artificiale applicata alla modellazione CAD suggerisce che i prossimi anni saranno caratterizzati da un progressivo avvicinamento tra generazione automatica e modellazione parametrica tradizionale.

La letteratura più recente converge infatti sull'idea che il futuro non sarà dominato da sistemi completamente autonomi, ma da approcci ibridi in cui l'IA affianca il progettista e si integra con gli strumenti CAD consolidati.

In questa prospettiva, l'obiettivo non è sostituire il processo di modellazione, bensì potenziarlo: l'IA potrebbe generare forme preliminari, suggerire alternative progettuali o automatizzare operazioni ripetitive, lasciando al progettista il controllo dei vincoli funzionali e delle scelte critiche.

Un secondo filone di sviluppo riguarda la comprensione semantica delle specifiche tecniche; i modelli attuali mostrano ancora difficoltà nell'interpretare correttamente tolleranze, accoppiamenti, riferimenti normativi e relazioni funzionali tra le parti.

Le ricerche recenti evidenziano come questa sia una delle sfide più complesse e per rendere l'IA realmente utile in ambito ingegneristico, sarà necessario sviluppare modelli capaci di comprendere non solo la geometria, ma anche il significato tecnico delle istruzioni fornite.

Ciò implica la creazione di dataset specifici, basati su disegni tecnici, modelli MBD e documentazione industriale, che permettano all'IA di apprendere il linguaggio dell'ingegneria in modo più profondo e affidabile.

Parallelamente, la comunità scientifica riconosce la necessità di definire metriche oggettive e standardizzate per valutare le prestazioni dei sistemi AI-CAD.

Attualmente, ogni studio utilizza criteri differenti, rendendo difficile confrontare approcci, modelli e strumenti; la mancanza di benchmark condivisi rappresenta uno dei principali ostacoli al progresso del settore.

Nei prossimi anni, ci si aspetta quindi lo sviluppo di framework valutativi che includano misure di accuratezza geometrica, fedeltà volumetrica, qualità topologica, efficienza computazionale e capacità di interpretazione dell'input.

Infine, un'ulteriore direzione di ricerca riguarda l'integrazione dell'IA nei flussi di lavoro industriali.

Non si tratta solo di generare modelli, ma di inserirli in un ecosistema più ampio che comprende PLM, simulazioni FEM, ottimizzazione topologica, produzione additiva e controllo qualità.

Negli articoli si evidenzia come l'IA possa diventare un elemento trasversale dell'intero ciclo di vita del prodotto, supportando decisioni progettuali, automatizzando verifiche preliminari e facilitando la collaborazione tra reparti.

Tuttavia, per raggiungere questo livello di integrazione sarà necessario garantire affidabilità, riproducibilità e conformità agli standard industriali, aspetti che oggi rappresentano ancora un limite significativo.

3 Metodo

In *figura 3.1* è rappresentata la struttura metodologica adottata per analizzare in modo sistematico le capacità dei tre software considerati nello studio.

L'intero schema è organizzato in due percorsi paralleli, denominati "Work Flow Prompt Testuale" e "Work Flow Immagine", che costituiscono i due approcci fondamentali attraverso cui l'intelligenza artificiale può essere impiegata per generare modelli tridimensionali: da un lato la generazione basata su descrizioni testuali, dall'altro la generazione basata su input visivi.

Ciascun work flow è stato analizzato attraverso i software; questa scelta permette di confrontare in modo diretto e coerente le prestazioni dei diversi strumenti, mantenendo costante la tipologia di input e variando unicamente il motore di generazione.

L'analisi è stata fatta sui tre modelli scelti che hanno caratteristiche geometriche e funzionali differenti, scelti appositamente per valutare come ciascun software gestisca forme semplici, elementi con vincoli funzionali e geometrie più articolate.

Da questo schema si capisce chiaramente l'obiettivo dell'analisi, ovvero verificare come ogni software si comporta rispetto agli stessi modelli e agli stessi input, isolando così le variabili e rendendo possibile un confronto oggettivo.

Questo permette di valutare non solo la qualità del risultato finale, ma anche la capacità del software di interpretare correttamente input di natura diversa.

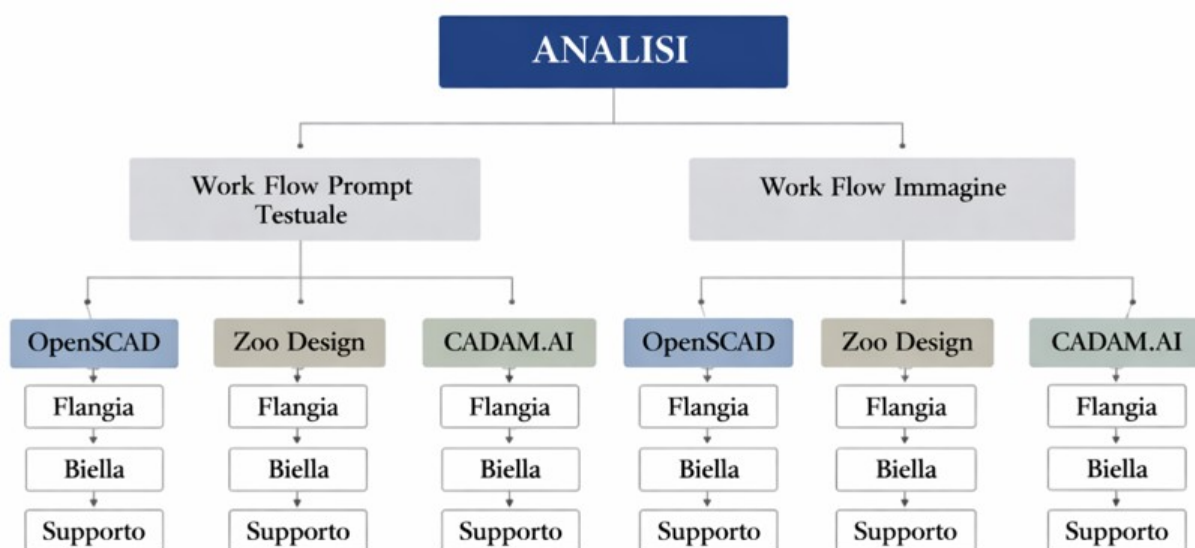


Figura 3.1. Schema struttura metodologica

3.1 Software utilizzati

- **OpenSCAD:**

Software di modellazione 3D basato su un paradigma completamente dichiarativo, fondato sull'uso di un linguaggio di scripting che consente di descrivere la geometria in modo deterministico, riproducibile e parametricamente controllato.

A differenza dei CAD tradizionali, che si basano su interazioni grafiche e operazioni dirette sull'interfaccia, OpenSCAD richiede che l'utente definisca ogni elemento geometrico tramite codice, specificando primitive, trasformazioni, operazioni booleane e parametri numerici.

Questo approccio elimina qualsiasi ambiguità nella definizione del modello e garantisce un controllo totale sulla struttura della parte, rendendolo particolarmente adatto alla modellazione meccanica, dove precisione e coerenza sono requisiti fondamentali.

Dal punto di vista metodologico, OpenSCAD si distingue per la sua natura completamente parametrica: ogni dimensione, vincolo o relazione può essere definita come variabile, permettendo la generazione automatica di famiglie di componenti e la modifica istantanea dell'intero modello attraverso la variazione di pochi parametri chiave.

Questa caratteristica lo rende uno strumento estremamente potente per la progettazione ingegneristica, la prototipazione rapida e la produzione additiva, dove la ripetibilità e la possibilità di automatizzare la generazione di geometrie complesse rappresentano un vantaggio.

Tuttavia, OpenSCAD presenta anche limitazioni significative; l'assenza di un'interfaccia grafica interattiva rende il software meno intuitivo per utenti non esperti di programmazione e la modellazione di geometrie molto complesse può richiedere script articolati e difficili da mantenere.

Inoltre non integra alcuna forma di intelligenza artificiale: non interpreta testo naturale, non comprende schizzi o immagini e non è in grado di generare geometrie a partire da descrizioni qualitative.

Infatti va utilizzato insieme ad un'intelligenza artificiale che sia in grado di generare il codice da inserirci per creare il modello richiesto.

In questo modo si va ad integrare la parte dell'IA nel software e si ha la possibilità di creare modelli senza per forza saper scrivere il codice, ma semplicemente dando l'input richiesto all'IA che genererà il codice da inserire direttamente sul software.

- **Zoo Design Studio:**

Software di generazione 3D basato su modelli di intelligenza artificiale, progettato principalmente per la creazione rapida di concept, forme organiche e modelli destinati a settori come l'arte digitale, il character design e la prototipazione creativa.

Il sistema è in grado di interpretare input testuali, schizzi bidimensionali e immagini di riferimento, traducendoli in modelli tridimensionali completi attraverso pipeline neurali di tipo generativo.

Questo approccio consente di ottenere risultati visivi coerenti anche a partire da descrizioni vaghe o incomplete, rendendo il software estremamente accessibile a utenti privi di competenze CAD tradizionali.

Dal punto di vista tecnico, Zoo Design Studio produce tipicamente mesh triangolari non parametriche, spesso caratterizzate da superfici organiche, topologie non manifold e assenza di vincoli dimensionali rigorosi.

La forza principale del software risiede nella sua capacità di interpretare input qualitativi e trasformarli in geometrie tridimensionali coerenti, un compito che i CAD tradizionali non sono in grado di svolgere.

Zoo Design Studio rappresenta quindi un esempio paradigmatico dell'approccio "creativo" dell'IA alla modellazione 3D, ovvero un sistema orientato alla generazione di forme, non alla progettazione ingegneristica.

- **CADAM.AI:**

Si colloca in una posizione intermedia tra i software CAD tradizionali e i sistemi generativi puramente creativi.

È un ambiente di modellazione basato su intelligenza artificiale progettato per interpretare descrizioni testuali tecniche e generare modelli 3D più vicini alle esigenze dell'ingegneria meccanica rispetto ad altri strumenti.

A differenza di software orientati al concept design, CADAM.AI tenta di comprendere specifiche geometriche, relazioni tra feature, vincoli funzionali e parametri dimensionali, producendo modelli che spesso risultano più strutturati e coerenti con la logica CAD.

Il sistema utilizza modelli linguistici avanzati per analizzare il testo fornito dall'utente e tradurlo in una sequenza di operazioni geometriche.

Questo processo, pur non essendo ancora paragonabile alla precisione di un modellatore parametrico, rappresenta un passo significativo verso l'integrazione dell'IA nei flussi di lavoro ingegneristici.

Il software è in grado di generare solidi, estrusioni, fori, raccordi e altre feature tipiche della modellazione meccanica, anche se con una precisione variabile e spesso insufficiente per applicazioni professionali.

Le principali limitazioni riguardano la precisione dimensionale, la gestione delle tolleranze, la riproduzione fedele di geometrie complesse e la capacità di interpretare correttamente descrizioni tecniche articolate.

I modelli generati possono presentare errori topologici, superfici non manifold o incoerenze tra le feature, soprattutto quando le specifiche testuali sono complesse o ambigue.

Nonostante ciò, CADAM.AI rappresenta un esempio significativo dell'evoluzione dell'intelligenza artificiale verso applicazioni tecniche: un sistema che, pur non sostituendo i CAD tradizionali, dimostra come la generazione automatica possa progressivamente avvicinarsi ai requisiti dell'ingegneria meccanica.

3.2 Modelli scelti

La selezione dei tre modelli — Flangia, Biella e Supporto — non è casuale, ma risponde a un criterio metodologico preciso che consiste nel coprire un insieme eterogeneo di geometrie meccaniche che permetta di valutare in modo completo le capacità dei software analizzati.

Ogni componente rappresenta una categoria diversa di complessità geometrica, funzionale e topologica, consentendo di osservare come i diversi strumenti gestiscano forme semplici, vincoli funzionali e strutture più articolate.

Un'accortezza importante è stata nel fatto di scegliere modelli meccanici che corrispondessero alle esigenze che si hanno a livello industriale, quindi modelli che abbiano delle feature reali.

Soprattutto sono stati scelti i modelli in modo che ognuno di essi sia di complessità crescente, valutata in base alla forma, al numero di superfici e alle feature presenti.

La flangia è il modello con la geometria più semplice e come caratteristiche importanti per la valutazione ha:

- Geometrie di rivoluzione (cilindri, mozzi, spallamenti);
- Forature equi distanziali e pattern circolari;
- Simmetrie radiali;
- Rapporti dimensionali critici (diametri, spessori, altezze);
- Superfici piane e cilindriche.

Da qui si può valutare la capacità dei software di rispettare dimensioni assolute, la corretta interpretazione di pattern regolari e la gestione di forme standardizzate.

La biella è il modello con difficoltà intermedia e permette di valutare:

- Fori funzionali con interasse definito;
- Sezioni variabili;
- Presenza di asole;
- Vincoli funzionali (allineamento, parallelismo, simmetria);
- Transizioni geometriche tra zone cilindriche e zone prismatiche.

Si riesce così a valutare la capacità dei software di interpretare relazioni geometriche, la gestione di forme ibride e la fedeltà nella riproduzione di elementi funzionali.

Il supporto è il modello con livello di complessità maggiore e permette di valutare:

- Corpi prismatici;
- Forature multiple su piani diversi;
- Cave che richiedono operazioni booleane complesse;
- Relazioni spaziali tridimensionali tra le feature;
- Asimmetrie funzionali.

Da questo componente è possibile valutare la capacità dei software di gestire geometrie multi feature, la coerenza topologica del modello creato e la comprensione tridimensionale delle relazioni tra le parti.

3.3 Work flow

L'analisi è stata strutturata su due work flow distinti, chiamati "Work Flow Prompt Testuale" e "Work Flow Immagine".

La scelta di utilizzare due modalità di input differenti risponde alla necessità di esplorare le due principali vie attraverso cui i sistemi generativi moderni interpretano e producono geometrie tridimensionali, ovvero la comprensione del linguaggio naturale e l'interpretazione di contenuti visivi.

Questa doppia prospettiva consente di isolare le variabili legate alla natura dell'input, verificando come ciascun software reagisca a stimoli diversi e quali limiti emergano in funzione del tipo di informazione fornita.

Inoltre permette di costruire un quadro comparativo più robusto, evidenziando differenze non solo nella qualità del modello generato, ma anche nella capacità del sistema di comprendere, interpretare e tradurre correttamente l'intenzione progettuale.

Anche in questo caso, per la scelta dei due work flow, ci si è basati sulle richieste dell'ambiente lavorativo, infatti questi due casi studio sono i più richiesti nella realtà industriale.

