



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica
Sessione di Laurea – Luglio 2026

Studio di una metodologia di sviluppo innovativa in ambiente integrato: caso studio di robot articolato

Relatori:

Prof. Terenziano Raparelli
Prof.ssa Daniela Maffiodo

Candidato:

Umberto Libero
Matricola 348216

Anno Accademico 2025/2026

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Contesto industriale	3
1.2	Problema	3
1.3	Obiettivo	3
2	Stato dell'arte	6
2.1	Robot antropomorfi industriali	6
2.2	Progettazione MBSE	7
2.3	Analisi strutturale FEM	9
2.4	Ottimizzazione topologica	10
3	Metodologia innovativa	11
3.1	Requisiti e CAD	13
3.2	Simulazione FEM	15
3.3	Ottimizzazione	16
4	Prototipo Dassault	18
4.1	Descrizione	18
4.2	Requisiti e CAD	20
4.3	Simulazione strutturale	22
4.4	Ottimizzazione criticità	25
5	Applicazione sul robot Comau	33
5.1	Descrizione	34
5.2	Modello FEM	39
5.3	Analisi risultati	42
6	Conclusioni e Sviluppi futuri	51
6.1	Introduzione dei contatti	51
6.2	Analisi a fatica	52
6.3	Fenomeni non lineari	52

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Contesto industriale

Nel contesto dell'automazione industriale, i robot antropomorfi rappresentano una delle architetture più diffuse grazie alla loro elevata flessibilità operativa e alla capacità di riprodurre movimenti articolati, adattandosi a diverse tipologie di lavoro. Questi sistemi trovano applicazione in numerosi ambiti, tra cui la manipolazione di oggetti, l'assemblaggio e la saldatura, in cui è richiesta elevata precisione. La progettazione di questi risulta tuttavia complessa, in quanto coinvolge numerose discipline e fasi di sviluppo: dal punto di vista strutturale per esempio, questi sistemi sono soggetti a condizioni di carico complesse, dovute alla combinazione tra peso proprio, masse movimentate, configurazioni cinematiche e sollecitazioni locali sui giunti.

1.2 Problema

Nella progettazione di robot antropomorfi industriali, le diverse fasi di sviluppo, a partire dalla definizione dei requisiti, la modellazione CAD e le successive simulazioni, vengono spesso affrontate separatamente, utilizzando strumenti e metodologie differenti, rendendo difficile una validazione coerente dell'intero progetto. Il risultato è un maggior rischio di errori, incoerenze e inefficienza di lavoro.

1.3 Obiettivo

L'obiettivo della tesi è sviluppare una metodologia integrata per la progettazione e l'analisi strutturale di un modello di braccio robotico antropomorfo, collegando insieme requisiti funzionali, modello CAD, simulazione FEM e relativa ottimizzazione. Il lavoro è articolato in sei capitoli. A seguito dell'introduzione, viene presentato lo stato dell'arte relativo alla robotica antropomorfa industriale, alla simulazione FEM e all'ottimizzazione strutturale. Successivamente viene descritta la metodologia proposta, applicata prima in un modello sviluppato internamente in Dassault Systemes per validare la strategia e, solo in seguito, ad un robot reale fornito direttamente dall'azienda Comau. Infine, basandosi sui confronti

tra il robot ideale rappresentato dal modello e quello reale importato da Comau, vengono presentati possibili risvolti futuri, alla luce di necessità e limitazioni riscontrate durante l'analisi.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Robot antropomorfi industriali

I **robot antropomorfi industriali** sono sistemi meccanici costituiti da una catena cinematica articolata, generalmente composta da più giunti rotazionali. Questa configurazione consente un elevato numero di gradi di libertà, permettendo al robot di raggiungere posizioni ed orientamenti differenti nello spazio di lavoro. Dal punto di vista strutturale però, la presenza di più bracci e giunti comporta una distribuzione complessa delle sollecitazioni: i carichi derivanti dal peso proprio del sistema e dalle forze esterne applicate tendono a propagarsi lungo la struttura, concentrandosi in particolare in corrispondenza dei giunti, che rappresentano perciò le zone più critiche.

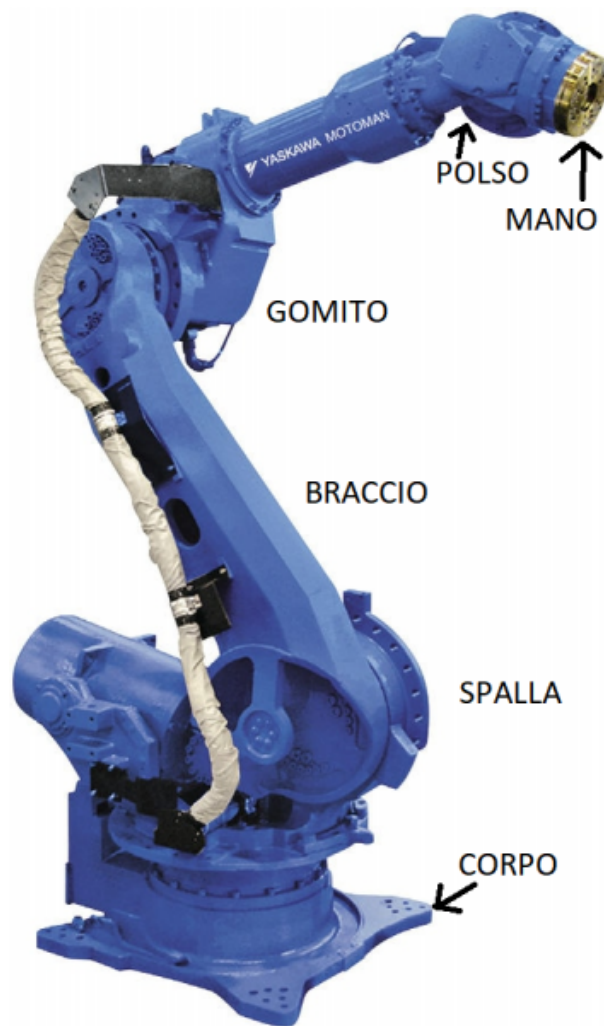


Figura 2.1: Prototipo di braccio robotico antropomorfo

2.2 Progettazione MBSE

L'approccio **Model Based Systems Engineering** rappresenta una metodologia di sviluppo costruita principalmente su documenti digitali utilizzati per progettare, analizzare e gestire sistemi complessi, con un approccio focalizzato al modello digitale. In un contesto ingegneristico moderno, caratterizzato dall'interazione tra differenti discipline quali progettazione meccanica, elettronica, automazione e simulazione numerica, la documentazione testuale risulta spesso insufficiente per garantire la corretta gestione delle informazioni e la loro tracciabilità. Il principio fondamentale del MBSE consiste nella creazione di un

modello digitale strutturato che diventa la principale fonte di informazione durante l'intero ciclo vita del prodotto. All'interno di tale modello vengono raccolti e correlati requisiti, funzioni, architetture di sistema, componenti fisici e criteri di validazione, permettendo una visione coerente e condivisa di un intero progetto.

A differenza del tradizionale approccio documentale dove le informazioni sono distribuite tra specifiche tecniche, fogli di calcolo e disegni spesso indipendenti tra loro, il MBSE permette di definire esplicitamente le relazioni esistenti tra i diversi attori del sistema. Ogni requisito può essere collegato alle funzioni che lo soddisfano, ai componenti che ne interpretano il significato fisico e alle attività di validazione come la simulazione. Questo processo garantisce totale tracciabilità delle decisioni progettuali e consente di valutare rapidamente eventuali modifiche sul complessivo. In questo modo il modello virtuale non rappresenta solamente una documentazione del progetto, ma diventa il protagonista di un processo di sviluppo.

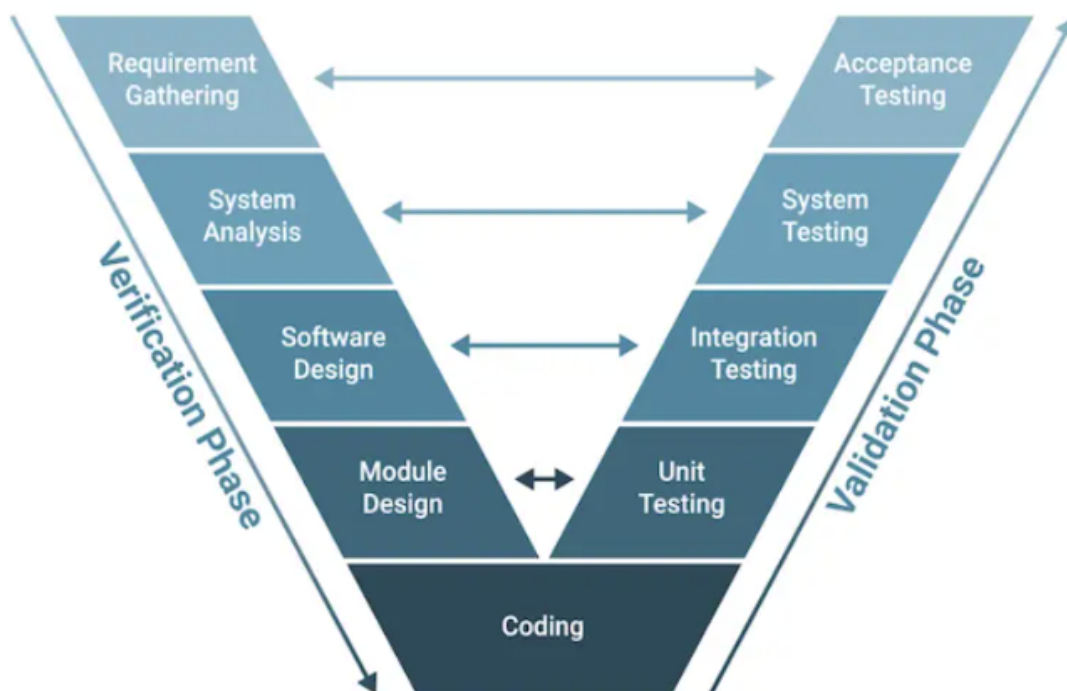


Figura 2.2: Struttura della progettazione MBSE

2.3 Analisi strutturale FEM

Il metodo degli elementi finiti (Finite Element Model, FEM) è una tecnica di calcolo numerico molto utilizzata per l'analisi del comportamento meccanico di strutture complesse. Come si evidenzia in Figura 2.3, il metodo si basa sulla discretizzazione del dominio continuo in un insieme finito di elementi, connessi tra loro tramite nodi. Ad ogni elemento è associata un'equazione che descrive il comportamento fisico locale del materiale, in modo che un problema continuo venga suddiviso in un sistema discreto risolvibile numericamente. Nel contesto della robotica industriale, utilizzare un modello FEM per svolgere le simulazioni, permette di conoscere la risposta strutturale del prototipo sotto diverse condizioni di carico. Nello specifico permette di individuare le zone maggiormente sollecitate e di verificare il rispetto dei limiti di resistenza e rigidità dei materiali.

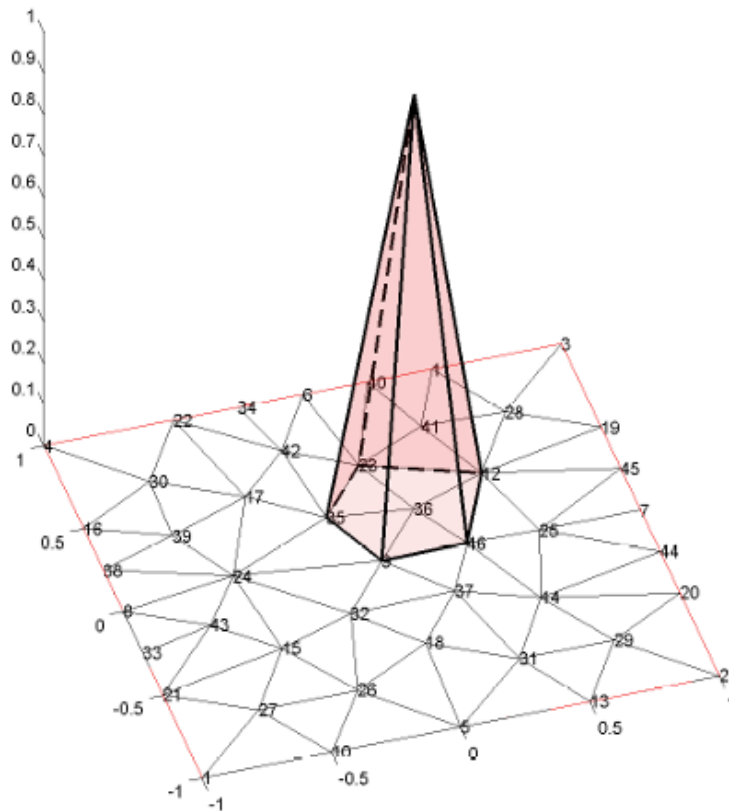


Figura 2.3: Discretizzazione del dominio mediante elementi finiti

La definizione del modello FEM richiede la specifica di diversi elementi, tra cui la geometria del sistema, le proprietà dei materiali, le condizioni al contorno e le azioni esterne applicate. La qualità dei risultati dipende fortemente dalla corretta definizione di tali parametri e soprattutto dalla scelta di una *mesh* accurata, ovvero di una discretizzazione ottimale per un determinato caso studio.

2.4 Ottimizzazione topologica

L'ottimizzazione topologica permette di individuare una distribuzione efficiente del materiale all'interno di un dominio di progetto, in funzione di obiettivi prestazionali e vincoli assegnati. A differenza delle tradizionali ottimizzazioni che agiscono su parametri geometrici, l'ottimizzazione topologica interviene direttamente sulla forma e struttura del componente: il processo prevede la definizione di un dominio di progetto, all'interno del quale il materiale può essere distribuito liberamente, e di specifiche condizioni al contorno come vincoli e carichi. Viene inoltre definito un obiettivo, che può consistere per esempio nella minimizzazione della massa o massimizzazione della rigidità. Tramite processi iterativi, l'algoritmo di ottimizzazione rimuove progressivamente il materiale nelle zone meno sollecitate, mantenendolo inalterato nelle zone in cui è necessario garantire prestazioni strutturali. Il risultato è una configurazione del pezzo caratterizzata da una distribuzione efficiente del materiale.

In Figura 2.4 si riporta un esempio di questa tecnologia

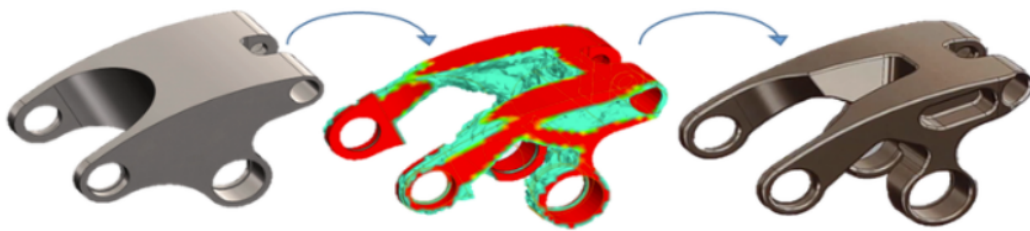


Figura 2.4: Ottimizzazione topologica di un componente meccanico

Nel contesto di questo progetto, l'ottimizzazione topologica viene applicata al componente meccanico maggiormente sollecitato, individuato mediante analisi FEM, in modo da poter effettuare un'operazione di *redesign* del medesimo e inserirlo nel CAD completo come sostituto del pezzo critico. Tramite questo processo è possibile ottenere un *Digital Twin* unico e affidabile, perfettamente replicabile nel contesto reale.

