

FGS MANIPULATOR

AUXILIARY EQUIPMENT SYSTEM FOR THE
INSTALLATION/DISASSEMBLY OF PLASMA FACING
COMPONENTS FOR REMOTE HANDLING APPLIED
IN A NUCLEAR FUSION REACTOR



DIE UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
TI. NAPOLEO FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA E TECNOLOGIE DELL'INFORMAZIONE

SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE E ROBOTICA

CORSO DI PROTOTIPAZIONE VIRTUALE 2023/2024

Candidati: Salvatore Granata – P38000219

Giuseppe Saggese – P38000213

Vincenzo Falcini – P38000187

Chiar.mo Prof. Giuseppe Di Gironimo

SOMMARIO

◆ Introduction

- ◆ Project Objectives

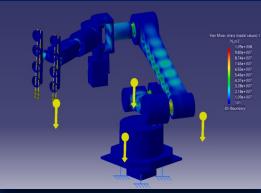
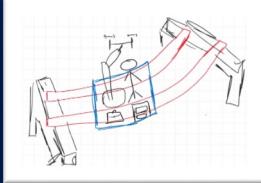
◆ Modelling

- ◆ Requirements Management
- ◆ Functional Analysis
- ◆ Logical Architecture Definition
- ◆ Physical Design (CATIA v5)