Il work flow basato su prompt testuale è stato scelto per analizzare la capacità dei software di interpretare descrizioni tecniche in linguaggio naturale, estrarre entità geometriche, dimensioni e relazioni funzionali e gestire incompletezze o formulazioni non standardizzate.

Il work flow basato su immagine permette di analizzare la capacità dei software di interpretare correttamente le geometrie e partire da un input visivo, riconoscere forme, proporzioni e relazioni spaziali, ricostruire volumi tridimensionali da una rappresentazione bidimensionale e gestire dettagli geometrici non esplicitati testualmente.

4 Caso studio

Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare l'efficienza di sistemi CAD 3D basati su IA per la creazione di modelli 3D, valutandoli in maniera oggettiva e sistematica attraverso dei parametri standardizzati.

La prima fase comprende la ricerca dei software disponibili, la ricerca dei parametri di valutazione, la creazione di formule per dare una valutazione numerica ad ogni parametro, la scelta di tre modelli e la loro creazione su Solid Edge per avere un riferimento con tutte le quote.

La seconda fase consiste nella creazione dei tre modelli per ogni software seguendo il work flow del prompt testuale.

La terza fase consiste nella creazione dei tre modelli per ogni software seguendo il work flow dell'immagine.

4.1 Prima fase

4.1.1 *Ricerca dei software*

In questa fase iniziale sono stati cercati online e tramite ChatGPT [7] dei software che ci permettessero di svolgere il nostro caso studio; la domanda posta a ChatGPT è stata: "Esistono dei software opensource utilizzabili in versione web o applicazione che consentano di realizzare dei modelli 3D meccanici a partire da una descrizione testuale o un'immagine?"; i risultati ottenuti sono stati molteplici, ma non tutti rispecchiavano le caratteristiche richieste.

Molti software sono stati scartati dallo studio, come Meshy.AI e Tripo 3D perché non rispecchiavano a pieno la parte meccanica degli output forniti ma erano fortemente legati alla parte grafica, puntando tutto sull'aspetto visivo piuttosto che metrico.

Infatti dopo aver eseguito delle prove preliminari per capire come funzionassero i software, si è visto subito che i risultati ottenuti da questi due non rispecchiavano le richieste geometriche fornite, ma creavano modelli solamente legati alla forma finale e all'impatto visivo.

Quindi erano modelli che non avevano niente a che fare con l'ingegneria meccanica visto che i software non davano priorità alle dimensioni, alle feature, ai vincoli geometrici e al linguaggio tecnico con cui veniva fornito l'input.

In conclusione sono stati scelti tre software su cui eseguire lo studio:

- **OpenSCAD:** software scaricabile gratuitamente, consente la creazione di modelli 3D parametrici attraverso l'inserimento di un codice opportuno nella sua chat incorporata, quindi va utilizzato in correlazione con ChatGPT in modo da farsi creare il codice e inserirlo. Il codice andrà a descrivere le operazioni geometriche per creare il modello e questo lo rende molto controllabile. L'output fornito è una mesh scaricabile in formato .STL e quindi non sarà possibile apportargli modifiche successive su un CAD parametrico;
- **Zoo Design Studio:** software scaricabile gratuitamente, consente la creazione di modelli 3D parametrici attraverso descrizioni testuali o immagini da inserire direttamente nella chat di testo incorporata. Utilizza modelli linguistici che riescono a decifrare specifiche tecniche. Possono essere apportate modifiche al modello creato andando a scrivere la modifica da effettuare in chat. L'output fornito è un modello scaricabile sia in formato .STL che in formato .STEP, quindi si potrà avere una mesh oppure un modello a superfici, con il vantaggio che quest'ultimo potrà essere modificato su un CAD parametrico;
- **CADAM.AI:** software scaricabile gratuitamente e disponibile in versione web, consente la creazione di modelli 3D parametrici attraverso descrizioni testuali o immagini da inserire direttamente nella chat di testo incorporata. Interpreta e realizza feature meccaniche avanzate come filettature e smussi. Le modifiche possono essere fatte tramite la chat di testo oppure dalla finestra in cui il software, una volta creato il modello, inserisce tutte le quote di ogni parte. L'output fornito è una mesh scaricabile in formato .STL e quindi senza possibilità di apportare modifiche successive su CAD parametrici.

4.1.2 Ricerca dei parametri e delle formule di valutazione

Per rendere oggettiva l'analisi dei modelli creati sono state fatte delle ricerche, tramite Google Scholar [8] e ChatGPT, per vedere se esistessero già dei parametri utilizzati in ambito industriale per valutare se i software fossero utilizzabili.

Da questa ricerca è venuto fuori che la maggior parte degli articoli presenti online valutassero i sistemi di generazione 3D solo nella loro forma grafica, quindi avendo parametri come ad esempio la luminosità, che nell'ambito della modellazione meccanica non sono utili per la valutazione di un modello.

L'unico articolo trovato [9] che accennasse a dei parametri di valutazione, era comunque molto legato alla parte grafica, infatti negli esempi presenti venivano usati modelli organici in cui la forma non è la priorità.

I parametri di questo articolo erano fidelity (fedeltà), efficiency (efficienza), consistency (coerenza), controllability (controllabilità) e diversity (diversità); non avendo però un riscontro con altri articoli per capire se questi parametri potessero andare bene anche per modelli meccanici è stata allora fatta una ricerca su ChatGPT, chiedendo quali fossero attualmente i criteri di valutazione dei sistemi CAD 3D basati su IA per la modellazione generativa.

Facendo un'analisi incrociata tra articoli e ChatGPT sono stati scelti sei parametri per valutare i modelli creati:

- **Accuratezza geometrica di dimensione:** serve per valutare se le dimensioni del modello creato corrispondono a quelle di riferimento;
- **Accuratezza geometrica di forma:** serve per valutare se il volume totale del modello creato corrisponde con quello di riferimento;
- **Efficienza:** serve per valutare quanto tempo impiega il software per creare il modello;
- **Modificabilità:** serve per valutare quanto tempo occorre per effettuare una modifica al modello creato;
- **Comprensione input:** serve per valutare se il software ha creato il modello rispettando tutte le indicazioni fornitegli nell'input;
- **Coerenza:** serve per valutare se il software crea lo stesso modello anche con input scritti in maniera differente ma con lo stesso contenuto.

Il passo successivo è stato quello di rendere questi parametri oggettivi, in modo che la loro interpretazione non potesse essere diversa da persona a persona; questo è stato fatto con la creazione di una formula per ogni parametro in modo da avere un voto finale che dipendesse solamente dalle dimensioni del modello creato e non dal giudizio personale.

In *tabella 4.1* sono presenti le formule per ogni parametro con la loro descrizione.

Tabella 4.1 Tabella parametri e formule

CATEGORIA	DESCRIZIONE	FORMULA	NOTE
Accuratezza geometrica di dimensione	Valutazione basata sullo scostamento assoluto rispetto ad una soglia massima di errore accettabile oltre alla quale il voto è 1. La soglia è definita come il 10% della misura reale in modo da garantire proporzionalità per ogni valore	$\text{Voto} = 10 \left(1 - \frac{ M_{\text{mod}} - M_{\text{reale}} }{E_{\text{max}}} \right)$	M_{mod} = Misura del modello generato $E_{\text{max}} = M_{\text{reale}} \cdot 0,1$
Accuratezza geometrica di forma	Valutazione basata sullo scostamento volumetrico rispetto ad una soglia massima di errore accettabile oltre alla quale il voto è 1. La soglia è definita come il 10% della misura reale in modo da garantire proporzionalità per ogni valore	$\text{Voto} = 10 \left(1 - \frac{ V_{\text{mod}} - V_{\text{reale}} }{E_{\text{max}}} \right)$	V_{mod} = Volume del modello generato $E_{\text{max}} = V_{\text{reale}} \cdot 0,1$
Efficienza	Valutazione basata sul tempo di generazione del modello rispetto ad un tempo di riferimento medio (2 min). Se il tempo è minore o uguale a quello di riferimento il voto è 10, altrimenti decresce gradualmente in funzione dell'eccesso di tempo	$\text{Voto} = 10 \left(1 - \frac{T_{\text{mod}} - T_{\text{rif}}}{\Delta T_{\text{max}}} \right)$	T_{mod} = Tempo impiegato per la creazione del modello ΔT_{max} = Massimo tempo di creazione accettabile (5 min)
Modificabilità	Valutazione basata sul tempo necessario per modificare il modello rispetto ad un tempo di riferimento medio (2 min). Se il tempo è minore o uguale a quello di riferimento il voto è 10, altrimenti decresce gradualmente in funzione dell'eccesso di tempo	$\text{Voto} = 10 \left(1 - \frac{T_{\text{mod}} - T_{\text{rif}}}{\Delta T_{\text{max}}} \right)$	T_{mod} = Tempo impiegato per la creazione del modello ΔT_{max} = Massimo tempo di creazione accettabile (5 min)
Comprensione input	Valutazione basata sul grado di somiglianza del modello rispetto ai requisiti espliciti dell'input (testo/immagine). La comprensione è valutata in funzione della copertura delle caratteristiche richieste e della coerenza complessiva	$\text{Voto} = 2 \cdot C$	$C \div 1-5$ $C=1$ Modello scollegato dall'input $C=3$ Modello riconoscibile ma con errori importanti $C=5$ Modello altamente coerente con l'input
Affidabilità/Coerenza	Valutazione basata sulla somiglianza tra il modello di riferimento della prima creazione e quello generato con un input simile	$\text{Voto} = 1 + (9 \cdot X)$	$X \div 0-1$ $X=0$ Modelli differenti $X=0,5$ Modelli simili ma con differenze importanti $X=1$ Modelli uguali

4.1.3 Scelta dei modelli su cui eseguire le prove

Per eseguire lo studio è stato necessario scegliere alcuni modelli meccanici reali in modo da avere un riferimento e capire se i software fossero in grado di essere utili a livello industriale.

La ricerca è stata fatta su un articolo trovato online [10] che rappresenta uno dei contributi più avanzati nello stato dell'arte della generazione CAD basata su IA.

Questo articolo introduce un approccio capace di unificare geometria e topologia all'interno di un unico spazio latente, con modelli che costituiscono esempi significativi di geometrie meccaniche reali e che li rendono particolarmente adatti per la valutazione delle metriche sviluppate in questa tesi.

La scelta è ricaduta su tre modelli: flangia, biella e supporto, rappresentati in *figura 4.1*; sono stati scelti questi tre perché nel loro insieme comprendevano tutte le feature più importanti da valutare come fori, fori filettati, smussi, raccordi, superfici inclinate, scavi, protusioni e inoltre sono con livello di complessità crescente, valutato in base alla forma e al numero di superfici e lavorazioni.

Dopo aver scelto i modelli si è passati alla loro creazione su Solid Edge [11] per avere poi un riscontro rispetto a quelli creati dai software e poter utilizzare le formule prendendo come parametri di riferimento quelli dei modelli creati su Solid Edge.

Questo passaggio è stato fondamentale per avere un riscontro 3D, rispetto alla sola immagine, dei modelli e poter calcolare così il loro volume, le dimensioni di ogni feature e capire infine se il tempo impiegato per realizzarli su un CAD parametrico fosse minore, uguale o maggiore rispetto a quello impiegato dai software.

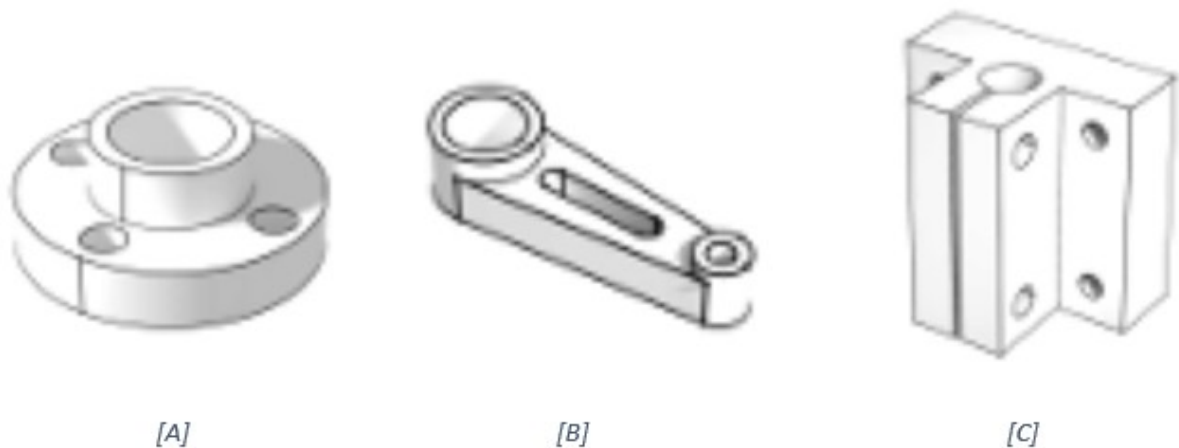


Figura 4.1. Modelli scelti: (A) flangia; (B) biella; (C) supporto.

4.2 Seconda fase - work flow del prompt testuale

In questa fase vengono analizzati i modelli generati dai software seguendo il work flow del prompt testuale; quindi è stata inserita come input una descrizione del modello completa e dettagliata compresa di quote.

4.2.1 OpenSCAD

- **Flangia:** in questo caso la descrizione del modello è stata fatta su ChatGPT chiedendo di creare il codice da inserire sul nostro software che corrispondesse alla descrizione data.

Il prompt dato è: “Crea il codice da inserire su OpenSCAD per realizzare il modello 3D di una flangia con base di diametro 100mm e altezza 20mm, con quattro fori di diametro 15mm e distanti 14mm dal bordo esterno della base, questi fori sono posizionati nelle quattro estremità opposte. Il cilindro sopra la base deve avere diametro 50mm e altezza 25mm, infine fai un foro passante lungo tutto il modello di diametro 40mm concentrico con la base.”