Capitolo 3

Metodologia innovativa

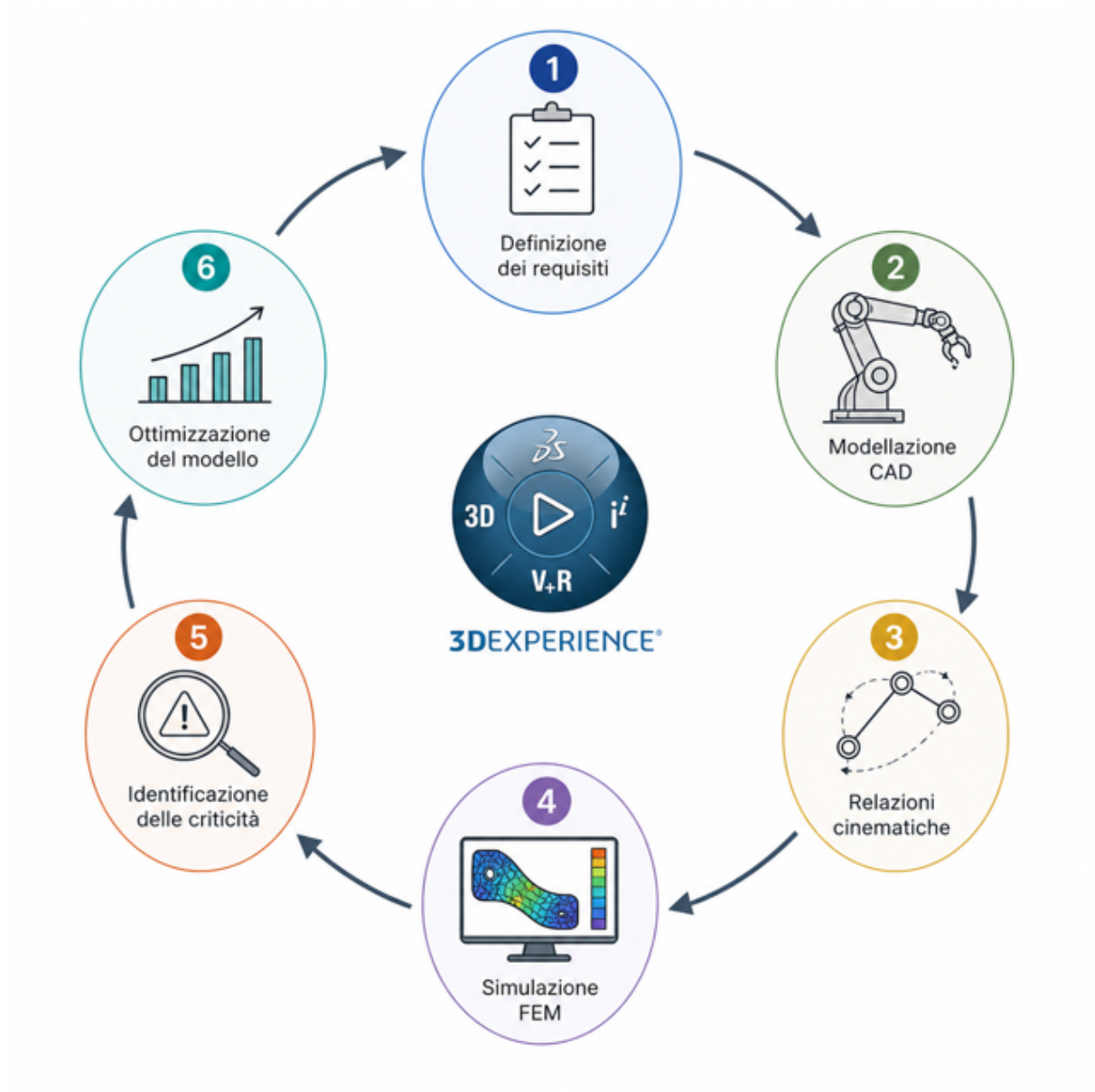


Figura 3.1: Workflow del progetto

La metodologia proposta in Figura 3.1 si basa su un *workflow integrato* che collega in un unico ambiente la definizione dei requisiti funzionali, la modellazione CAD, la simulazione e l'ottimizzazione di componenti meccanici. Per fare questo si è utilizzata la piattaforma *3DEXPERIENCE*, sviluppata dall'azienda *Dassault Systemes*: un ambiente digitale integrato che supporta l'intero ciclo di sviluppo del prodotto. A differenza degli approcci tradizionali, nei quali diversi strumenti software vengono utilizzati separatamente per le diverse fasi del processo progettuale, la *3DEXPERIENCE* si basa su un'architettura unificata che consente di operare all'interno di un unico ecosistema. Dal punto di vista concettuale, la piattaforma può essere vista come un ambiente collaborativo basato su dati condivisi, nel quale modelli, simulazioni e informazioni di progetto sono centralizzati e costantemente aggiornati. Questo approccio consente di garantire coerenza tra le diverse attività e di ridurre il rischio di inconsistenze dovute al trasferimento manuale dei dati tra software differenti. Nel contesto del presente lavoro, la piattaforma *3DEXPERIENCE* è stata utilizzata per integrare diverse attività ingegneristiche. In particolare, sono stati impiegati strumenti di definizione dei requisiti di un braccio robotico come **CATIA Magic**, di modellazione CAD come **Solidworks** e strumenti di simulazione strutturale appartenenti alla sezione **SIMULIA**, come **Abaqus**; infine il tool **Dymola** è stato utilizzato per la rappresentazione del comportamento del sistema a livello funzionale. L'integrazione di questi strumenti all'interno della stessa piattaforma consente di mantenere un collegamento diretto tra le diverse fasi del processo progettuale. In particolare, il modello CAD può essere utilizzato direttamente per la simulazione strutturale, evitando la necessità di esportazioni e conversioni, in modo che le modifiche apportate alla geometria risultino immediatamente disponibili per le successive analisi. Tra i principali vantaggi della piattaforma *3DEXPERIENCE* si evidenziano la gestione centralizzata dei dati, la tracciabilità delle modifiche, la collaborazione tra diversi attori e la possibilità di implementare workflow integrati. Questi aspetti risultano particolarmente rilevanti in ambito industriale, dove la complessità dei sistemi richiede strumenti in grado di garantire coerenza, efficienza e affidabilità lungo tutto il processo di sviluppo.

3.1 Requisiti e CAD

La prima fase consiste nella definizione dei requisiti funzionali che descrivono le capacità operative richieste al robot, (Figura 3.2), con particolare attenzione ai movimenti dei singoli giunti. Questi requisiti costituiscono la base per lo sviluppo del modello CAD, che deve rispettare le configurazioni cinematiche previste.

#	Name	Text
1	1 Compact Design	The robotic arm shall have a compact design to fit in various workspaces on office table environment.
2	2 Compact packaging	The robotics arm shall be packaged in compact package for easy shipping.
3	4 Compatibility with Arduino	The robotic arm kit shall be compatible with Arduino microcontrollers.
4	5 Customizable Gripper	The robotic arm shall have a customizable gripper that can be adapted for different tasks.
5	6 Easy Assembly	The robotic arm kit shall be easy to assemble with clear instructions provided in one hour.
6	7 Educational Value	The robotic arm kit shall have educational value to teach robotics and programming concepts.
7	8 Expandable	The robotic arm kit shall be expandable with additional modules or accessories for enhanced functionality.
8	9 Modular Design	The robotic arm shall have a modular design for easy maintenance and upgrades.
9	11 Programmable Actions	The robotic arm shall be programmable to perform a sequence of actions autonomously.
10	12 Smooth Movements	The robotic arm shall move smoothly and without jerking motions for precise control.
11	13 Sturdy Construction	The robotic arm shall be constructed with durable materials to ensure longevity and stability.
12	14 User-Friendly Interface	The robotic arm shall have a user-friendly interface for easy operation and programming.
13	2 5 Degrees of Freedom	The robotic arm shall have 5 degrees of freedom for versatile movement.

Figura 3.2: Esempio di file di gestione dei requisiti

Per fare questo si è utilizzato il software CATIA magic che, pur non essendo direttamente integrato nella piattaforma, ha comunque la possibilità di collegarsi alla 3DEXPERIENCE in modo che, qualunque modifica apportata alla gestione dei requisiti, venga aggiornata anche su di essa. Per completezza si riporta di seguito (Figura 3.3) anche la *Magic Grid* del relativo esempio di robot meccanico: ciascuna voce contiene le specifiche tecniche che, una volta importante sul modellatore solido, consentono di imporre dei limiti di costruzione e movimentazione.

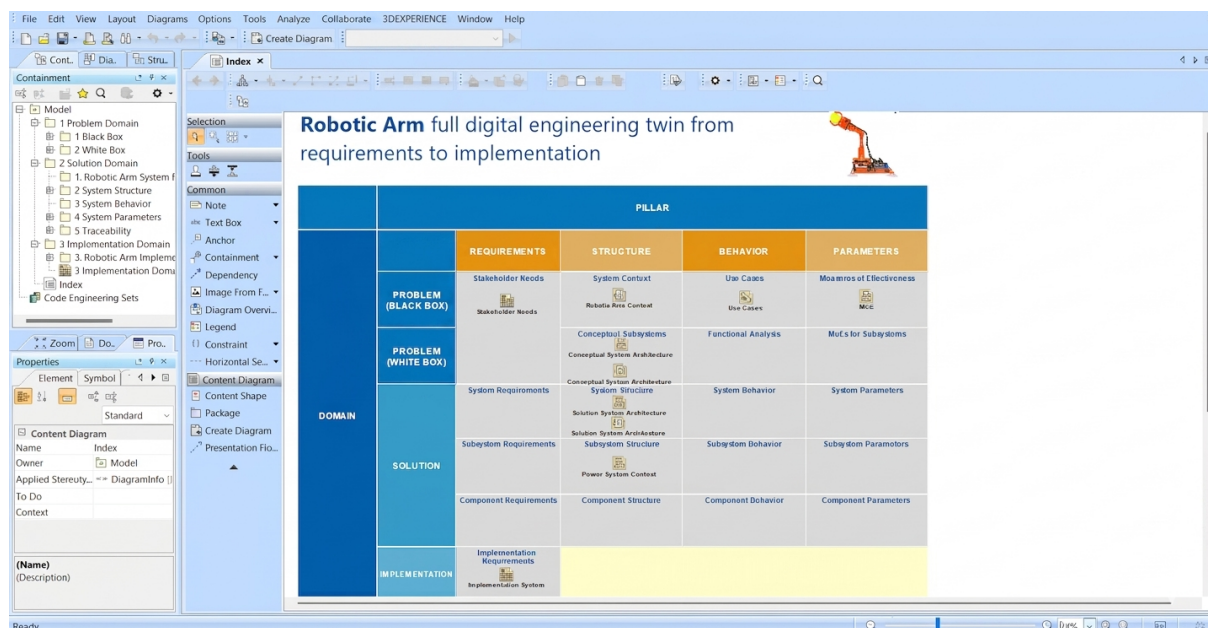


Figura 3.3: Esempio di MagicGrid della gestione dei requisiti di un braccio robotico

La fase successiva alla definizione dei requisiti consiste nello sviluppo del modello CAD tridimensionale del prodotto. Per questa attività si è utilizzato il software *Solidworks*, uno strumento di progettazione parametrica che permette di realizzare geometrie complesse, pur mantenendo un'elevata flessibilità nella modifica del modello. L'approccio parametrico consente infatti di aggiornare rapidamente dimensioni, configurazioni e caratteristiche dei componenti in funzione dell'evoluzione dei requisiti progettuali.

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dall'integrazione con la piattaforma 3DEXPERIENCE, che permette di inserire il modello CAD all'interno di un ambiente collaborativo unico. Attraverso questa connessione è possibile mantenere continuità digitale tra progettazione e successive simulazioni, evitando errori durante il trasferimento verso strumenti di analisi FEM.

3.2 Simulazione FEM

Il modello CAD viene successivamente preparato per l'analisi strutturale. Questa fase include la semplificazione della geometria, eliminando dettagli non significativi ai fini dell'analisi FEM, quali raccordi o elementi che non influenzano in maniera significativa la risposta strutturale, con l'obiettivo di ridurre il costo computazionale, pur mantenendo l'accuratezza del modello.

Successivamente viene definito lo scenario di simulazione, assegnando ai vari componenti le proprietà fisiche necessarie per descriverne il comportamento reale. Nello specifico, si assegnano i materiali, definiscono le mesh di discretizzazione e le condizioni al contorno del sistema. A queste si aggiungono le modellazioni delle interazioni tra componenti attraverso connessioni e vincoli cinematici, oltre all'applicazione dei carichi esterni in funzione delle condizioni operative richieste.

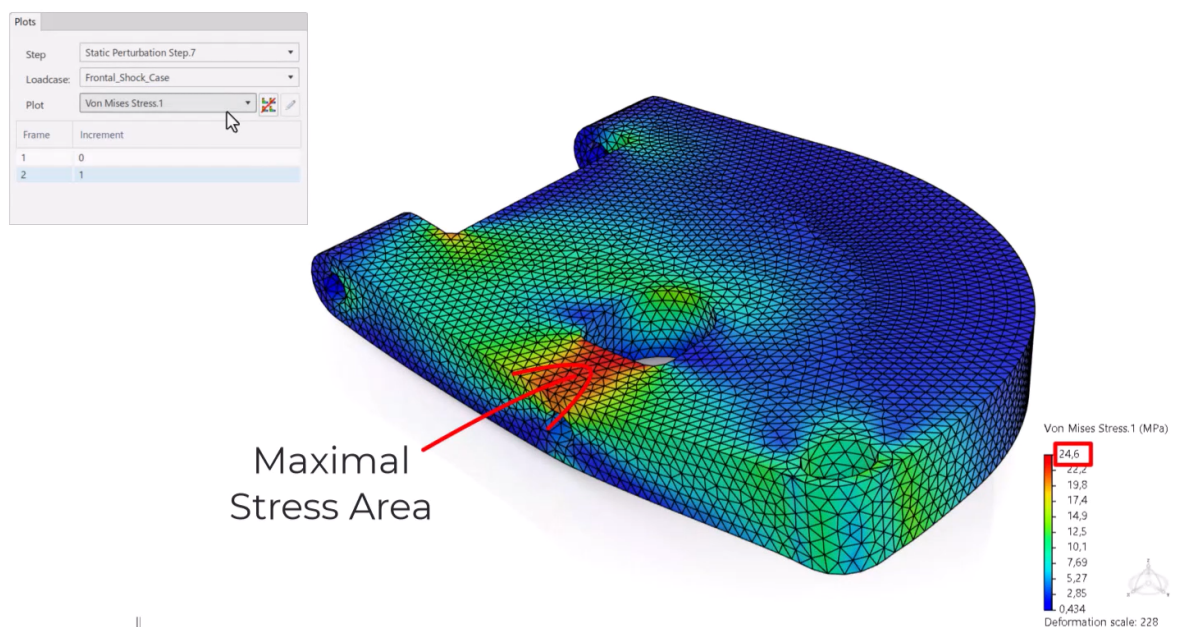


Figura 3.4: Analisi FEM di un componente meccanico

Una volta completata la simulazione, la fase di *post-processing* consente di analizzare gli output definiti nel caso studio. A seconda della tipologia di analisi è possibile infatti valutare differenti grandezze fisiche, quali spostamenti, deformazioni, tensioni e altri parametri rappresentativi del comportamento strutturale del componente.

Nel caso dell'analisi strutturale, uno degli output più significativi è rappresentato dalla tensione equivalente di Von Mises. Questo criterio permette di combinare lo stato ten-

sionale tridimensionale del materiale in un unico valore scalare equivalente, permettendo un confronto diretto con il limite di snervamento. Attraverso la rappresentazione grafica della distribuzione delle tensioni, il software consente di individuare immediatamente le aree maggiormente sollecitate e quindi di conseguenza quelle più critiche, sulle quali concentrare eventuali modifiche progettuali.

3.3 Ottimizzazione

A partire dai risultati della simulazione strutturale ad elementi finiti, viene individuato il componente maggiormente sollecitato. Esso viene considerato oggetto di una successiva ottimizzazione, al fine di migliorare specifici target di progetto. L'ottimizzazione viene impostata definendo il dominio di progetto, le regioni da preservare (atte per esempio ad ospitare la sede di una vite), i vincoli imposti e l'obiettivo finale. Un esempio può essere l'ottimizzazione topologica di una parte, che si propone di migliorare la forma dell'oggetto, massimizzando la rigidità e riducendo al minimo la massa: questo processo viene eseguito agendo sulle zone meno sollecitate strutturalmente, ovvero quelle in cui è possibile l'asportazione di materiale.

Capitolo 4

Prototipo Dassault

In questo capitolo si riporta l'applicazione del metodo precedentemente descritto, al fine di validarlo su un *Digital Twin* coerente, per poi replicarlo nel caso reale su un robot Comau.

4.1 Descrizione

La prima analisi riguarda il modello di braccio robotico antropomorfo rappresentato in Figura 4.1, sviluppato internamente in Dassault Systemes. Esso è utilizzato come ambiente di prova per costruire e validare la metodologia proposta nei capitoli precedenti.