◆ Validation & Simulation

- ◆ FEM Analysis
- ◆ Kinematic Simulation
- ◆ Ergonomic Analysis

◆ Conclusion



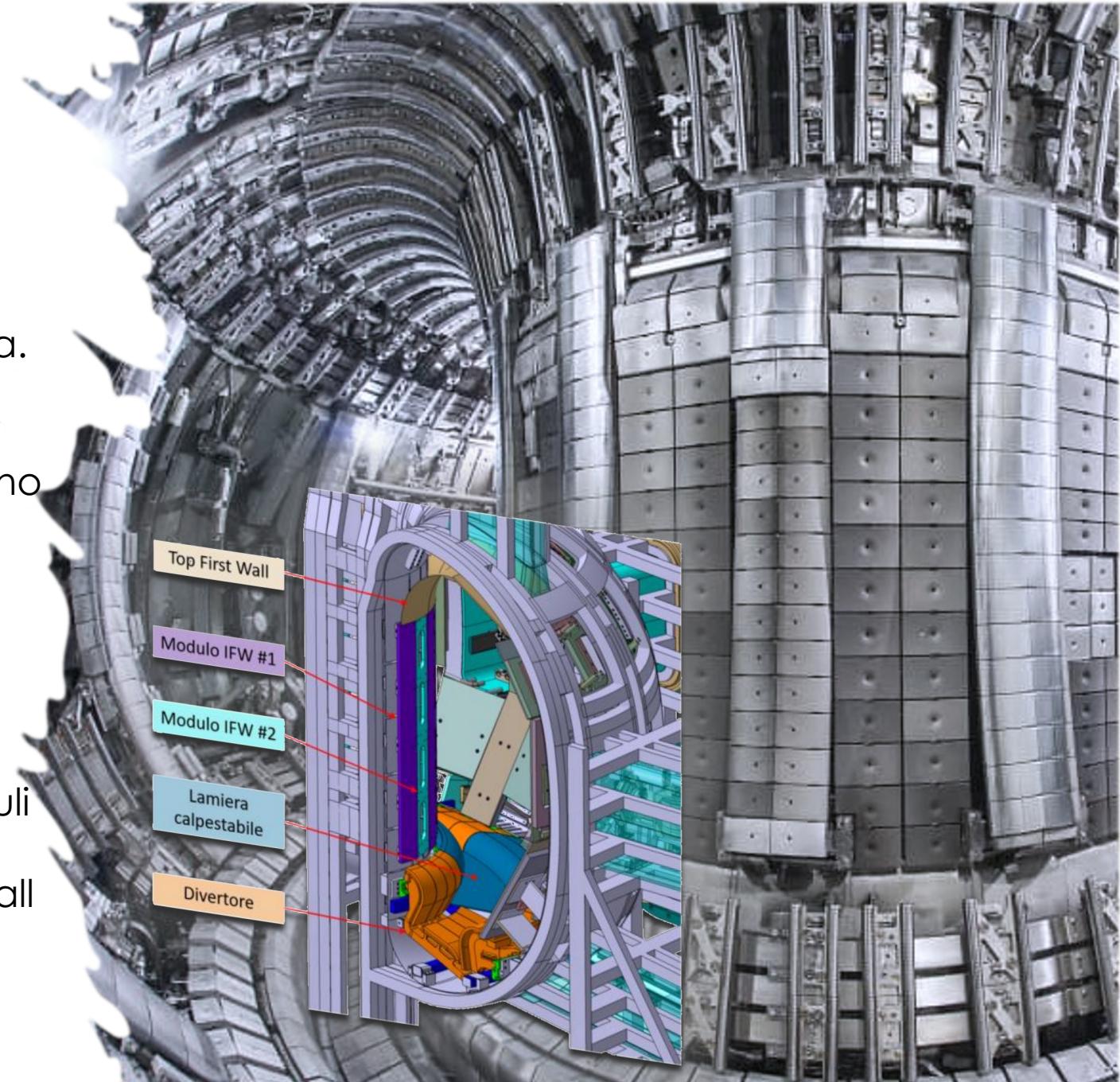
Introduction - Tokamak

Un tokamak è un reattore a fusione nucleare progettato per generare energia attraverso la fusione controllata di isotopi di idrogeno.

Questo è composto da una struttura toroidale adatta al controllo e al confinamento del plasma.

I "Plasma Facing Components" sono componenti che necessitano di essere manutenuti e si dividono in:

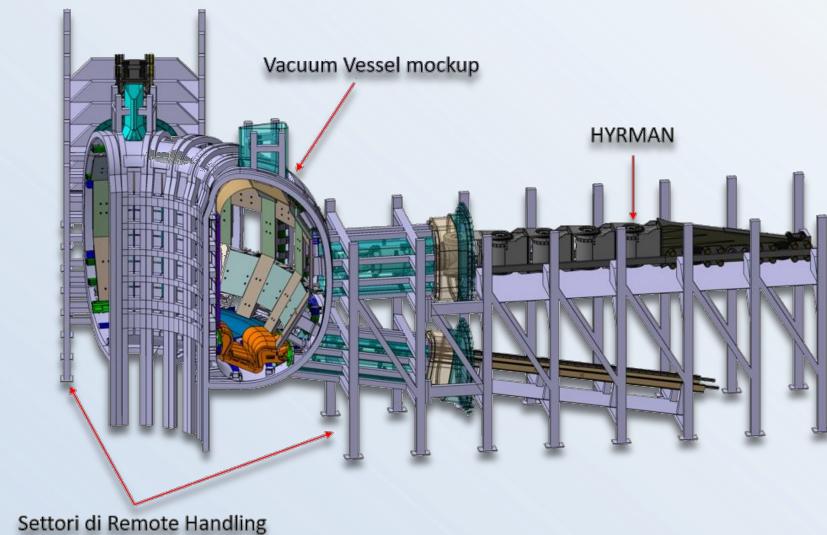
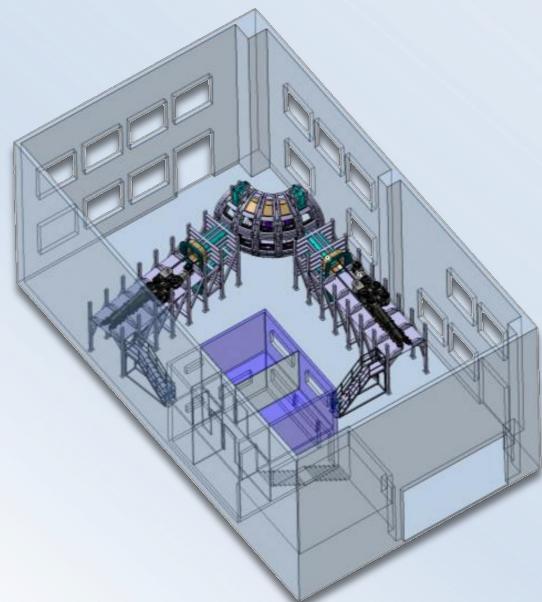
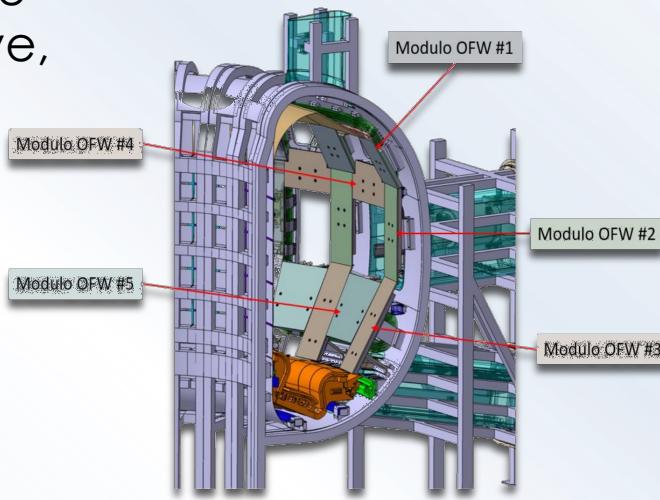
- **Divertore**, composto da una serie di moduli ("Cassette") posti nella parte inferiore del reattore;
- **First Wall (FW)**, composta da una serie di moduli tali da rappresentare le pareti laterali, denominate rispettivamente Outboard First Wall (**OFW**), Inboard First Wall (**IFW**) e Top First Wall (**TFW**)



Introduction – Project Objective

Il progetto consiste nella prototipazione virtuale di un **sistema di attrezzature** che fungono da supporto agli operatori della **RH Facility** nelle differenti fasi operative, considerato l'ingente peso dei moduli di **First Wall** con massa del modulo più pesante stimata di circa 250 kg.