Il codice fornito dall’IA da inserire nel software è presente in appendice al 8.1

Output:

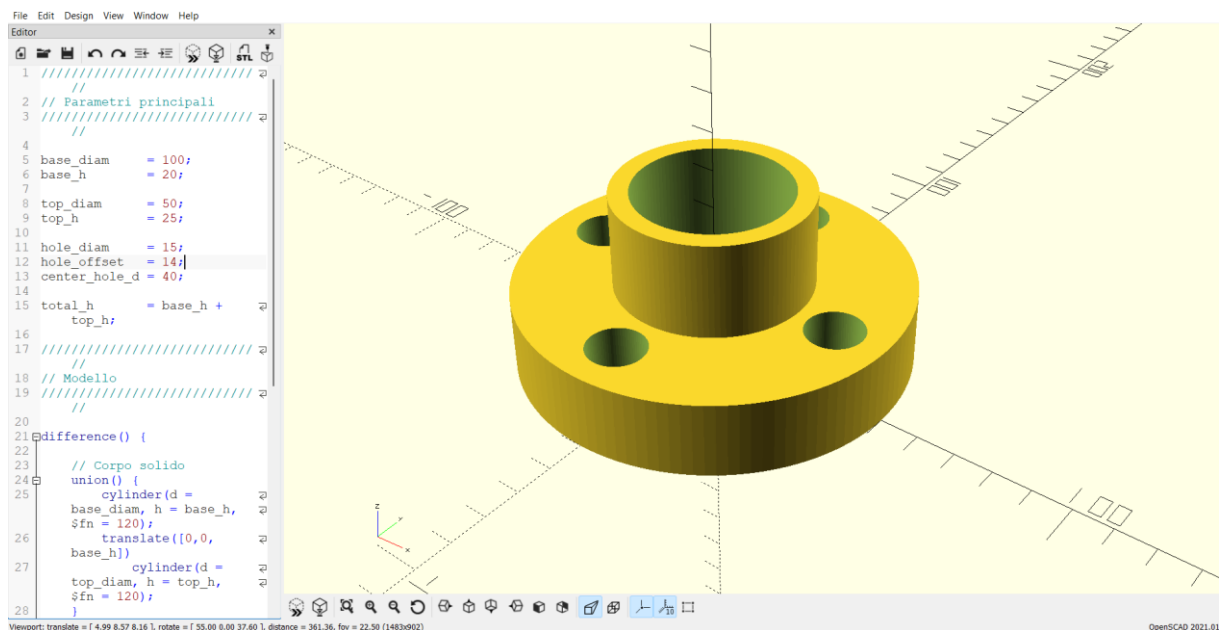


Figura 4.2. Modello 3D della flangia da prompt testuale su OpenSCAD

Come si può vedere il software ha creato un modello coerente a livello di forme e dimensioni, rispettando tutte le feature richieste.

L'unica modifica apportata è stata quella di allungare i fori e renderli completamente passanti perché rimaneva un sottile strato di materiale sul fondo.

- **Biella:** il prompt dato a ChatGPT è: “Crea il codice da inserire su OpenSCAD per creare il modello 3D di una biella che abbia un cilindro di diametro 60mm ed altezza 45mm collegato ad un altro cilindro di diametro 40mm ed altezza 30mm e con interasse tra di essi di 120mm. La base che unisce i due cilindri deve essere tangente ad entrambi ed essere alta 25mm partendo dalla base dei cilindri. Il cilindro da 60mm ha un foro concentrico passante di diametro 50mm, quello da 40mm ha un foro concentrico passante di 30mm. Sulla superficie della base è presente una tasca passante formata da due raccordi di 7,5mm con interasse 35mm posizionata sull'asse centrale e il centro del raccordo di sinistra dista 45mm dal centro del cilindro da 60mm.”

Il codice fornito dall'IA da inserire nel software è presente in appendice al 8.2

Output:

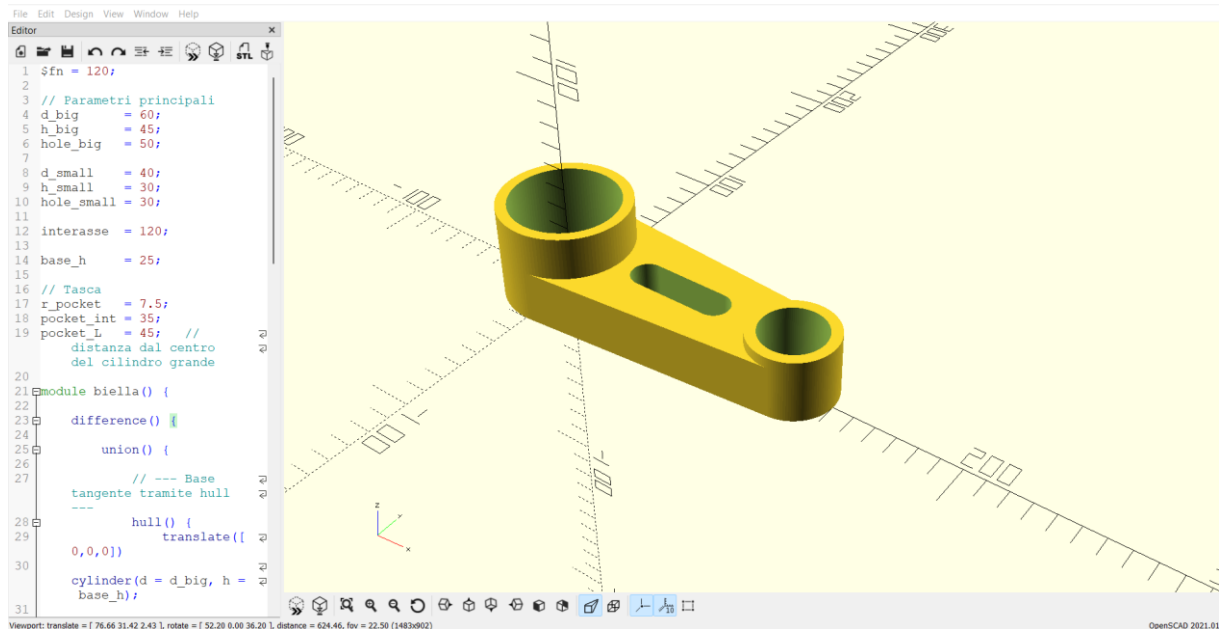


Figura 4.3. Modello 3D della biella da prompt testuale su OpenSCAD

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, rispetta tutte le feature richieste. L'unica modifica fatta è stata quella di aumentare la profondità della tasca perché non risultava passante.

- **Supporto:** il prompt dato a ChatGPT è: “Crea il codice da inserire su OpenSCAD per realizzare il modello 3D seguente: base quadrata di lato 80mm e altezza 25mm, su di essa sono presenti quattro fori filettati M10 disposti negli angoli e con il loro centro distante 10mm da entrambi i lati. Dalla base si estende un rettangolo 80mm per 30mm centrato lungo l'asse x alto 50mm. Sul lato lungo l'asse y del rettangolo sono presenti due fori posizionati negli angoli di diametro 8mm e con il centro distante 10mm da entrambi i lati. Sulla faccia lungo l'asse x del rettangolo è presente uno scavo composto da un cerchio di diametro 15mm con il centro distante 40mm dalla superficie superiore del rettangolo, inoltre va scavata anche la zona dalla superficie superiore del rettangolo fino a dentro il foro a cerchio con larghezza 3 mm e posizionata nel centro della superficie lungo l'asse x e lunga per tutta la misura del modello.”

Il codice fornito dall'IA da inserire nel software è presente in appendice al 8.3

Output:

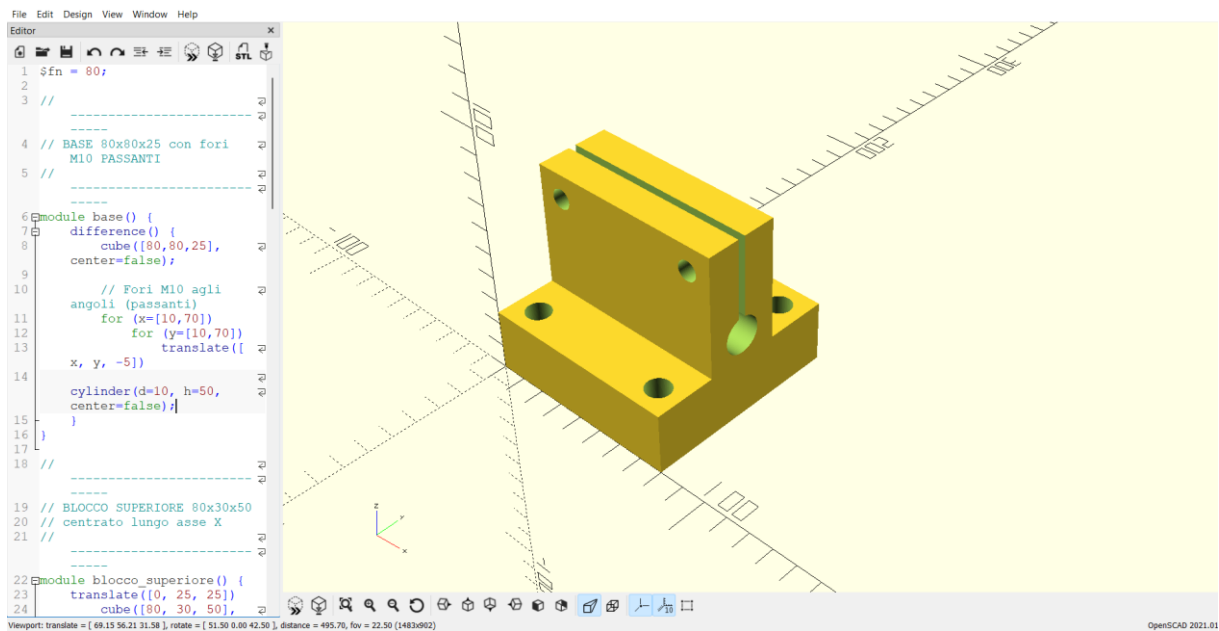


Figura 4.4. Modello 3D del supporto da prompt testuale su OpenSCAD

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, la filettatura non è stata realizzata perché per farla serve scaricare una libreria apposita.

Le modifiche apportate sono state quelle di far sì che i fori e gli scavi fossero passanti e rendere corretto lo scavo sulla parte superiore che veniva fatto rispetto all'asse opposto.

4.2.2 Zoo Design Studio

- **Flangia:**

Input: “Crea il modello 3D di una flangia con base di diametro 100mm e altezza 20mm, con quattro fori di diametro 15mm e distanti 14mm dal bordo esterno della base, questi fori sono posizionati nelle quattro estremità opposte. Il cilindro sopra la base deve avere diametro 50mm e altezza 25mm, infine fai un foro passante lungo tutto il modello di diametro 40mm concentrico con la base.”

Output:

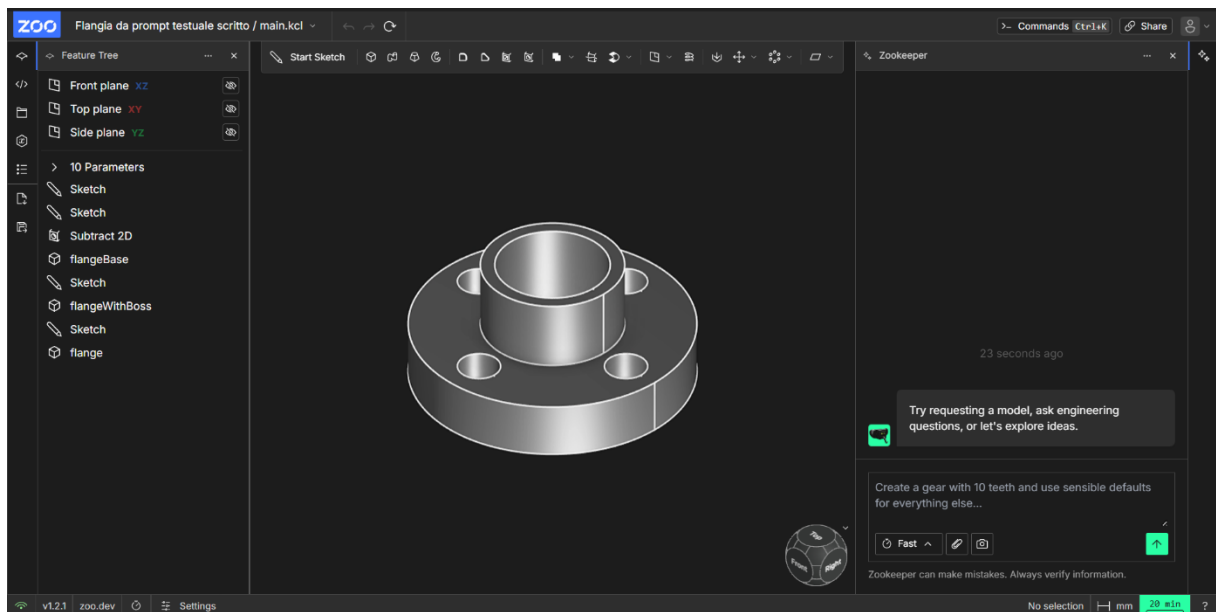


Figura 4.5. Modello 3D della flangia da prompt testuale su Zoo Design Studio

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, le feature sono state create.

- **Biella:**

Input: “Crea il modello 3D di una biella che abbia un cilindro di diametro 60mm ed altezza 45mm collegato ad un altro cilindro di diametro 40mm ed altezza 30mm e con interasse tra di essi di 120mm. La base che unisce i due cilindri deve essere tangente ad entrambi ed essere alta 25mm partendo dalla base dei cilindri. Il cilindro da 60mm ha un foro concentrico passante di diametro 50mm, quello da 40mm ha un foro concentrico passante di 30mm. Sulla superficie della base è presente una tasca passante formata da due raccordi di 7,5mm con interasse 35mm posizionata sull'asse centrale e il centro del raccordo di sinistra dista 45mm dal centro del cilindro da 60mm.”

Output:

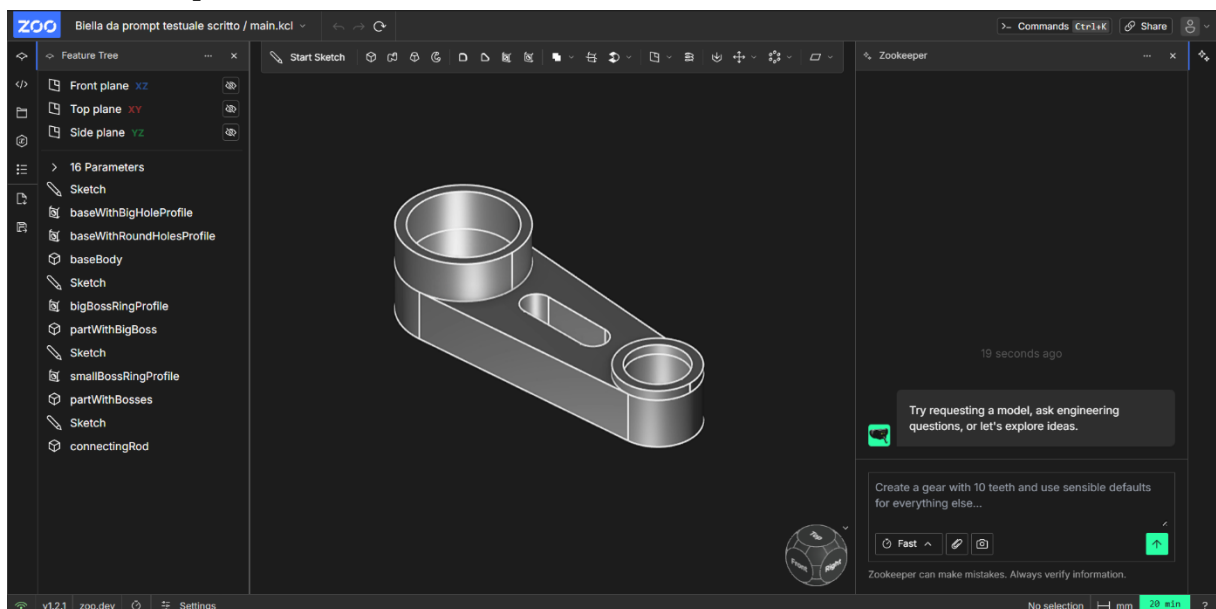


Figura 4.6. Modello 3D della biella da prompt testuale su Zoo Design Studio

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, le feature sono state create. Modifica effettuata per far sì che i fori dei due cilindri fossero passanti.