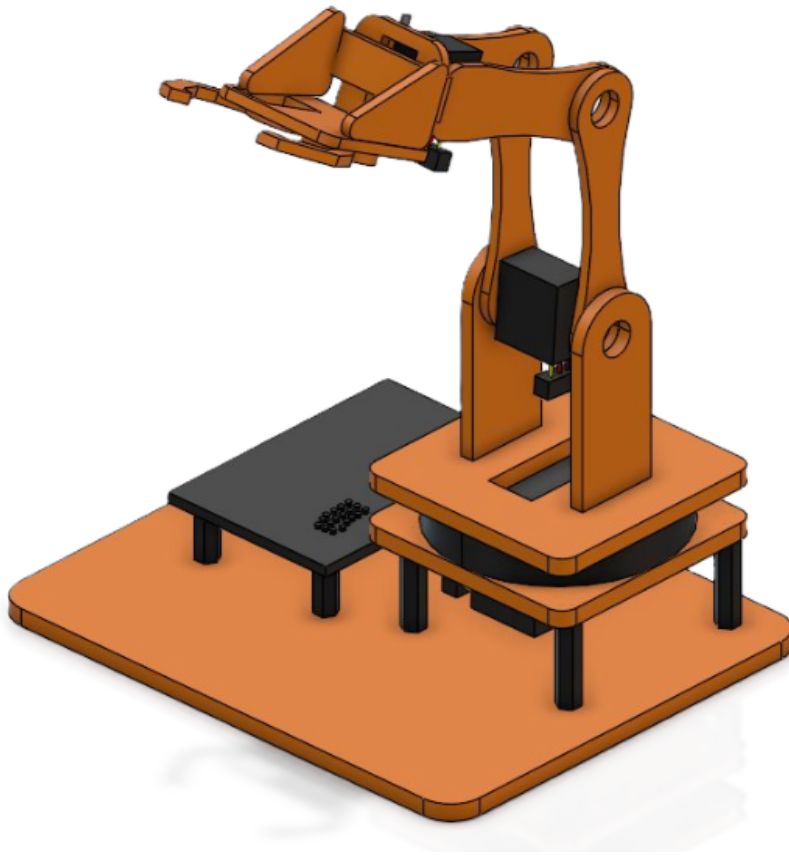


Figura 4.1: Modello CAD

Il robot è costituito da una base fissa quadrata di 180 mm di lato che rappresenta il riferimento, sulla quale è installata una piattaforma rotante quadrata di lato 90 mm. La struttura del manipolatore è composta da due segmenti mobili: il primo braccio di lunghezza 120 mm e il secondo di 110 mm, collegati tra loro mediante giunti rotazionali. All'estremità del meccanismo è presente una pinza di afferraggio lunga 70 mm, collegata saldamente ad una base d'appoggio quadrata di lato 40 mm, a sua volta unita da cinematici rotazionali al braccio del robot. L'intero sistema è costituito quindi da quattro giunti (J_1 , J_2 , J_3 , J_4) che definiscono la cinematica del braccio, e da una pinza terminale la cui apertura e chiusura determina il quinto grado di libertà. Le dimensioni complessive del robot risultano pari a 230 mm di lunghezza, 160 mm di larghezza e 260 mm di altezza.

E' importante sottolineare che il modello considerato in questa fase non rappresenta un sistema industriale reale, bensì costituisce un caso studio semplificato, utile per lavorare in un contesto controllato, nel quale è possibile costruire e validare progressivamente la metodologia proposta nei capitoli precedenti.

4.2 Requisiti e CAD

#	Name	Text
1	1 Compact Design	The robotic arm shall have a compact design to fit in various workspaces on office table environment.
2	3 Compact packaging	The robotics arm shall be packaged in compact package for easy shipping.
3	4 Compatibility with Arduino	The robotic arm kit shall be compatible with Arduino microcontrollers.
4	5 Customizable Gripper	The robotic arm shall have a customizable gripper that can be adapted for different tasks.
5	6 Easy Assembly	The robotic arm kit shall be easy to assemble with clear instructions provided in one hour.
6	7 Educational Value	The robotic arm kit shall have educational value to teach robotics and programming concepts.
7	8 Expandable	The robotic arm kit shall be expandable with additional modules or accessories for enhanced functionality.
8	9 Modular Design	The robotic arm shall have a modular design for easy maintenance and upgrades.
9	11 Programmable Actions	The robotic arm shall be programmable to perform a sequence of actions autonomously.
10	12 Smooth Movements	The robotic arm shall move smoothly and without jerking motions for precise control.
11	13 Sturdy Construction	The robotic arm shall be constructed with durable materials to ensure longevity and stability.
12	14 User-Friendly Interface	The robotic arm shall have a user-friendly interface for easy operation and programming.
13	2 5 Degrees of Freedom	The robotic arm shall have 5 degrees of freedom for versatile movement.

Figura 4.2: Definizione dei requisiti in CATIA Magic

I requisiti funzionali del robot mostrati in Figura 4.2 sono stati definiti con il software CATIA magic, con particolare attenzione ai movimenti richiesti ai giunti e ai relativi gradi di libertà. Questa fase iniziale permette di trasformare le esigenze progettuali del sistema in un insieme strutturato di requisiti tecnici, mantenendo una connessione tra gli obiettivi del progetto e le successive attività di sviluppo.

Nel caso specifico del braccio robotico analizzato, è stata posta particolare attenzione ai requisiti in merito alla movimentazione del sistema, identificando i giunti responsabili del movimento e i relativi gradi di libertà. Sono quindi state definite le caratteristiche cinematiche principali del robot, quali gli assi di rotazione, i range di movimento e le configurazioni operative di esso.

A partire dai requisiti definiti nella fase precedente, è stato successivamente sviluppato il modello CAD del robot (Figura 4.1) attraverso software Solidworks. In seguito è stato integrato nella piattaforma 3DEXPERIENCE, dove è stato possibile definire la movimentazione attraverso l'introduzione delle relazioni cinematiche tra componenti. In figura 4.3 si osserva un esempio della movimentazione ottenuta, nella quale è possibile apprezzare l'evoluzione temporale dei diversi giunti del braccio in funzione dei requisiti impostati.

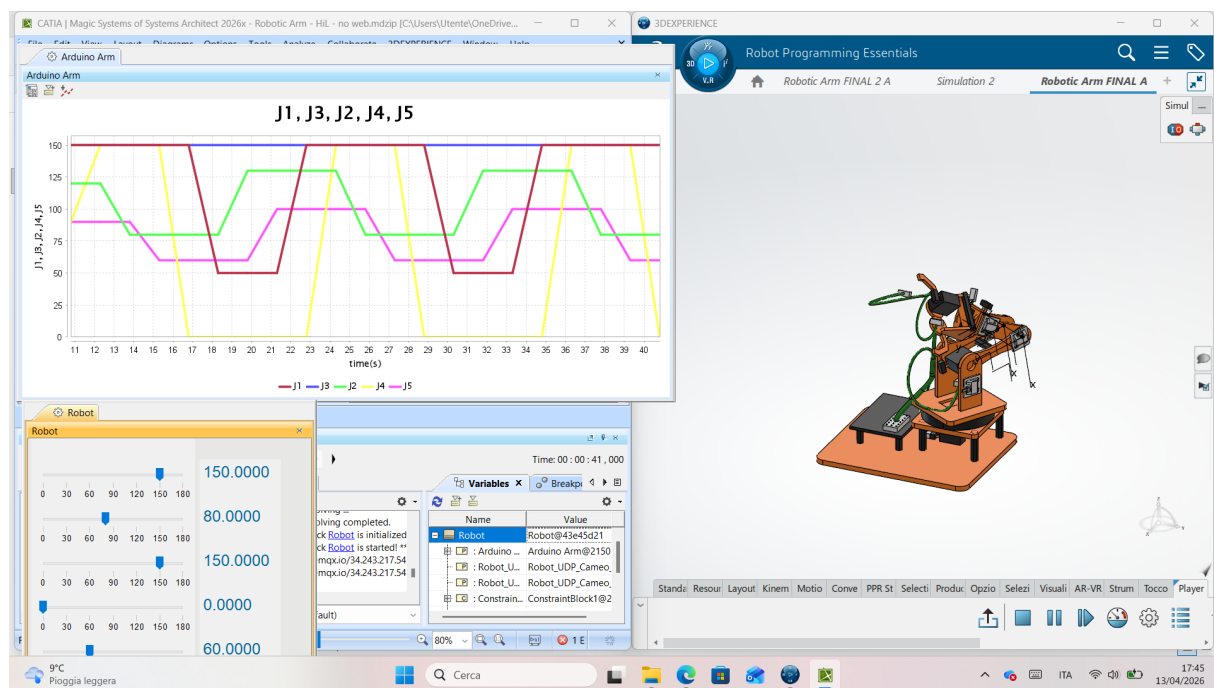


Figura 4.3: Movimentazione del robot in funzione dei requisiti

Le traiettorie assegnate ai diversi giunti derivano direttamente dai requisiti funzionali definiti nella fase di progettazione e consentono di verificare in modo preliminare la correttezza cinematica del manipolatore. Il grafico a sinistra, generato in CATIA Magic, riporta l'andamento temporale delle posizioni angolari dei quattro giunti rotazionali (J1, J2, J3, J4, J5). Nello specifico J1 rappresenta il giunto di rotazione della base, mentre J2, J3 e J4 descrivono rispettivamente le rotazioni dei successivi segmenti del braccio fino al componente terminale.

Per ciascun giunto viene definita una legge di moto che stabilisce l'evoluzione delle posizioni angolari nel tempo, nel rispetto delle condizioni di vincolo cinematiche e dei requisiti funzionali imposti. Sulla base di tali informazioni, CATIA Magic permette di generare automaticamente un ciclo-prova, ovvero una sequenza completa di movimenti coordinati del manipolatore, ottenuta dalla sincronizzazione delle traiettorie dei giunti. L'obiettivo di questa simulazione è verificare che il robot sia effettivamente in grado di eseguire il comportamento richiesto senza violare i vincoli cinematici definiti dal modello, e individuare preventivamente eventuali incongruenze tra i movimenti.

La rappresentazione tridimensionale mostrata a destra della Figura 4.3, rappresentata in ambiente 3DEXPERIENCE, consente di visualizzare l'esecuzione reale del ciclo-prova im-

posto e di confermare qualitativamente le corrette configurazioni assunte dal manipolatore, prima di procedere con le successive analisi.

4.3 Simulazione strutturale

Il modello CAD è stato successivamente trasferito nell'ambiente di simulazione Abaqus, sempre integrato nella piattaforma *3DEXPERIENCE*. In questa fase sono stati definiti tutti gli elementi necessari per l'esecuzione di un'analisi strutturale, tra cui le proprietà materiali, i vincoli, i carichi applicati e la discretizzazione ad elementi finiti (mesh) (Figura 4.4) dei componenti interessati al calcolo. Queste informazioni consentono di valutare il comportamento del manipolatore in condizioni di esercizio rappresentative attraverso simulazioni statiche preliminari.

E' tuttavia importante sottolineare che il robot analizzato costituisce un modello dimostrativo, sviluppato con finalità metodologiche e non associato ad una specifica applicazione industriale. Di conseguenza, tutti i parametri necessari alla simulazione, quali la scelta dei materiali, le velocità, le accelerazioni e i carichi trasportati, sono stati definiti in modo razionale e ingegneristicamente coerente, al fine di riprodurre condizioni operative realistiche. Pur non derivando da un' applicazione concreta, queste ipotesi consentono di validare la metodologia proposta e di verificarne il corretto funzionamento prima della sua integrazione in un contesto reale di produzione.

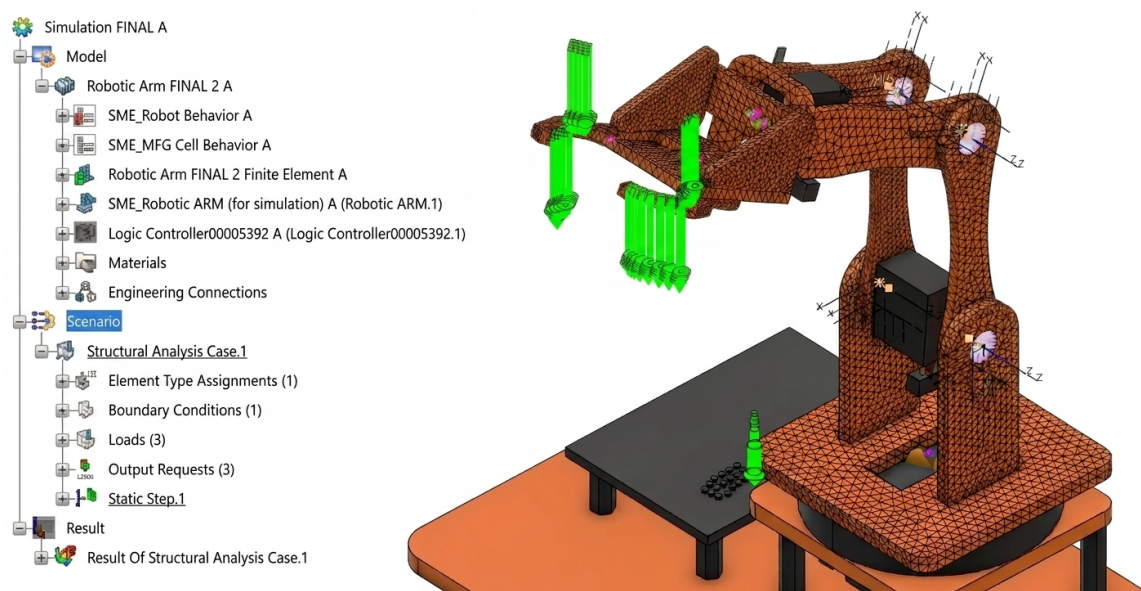


Figura 4.4: Preparazione del modello alla simulazione

Come si osserva in Figura 4.4, è stato ipotizzato uno scenario di simulazione che fosse quanto più realistico possibile, compatibilmente con l'utilizzo puramente dimostrativo che il robot ha in merito allo sviluppo della tecnologia *End-to-End*. La base d'appoggio è considerata fissa al suolo tramite la funzione *Fixed Displacement* che ne vincola spostamenti lineari e rotazionali in qualunque direzione. Il materiale è il PMMA, con modulo di Young pari a 3,3 GPa, densità di 1180 kg/m³ e coefficiente di Poisson di 0,4. Per questa tipologia di simulazione strutturale, non è di interesse conoscere il comportamento plastico e dunque non risulta necessario definire le proprietà plastiche del polimero. Le connessioni sono di tipo *Tie* quando due pezzi sono fissati tra loro, mentre di tipo *Connector* se è permessa la loro rotazione relativa attorno all'asse. Infine, oltre alla gravità applicata all'intero modello, viene imposto un carico concentrato sull'end-effector in corrispondenza delle pinze, finalizzato a simulare la presenza di un oggetto realmente afferrato dal manipolatore. L'entità della forza è stata scelta in modo da rappresentare un *payload* compatibile con le dimensioni e il materiale del robot, consentendo di riprodurre una condizione di esercizio realistica.

Una volta completata la definizione dello scenario di simulazione, è possibile lanciare la simulazione strutturale statica agli elementi finiti per analizzare i risultati ottenuti. Ciascun elemento della mesh possiede una propria rigidità, dipendente dalle proprietà del materiale assegnato e dalla geometria. Il comportamento globale della struttura viene ottenuto considerando il contributo di tutti gli elementi della discretizzazione. Il problema viene quindi ricondotto alla risoluzione del sistema:

$$Ku = F$$

in cui K rappresenta la matrice di rigidità globale del sistema, F il vettore dei carichi applicati e u il vettore degli spostamenti incogniti. Il solutore calcola quindi gli spostamenti dei nodi della mesh e da questi determina deformazioni e tensioni dei componenti. Una volta determinati gli spostamenti u , il software ricava le deformazioni presenti negli elementi della mesh, valutando la variazione degli spostamenti nello spazio:

$$\varepsilon = Bu$$

ε rappresenta il vettore delle deformazioni e B è la matrice delle funzioni forma dell'elemento finito, che permette di collegare gli spostamenti alle deformazioni.

Infine, attraverso il modello costitutivo del materiale assegnato, si determina lo stato tensionale. Nel caso di un materiale elastico lineare, questa relazione è data dalla legge di Hook per cui:

$$\sigma = D\varepsilon$$

dove σ rappresenta il vettore delle tensioni e D la matrice costitutiva del materiale, definita attraverso le proprietà fisiche quali il modulo di Young E e il coefficiente di Poisson ν . Le tensioni ottenute vengono infine combinate attraverso il criterio di Von Mises per ottenere una tensione equivalente, utile per individuare le zone maggiormente sollecitate

e confrontarle con i limiti del materiale.

L'obiettivo di questa fase non è solamente quello di verificare la resistenza strutturale, ma soprattutto individuare eventuali criticità progettuali e comprendere la distribuzione delle tensioni su di esse.

In Figura 4.5 si possono osservare i risultati ottenuti dalla simulazione.