- **Supporto:**

Input: “Crea il modello 3D seguente: base quadrata di lato 80mm e altezza 25mm, su di essa sono presenti quattro fori filettati M10 disposti negli angoli e con il loro centro distante 10mm da entrambi i lati. Dalla base si estende un rettangolo 80mm per 30mm centrato lungo l'asse x alto 50mm. Sull'asse y del rettangolo sono presenti due fori passanti posizionati negli angoli superiori di diametro 8mm e con il centro distante 10mm da entrambi i lati. Sulla faccia lungo l'asse x del rettangolo è presente uno scavo composto da un cerchio di diametro 15mm con il centro distante 40mm dalla superficie superiore del rettangolo, inoltre va scavata anche la zona dalla superficie superiore del rettangolo fino a dentro il foro a cerchio con larghezza 3 mm e posizionata nel centro della superficie lungo l'asse x e lunga per tutta la misura del modello.”

Output:

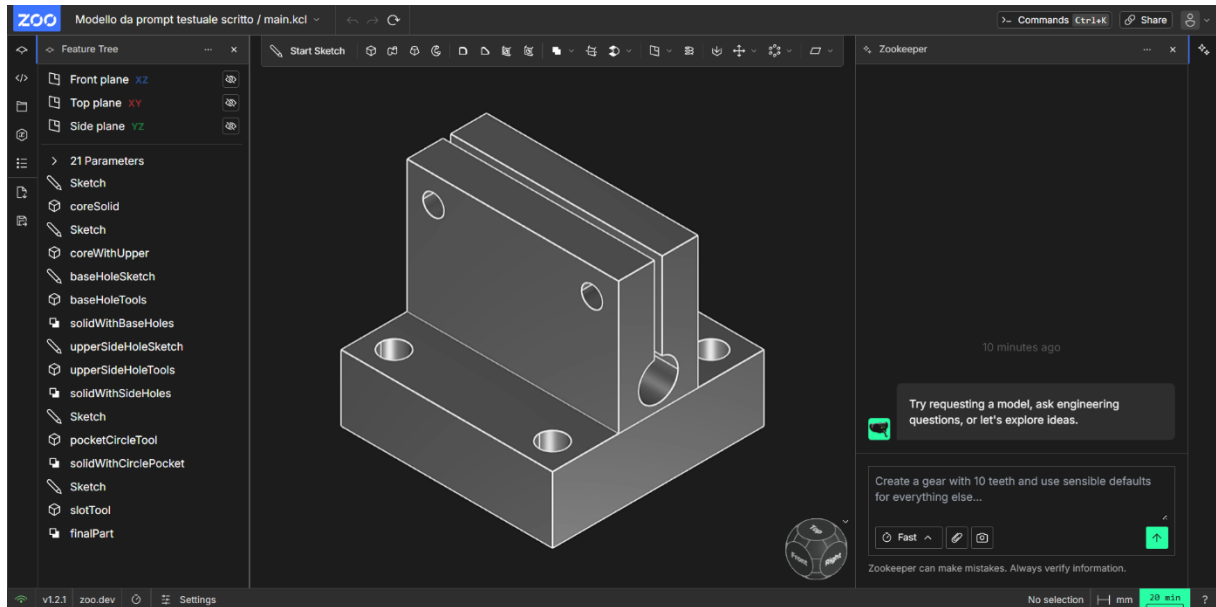


Figura 4.7. Modello 3D del supporto da prompt testuale su Zoo Design studio

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, le feature sono state realizzate tranne i fori filettati.

Modifica per far sì che lo scavo nella parte superiore fosse realizzato lungo il giusto asse.

4.2.3 CADAM.AI

- **Flangia:**

Input: “Crea il modello 3D di una flangia con base di diametro 100mm e altezza 20mm, con quattro fori di diametro 15mm e distanti 14mm dal bordo esterno della base, questi fori sono posizionati nelle quattro estremità opposte. Il cilindro sopra la base deve avere diametro 50mm e altezza 25mm, infine fai un foro passante lungo tutto il modello di diametro 40mm concentrico con la base.”

Output:

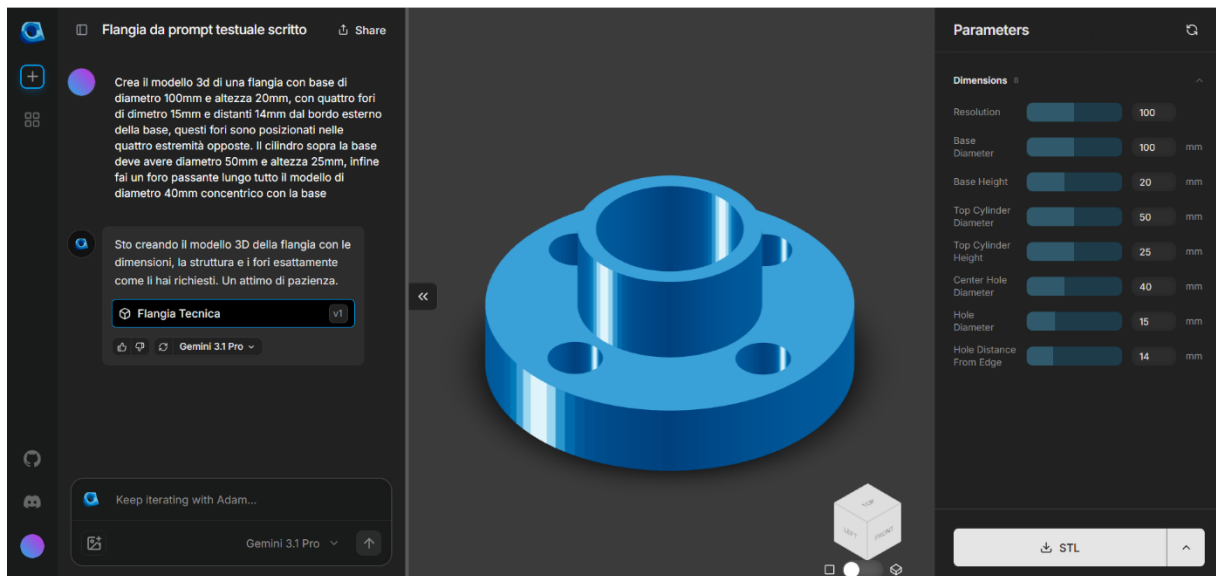


Figura 4.8. Modello 3D della flangia da prompt testuale su CADAM.AI

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, tutte le feature sono state create.

- **Biella:**

Input: “Crea il modello 3D di una biella che abbia un cilindro di diametro 60mm ed altezza 45mm collegato ad un altro cilindro di diametro 40mm ed altezza 30mm e con interasse tra di essi di 120mm. La base che unisce i due cilindri deve essere tangente ad entrambi ed essere alta 25mm partendo dalla base dei cilindri. Il cilindro da 60mm ha un foro concentrico passante di diametro 50mm, quello da 40mm ha un foro concentrico passante di 30mm. Sulla superficie della base è presente una tasca passante formata da due raccordi di 7,5mm con interasse 35mm posizionata sull'asse centrale e il centro del raccordo di sinistra dista 45mm dal centro del cilindro da 60mm.”

Output:

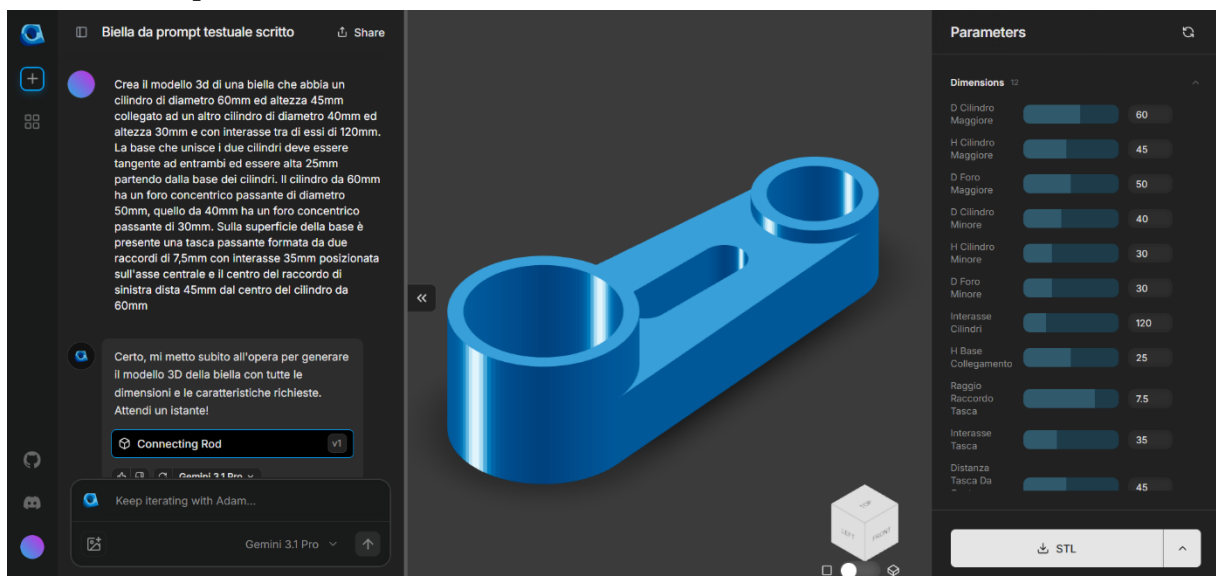


Figura 4.9. Modello 3D della biella da prompt testuale su CADAM.AI

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, le feature sono state create.

- **Supporto:**

Input: “Crea il modello 3D seguente: base quadrata di lato 80mm e altezza 25mm, su di essa sono presenti quattro fori filettati M10 disposti negli angoli e con il loro centro distante 10mm da entrambi i lati. Dalla base si estende un rettangolo 80mm per 30mm centrato lungo l'asse x alto 50mm. Sull'asse y del rettangolo sono presenti due fori passanti posizionati negli angoli superiori di diametro 8mm e con il centro distante 10mm da entrambi i lati. Sulla faccia lungo l'asse x del rettangolo è presente uno scavo composto da un cerchio di diametro 15mm con il centro distante 40mm dalla superficie superiore del rettangolo, inoltre va scavata anche la zona dalla superficie superiore del rettangolo fino a dentro il foro a cerchio con larghezza 3 mm e posizionata nel centro della superficie lungo l'asse x e lunga per tutta la misura del modello.”

Output:

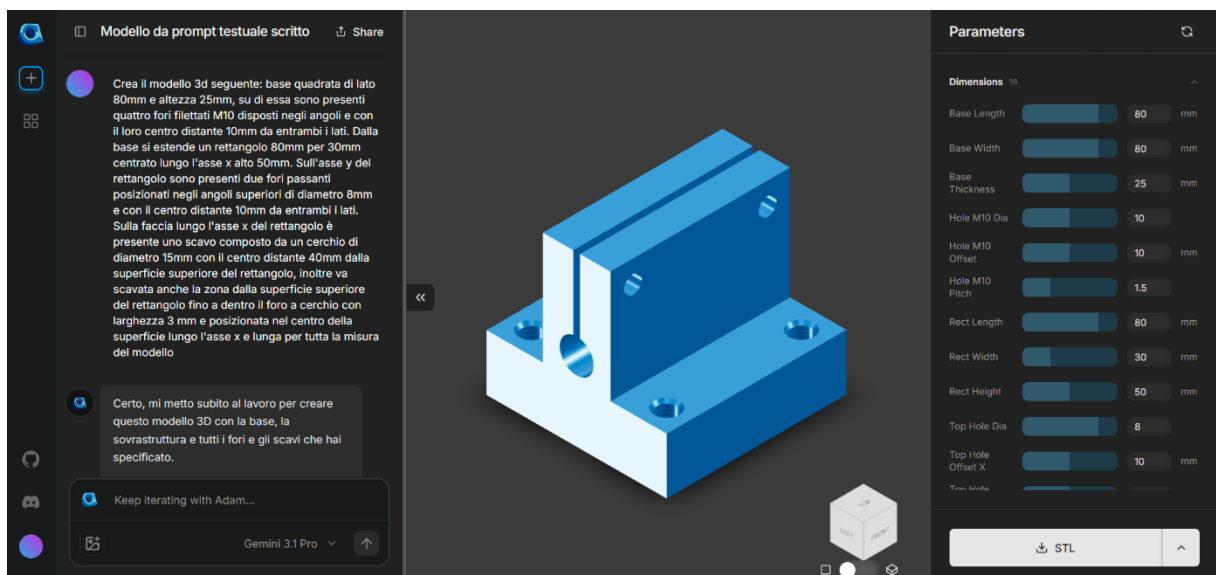


Figura 4.10. Modello 3D del supporto da prompt testuale su CADAM.AI

Il modello creato è coerente a livello di forme e dimensioni, le feature sono state create.

Modifica per far sì che lo scavo nella parte superiore fosse realizzato lungo il giusto asse e far sì che i fori fossero filettati.

4.3 Terza fase - work flow dell'immagine

In questa fase vengono analizzati i modelli generati dai software seguendo il work flow dell'immagine; quindi è stata inserita come input l'immagine del modello in questione visibile in *figura 4.1*.

4.3.1 OpenSCAD

- **Flangia:** in questo caso l'immagine del modello in *figura 4.1 (A)* è stata inserita su ChatGPT chiedendo di creare il codice da inserire su OpenSCAD per creare il modello rappresentato. Sono state date delle quote di riferimento del modello per valutare se i software fossero in grado di crearlo proporzionandolo come nell'immagine avendo quelle quote come riferimento.

Prompt dato a ChatGPT: "Crea il codice da inserire su OpenSCAD per realizzare il modello 3D della flangia in figura proporzionandolo sapendo che la base ha diametro 100mm e altezza 20mm."

Il codice fornito dall'IA da inserire nel software è presente in appendice al 8.4

Output:

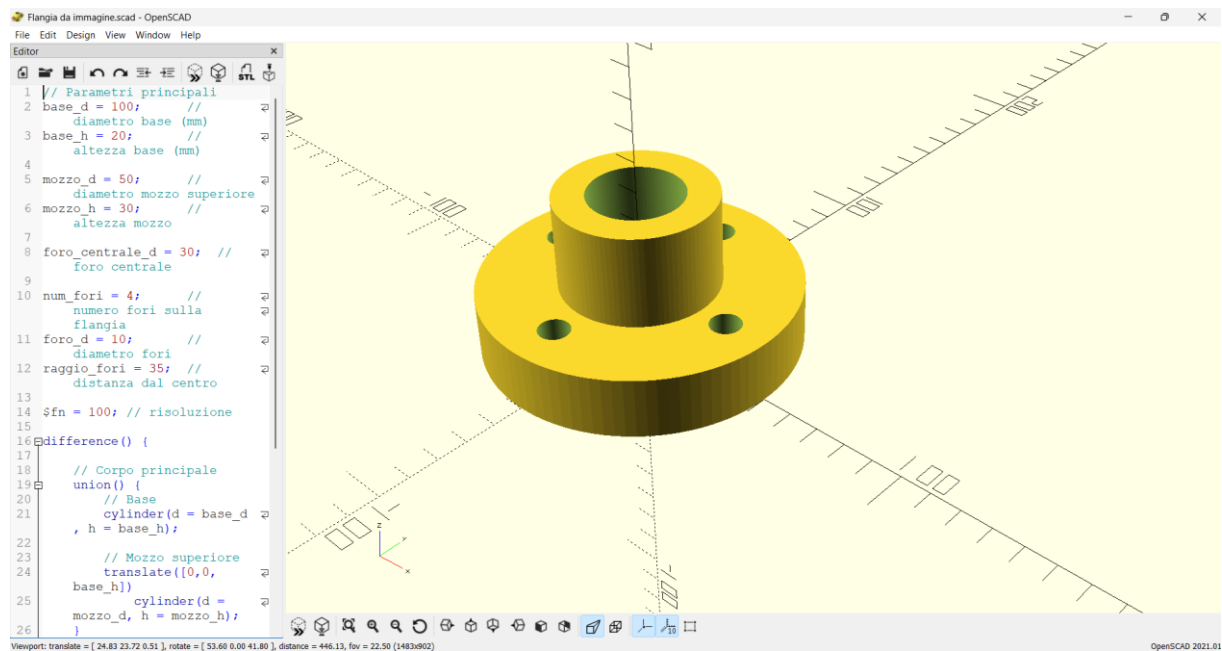


Figura 4.11. Modello 3D della flangia da immagine su OpenSCAD

Il modello creato è riconoscibile a livello di forme, ma ha le quote sbagliate e non è proporzionato come nell'immagine.

- **Biella:** Figura 4.1 (B)

Prompt dato a ChatGPT: “Crea il codice da inserire su OpenSCAD per realizzare il modello 3D della biella in figura proporzionandolo sapendo che l'interasse tra le circonferenze è 120mm e quella maggiore ha diametro 60mm.”

Il codice fornito dall'IA da inserire nel software è presente in appendice al 8.5

Output:

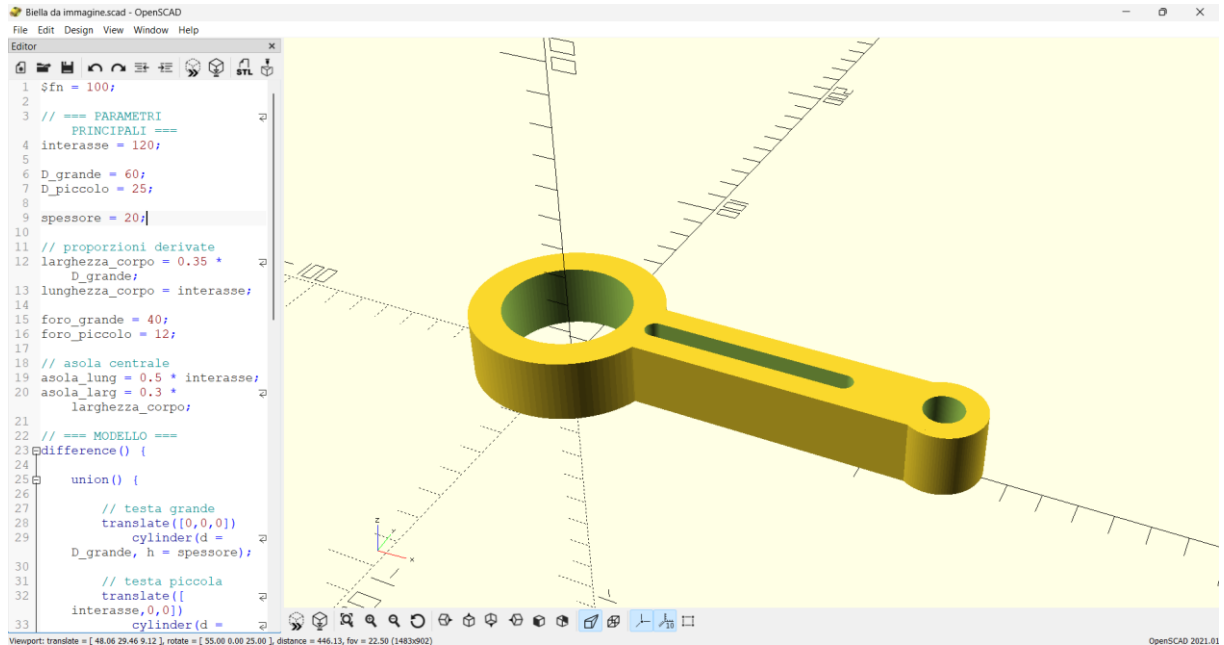


Figura 4.12. Modello 3D della biella da immagine su OpenSCAD

Il modello creato è parzialmente riconoscibile ma con errori evidenti a livello di forme, dimensioni e proporzioni.

- **Supporto:** *Figura 4.1 (C)*

Prompt dato a ChatGPT: “Crea il codice da inserire su OpenSCAD per realizzare il supporto rappresentato in figura proporzionandolo sapendo che la base è un parallelepipedo 80x80x25 mm.”

Il codice fornito dall’IA da inserire nel software è presente in appendice al 8.6

Output:

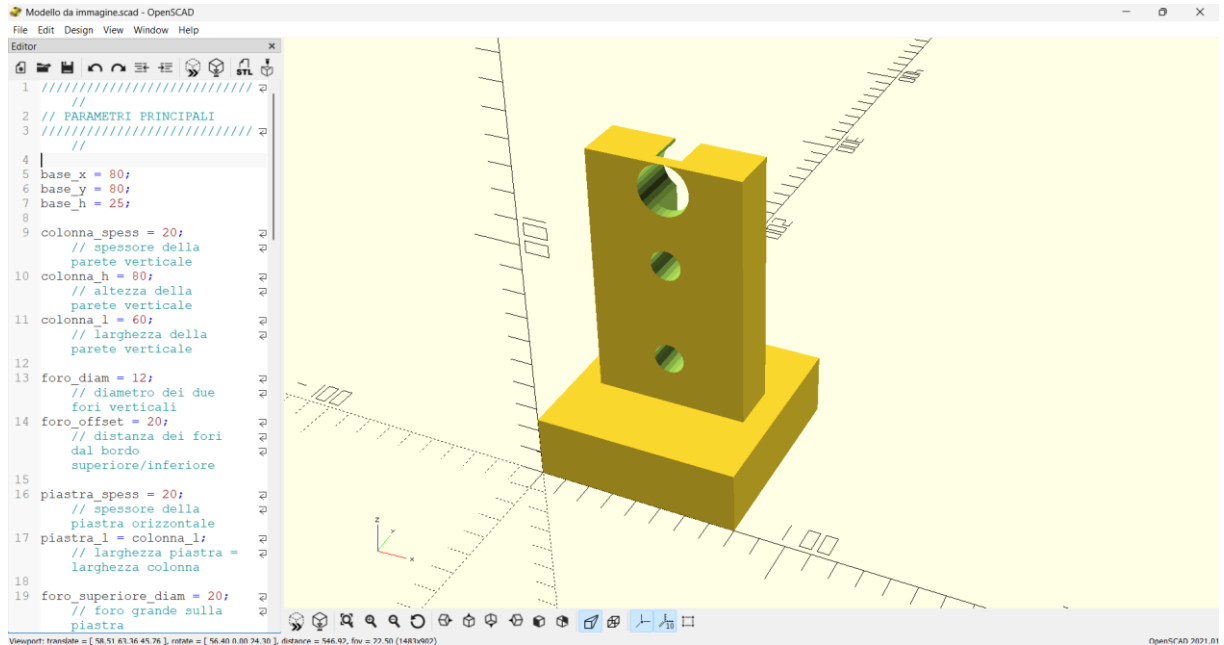


Figura 4.13. Modello 3D del supporto da immagine su OpenSCAD

Il modello creato non è riconoscibile e quindi completamente sbagliato a livello di forme e dimensioni.

4.3.2 Zoo Design Studio

- **Flangia:** Figura 4.1 (A)

Input: “Crea il modello 3D della flangia in figura proporzionandolo sapendo che la base ha diametro 100mm e altezza 20mm.”

Output:

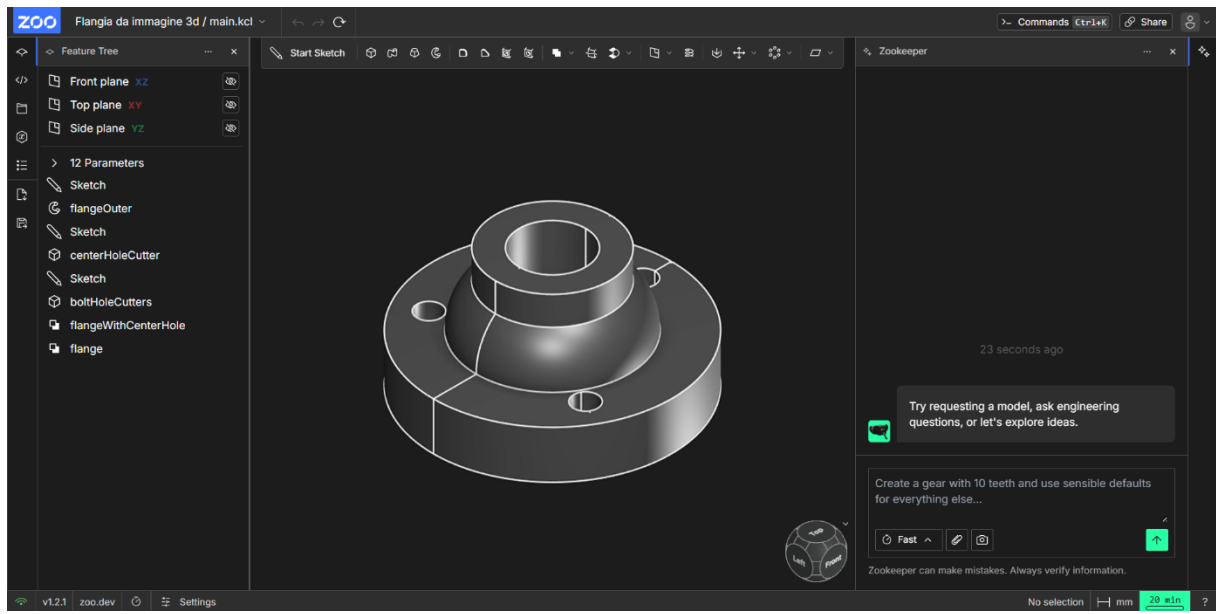


Figura 4.14. Modello 3D della flangia da immagine su Zoo Design Studio

Il modello creato è riconoscibile ma con errori evidenti come la mancanza di un foro nella base e la parte superiore creata in modo errato. Anche le misure non sono corrette.

- **Biella:** *Figura 4.1 (B)*

Input: “Crea il modello 3D della biella in figura proporzionandolo sapendo che l'interasse tra le circonferenze è 120mm con il diametro di quella maggiore che è 60mm.”

Output:

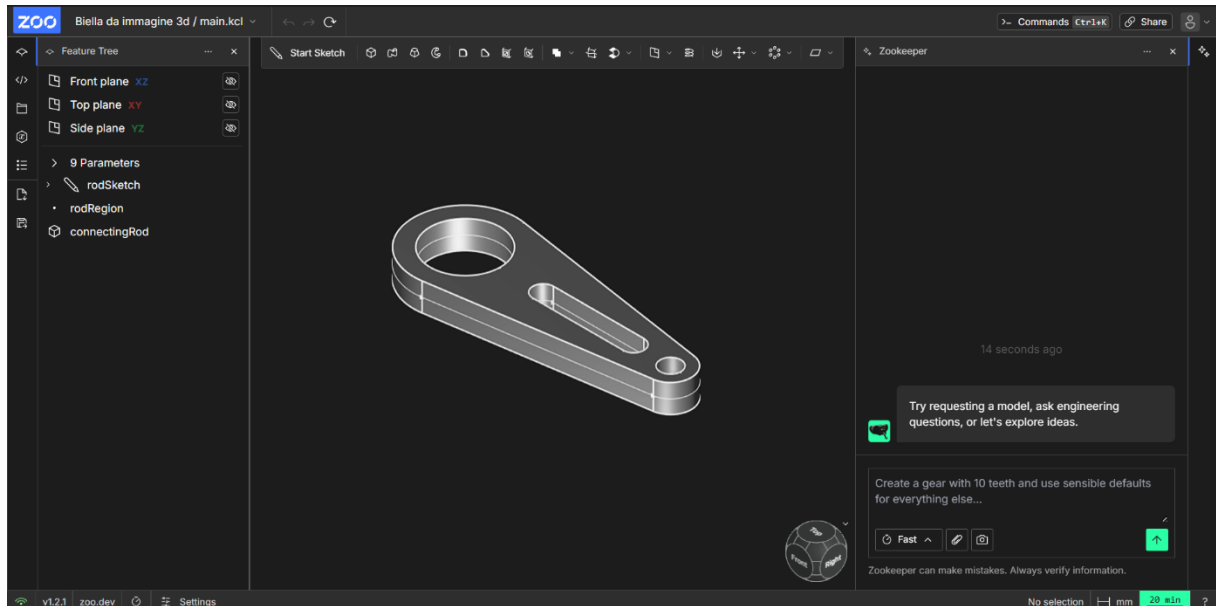


Figura 4.15. Modello 3D della biella da immagine su Zoo Design Studio

Il modello creato è parzialmente riconoscibile ma con errori evidenti a livello di forme e dimensioni.