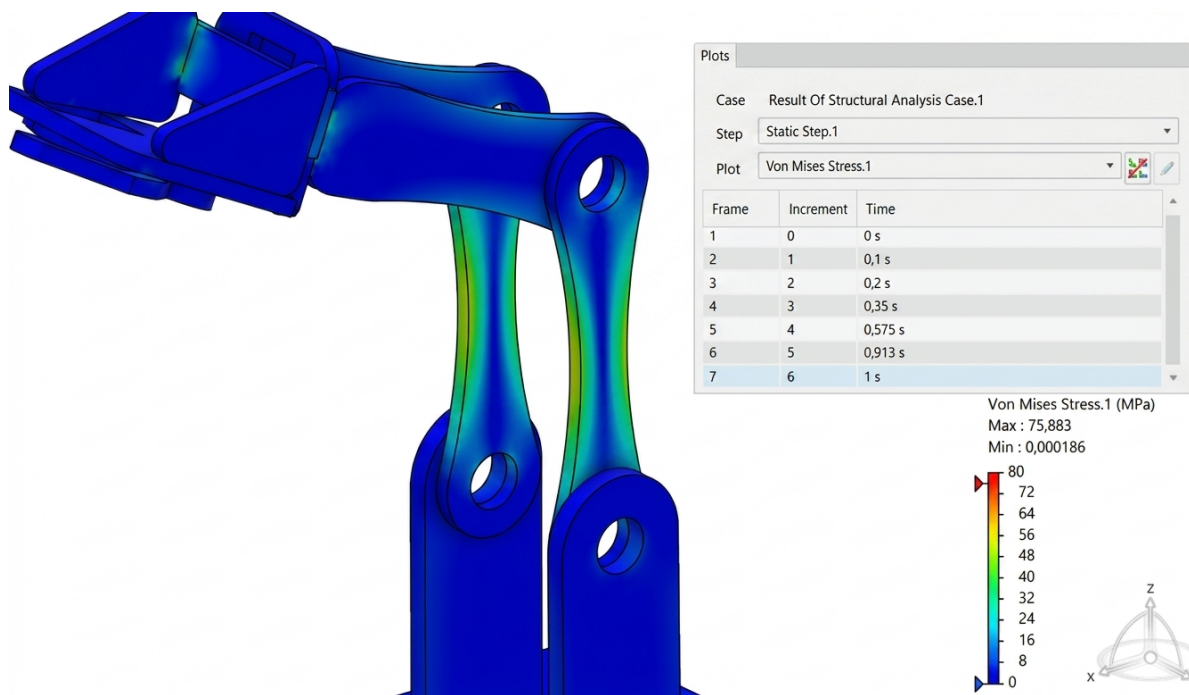


Figura 4.5: Risultati della simulazione strutturale

L'analisi statica ha permesso di valutare il comportamento strutturale del robot nella configurazione di equilibrio corrispondente ai vincoli e carichi applicati, evidenziando la distribuzione delle tensioni di Von Mises all'interno dei componenti. Come si osserva in Figura 4.5, la distribuzione delle tensioni risulta pressochè uniforme nella maggior parte dei componenti, con incrementi localizzati nei bracci più lunghi del manipolatore e nelle aree di raccordo. Questo fenomeno è giustificabile a causa della necessità del braccio di scaricare gli sforzi subiti a valle verso la struttura principale del manipolatore. Le forze si distribuiscono pertanto nelle zone di trasferimento dei carichi, dove l'effetto combinatorio delle forze applicate e del peso proprio produce un incremento delle sollecitazioni locali.

Questo aspetto rappresenta un'indicazione importante dal punto di vista progettuale, in quanto suggerisce la possibilità di redistribuire il materiale in maniera più efficiente, mo-

tivo per cui viene eseguita in seguito un'ottimizzazione topologica del pezzo critico (come spiegato nel paragrafo successivo). Infatti, mentre alcune regioni del robot risultano fortemente sollecitate ed indispensabili per la resistenza strutturale, altre zone appaiono poco utilizzate, motivo per cui costituiscono un potenziale margine di alleggerimento, senza compromettere le prestazioni meccaniche del sistema.

L'obiettivo della simulazione non è quello di effettuare una verifica strutturale definitiva del braccio robotico, bensì di valutare una prima risposta del modello e individuarne le aree maggiormente sollecitate. I risultati ottenuti costituiscono così la base per eventuali successive attività di ottimizzazione progettuale.

4.4 Ottimizzazione criticità

A seguito dell'analisi strutturale presentata nel paragrafo precedente, è stato possibile individuare il componente più sollecitato dell'intero braccio robotico. L'elevata concentrazione delle tensioni riscontrata in questo elemento, in aggiunta al suo ruolo fondamentale per la trasmissione dei carichi, ha portato alla scelta di utilizzarlo per una successiva ottimizzazione topologica.

L'obiettivo di questa fase è di redistribuire il materiale all'interno del componente in modo da conservarlo esclusivamente nelle regioni realmente coinvolte nella trasmissione dei carichi. In questo modo è possibile ridurre la massa del pezzo, mantenendo inalterate le prestazioni strutturali richieste in termini di rigidità e resistenza. Per fare questo si è sfruttato il modulo SIMULIA integrato all'interno della piattaforma 3DEXPERIENCE: questo ha permesso di lavorare sempre sul modello comune, senza la necessità di esportare il pezzo critico, ottimizzarlo ed infine importarlo nuovamente nel CAD generale. Lavorando all'interno della piattaforma integrativa infatti, è stato sufficiente cambiare il tool di programmazione, passando quindi dall'ambiente *Structural Scenario Creation* all'ambiente *Topological Optimization* dello stesso modulo SIMULIA.

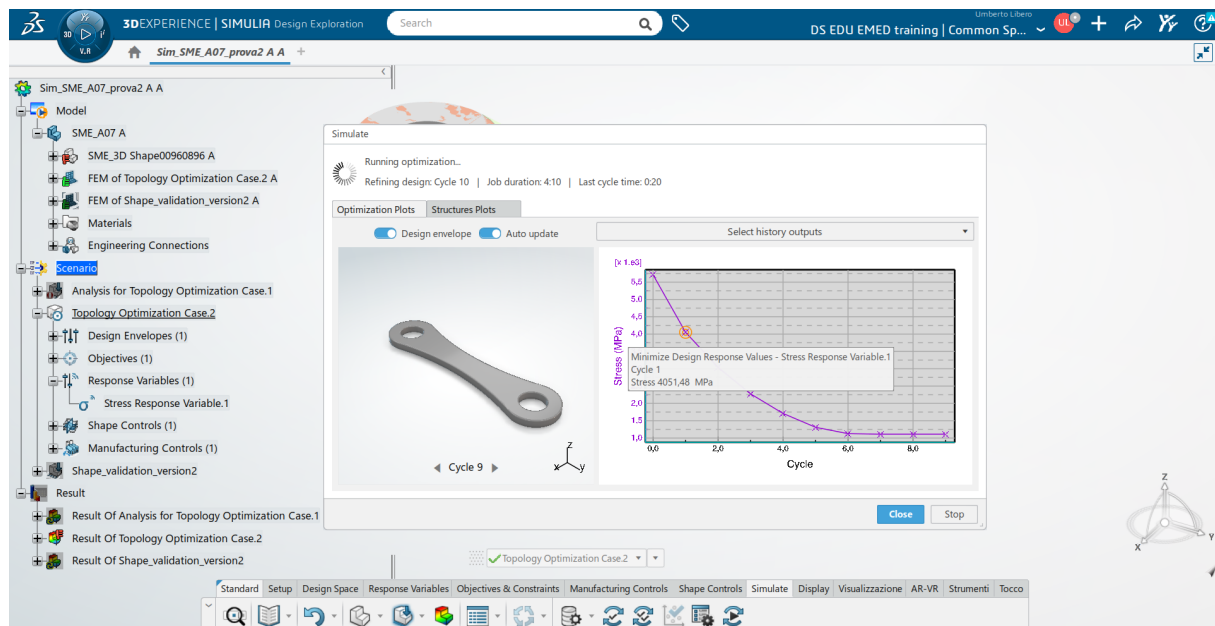


Figura 4.6: Processo di ottimizzazione

In Figura 4.6 viene mostrato un istante del processo di ottimizzazione che ha avuto come fine ultimo la necessità di minimizzare le tensioni locali. In questa fase viene definito il dominio di progetto, ovvero il volume di materiale sul quale l'algoritmo è autorizzato ad intervenire, rimuovendo progressivamente il materiale non essenziale per la trasmissione dei carichi. Contestualmente vengono individuate le regioni da preservare poichè necessarie al corretto accoppiamento tra i componenti.

Il processo iterativo di ottimizzazione si fonda sul concetto di **Design of Experiments (DoE)**, che consente di analizzare in modo sistematico l'insieme delle possibili soluzioni progettuali, senza la necessità di valutare tutte le combinazioni dei parametri. In primo luogo il progettista individua le variabili geometriche da modificare, ne definisce gli intervalli di variazione e seleziona le grandezze di risposta da monitorare, quali massa, tensioni o spostamenti. Sulla base di queste informazioni, grazie ai software del modulo SIMULIA, si ottengono automaticamente una serie di configurazioni progettuali possibili, selezionate mediante criteri statistici. Ciascuna di esse viene quindi analizzata mediante simulazione agli elementi finiti e confrontata con le altre in funzione degli obiettivi di progetto, definiti in fase preliminare. Questo approccio permette di individuare l'influenza delle singole variabili sulle prestazioni strutturali del componente e di orientare il processo di ottimizzazione verso soluzioni più promettenti, riducendo drasticamente il numero di analisi necessarie rispetto ad uno studio di tutte le possibili combinazioni.

Al termine delle simulazioni, il software confronta le prestazioni di tutte le configurazioni analizzate rispetto agli obiettivi e i vincoli definiti dal progettista. Partendo da questi risultati, l'algoritmo di ottimizzazione aggiorna progressivamente la distribuzione di materiale all'interno del dominio di progetto, eliminando quello che contribuisce in misura ridotta alla rigidezza del componente e preservando le regioni funzionali precedentemente vincolate. Il processo viene iterato fino al raggiungimento della convergenza secondo gli obiettivi preposti, quali la riduzione di massa o tensioni desiderate. Il risultato ottenuto rappresenta quindi la configurazione migliore che soddisfa il compromesso tra l'obiettivo e il mantenimento delle prestazioni strutturali necessarie.

Nel campo della progettazione assistita, l'utilizzo del DoE risulta vantaggioso poichè consente di supportare le decisioni progettuali mediante dati quantitativi e di ridurre le iterazioni necessarie per ottenere l'ottimizzazione desiderata. In questo modo il processo di sviluppo non si basa solamente sull'esperienza del progettista ma viene guidato da un'analisi sistematica delle relazioni tra geometria, massa e risposte strutturali.

Il risultato di questo processo viene mostrato di seguito in Figura 4.7, con la rappresentazione ultima e definitiva del pezzo ottimizzato. Nel caso in esame, il componente è stato adattato ad un processo di lavorazione per asportazione di materiale (fresatura), vincolo definito in fase preliminare, così da avvicinare il risultato alle reali esigenze di produzione industriale.



Figura 4.7: Ottimizzazione del pezzo critico

Dall'immagine si può osservare come il materiale sia stato mantenuto principalmente dove la sollecitazione era massima nella configurazione originale, mentre le regioni caratterizzate da un ridotto contributo di resistenza strutturale siano state alleggerite.

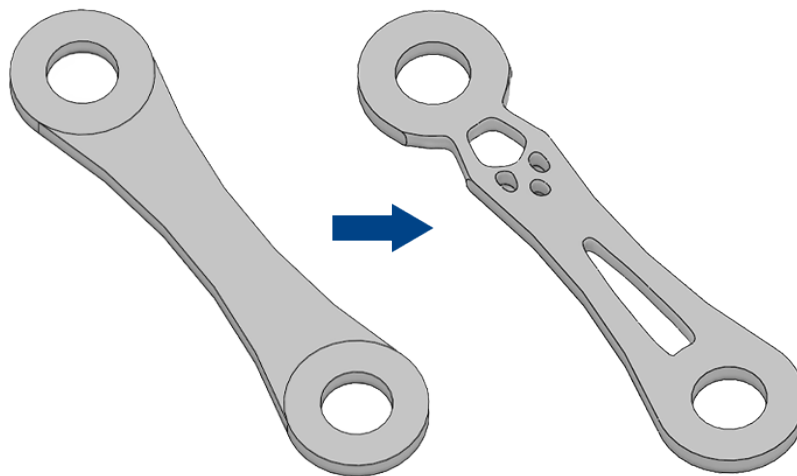


Figura 4.8: Confronto tra il componente originale e quello ottimizzato

Di seguito viene mostrata la simulazione strutturale del componente ottimizzato. Dal confronto con la configurazione iniziale emerge non solo una diversa distribuzione delle tensioni, ma anche una riduzione del loro valore massimo: la tensione equivalente di Von Mises passa infatti da valori di circa 50 MPa nella configurazione originale a valori di 24,5 MPa nel componente ottimizzato. Questo risultato evidenzia come l'ottimizzazione topologica abbia consentito di ottenere un componente più leggero e, al tempo stesso, caratterizzato da uno stato tensionale inferiore nelle condizioni di carico considerate.

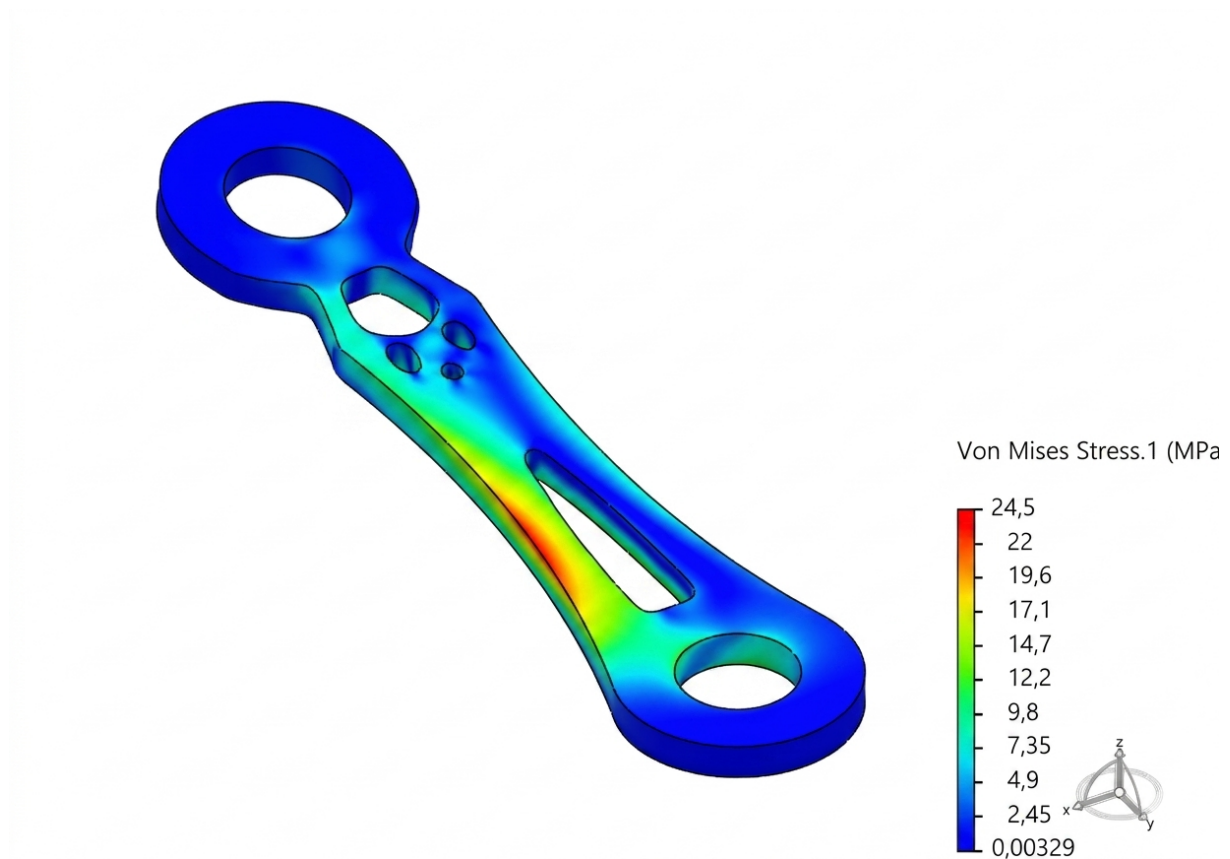


Figura 4.9: Simulazione del pezzo ottimizzato

Terminata la validazione della nuova parte ottimizzata, occorre inserirla all'interno dell'assieme generale: ancora una volta, grazie alla praticità di maneggiare e tracciare i dati dei diversi tools di programmazione della 3DEXPERIENCE, è sufficiente aggiornare il modello per visualizzare la nuova parte all'interno di esso, sostituendo quella che risultava critica precedentemente. Grazie a questa funzione integrata, non è necessario ridefinire i materiali e le connessioni che interessano il nuovo pezzo, poichè vengono automaticamente ricreati secondo quanto specificato nella configurazione iniziale.

La validazione finale, riportata in Figura 4.10, mostra come il giunto mantenga livelli tensionali compatibili con i requisiti progettuali, pur presentando una geometria significativamente alleggerita rispetto alla configurazione principale.

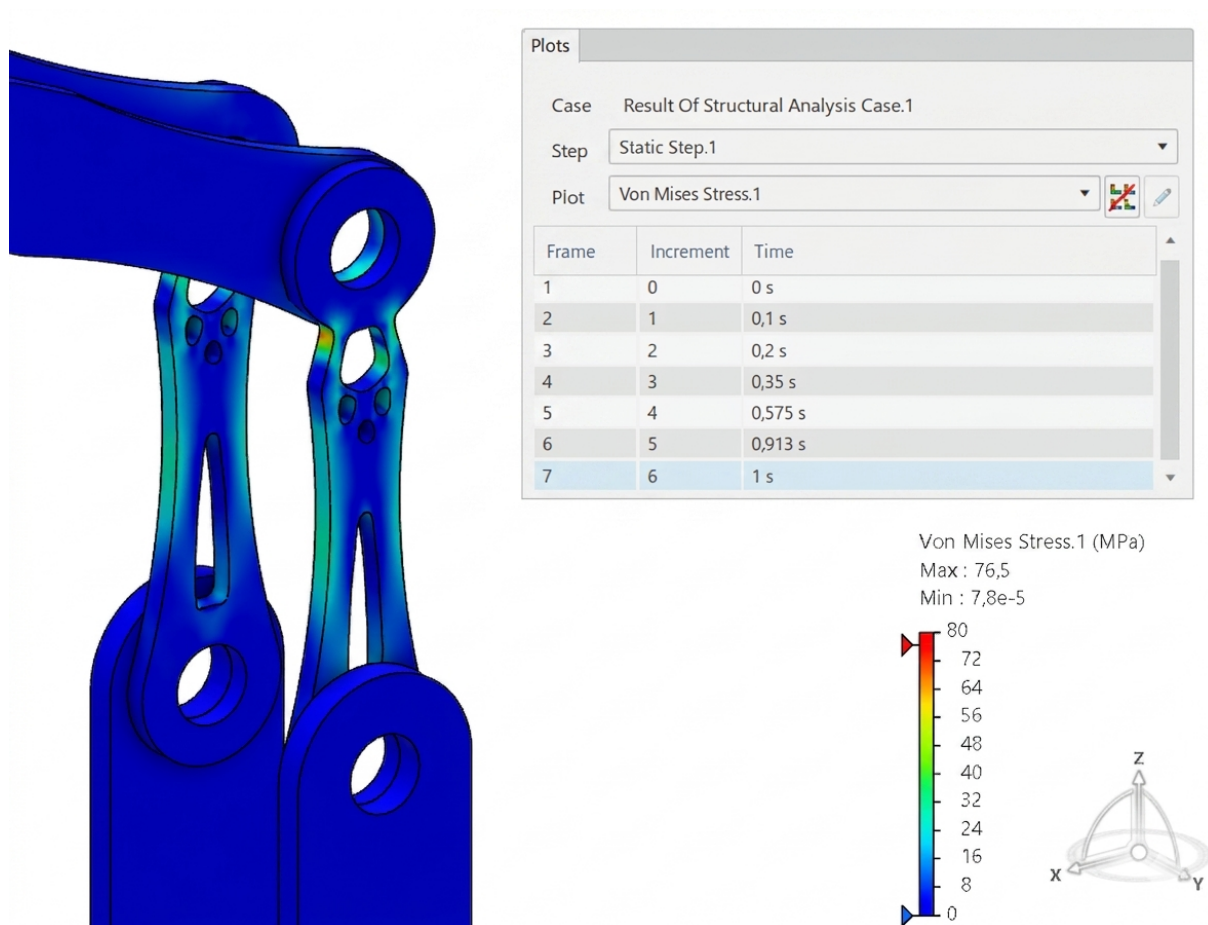


Figura 4.10: Aggiornamento e validazione dell'ottimizzazione

Dal confronto con la simulazione precedente si deduce come l'ottimizzazione abbia prodotto un miglioramento dello stato tensionale nella zona inizialmente critica, ottenendo una distribuzione più uniforme degli sforzi subiti.

Si osservano tuttavia alcuni picchi di tensione localizzati in corrispondenza di raccordi e piccole variazioni geometriche generate automaticamente durante il processo di ottimizzazione topologica. In una successiva fase di progettazione, questi effetti possono essere ridotti introducendo opportune restrizioni geometriche durante l'ottimizzazione oppure attraverso una rifinitura del modello CAD, per esempio aumentano i raggi di raccordo.

Questo risultato conferma l'efficacia dell'integrazione tra simulazione FEM ed ottimizzazione topologica all'interno dell'approccio Model-Based adottato in questo progetto. Gli strumenti disponibili all'interno della piattaforma 3DEXPERIENCE hanno permesso di supportare il progettista non soltanto nella verifica del comportamento strutturale, ma

anche nella generazione di soluzioni progettuali innovative e più efficienti dal punto di vista ingegneristico.

Per completezza di processo, si riporta il modello CAD di braccio robotico dimostrativo ottimizzato ed aggiornato.

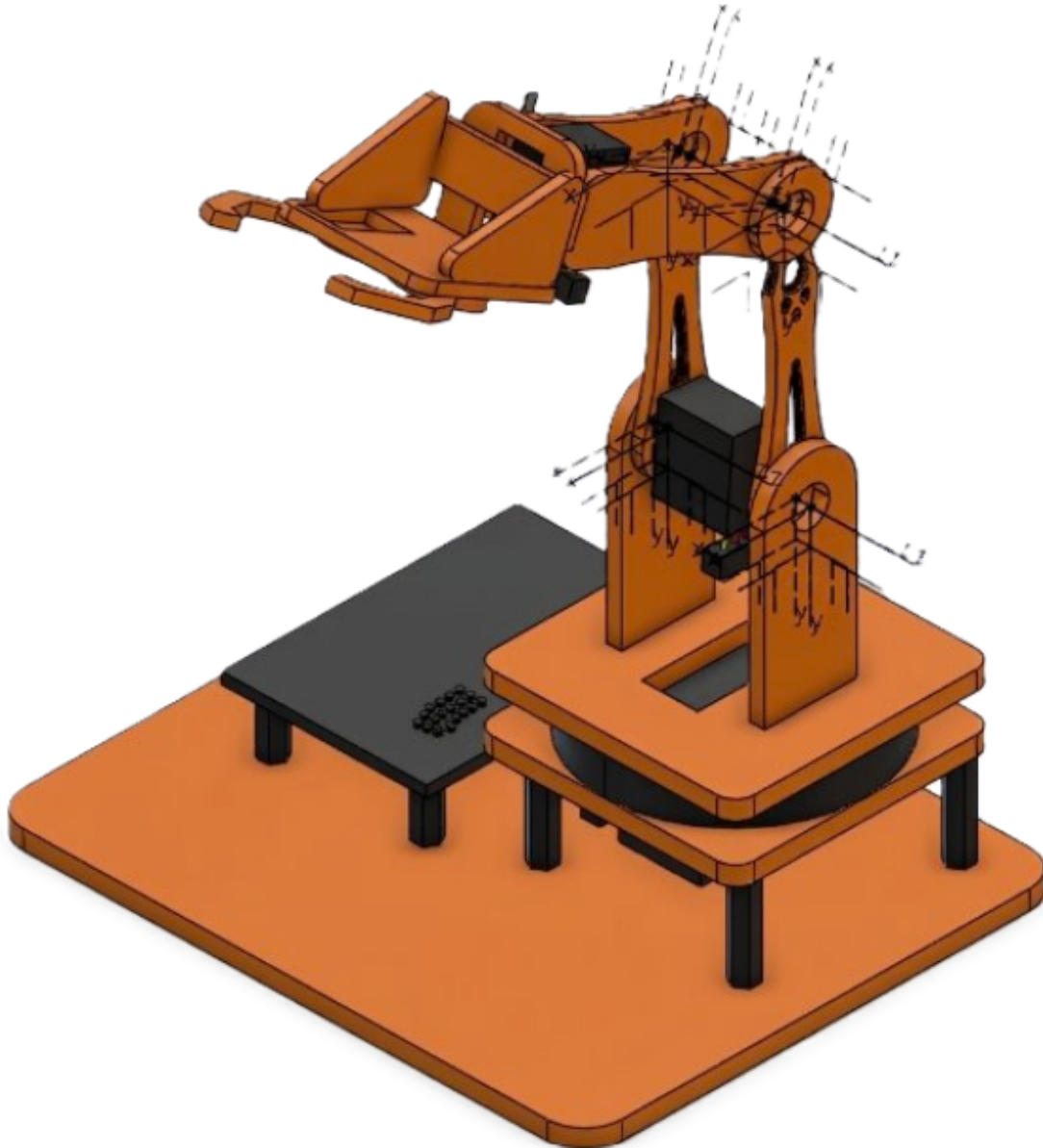


Figura 4.11: Assieme CAD finale

Capitolo 5

Applicazione sul robot Comau

Dopo aver sviluppato e validato la metodologia proposta mediante il modello dimostrativo realizzato in Dassault Systèmes, il progetto è stato esteso ad un'applicazione industriale reale con l'obiettivo di verificarne l'efficacia in un contesto caratterizzato da requisiti progettuali e vincoli operativi stringenti, componenti complessi e un ciclo di lavoro definito e perfettamente replicabile nel settore industriale.

Questa fase della ricerca è stata possibile grazie alla collaborazione aziendale sviluppata tra Dassault Systèmes e Comau. Questo coinvolgimento ha consentito l'accesso a dati progettuali reali, modelli CAD completi e specifiche tecniche del braccio robotico, permettendo così di applicare la metodologia validata nei capitoli precedenti su un caso studio concreto e riconducibile ad una realtà produttiva esistente.

L'obiettivo di questa fase di progetto non è solamente quello di replicare le attività di modellazione e simulazione già svolte sul prototipo dimostrativo, ma soprattutto quello di verificare la capacità di un approccio Model-Based di sostenere il processo di sviluppo di un robot complesso in condizioni operative realistiche. A differenza del caso precedente dove, al fine di costruire un modello realistico si sono ipotizzate delle condizioni di lavoro, ora queste sono note direttamente dal produttore. Infatti, mentre il prototipo Dassault ha lo scopo di dimostrare le potenzialità degli strumenti di progettazione, simulazione ed ottimizzazione integrati nell'unica piattaforma 3DEXPERIENCE, il caso Comau introduce una componente dinamica direttamente derivata dall'utilizzo del robot. Le condizioni di carico non sono quindi limitate alla sola presenza del peso proprio della struttura e del payload applicato, bensì includono anche gli effetti inerziali generati dai movimenti dei giunti durante il ciclo produttivo.

La metodologia di approccio rimane la medesima illustrata nei capitoli precedenti, tuttavia l'applicazione ad un robot industriale introduce maggiori complessità soprattutto inerenti alla simulazione strutturale. Per questo motivo, in questa seconda parte di lavoro, l'attenzione viene concentrata principalmente sugli aspetti che differenziano il modello reale dal prototipo dimostrativo, con particolare attenzione alla definizione dello scenario FEM.

La fase di ottimizzazione topologica mantiene invece invariato il principio metodologico descritto nei capitoli precedenti: il processo si fonda sempre sull'individuazione di una distribuzione del materiale più efficiente, sulla base degli obiettivi e dei vincoli imposti. Le differenze riguardano principalmente la tipologia di componente oggetto di ottimizzazione e le specifiche che si vogliono ottenere a valle del processo, quali la percentuale di riduzione di massa.

5.1 Descrizione

Il sistema oggetto di studio è il robot antropomorfo N-220-2.7 di Comau, appartenente alla categoria dei manipolatori a sei assi, destinati ad attività di pallettizzazione e saldatura per punti. Il robot è infatti progettato per garantire elevati requisiti di affidabilità e precisione.

In Figura 5.1 si presenta il braccio analizzato

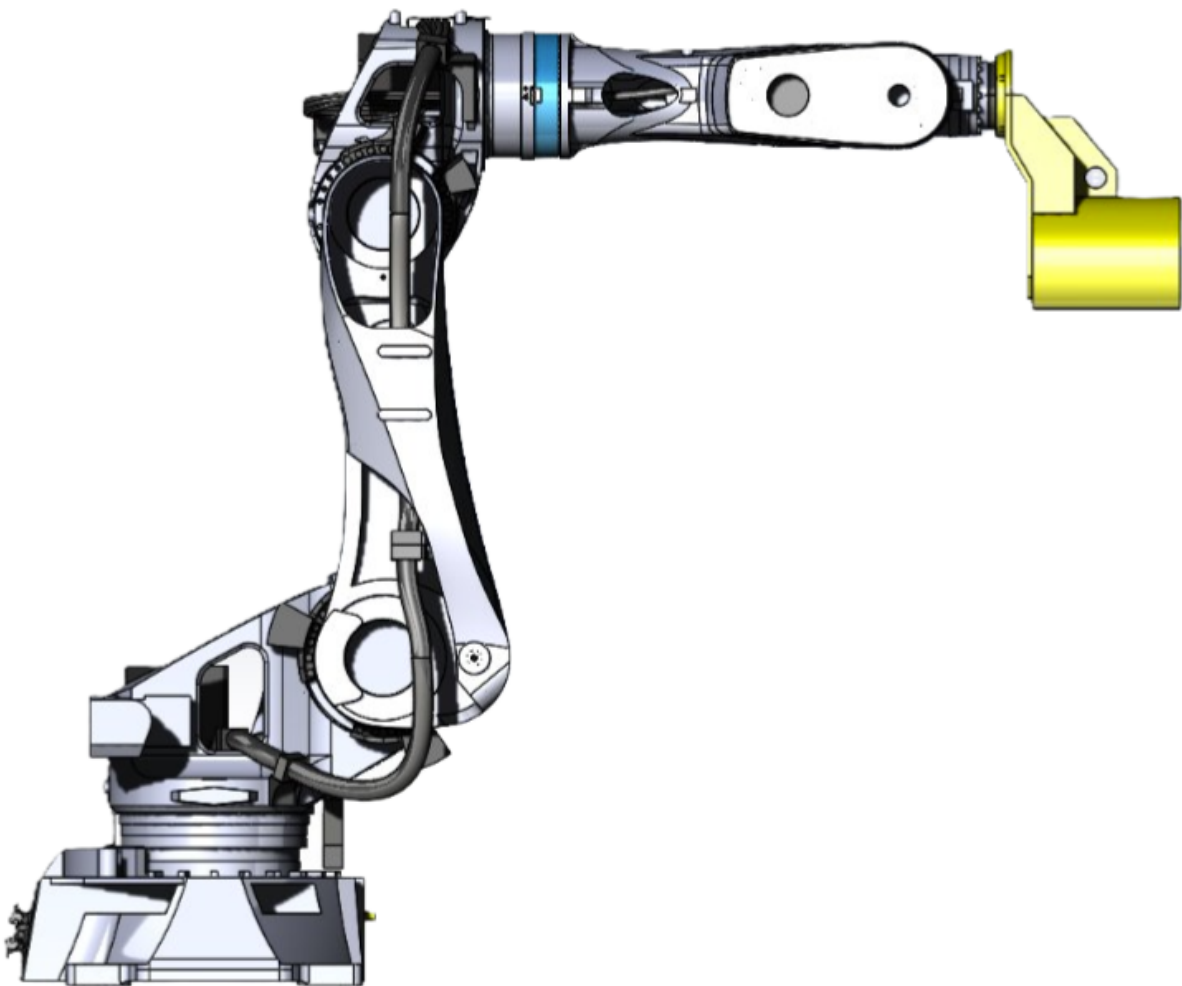


Figura 5.1: Robot N-220-2.7 Comau

Viene mostrata di seguito anche la scheda tecnica del medesimo manipolatore, insieme ai movimenti dei giunti, derivati dal ciclo di lavoro imposto.

VERSIONE		N-220-2.7 N-220-2.7 F	N-220-2.6 Ceiling
Struttura / n° assi		Antropomorfo / 6 assi	
Carico al polso		220 kg (485 lb) * ¹	
Carico supplementare su avambraccio		270 kg (595 lb) - Q _F * ²	230 kg (507 lb) - Q _F * ²
Coppia asse 4		1273 Nm	
Coppia asse 5		1273 Nm * ⁵	
Coppia asse 6		787 Nm	
Corsa /(Velocità)* ⁸	Asse 1	+/- 180° (120°/s)	
	Asse 2	-77° / +76° (100°/s)	-77° / + 64° (100 °/s)
	Asse 3	-167°/ +74° (110°/s)	
	Asse 4	+/- 200° (140°/s)	
	Asse 5	+/-125° (140°/s)	
	Asse 6	+/-200° (210°/s)	
Sbraccio max orizzontale		2670 mm (8.76 ft)	2595 mm (8.51 ft)
Ripetibilità		+/- 0,05 mm	
Peso robot		1250 kg (2756 lb)	
Flangia attacco attrezzi		ISO 9409 - 1 - A 125	
Motori		AC brushless	
Sistema di misura della posizione		con Encoder	
Potenza totale installata		8 kVA	
Consumo energetico percorso standard		2210 W * ⁷	-
Stato di funzionamento inattivo (Drive On)		935 W * ⁷	-
Stato di funzionamento freno chiuso (Drive Off)		98 W * ⁷	-
Grado di protezione		IP65 IP65/ IP67 (motori e polso) * ⁶	
Temperatura di esercizio		da 5 °C a + 45 °C (da +41°F a +113°F)	
Temperatura di immagazzinamento		da -10 °C a +55 °C (da -50°F a +131°F)	
Umidità relativa		da 5% a 95% senza condensa	
Massimo incremento di temperatura		1,5 °C/min (34.7 °F/min)	
Colore robot (standard)		Grigio RAL 9006 * ³	
Posizione di montaggio		A pavimento / piano inclinato* ⁴	A soffitto

Figura 5.2: Scheda tecnica del robot N-220-2.7

Dal punto di vista tecnico, il modello analizzato presenta una configurazione a sei gradi di libertà e una portata nominale al polso di 220 kg, con la possibilità di supportare ulteriori

carichi distribuiti sull'avambraccio fino a 270 kg. Lo sbraccio massimo raggiunge 2670 mm, consentendo al manipolatore di operare su ampie zone di lavoro, con una ripetibilità dichiarata 0,05 mm. Quest'ultimo valore risulta particolarmente significativo poichè ne sottolinea l'accuratezza di lavorazione, considerando le elevate dimensioni e capacità di carico del sistema. Per caratterizzare in modo più approfondito il modello utilizzato nelle simulazioni successive, sono state estratte direttamente dal modello CAD fornito da Comau le proprietà di massa dei singoli *link* del manipolatore.