- **Supporto:** *Figura 4.1 (C)*

Input: “Crea il modello 3D del supporto rappresentato in figura proporzionandolo sapendo che la base è un parallelepipedo 80x80x25 mm.”

Output:

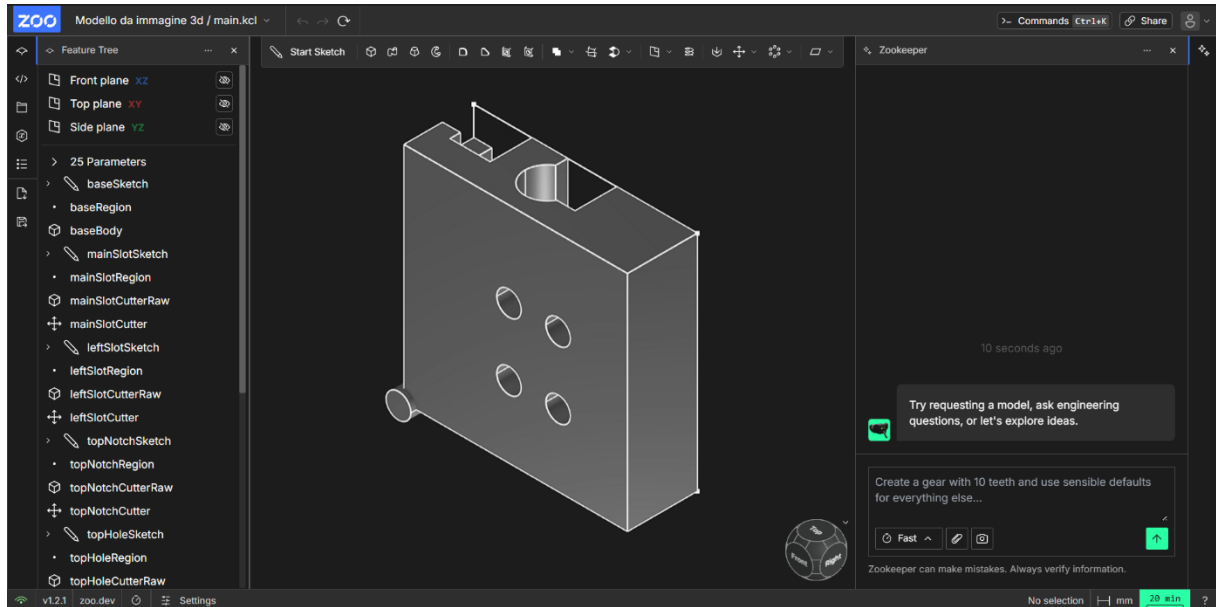


Figura 4.16. Modello 3D del supporto da immagine su Zoo Design Studio

Il modello creato non è riconoscibile e quindi completamente sbagliato a livello di forme e dimensioni.

4.3.3 CADAM.AI

- **Flangia:** Figura 4.1 (A)

Input: “Crea il modello 3D della flangia in figura proporzionandolo sapendo che la base ha diametro 100mm e altezza 20mm.”

Output:

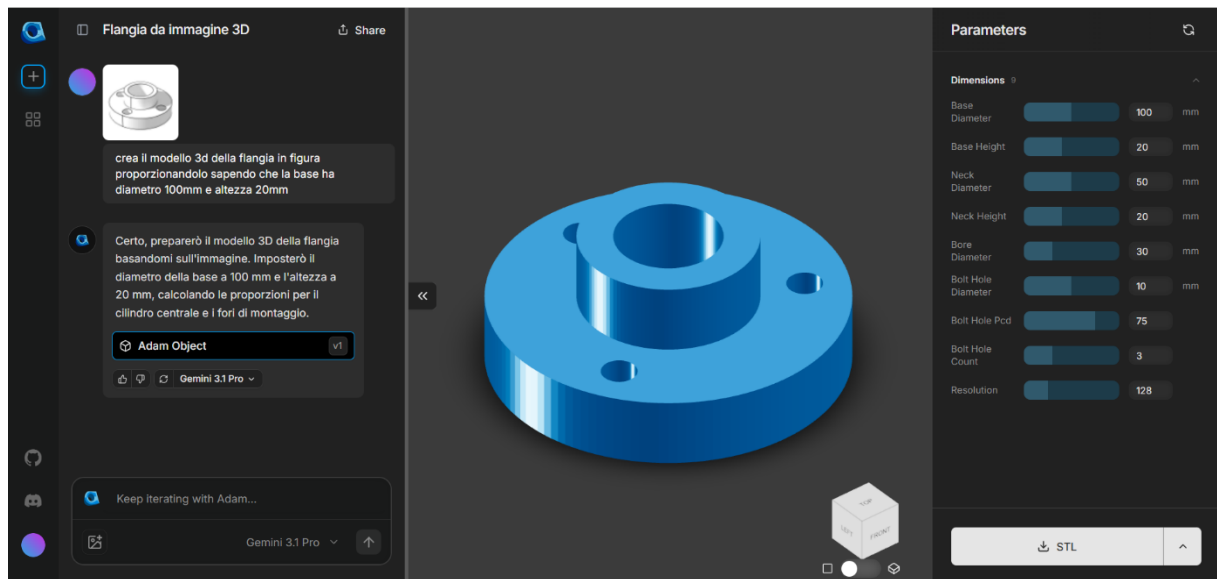


Figura 4.17. Modello 3D della flangia da immagine su CADAM.AI

Il modello creato è riconoscibile ma con errori evidenti come la mancanza di un foro nella base e la mancata proporzionalità.

- **Biella:** *Figura 4.1 (B)*

Input: “Crea il modello 3D della biella in figura proporzionandolo sapendo che l'interasse tra le circonferenze è 120mm con il diametro di quella maggiore che è 60mm.”

Output:

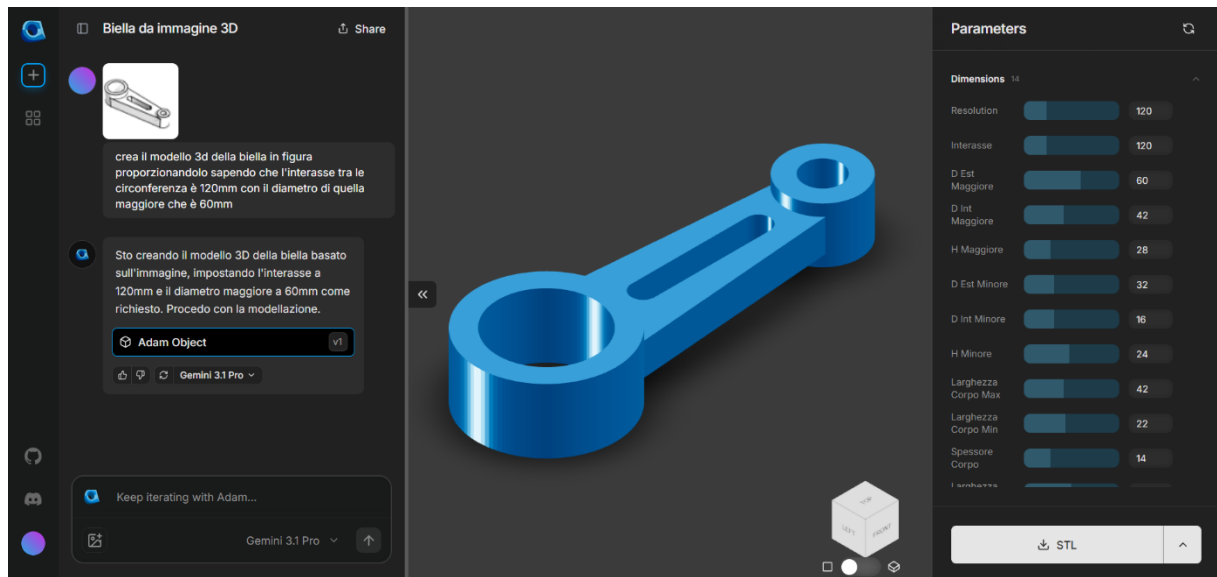


Figura 4.18. Modello 3D della biella da immagine su CADAM.AI

Il modello creato è relativamente riconoscibile ma con errori evidenti a livello di forme e dimensioni.

- **Supporto:** *Figura 4.1 (C)*

Input: “Crea il modello 3D del supporto rappresentato in figura proporzionandolo sapendo che la base è un parallelepipedo 80x80x25 mm.”

Output:

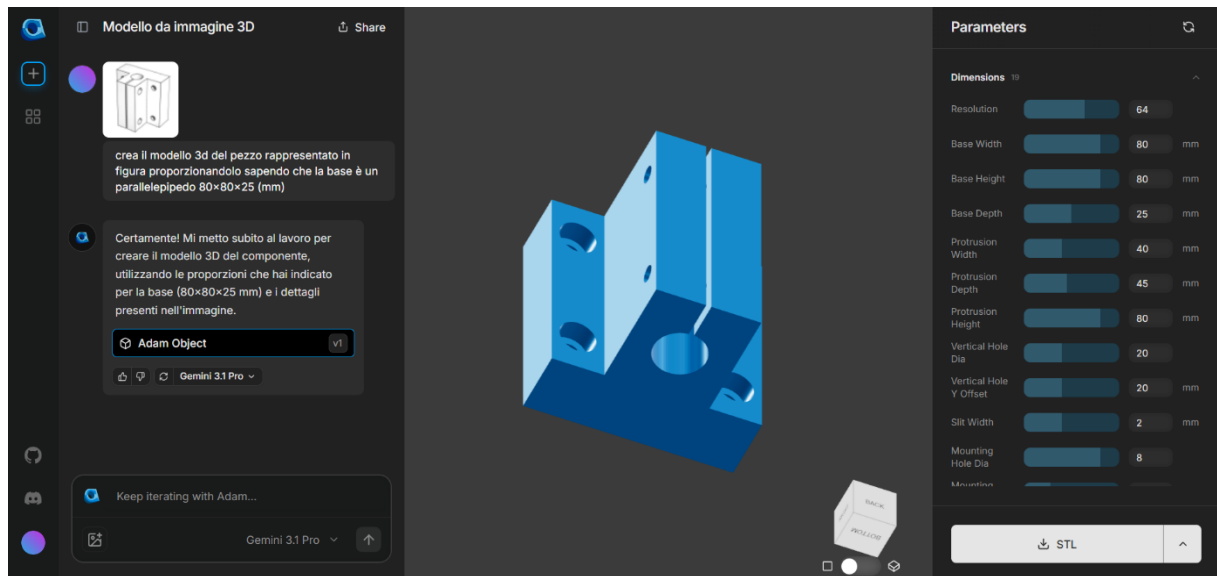


Figura 4.19. Modello 3D del supporto da immagine su CADAM.AI

Il modello creato è riconoscibile ma ha errori come i fori della base e della parte superiore che sono lamati e inoltre le misure non sono corrette.

5 Risultati e discussione

Il passo successivo alla creazione dei modelli è stato quello di prenderli uno ad uno ed analizzarli attraverso i parametri di valutazione; una visione di insieme di tutti i modelli creati tramite i tre software ed i due work flow è presente in appendice al 8.7 e 8.8.

In questa analisi sono stati messi da parte i parametri “accuratezza geometrica di dimensione” e “coerenza” perché, per quanto riguarda il primo, non è possibile valutare ogni quota del modello creato essendo che la maggior parte sono scaricabili solo come mesh, per il secondo, invece, perché servirebbe fare un ulteriore caso studio in cui si vanno a realizzare gli stessi modelli, inserendo un prompt testuale con lo stesso contenuto ma differente nella forma, oppure un’immagine del modello da un’angolazione differente e si dovrebbe valutare quanto questi nuovi modelli somiglino a quelli del primo caso studio.

Per i restanti parametri sono stati presi tutti i dati necessari da inserire nelle formule per poterli valutare.

Per prendere il volume del modello creato si è aperto il file .STL o .STEP su Solid Edge e con l’apposito comando è stato calcolato il volume totale.

Durante la creazione dei modelli è sempre stato calcolato il tempo di creazione per ognuno così da poterlo poi inserire nella formula; anche il tempo di modifica è stato preso nello stesso modo.

Per quanto riguarda la comprensione dell’input è stato dato ad ogni modello un valore “C” da 1 a 5, che corrisponde al grado di riconoscibilità e coerenza del modello creato rispetto all’originale.

Tutti i dati presi sono stati raccolti in delle tabelle riassuntive per avere chiarezza e rendere più facile il passaggio successivo che ha previsto il loro utilizzo nelle formule per avere tutte le valutazioni finali.

I dati per il work flow del prompt testuale sono stati raccolti in *tabella 5.1*.

I dati per il work flow dell’immagine sono stati raccolti in *tabella 5.2*.

Il volume reale è quello calcolato sul modello creato su Solid Edge come riferimento, “V mod” indica il volume del modello generato dal software, “T mod” indica il tempo, espresso in minuti, impiegato dal software per la creazione del modello, “T modifica” indica il tempo impiegato per effettuare una modifica al modello, se quest’ultima non serve il valore è indicato con un simbolo “X”, come ultimo dato si ha “C”, che indica attraverso il suo valore numerico da 1 a 5 il grado di coerenza del modello rispetto ai requisiti richiesti nell’input.