Tabella 5.1: Masse dei link del robot Comau N-220-2.7

Link	Componenti del robot	Massa [kg]
Link 0	Base d'appoggio	202.02
Link 1	Spalla	717.63
Link 2	Braccio	160.18
Link 3	Avambraccio	124.37
Link 4	Polso (Asse 4)	14.59
Link 5	Polso (Asse 5)	83.58
Link 6	Flangia porta-utensile	2.07

La struttura complessiva del manipolatore presenta una massa di circa 1250 kg ed è stata progettata per operare in ambienti industriali gravosi, con un grado di protezione fino a IP65/IP67 nelle zone più esposte. Queste caratteristiche rendono il robot adatto all'impiego nei settori automotive, della movimentazione industriale e dell'automazione avanzata, dove robustezza strutturale e affidabilità operativa costituiscono due dei requisiti fondamentali.

Dal punto di vista cinematico, il robot Comau N-220-2.7 dispone di sei assi controllati che consentono di posizionare l'organo terminale all'interno di un ampio volume di lavoro, mantenendo flessibilità e correttezza nella posizione dell'utensile.

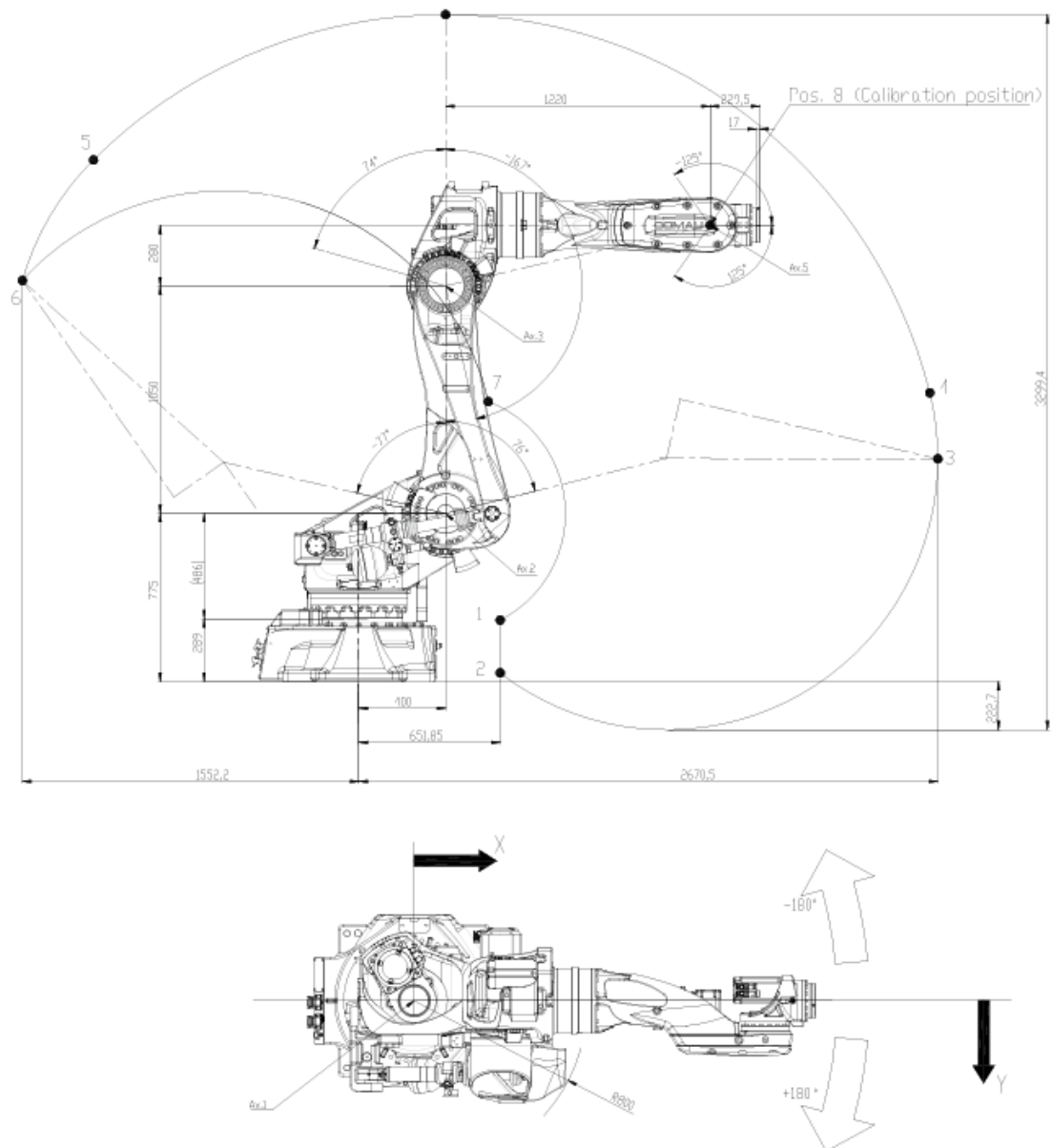
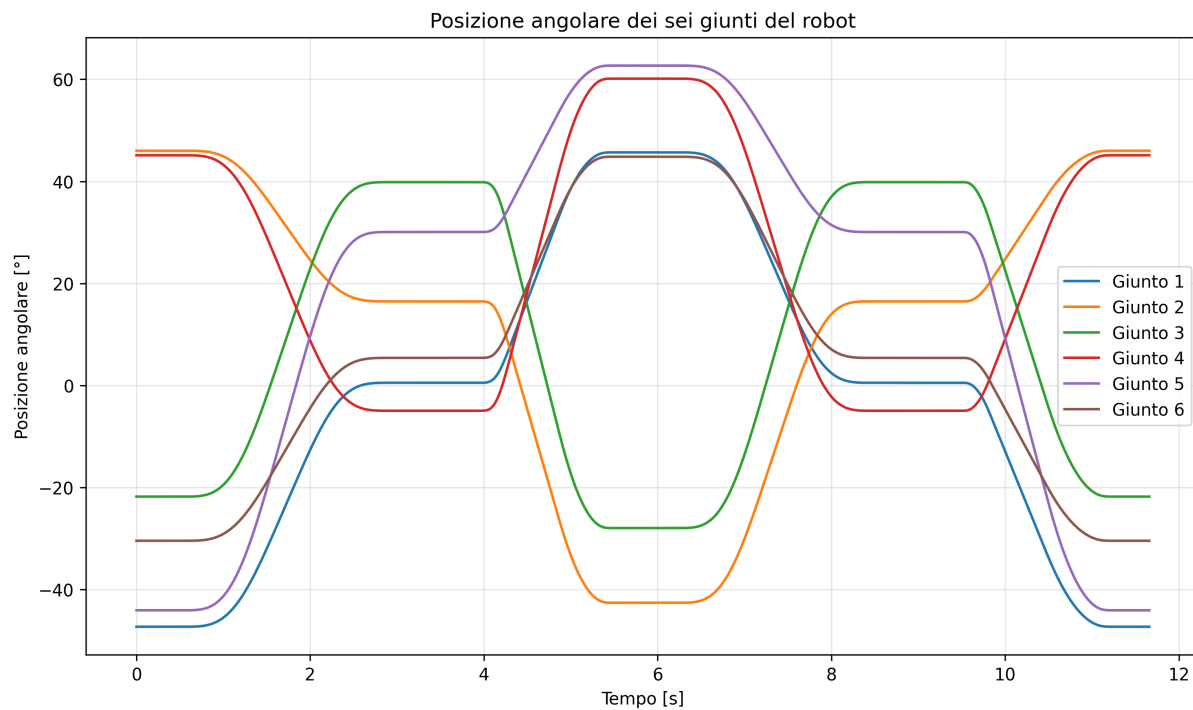


Figura 5.3: Movimentazione del robot N-220-2.7

Come illustrato in Figura 5.3, il campo di lavoro del robot è definito dalla combinazione delle rotazioni dei vari assi che garantiscono al braccio di operare su un ampio spazio di lavoro.

Di seguito vengono mostrati i movimenti che i singoli giunti assumono durante l'intero ciclo di lavoro fornito direttamente dall'azienda Comau.



Come si osserva dal grafico, il ciclo di lavoro ha una durata di circa dodici secondi, nei quali tutti i giunti partono e arrivano nella stessa posizione. Lo zero di riferimento coincide con la posizione assunta dai singoli giunti del robot in condizioni di riposo (Figura 5.1). Si osserva inoltre che i profili di posizione presentano un andamento regolare: ciascun giunto raggiunge la configurazione desiderata, permane per alcuni istanti a posizione costante e successivamente rientra verso la configurazione iniziale. Non essendoci bruschi cambi di direzione, le traiettorie cinematiche risultano fluide e continue. Questa caratteristica consente di limitare accelerazioni impulsive e di conseguenza i carichi inerziali trasmessi alla struttura durante il ciclo operativo.

L'introduzione delle informazioni cinematiche costituisce uno degli aspetti più rilevanti dell'approccio adottato, poichè permette di collegare il modello CAD, i requisiti funzionali e le condizioni operative reali all'interno di un'unica piattaforma integrata. In questo modo la simulazione non rappresenta più soltanto una verifica strutturale del prodotto, ma diventa uno strumento di supporto alle decisioni progettuali, capace di descrivere con precisione il comportamento del sistema durante l'esecuzione del ciclo di lavoro assegnato.

5.2 Modello FEM

La prima fase di preparazione del modello riguarda l'importazione del robot Comau all'interno dell'ambiente Simulia nella piattaforma 3DEXPERIENCE, in modo che si possa lavorare su un modello comune, durante le diverse fasi di simulazione.

Trattandosi di un modello sviluppato per finalità funzionali e produttive, esso presenta un livello di dettaglio significativamente elevato, per cui è necessaria una fase preliminare di semplificazione dei componenti. L'obiettivo è quello di identificare e rimuovere possibili geometrie che potrebbero compromettere la qualità della discretizzazione numerica o aumentare notevolmente il costo computazionale dell'analisi. Inoltre vengono anche scartati dal modello ad elementi finiti tutti quegli elementi che, pur essendo indispensabili dal punto di vista costruttivo (cavi di collegamento elettrico, piccole batterie, supporti meccanici), non influenzano in modo significativo la risposta strutturale del sistema. Per semplificare tutto il modello vengono utilizzati strumenti di defeaturing, sempre disponibili in ambiente Simulia: in particolare con le funzioni *chamfer defeaturing*, *fillet defeaturing* e *logo defeaturing* si rimuovono piccoli raccordi, smussi, forature secondarie, dettagli di fissaggio ed elementi puramente estetici. Per quanto riguarda invece i componenti più grossolani come batterie, cavi elettrici e supporti meccanici non sono soggetti a defeaturing, ma sono direttamente esclusi dalla definizione della mesh del modello. Particolare attenzione è stata dedicata alle zone di contatto tra i diversi componenti, poichè eventuali imperfezioni geometriche in tali regioni possono influenzare drasticamente la convergenza numerica della simulazione.

Completata la preparazione della geometria, è possibile procedere con la definizione del modello numerico utilizzato per l'analisi strutturale. In primo luogo vengono definiti i materiali dei diversi componenti del robot. Per ciascuno sono noti i moduli di Young, le densità e i coefficienti di Poisson. Vengono trascurate tutte le proprietà fisiche che coinvolgono fenomeni plastici poichè si ipotizza una condizione di lavoro in cui le tensioni sviluppate rimangono inferiori al limite di snervamento dei materiali impiegati. Successivamente viene definita la mesh agli elementi finiti di ogni componente. Questa fase risulta particolarmente delicata sia perchè necessita estrema precisione per garantire la corretta convergenza numerica tra i giunti in fase di simulazione, sia perchè influisce direttamente sulla precisione dei risultati.

Il modello è definito da 203316 elementi lineari C3D4. Si è scelto questo parametro per ridurre quanto possibile il costo computazionale della simulazione, in modo da ottenere tempi di calcolo contenuti, pur garantendo al tempo stesso una rappresentazione accettabile della risposta strutturale del sistema. Essi infatti, pur essendo più rigidi a flessione rispetto ad elementi di ordine superiore, risultano comunque adatti per una valutazione di componenti massivi come quelli analizzati, privi di urti, contatti e fenomeni non lineari.

Una modellazione più raffinata potrebbe essere ottenuta con la definizione di elementi tetraedrici, come i C3D10HS, in grado di descrivere meglio le proprietà tensionali e la

distribuzione degli sforzi nelle zone geometricamente più complesse. In questo caso, utilizzare questi elementi causerebbe un aumento di costo computazionale notevole a causa del numero elevato di gradi di libertà da risolvere. Con l'obiettivo di ottenere una rappresentazione del comportamento globale del robot, l'impiego di elementi lineari C3D4 rappresenta un compromesso progettuale che consente di ottenere risultati accurati per gli obiettivi dell'analisi, pur mantenendo un costo computazionale contenuto.

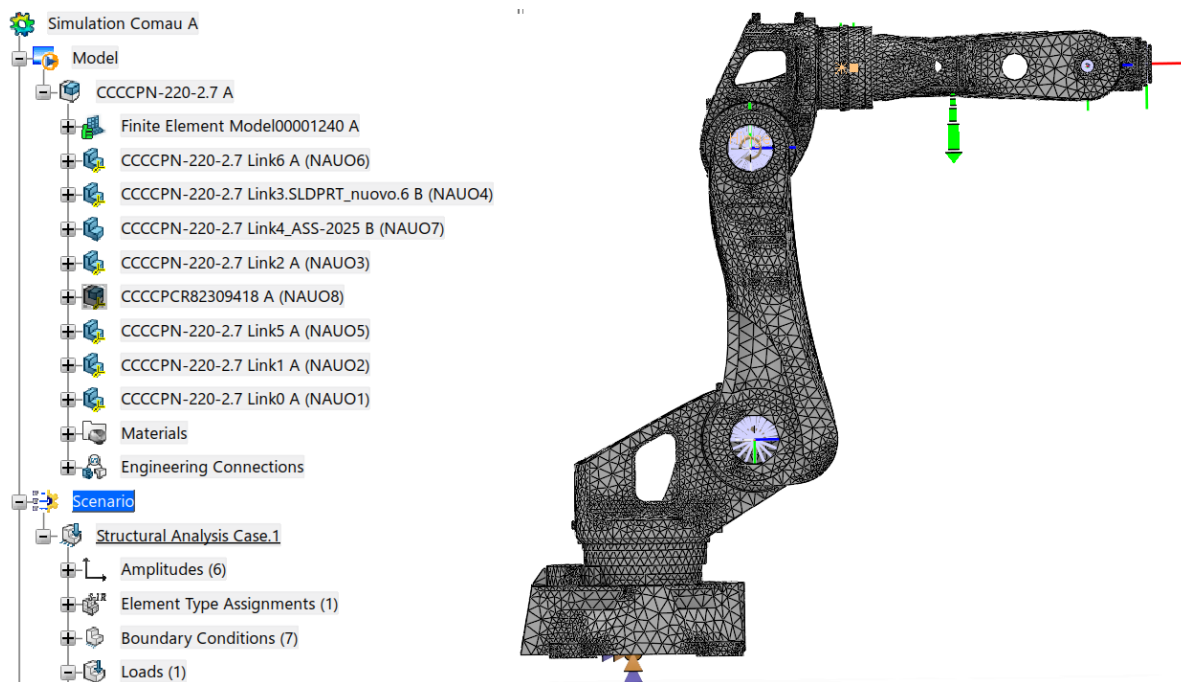


Figura 5.4: Modello FEM del robot N-220-2.7

In Figura 5.4 si osserva il risultato di questa prima fase di predisposizione del modello per la successiva simulazione strutturale.