Tabella 5.1 Tabella dati dei modelli creati da prompt testuale

TABELLA DATI DEI MODELLI CREATI DA PROMPT TESTUALE			
	OPENSCAD	CADAM.AI	ZOO DESIGN
FLANGIA V reale = 135481,183mm ³	V mod = 135427,357mm ³	V mod = 135392,061mm ³	V mod = 135481,183mm ³
	T mod = istantaneo	T mod = 1min	T mod = 2,40min
	T modifica = 1min	T modifica = X	T modifica = X
	C = 5	C = 5	C = 5
BIELLA V reale = 137297,961mm ³	V mod = 137263,549mm ³	V mod = 137263,550mm ³	V mod = 137297,227mm ³
	T mod = istantaneo	T mod = 1min	T mod = 10min
	T modifica = 1min	T modifica = X	T modifica = 2min
	C = 5	C = 5	C = 5
SUPPORTO V reale = 249826,277mm ³	V mod = 247506,889mm ³	V mod = 249334,860mm ³	V mod = 247482,442mm ³
	T mod = istantaneo	T mod = 1,45min	T mod = 4,26min
	T modifica = 1min	T modifica = 1min	T modifica = 1min
	C = 4	C = 4	C = 4

Tabella 5.2 Tabella dati dei modelli creati da immagine

TABELLA DATI DEI MODELLI CREATI DA IMMAGINE 3D			
	OPENSCAD	CADAM.AI	ZOO DESIGN
FLANGIA V reale = 135481,183mm ³	V mod = 174243,692mm ³	V mod = 163297,215mm ³	V mod = 193344,328mm ³
	T mod = istantaneo	T mod = 1,15min	T mod = 2,45min
	T modifica = X	T modifica = X	T modifica = X
	C = 3	C = 3	C = 2
BIELLA V reale = 137297,961mm ³	V mod = 64290,534mm ³	V mod = 80475,172mm ³	V mod = 74026,200mm ³
	T mod = istantaneo	T mod = 1,10min	T mod = 7min
	T modifica = X	T modifica = X	T modifica = X
	C = 2	C = 2	C = 2
SUPPORTO V reale = 249826,277mm ³	V mod = 267679,136mm ³	V mod = 264914,131mm ³	V mod = 135769,417mm ³
	T mod = istantaneo	T mod = 2,20min	T mod = 3,58min
	T modifica = X	T modifica = X	T modifica = X
	C = 1	C = 3	C = 1

Successivamente, grazie ad un foglio di calcolo Excel [12], visibile in *figura 5.1*, sono state calcolate tutte le valutazioni dei parametri di ogni modello creato in maniera rapida.

Come si può vedere in figura, nella colonna “A” sono state riportate le voci dei parametri necessari per il calcolo dei voti, nella colonna “B” sono stati inseriti i valori presi dalle tabelle di raccolta dati, nella colonna “D” sono stati inseriti i parametri da valutare, infine la colonna “G” è quella in cui viene definito il voto finale di ogni parametro in base ai dati inseriti.

Sono stati inseriti nella colonna "B" i dati relativi ad ogni modello ed è poi stato registrato il valore uscito nella colonna "G"; in quest'ultima, per permettere il calcolo con i dati inseriti, sono state messe, con il linguaggio di Excel, le formule dei parametri presenti in *tabella 4.1*.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	V reale	249.826						
3	V modello	247482,442		Voto accuratezza geometrica			9,06181	
4	E max	24982,6277						
5								
6								
7	T riferimento	2						
8	T modello	4,26		Voto efficienza			5,48	
9	ΔT max	5						
10								
11								
12	T riferimento	2						
13	T modello	1		Voto modificabilità			12	
14	ΔT max	5						
15								
16								
17	C somiglianza	4		Voto comprensione input			8	
18								

Figura 5.1. Foglio di calcolo Excel per calcolare i voti dei parametri

I risultati forniti sono stati aggiunti man mano nelle tabelle dei voti, *tabella 5.3* e *tabella 5.4*, in modo da avere un quadro chiaro del loro andamento e poter estrapolare le considerazioni finali.

Tabella 5.3 Tabella voti dei modelli creati da prompt testuale

TABELLA VOTI DEI MODELLI CREATI DA PROMPT TESTUALE									
	OPENSCAD			CADAM.AI			ZOO DESIGN		
	Flangia	Biella	Supporto	Flangia	Biella	Supporto	Flangia	Biella	Supporto
Accuratezza geometrica di forma	9,96	9,97	9,07	9,93	9,97	9,80	10	9,99	9,06
Efficienza	10	10	10	10	10	10	9,2	1	5,48
Modificabilità	10	10	10	X	X	10	X	10	10
Comprensione input	10	10	8	10	10	8	10	10	8

Tabella 5.4 Tabella voti dei modelli creati da immagine

TABELLA VOTI DEI MODELLI CREATI DA IMMAGINE 3D									
	OPENSCAD			CADAM.AI			ZOO DESIGN		
	Flangia	Biella	Supporto	Flangia	Biella	Supporto	Flangia	Biella	Supporto
Accuratezza geometrica di forma	1	1	2,85	1	1	3,96	1	1	1
Efficienza	10	10	10	10	10	9,6	9,1	1	6,84
Modificabilità	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Comprensione input	6	4	2	6	4	6	4	4	2

5.1 Discussione risultati del work flow del prompt testuale

Analizzando la *tabella 5.3* dei voti dei modelli da prompt testuale si possono fare le seguenti considerazioni:

- **Accuratezza geometrica di forma:** i voti sono tutti molto alti, questo significa che il volume dei modelli non si discosta di più del 10% da quello di riferimento; se il volume fosse identico il voto sarebbe 10, man mano che il volume del modello cambia aumentando o diminuendo rispetto al riferimento, il voto diminuisce linearmente fino ad arrivare ad uno scostamento maggiore del 10% in cui il voto diventa automaticamente 1 perché non sarebbe più un valore accettabile per la precisione richiesta in ambito meccanico.
- **Efficienza:** i voti sono valutati rispetto ad un tempo di riferimento (2 minuti), se il tempo impiegato per creare il modello è minore o uguale a quello di riferimento il voto è 10, altrimenti decresce linearmente in funzione dell'eccesso di tempo; è stato inserito un tempo massimo di creazione equivalente a 5 minuti dopo il quale il voto diventa 1 perché a quel punto non andrebbe più bene per le tempistiche richieste in ambito meccanico. Si può vedere come il tempo di creazione è sempre molto basso, tranne in due casi per i modelli creati su Zoo Design Studio, in cui per la creazione della biella il tempo sfiora addirittura i 5 minuti mentre per il supporto il tempo è elevato visto che il voto è insufficiente.
- **Modificabilità:** i voti seguono la stessa logica dell'efficienza, con la differenza che non sempre è necessaria una modifica sul modello. Come si può vedere i tempi di modifica rispettano sempre il tempo di riferimento, infatti il voto è sempre 10.
- **Comprensione input:** è valutata in funzione del grado di copertura delle caratteristiche richieste e della coerenza complessiva; al modello creato viene attribuito un voto da 1 a 5 (1 se il modello è scollegato dall'input, 3 se il modello è riconoscibile ma con errori evidenti, 5 se il modello è altamente coerente con l'input) e tramite la formula verrà fornito un voto da 1 a 10. Ai modelli creati è sempre stato dato un coefficiente "C" pari a 5, quindi erano altamente coerenti con l'input, solo nei casi del supporto il voto è leggermente minore perché i software creavano una lavorazione lungo l'asse sbagliato e quindi non veniva interpretato bene il testo.

In questo caso studio i software hanno lavorato bene, infatti, come detto sopra, i modelli creati risultano accettabili sia a livello di forme che di dimensioni.

Anche i tempi impiegati per la creazione e le eventuali modifiche risultano accettabili.

I modelli creati hanno tutte le feature richieste senza lavorazioni di troppo, il che indica che i software hanno interpretato bene l'input testuale fornito.

In conclusione, per questo caso studio, i software possono essere implementati a livello industriale ed utilizzati come strumento di analisi preliminare.

5.2 Discussione risultati del work flow dell'immagine

Analizzando la *tabella 5.4* dei voti dei modelli da immagine si possono fare le seguenti considerazioni:

- **Accuratezza geometrica di forma:** i voti sono più bassi, questo indica che il volume dei modelli creati non rispetta un range accettabile, solo in due casi il voto rientra nello scostamento del 10%, mentre tutti gli altri voti sono 1. Quindi i software non riescono a creare il modello proporzionato avendo solamente un'immagine e qualche quota guida da prendere come riferimento per le altre dimensioni.
- **Efficienza:** i voti sono elevati, infatti i modelli sono stati creati tutti rispettando il tempo di riferimento, solo la biella su Zoo Design Studio ha voto 1 perché ha sfiorato i 5 minuti accettabili.
- **Modificabilità:** in questo caso studio le modifiche ai modelli non sono state effettuate perché si era visto subito che non rispettavano le caratteristiche dei modelli di riferimento, quindi sarebbe stato inutile apportare modifiche ad un modello già completamente sbagliato.
- **Comprensione input:** i voti sono bassi perché i modelli creati non erano coerenti con le caratteristiche richieste, ma anzi, erano sempre presenti errori a livello di forma, posizionamento delle feature, mancanza di fori o presenza di lavorazioni di troppo non richieste.

In questo caso studio i software non hanno creato dei modelli accettabili, infatti le forme, le dimensioni e le feature erano completamente sbagliate, oltre che avere lavorazioni di troppo non richieste.

Quindi i software non sono stati in grado di interpretare correttamente l'immagine fornita come input, né a livello di forme né a livello di proporzioni.

In conclusione, per questo caso studio, i software non possono essere considerati uno strumento utile a livello industriale.

6 Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi ha affrontato in modo sistematico il tema emergente dell'integrazione tra modellazione CAD e sistemi generativi basati su IA, con l'obiettivo di valutare in che misura tali tecnologie possano supportare il processo di progettazione meccanica ed aiutare il progettista.

Lo studio è partito dall'analisi di come i software disponibili fossero confrontati tra loro e come funzionassero; proprio da qui si è visto come ad oggi non esistano dei criteri di valutazione oggettivi e riproducibili per valutare questi sistemi dal punto di vista meccanico.

In risposta a questa mancanza, la tesi ha introdotto un framework di metriche universali per valutare le caratteristiche principali che questi software devono rispettare a livello di tempistiche e di realizzazione dei modelli richiesti.

L'applicazione di questi parametri ai tre software selezionati, confrontando i tre modelli scelti per effettuare lo studio, ha permesso di avere un quadro comparativo chiaro e fondato su analisi sistematiche.

I risultati evidenziano come gli strumenti basati su IA generativa offrano un potenziale significativo in termini di rapidità e flessibilità, mentre presentano ancora limiti rilevanti nella precisione geometrica, nella coerenza delle feature meccaniche e nella comprensione dell'input dato, in particolare se quest'ultimo è un'immagine non quotata.

Da questo studio è emerso come i software analizzati siano abbastanza efficienti se si utilizza il work flow del prompt testuale, infatti in questo caso i modelli generati rispecchiano le caratteristiche richieste a meno di qualche feature; mentre seguendo il work flow dell'immagine questi software non possono essere considerati affidabili visto che i modelli creati non rispecchiano in niente le caratteristiche richieste.

L'unico aspetto che può essere valutato positivamente è il tempo di creazione dei modelli, che è molto simile a quello impiegato da un CAD parametrico ma con il vantaggio che questi software non richiedono competenze tecniche per essere utilizzati.

Nel complesso, l'analisi evidenzia che le tecnologie generative non rappresentano ancora un valido sostituto dei metodi CAD tradizionali, ma ne costituiscono un complemento promettente, soprattutto nelle fasi iniziali di concept design, esplorazione geometrica e generazione rapida di alternative.

La definizione di parametri oggettivi si è rivelata essenziale per valutare tali strumenti in modo equo e ripetibile e costituisce una base solida per le future attività di ricerca e sviluppo dei software basati su IA.

Tuttavia, lo studio effettuato in questa tesi, ha delle limitazioni riguardo il tipo e il numero di componenti analizzati e la qualità dell'input fornito.

Infatti, per uno studio completo, andrebbero analizzati ulteriori modelli che abbiano feature e vincoli geometrici diversi, sempre tenendo in considerazione le caratteristiche richieste a livello industriale.

Un ulteriore limite è l'aver analizzato solamente modelli considerabili parti e non assiemi, andando a valutare anche i vincoli tra più parti e le loro connessioni.

Nel caso studio del work flow dell'immagine, un limite è stato quello di aver utilizzato come input solamente un'immagine, mentre potrebbero venir fuori dei risultati migliori se come input venissero aggiunte altre immagini da diverse angolazioni dello stesso modello, in modo che il software non debba interpretare le zone non in vista nella singola immagine, ma abbia accesso a tutte le viste del modello potendo analizzare ed interpretare ogni feature.

In prospettiva, l'evoluzione dei modelli linguistici e delle tecniche di generazione 3D lascia prevedere un miglioramento significativo in termini di qualità e affidabilità dei risultati; dovrà essere però fondamentale accompagnare questa crescita con lo sviluppo di strumenti di valutazione rigorosi, garantendo un fine orientato alla qualità del prodotto finale.

Un primo sviluppo potrebbe riguardare l'estensione dei parametri a geometrie più complesse, assiemi funzionali e componenti con tolleranze specifiche, così da valutare le prestazioni dei software in scenari industriali reali.

Un altro sviluppo possibile riguarda il formato del prodotto finito, ovvero lo sviluppo di questi sistemi per far sì che l'output non sia più solamente una mesh ma un modello solido dotato di feature modificabili, in questo modo si avrà la vera assistenza che questi software possono apportare alla progettazione meccanica.

Ulteriori sviluppi includono il miglioramento della capacità dei software di comprendere input tecnici, vincoli geometrici e normative.

La tesi si conclude quindi con una visione chiara: l'IA generativa rappresenta un'opportunità concreta ma ancora immatura per la progettazione meccanica, la sua piena integrazione richiederà ulteriori progressi tecnici, ma soprattutto metodologie di valutazione solide e sistematiche, che consentano di misurare con precisione l'efficacia, i limiti e il reale valore aggiunto in ambito meccanico.

7 Bibliografia

- [1] OpenSCAD. (2026). *OpenSCAD – The Programmer’s Solid 3D CAD Modeller*. Recuperato da <https://openscad.org/>
- [2] Zoo Corporation. (2026). *Zoo Design Studio*. Recuperato da <https://zoo.dev/design-studio> (zoo.dev in Bing)
- [3] AdamCAD. (2026). *CADAM – The Open Source Text-to-CAD Web App*. Recuperato da <https://github.com/Adam-CAD/CADAM>
- [4] A Survey on Generative AI for 3D CAD in Engineering. (2025). *IEEE Xplore*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11397452>
- [5] Zhang, L., Le, B., Akhtar, N., Lam, S.-K., & Ngo, T. (2025). *Large language models for computer-aided design: A survey*. arXiv. <https://arxiv.org/html/2505.08137v1>
- [6] Generative AI meets CAD: Enhancing engineering design. (2025). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-025-15830-2>
- [7] OpenAI. (2026). *ChatGPT*. Recuperato da <https://chatgpt.com/>
- [8] Google. (2026). *Google Scholar*. Recuperato da <https://scholar.google.com/>
- [9] Li, C., Zhang, C., Cho, J., Waghvase, A., Lee, L.-H., Rameau, F., Yang, Y., Bae, S.-H., & Hong, C. S. (2024). *Generative AI meets 3D: A Survey on Text-to-3D in AIGC Era* (Version 4). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2305.06131>
- [10] Liu, Y., Xu, D., Yu, X., Xu, X., Cohen-Or, D., Zhang, H., & Huang, H. (2025). *HoLa: B-Rep generation using a holistic latent representation* (arXiv:2504.14257v3). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2504.14257>
- [11] Siemens Digital Industries Software. (2026). *Solid Edge*. Recuperato da <https://solidedge.siemens.com/>
- [12] Microsoft Corporation. (2024). *Microsoft Excel* (Versione 16.x) [Software]. <https://www.microsoft.com/microsoft-365/excel> (microsoft.com in Bing)

8 Appendice

8.1 Codice OpenSCAD flangia da prompt testuale

```
////////////////////////////////////
// Parametri principali
////////////////////////////////////

base_diam  = 100;
base_h     = 20;

top_diam   = 50;
top_h      = 25;

hole_diam  = 15;
hole_offset = 14;
center_hole_d = 40;

total_h    = base_h + top_h;

////////////////////////////////////
// Modello
////////////////////////////////////

difference() {

    // Corpo solido
    union() {
        cylinder(d = base_diam, h = base_h, $fn = 120);
        translate([0,0,base_h])
            cylinder(d = top_diam, h = top_h, $fn = 120);
    }

    // Foro centrale passante (più lungo e abbassato)
    translate([0,0,-5])
        cylinder(d = center_hole_d, h = total_h + 10, $fn = 120);
}
```

```

// Fori laterali passanti (più lunghi e abbassati)
hole_radius = (base_diam / 2) - hole_offset;

for (angle = [0, 90, 180, 270]) {
    rotate([0,0,angle])
        translate([hole_radius, 0, -5])
            cylinder(d = hole_diam, h = total_h + 10, $fn = 80);
}
}

```

8.2 Codice OpenSCAD biella da prompt testuale

```

$fn = 120;

// Parametri principali
d_big    = 60;
h_big    = 45;
hole_big = 50;

d_small  = 40;
h_small  = 30;
hole_small = 30;

interasse = 120;

base_h    = 25;

// Tasca
r_pocket  = 7.5;
pocket_int = 35;
pocket_L  = 45; // distanza dal centro del cilindro grande

module biella() {

    difference() {

        union() {

```

```

// --- Base tangente tramite hull ---
hull() {
    translate([0,0,0])
        cylinder(d = d_big, h = base_h);

    translate([interasse,0,0])
        cylinder(d = d_small, h = base_h);
}

// --- Cilindro grande sopra la base ---
translate([0,0,base_h])
    cylinder(d = d_big, h = h_big - base_h);

// --- Cilindro piccolo sopra la base ---
translate([interasse,0,base_h])
    cylinder(d = d_small, h = h_small - base_h);
}

// --- Fori passanti ---
translate([0,0,-1])
    cylinder(d = hole_big, h = h_big + 2);

translate([interasse,0,-1])
    cylinder(d = hole_small, h = h_small + 2);

// --- Tasca passante (estrusa più in profondità) ---
translate([0,0,-5]) // scende sotto la base
    linear_extrude(height = base_h + 50) // attraversa tutto
        pocket2D();
}

// Profilo 2D della tasca (slot con due raccordi)
module pocket2D() {
    hull() {
        translate([pocket_L, 0])
            circle(r = r_pocket);

        translate([pocket_L + pocket_int, 0])

```

```

        circle(r = r_pocket);
    }
}

biella();

```

8.3 Codice OpenSCAD supporto da prompt testuale

```

$fn = 80;

// -----
// BASE 80x80x25 con fori M10 PASSANTI
// -----
module base() {
    difference() {
        cube([80,80,25], center=false);

        // Fori M10 agli angoli (passanti)
        for (x=[10,70])
            for (y=[10,70])
                translate([x, y, -5])
                    cylinder(d=10, h=50, center=false);
    }
}

// -----
// BLOCCO SUPERIORE 80x30x50
// centrato lungo asse X
// -----
module blocco_superiore() {
    translate([0, 25, 25])
        cube([80, 30, 50], center=false);
}

// -----
// FORI Ø8 PASSANTI sulla faccia Y = 25
// -----
module fori_laterali_y() {

```

```

for (x=[10,70])
  for (z=[35, 65]) // 25+10 e 25+40
    translate([x, 25-5, z])
    rotate([90,0,0])
    cylinder(d=8, h=100, center=false);
}

// -----
// DUE FORI Ø8 PASSANTI sulla faccia opposta Y = 55
// con distanza misurata dalla superficie superiore
// -----
module fori_laterali_y_opposti() {

  z_foro = 75 - 10; // 10 mm sotto la superficie superiore

  for (x=[10,70])
    translate([x, 55+5, z_foro])
    rotate([90,0,0])
    cylinder(d=8, h=100, center=false);
}

// -----
// SCAVO PASSANTE (foro Ø15 + asola 3mm)
// sulla faccia lungo asse X
// -----
module scavo_frontale_passante() {

  z_centro = 35; // centro del foro circolare

  // Foro circolare Ø15 PASSANTE
  translate([-5, 25 + 15, z_centro])
  rotate([0,90,0])
  cylinder(d=15, h=150, center=false);

  // Asola 3 mm PASSANTE
  translate([-5, 25 + (30-3)/2, z_centro])
  cube([150, 3, 75 - z_centro], center=false);
}

```

```
// -----
// MODELLO COMPLETO
// -----
difference() {
    union() {
        base();
        blocco_superiore();
    }

    // Fori Ø8 passanti su faccia Y=25
    fori_laterali_y();

    // SOLO DUE fori Ø8 sulla faccia opposta Y=55
    fori_laterali_y_opposti();

    // Scavo frontale passante (foro Ø15 + asola 3mm)
    scavo_frontale_passante();
}
```

8.4 Codice OpenSCAD flangia da immagine

```
// Parametri principali
base_d = 100; // diametro base (mm)
base_h = 20; // altezza base (mm)

mozzo_d = 50; // diametro mozzo superiore
mozzo_h = 30; // altezza mozzo

foro_centrale_d = 30; // foro centrale

num_fori = 4; // numero fori sulla flangia
foro_d = 10; // diametro fori
raggio_fori = 35; // distanza dal centro

$fn = 100; // risoluzione

difference() {
```

```

// Corpo principale
union() {
    // Base
    cylinder(d = base_d, h = base_h);

    // Mozzo superiore
    translate([0,0,base_h])
        cylinder(d = mozzo_d, h = mozzo_h);
}

// Foro centrale passante
translate([0,0,-1])
    cylinder(d = foro_centrale_d, h = base_h + mozzo_h + 2);

// Fori sulla flangia
for (i = [0 : 360/num_fori : 360 - 360/num_fori]) {
    rotate([0,0,i])
        translate([raggio_fori,0,-1])
            cylinder(d = foro_d, h = base_h + 2);
}
}

```

8.5 Codice OpenSCAD biella da immagine

```

$fn = 100;

// === PARAMETRI PRINCIPALI ===
interasse = 120;

D_grande = 60;
D_piccolo = 25;

spessore = 20;

// proporzioni derivate
larghezza_corpo = 0.35 * D_grande;
lunghezza_corpo = interasse;

```

```

foro_grande = 40;
foro_piccolo = 12;

// asola centrale
asola_lung = 0.5 * interasse;
asola_larg = 0.3 * larghezza_corpo;

// === MODELLO ===
difference() {

    union() {

        // testa grande
        translate([0,0,0])
            cylinder(d = D_grande, h = spessore);

        // testa piccola
        translate([interasse,0,0])
            cylinder(d = D_piccolo, h = spessore);

        // corpo centrale (collegamento)
        hull() {
            translate([0,0,0])
                cylinder(d = larghezza_corpo, h = spessore);

            translate([interasse,0,0])
                cylinder(d = larghezza_corpo, h = spessore);
        }
    }

    // foro grande
    translate([0,0,-1])
        cylinder(d = foro_grande, h = spessore+2);

    // foro piccolo
    translate([interasse,0,-1])
        cylinder(d = foro_piccolo, h = spessore+2);

    // asola centrale

```

```

hull() {
    translate([interasse/2 - asola_lung/2, 0, -1])
        cylinder(d = asola_larg, h = spessore+2);

    translate([interasse/2 + asola_lung/2, 0, -1])
        cylinder(d = asola_larg, h = spessore+2);
}
}

```

8.6 Codice OpenSCAD supporto da immagine

```

////////////////////////
// PARAMETRI PRINCIPALI
////////////////////////

base_x = 80;
base_y = 80;
base_h = 25;

colonna_spess = 20; // spessore della parete verticale
colonna_h = 80;    // altezza della parete verticale
colonna_l = 60;    // larghezza della parete verticale

foro_diam = 12;    // diametro dei due fori verticali
foro_offset = 20;  // distanza dei fori dal bordo superiore/inferiore

piastra_spess = 20; // spessore della piastra orizzontale
piastra_l = colonna_l; // larghezza piastra = larghezza colonna

foro_superiore_diam = 20; // foro grande sulla piastra
asola_larg = 10;         // larghezza asola
asola_altezza = 40;      // altezza asola

////////////////////////
// MODELLO
////////////////////////

difference() {

```

```

union() {

    // BASE
    cube([base_x, base_y, base_h]);

    // COLONNA VERTICALE
    translate([(base_x-colonna_l)/2, (base_y-colonna_spess)/2, base_h])
        cube([colonna_l, colonna_spess, colonna_h]);

    // PIASTRA ORIZZONTALE
    translate([(base_x-piastra_l)/2, (base_y-colonna_spess)/2, base_h +
colonna_h])
        cube([piastra_l, piastra_spess, piastra_spess]);
}

////////////////////////
// FORI NELLA COLONNA
////////////////////////

// foro inferiore
translate([base_x/2, base_y/2, base_h + foro_offset])
    rotate([90,0,0])
        cylinder(h = colonna_spess + 2, d = foro_diam, center=true);

// foro superiore
translate([base_x/2, base_y/2, base_h + colonna_h - foro_offset])
    rotate([90,0,0])
        cylinder(h = colonna_spess + 2, d = foro_diam, center=true);

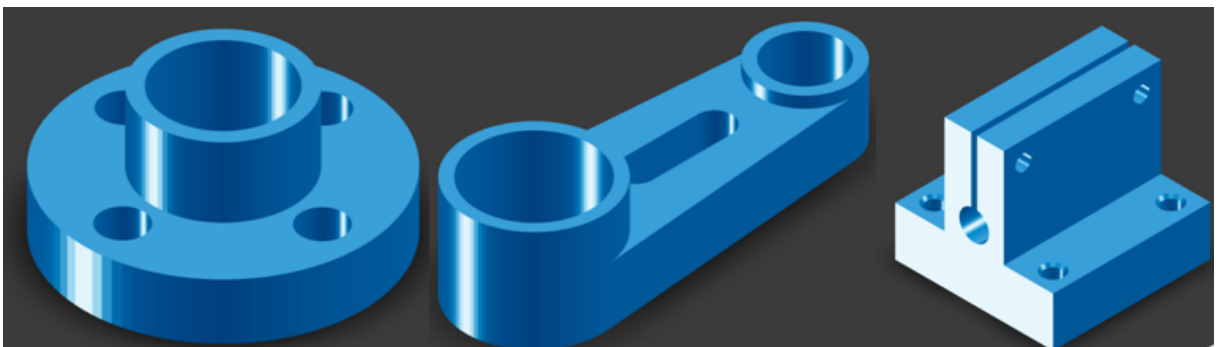
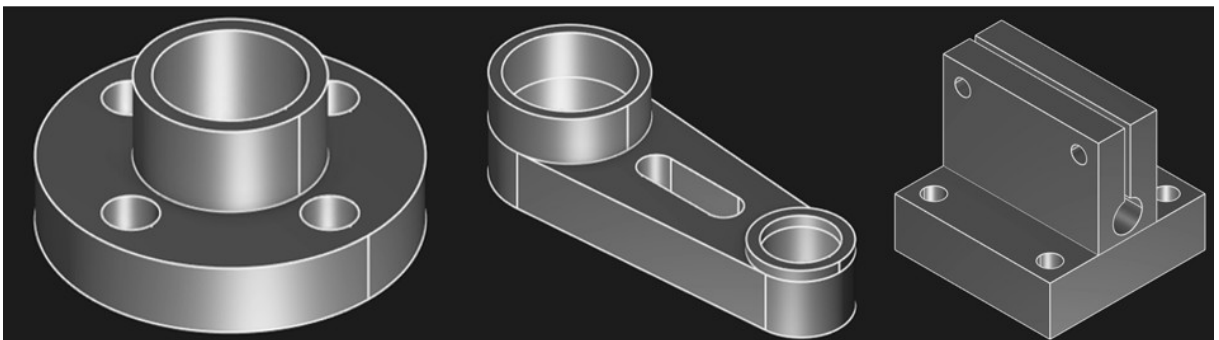
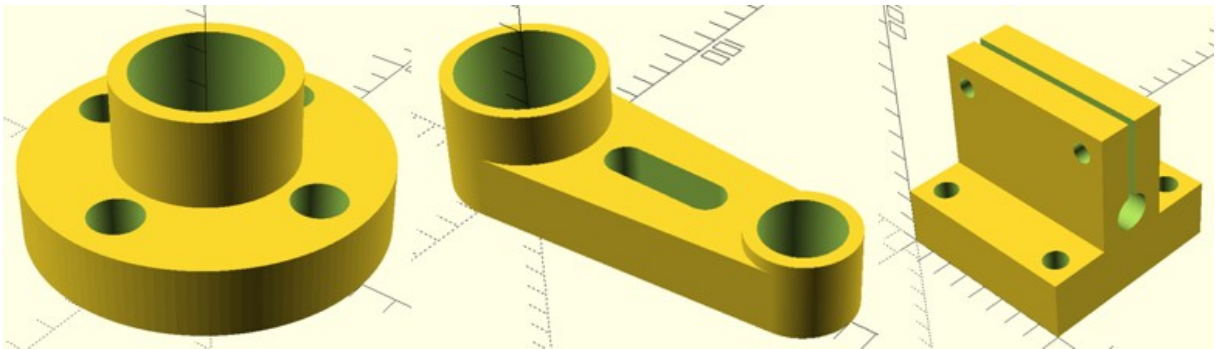
////////////////////////
// FORO SUPERIORE + ASOLA
////////////////////////

// foro circolare
translate([base_x/2, base_y/2, base_h + colonna_h + piastra_spess/2])
    rotate([90,0,0])
        cylinder(h = piastra_spess + 2, d = foro_superiore_diam, center=true);

```

```
// asola verticale
translate([base_x/2 - asola_larg/2, base_y/2 - asola_larg/2,
        base_h + colonna_h + piastra_spess/2 - asola_altezza/2])
cube([asola_larg, piastra_spess + 2, asola_altezza], center=false);
}
```

8.7 Modelli creati con il work flow del prompt testuale



8.8 Modelli creati con il work flow dell'immagine