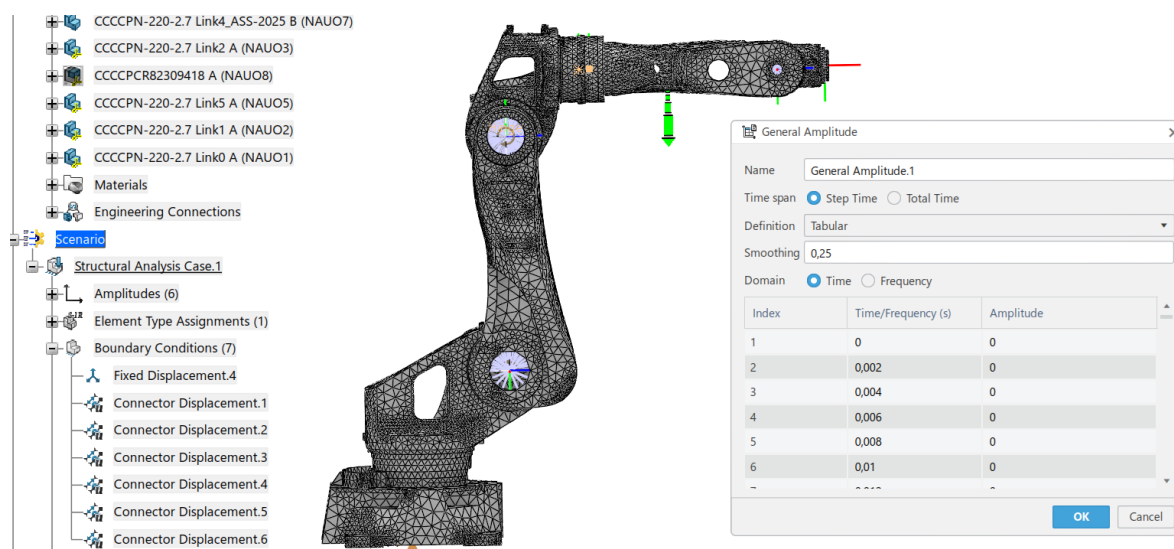
Uno degli aspetti più critici nella modellazione di un robot antropomorfo riguarda la corretta rappresentazione dei collegamenti cinematici tra i diversi segmenti della struttura. Per questo motivo è stato utilizzato il comando *Connector* del modulo Simulia che consente di rappresentare il comportamento cinematico dei giunti mediante relazioni matematiche tra punti di riferimento associati ai diversi corpi rigidi del modello. Per ciascun asse del manipolatore viene definito un connector di tipo *Hinge*, in grado di consentire esclusivamente la rotazione attorno all'asse indicato e di vincolare gli altri cinque gradi di libertà. I punti estremi del connector sono collegati alle rispettive superfici mediante il comando *Coupling*, garantendo così il corretto trasferimento degli spostamenti e delle

rotazioni tra il riferimento cinematico e l'intera struttura.

Per rappresentare il comportamento reale del robot durante l'esecuzione del ciclo produttivo vengono introdotte le componenti temporali del movimento: a differenza delle classiche analisi statiche nelle quali vengono valutate esclusivamente le configurazioni in equilibrio, il caso in esame richiede anche la considerazione delle variazioni di posizione assunte dai singoli giunti durante il ciclo operativo. Queste variazioni generano infatti velocità ed accelerazioni che influenzano direttamente lo stato tensionale della struttura attraverso gli effetti inerziali associati alle masse movimentate.

La descrizione del moto è stata implementata mediante le funzioni *Amplitude*, che consentono di definire l'evoluzione temporale delle posizioni assunte da ogni componente del manipolatore. Per ciascun grado di libertà del robot infatti, è associata una specifica legge temporale contenente la sequenza di posizioni angolari raggiunte nei diversi istanti del ciclo. In questo modo, il solver implicito del software *Abaqus* utilizza tali informazioni per ricostruire automaticamente il moto del sistema, calcolando in maniera consistente le velocità e le accelerazioni associate alle traiettorie imposte. Di conseguenza gli effetti dinamici non vengono introdotti artificialmente mediante carichi equivalenti, ma derivano direttamente dalla cinematica del robot e dalla distribuzione delle masse presenti.

A titolo di esempio viene mostrata una parte della tabella degli Amplitude riferiti al primo giunto: tutti i componenti partono dalla posizione zero che coincide con la configurazione mostrata in Figura 5.4 e ritorna con la medesima dopo circa dodici secondi di ciclo operativo.



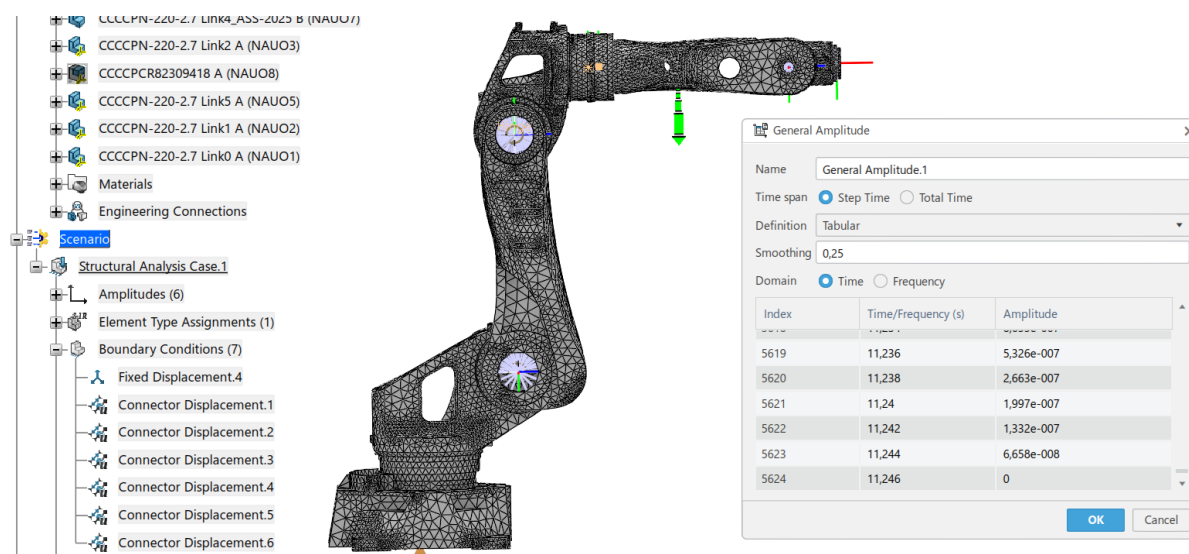


Figura 5.5: Esempio di Amplitude del primo giunto

5.3 Analisi risultati

Terminata la definizione del modello agli elementi finiti e la definizione dello scenario di simulazione, viene presentato un confronto tra l'approccio statico e quello dinamico implicito, con l'obiettivo di valutare l'influenza degli effetti inerziali durante il ciclo operativo del robot.

Nel caso dell'**analisi statica** il movimento del braccio viene presentato come una successione di configurazioni di equilibrio che il solutore è in grado di risolvere. Infatti, come spiegato nei capitoli precedenti, tramite funzioni *amplitude* nel tempo, si conoscono le posizioni angolari che ogni singolo giunto deve raggiungere durante il ciclo di lavoro. In questo caso però, l'informazione temporale viene utilizzata solamente per ottenere una sequenza ordinata delle diverse configurazioni: per ogni posizione imposta, il software è in grado di ricavare la condizione di equilibrio tra i carichi applicati, i vincoli e la risposta elastica del sistema. La struttura viene quindi interpretata come se raggiungesse lentamente ogni configurazione, senza considerare come venga ottenuta. Di conseguenza, anche le informazioni relative ad accelerazioni e velocità non vengono considerate in questo caso, così come i contributi legati ad effetti inerziali.

Di seguito si mostrano i risultati strutturali dell'analisi statica.

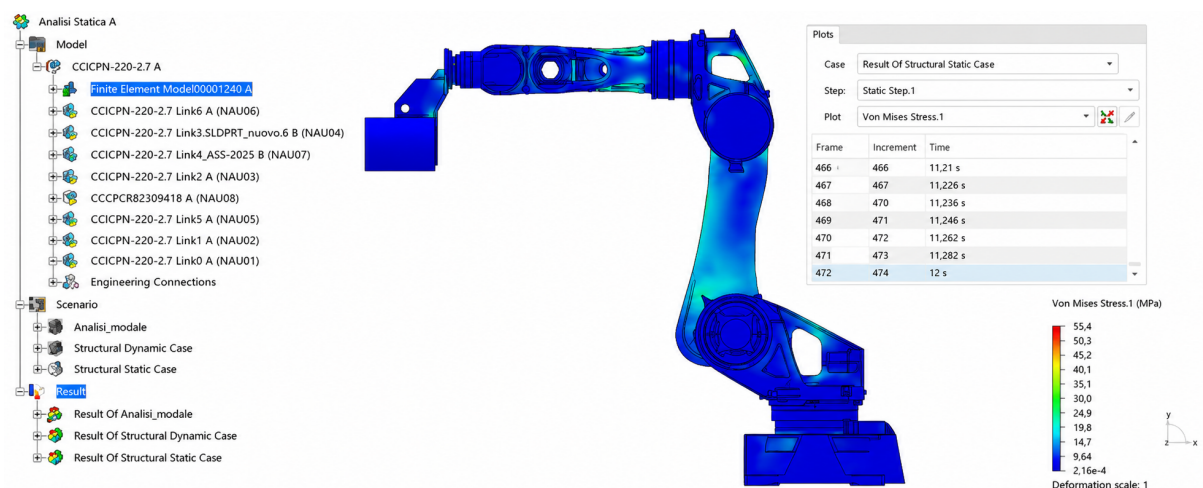


Figura 5.6: Vista frontale dell'analisi statica del robot

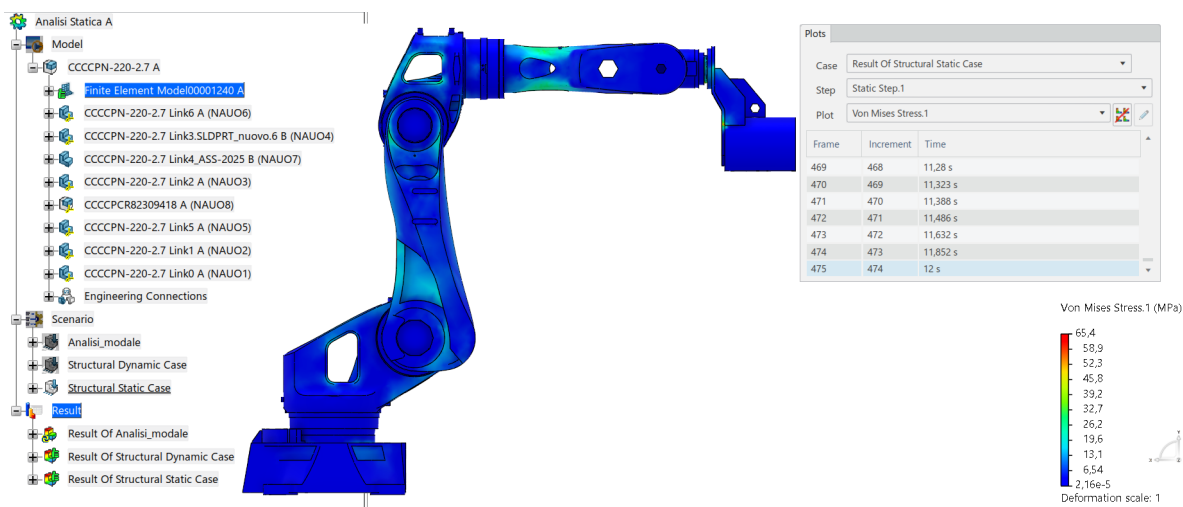


Figura 5.7: Vista posteriore dell'analisi statica del robot

L'analisi statica rappresenta quindi un primo livello di valutazione del comportamento strutturale del robot. Questo approccio risulta importante nelle fasi iniziali del progetto, poichè permette di verificare rapidamente la risposta del modello nelle diverse configurazioni operative, identificando le zone maggiormente sollecitate con un costo computazio-

nale relativamente basso.

Tuttavia, nel caso di un robot industriale, una descrizione puramente statica non è sufficiente per rappresentare in modo completo il reale funzionamento del sistema. Durante un ciclo operativo infatti, i diversi componenti non raggiungono semplicemente una successione di configurazioni di equilibrio indipendenti, ma si muovono secondo specifiche leggi temporali che generano velocità ed accelerazioni. Queste ultime, combinate con la massa dei componenti, producono forze d'inerzia che si aggiungono ai carichi esterni già presenti nello scenario di simulazione e possono modificare in modo significativo lo stato tensionale della struttura. Per tale motivo, al fine di ottenere una rappresentazione più fedele del comportamento del robot durante il ciclo operativo, è necessario introdurre un'analisi dinamica.

Nel caso di un'analisi **dinamica implicita** invece, si considera la reale evoluzione nel tempo del robot. Vengono utilizzati gli stessi *amplitude* temporali, ma in questo caso il solutore li interpreta come funzioni nel tempo: attraverso l'interpolazione delle posizioni fornite ad ogni istante, si ricostruisce l'andamento continuo del movimento, potendo così ottenere le informazioni di velocità ed accelerazioni associate ai diversi componenti del braccio robotico. La presenza di queste variabili fisiche introduce l'effetto dei carichi inerziali, che vengono implementati all'interno della soluzione numerica. La risposta del sistema non è quindi in funzione esclusivamente della configurazione geometrica raggiunta, ma anche della modalità con cui avviene.

Di seguito si mostrano i risultati strutturali dell'analisi dinamica.

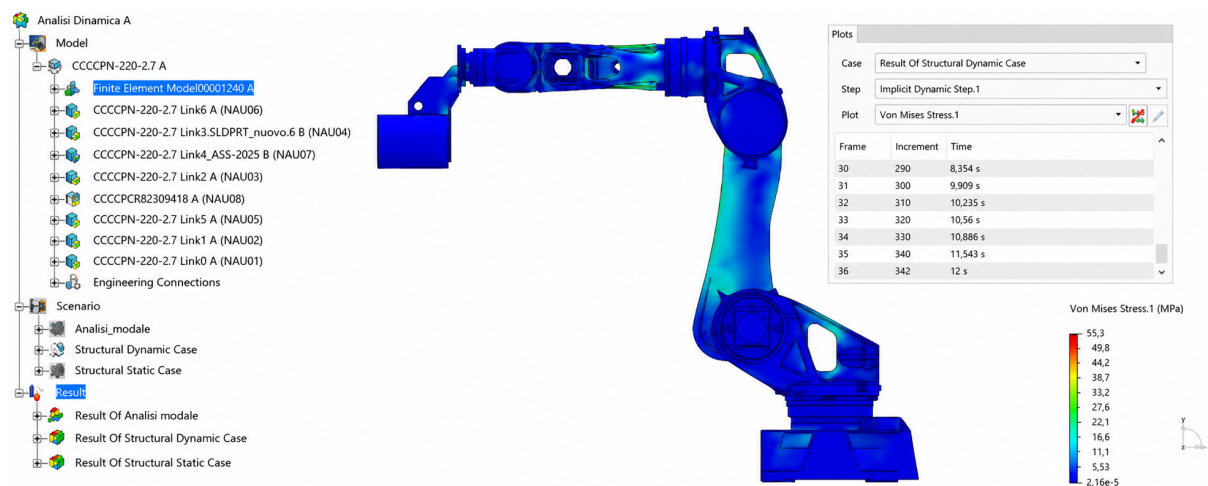


Figura 5.8: Vista frontale dell'analisi dinamica del robot

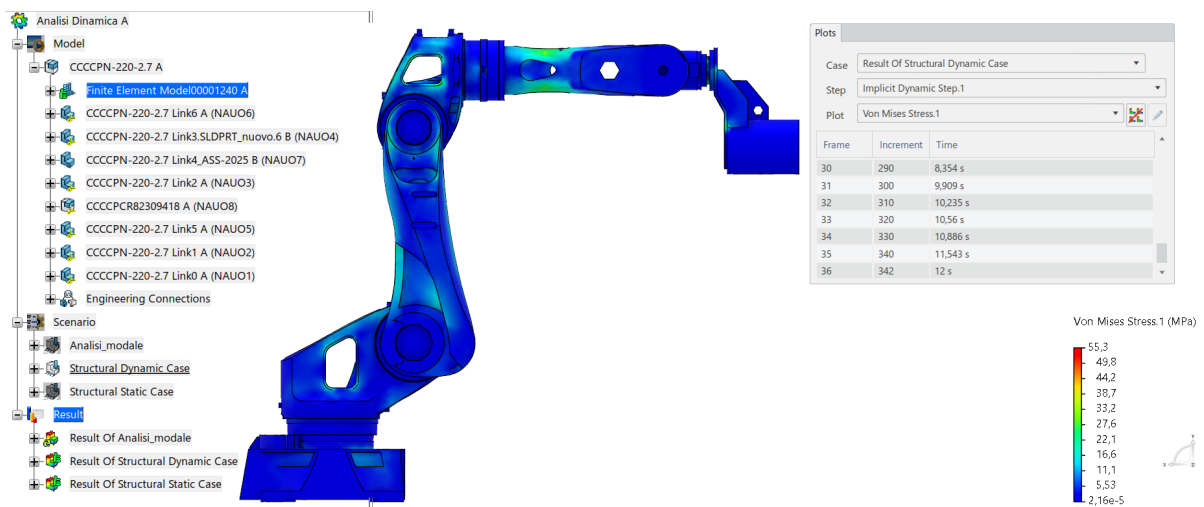


Figura 5.9: Vista posteriore dell'analisi dinamica del robot

Per completezza di analisi, viene presentato un grafico relativo alla posizione raggiunta nel tempo dall'end-effector durante un ciclo di lavoro completo, sia nel caso statico, sia in quello dinamico implicito.

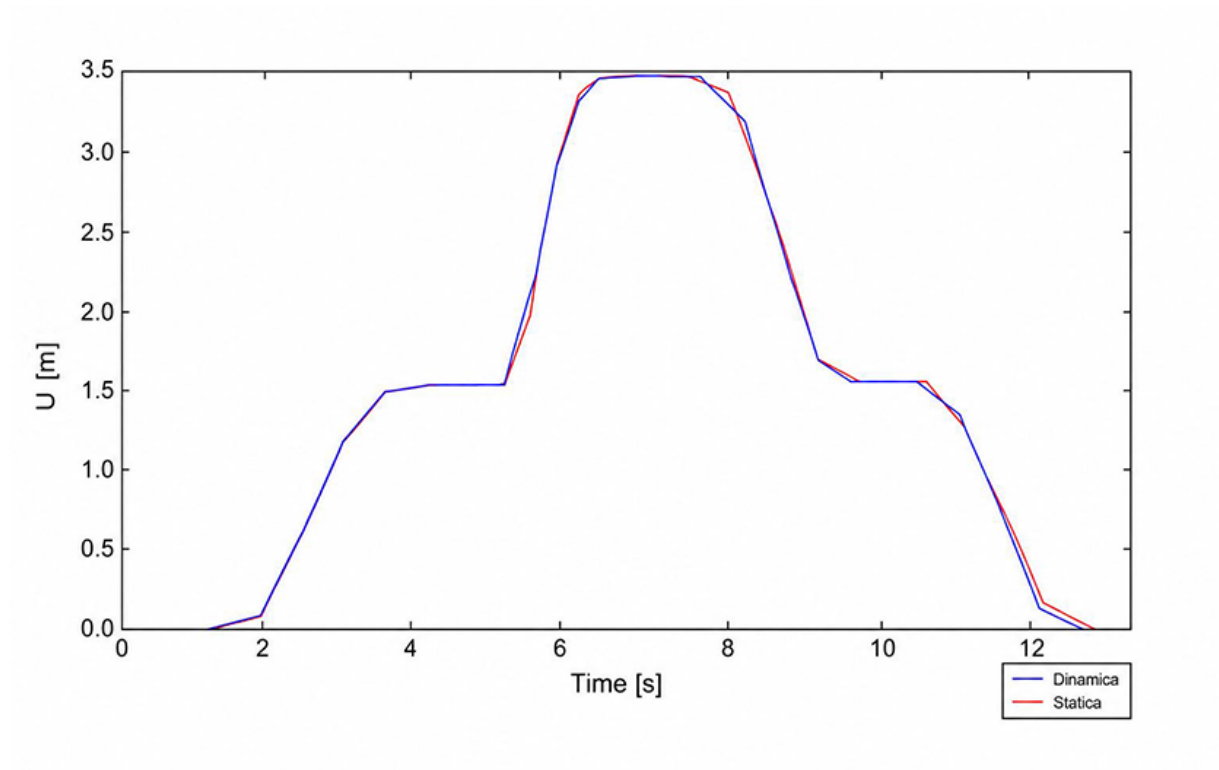


Figura 5.10: Confronto tra simulazione statica e dinamica sull'end-effector

La grandezza U rappresenta il modulo dello spostamento di un punto generico posto sull'estremità dell'end-effector, relativo al sistema di riferimento globale del braccio robotico. Questa variabile costituisce quindi la misura della variazione di posizione nello spazio durante l'intero ciclo di lavoro e viene calcolata come distanza tra la posizione iniziale e finale assunta in ciascun istante del movimento.

Indicando con

$$\mathbf{P}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix}$$

la posizione cartesiana del punto nell'istante generico t e con

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

la posizione iniziale, la grandezza U è definita come

$$U(t) = \|\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}_0\| = \sqrt{(x(t) - x_0)^2 + (y(t) - y_0)^2 + (z(t) - z_0)^2}$$

Dal punto di vista cinematico, la posizione del punto può essere definita in funzione degli angoli dei giunti, mediante la cinematica diretta:

$$\mathbf{P}(t) = f(\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_6(t)),$$

dove $\theta_i(t)$ rappresenta la rotazione del generico giunto del robot. Nonostante ciascuno esegua solamente rotazioni, la successione di esse lungo la catena cinematica modifica la posizione dei *link* successivi, e di conseguenza anche quella di un punto situato sull'end-effector del braccio. Le rotazioni costituiscono quindi l'effettivo movimento del punto, mentre lo spostamento cartesiano rappresenta l'effetto osservabile. La grandezza U misura pertanto esclusivamente lo spostamento del punto nello spazio, ma questo risulta dipendente dall'effetto combinato di tutte le rotazioni dei giunti che hanno condotto il manipolatore nella configurazione desiderata. In questo modo è possibile utilizzare un solo parametro per descrivere in modo sintetico e completo l'evoluzione della traiettoria di qualunque punto del robot.

Il confronto tra i risultati ottenuti nei due casi studio mostra come la risposta dinamica presenti piccole variazioni intorno alla posizione di equilibrio ottenuta con l'analisi statica, senza discostarsi in modo significativo da essa.

Questo si può osservare anche direttamente dai valori movimenti imposti ai giunti, dove si vede come il passaggio da una configurazione all'altra avviene nell'ordine di secondi. Questo, sommato al fatto che i movimenti risultino nel complesso uniformi e privi di cambi di direzione, fanno sì che il ciclo di lavoro del robot non preveda velocità elevate, brusche accelerazioni o vibrazioni eccessive. Di conseguenza, poichè i carichi inerziali sono direttamente proporzionali ai valori delle accelerazioni del sistema, il loro contributo sulla risposta strutturale risulta complessivamente ridotto. Questo dimostra come i grafici che riportano l'andamento dell' end-effector nel tempo siano pressochè analoghi sia nel caso statico, sia in quello dinamico implicito.

Secondo tali condizioni il robot lavora quindi in una condizione definibile **quasi-statica**: le variazioni di configurazione sono sufficientemente lente da permettere alla struttura di raggiungere continuamente una nuova posizione di equilibrio senza sviluppare fenomeni dinamici rilevanti.

Una situazione differente si avrebbe nel caso di cicli operativi con movimenti molto più rapidi, con variazioni significative delle posizioni dei singoli giunti in intervalli di tempo ridotti. In quel caso, le accelerazioni darebbero un contributo significativo al sistema e con esse anche gli effetti inerziali. Secondo tale scenario, se si prendesse sempre come riferimento la posizione raggiunta dall' end-effector durante l'esercizio, si otterrebbe un andamento della soluzione dinamica molto diverso rispetto al caso statico, rendendo indispensabile la necessità di seguire un approccio dinamico per una corretta valutazione dello stato tensionale.

Questa valutazione è stata inoltre supportata da un'analisi in frequenza, con l'obiettivo di definire il comportamento dinamico intrinseco della struttura, indipendentemente dai carichi applicati durante il ciclo di lavoro. In particolare, essa permette di determinare le frequenze proprie del sistema e le corrispondenti forme modali, ovvero le configurazioni secondo cui la struttura tende naturalmente a deformarsi quando viene eccitata. Le frequenze proprie rappresentano una proprietà caratteristica del sistema e dipendono esclusivamente dalla distribuzione di massa, dalla rigidità della struttura e dalle condizioni di vincolo. Esse identificano le frequenze naturali del manipolatore, alle quali la risposta dinamica può amplificarsi significativamente quando il sistema è eccitato da carichi dinamici con frequenza coincidente o prossima a quella naturale. Qualora tale condizione si verifichi, possono insorgere fenomeni di risonanza, con conseguente incremento delle oscillazioni, degli spostamenti e dello stato tensionale.

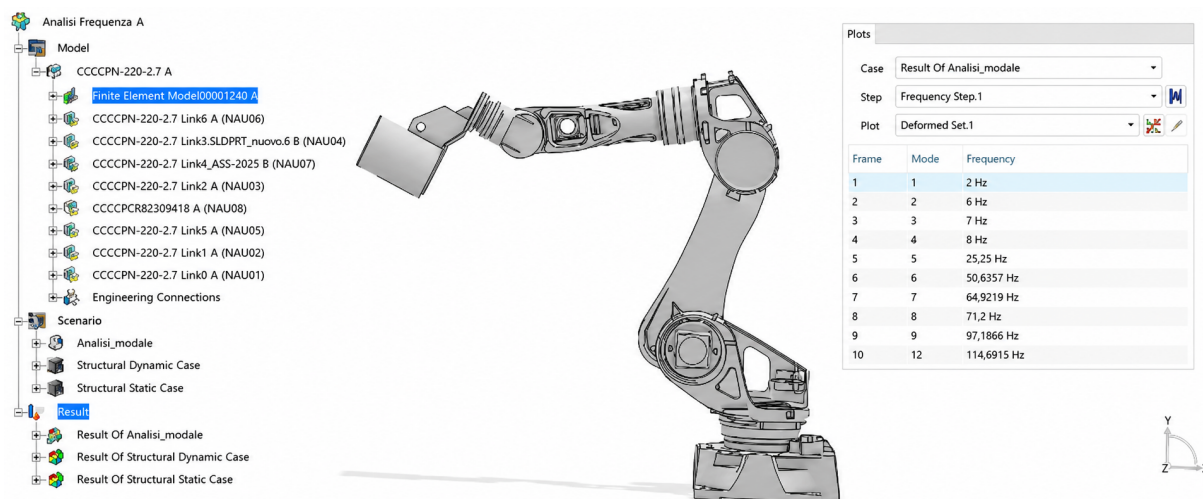


Figura 5.11: Analisi in frequenza del braccio robotico

Come mostrato in Figura 5.11, la prima frequenza propria del sistema risulta pari a

$$f_1 = 25,25 \text{ Hz}$$

Il corrispondente periodo naturale risulta quindi

$$T_1 = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{25,25} = 0,039 \text{ s}$$

Assumendo come riferimento un periodo pari circa a dieci volte quello naturale, si ha

$$T_{\text{rif}} = 10 T_1 \approx 0,39 \text{ s}$$

Al di sopra di tale periodo, gli effetti dinamici risultano poco significativi e la risposta del sistema tende ad avvicinarsi a quella di tipo quasi-statica. Nel caso in esame, il periodo caratteristico del movimento imposto risulta dell'ordine di alcuni secondi, per cui molto maggiore del valore di riferimento. Tradotto nel dominio della frequenza, questo significa che la frequenza del moto imposto risulta molto inferiore rispetto alla prima frequenza propria del manipolatore,

$$f_{\text{mov}} \ll f_1$$

e pertanto il sistema opera in condizioni sufficientemente lontane dalla risonanza. Questo implica che siano anche limitati i fenomeni di amplificazione dinamica, dando così una conferma ulteriore dei risultati pressochè coincidenti della simulazione statica e dinamica.

I risultati ottenuti consentono di trarre alcune considerazioni di carattere generale sul comportamento del manipolatore durante il ciclo di lavoro analizzato. Il confronto tra analisi statica e dinamica ha evidenziato un' elevata corrispondenza sia in termini di distribuzione delle tensioni sia in termini cinematici. L'analisi modale ha inoltre mostrato come sia possibile considerare trascurabili gli effetti dinamici. L'insieme degli studi compiuti dimostra quindi che, per le condizioni operative considerate, gli effetti inerziali risultano limitati e il comportamento del manipolatore può essere descritto con una buona accuratezza mediante un approccio quasi-statico. Ne consegue che, in questo specifico caso studio, l'impiego dell'analisi statica rappresenta una soluzione affidabile ed efficiente, consentendo di ottenere risultati confrontabili con quelli dell'analisi dinamica implicita, a fronte di un costo computazionale decisamente inferiore.

La metodologia sviluppata non si limita solamente a questo specifico caso applicativo. L'approccio proposto, basato sull'integrazione tra modellazione CAD, simulazione strutturale, analisi dinamica e verifica modale all'interno della piattaforma 3DEXPERIENCE, costituisce infatti una procedura generale per la valutazione del comportamento strutturale di qualunque componente meccanico. Questa metodologia può essere infatti estesa a diverse configurazioni geometriche, cicli di lavoro e condizioni di carico, rappresentando una base solida per gli sviluppi futuri nel campo della progettazione meccanica.

Capitolo 6

Conclusioni e Sviluppi futuri

Il confronto tra i due casi studio permette di valutare la robustezza e trasferibilità della metodologia proposta. Il modello Dassault ha permesso di costruire e verificare l'intero *workflow* in un ambiente controllato come quello del *Digital Twin*, mentre il caso reale di Comau ha consentito di applicare il medesimo approccio ad un sistema industriale. I risultati ottenuti evidenziano come la metodologia proposta permetta di collegare in modo coerente requisiti, modellazione CAD, simulazione strutturale e ottimizzazione di qualunque robot meccanico si necessiti di analizzare, dal semplice modello di Dassault Systemes, fino ad assiemi più complessi come il prototipo di Comau. Il principale valore aggiunto del metodo non risiede nella singola simulazione, ma nella definizione di un processo strutturato e replicabile su qualunque applicazione.

Il lavoro svolto rappresenta una delle molteplici applicazioni di una metodologia integrata per la simulazione di qualunque componente meccanico, all'interno della piattaforma 3DEXPERIENCE. Grazie alla natura modulare della piattaforma, il modello realizzato costituisce una base di partenza sulla quale possono essere introdotti ulteriori livelli di complessità, con l'obiettivo di avvicinare progressivamente la simulazione digitale al comportamento reale del sistema fisico. In particolare si possono introdurre come sviluppi futuri la definizione di contatti non lineari, analisi più approfondite dei componenti e una caratterizzazione più completa delle condizioni operative.

6.1 Introduzione dei contatti

Un primo sviluppo può riguardare la modellazione avanzata dei **contatti meccanici** tra le diverse parti dell'assieme. Nella presente tesi le connessioni tra i componenti sono state rappresentate attraverso condizioni semplificate, sufficienti a valutare il comportamento globale della struttura. Tuttavia in un sistema reale, le interfacce tra parti accoppiate possono presentare fenomeni più complessi come piccoli spostamenti relativi, distribuzioni locali delle pressioni di contatto o possibili fenomeni di attrito.

Secondo tale scenario, l'algoritmo di contatto permetterebbe di ottenere una rappresentazione più fedele delle zone di collegamento, analizzando con maggiore dettaglio la distribuzione dei carichi e individuando eventuali concentrazioni locali di tensione. Questo sarebbe in grado di garantire maggiore affidabilità del modello numerico, specialmente nelle zone più critiche della struttura.

6.2 Analisi a fatica

Un altro possibile studio può coinvolgere i fenomeni di **fatica** dei componenti meccanici. In particolare, i robot operano attraverso numerosi cicli operativi in cui, anche le tensioni inferiori ai limiti statici del materiale possono, se applicate ciclicamente, causare danneggiamenti nel tempo.

Integrando un'analisi a fatica sarebbe possibile sfruttare i risultati ottenuti dalla simulazione per stimare la vita utile dei componenti e valutare eventuali modifiche progettuali orientate all'aumento dell'affidabilità.

6.3 Fenomeni non lineari

Infine, un ulteriore sviluppo potrebbe riguardare l'introduzione di materiali avanzati, capaci di descrivere eventuali **fenomeni plastici e non lineari**. In condizioni operative particolarmente gravose come sovraccarichi accidentali, urti o configurazioni limite della struttura, alcuni materiali possono superare il campo elastico ed entrare in quello plastico. La definizione di questi fenomeni permetterebbe di analizzare deformazioni permanenti, redistribuzione delle tensioni e margini di sicurezza oltre il reale funzionamento del sistema.

L'integrazione di questi ulteriori aspetti all'interno della piattaforma 3DEXPERIENCE resa disponibile da Dassault Systèmes consentirebbe quindi di evolvere il modello realizzato verso una rappresentazione sempre più vicina al reale comportamento del robot, avvicinandosi al concetto di digital twin, in cui il modello virtuale non rappresenta solamente la geometria del prodotto, ma diventa uno strumento predittivo per supportare la progettazione durante tutto il ciclo di vita del sistema.

Bibliografia

- [1] S. Friedenthal, A. Moore, and R. Steiner, *A Pratical Guide to SysML*. Morgan Kaufmann, 2015.
- [2] INCOSE, *Systems Engineering Handbook*. Wiley, 2023.
- [3] D. Systèmes, *CATIA Magic Systems of Systems Architect User Guide*, 2025.
- [4] D. Systèmes, *3DEXPERIENCE Platform Documentation*, 2025.
- [5] D. Systèmes, *CATIA User Doumentation*, 2025.
- [6] D. Systèmes, *SolidWorks User Guide*, 2025.
- [7] D. Systèmes, *Abaqus Analysis User Guide*, 2025.
- [8] D. Systèmes, *Simulia Structural Simulation Documentation*, 2025.
- [9] Comau, *Robot N-220-2.7 Technical Datasheet*, 2024.
- [10] M. P. Bendsoe and O. Sigmund, *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer, 2004.
- [11] M. Grieves, “Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication,” *White paper*, 2014.