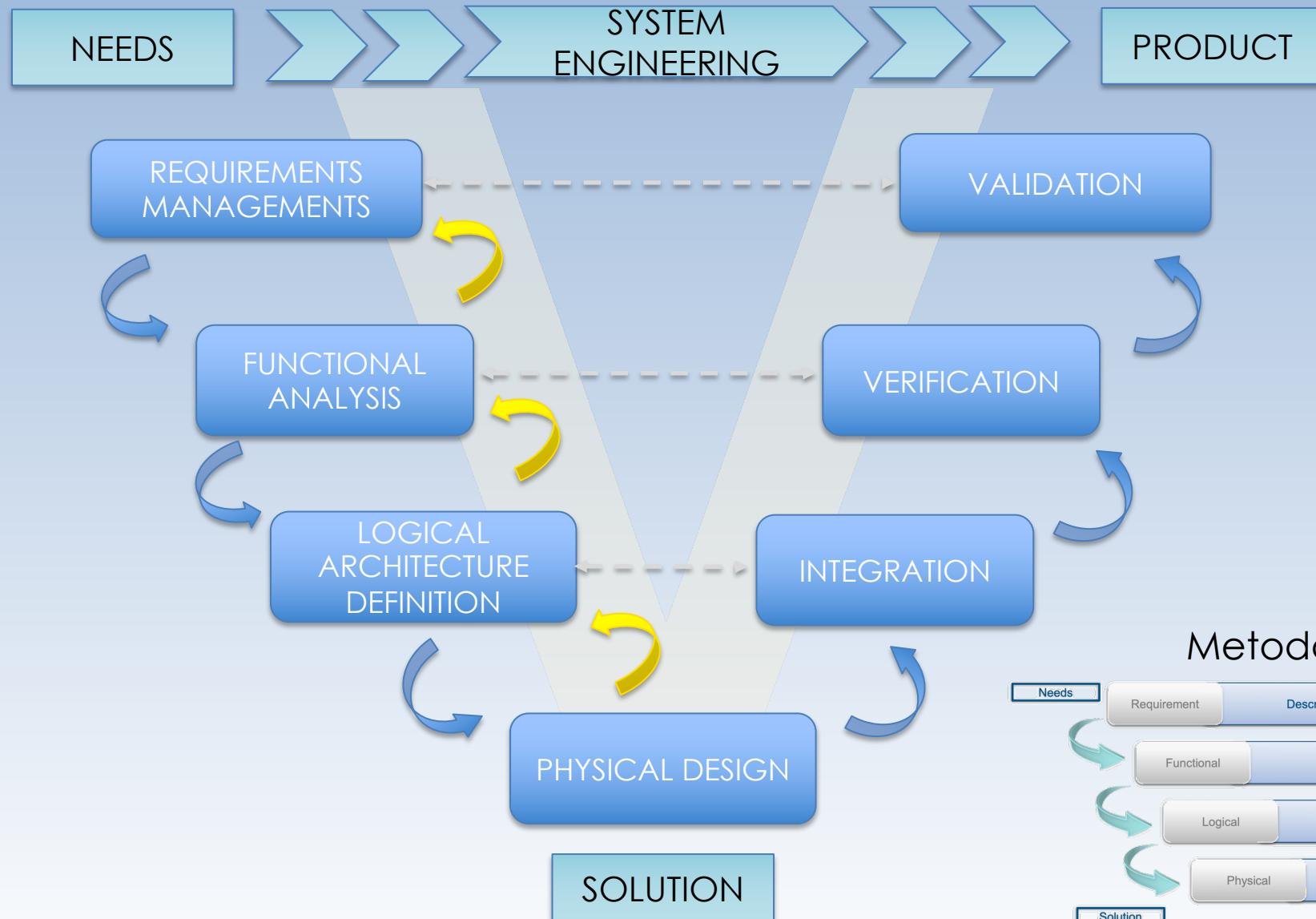
Il sistema, oltre a sostituire l'operatore nella **movimentazione dei moduli**, dovrà garantirne l'accesso alla superficie calpestabile interna all'ambiente, o prevedere una soluzione alternativa alla superficie calpestabile che permetta ugualmente l'accesso all'area interna ai mockup per **operazioni di montaggio/smontaggio** manuale dei moduli di First Wall e di **ispezione visiva**.



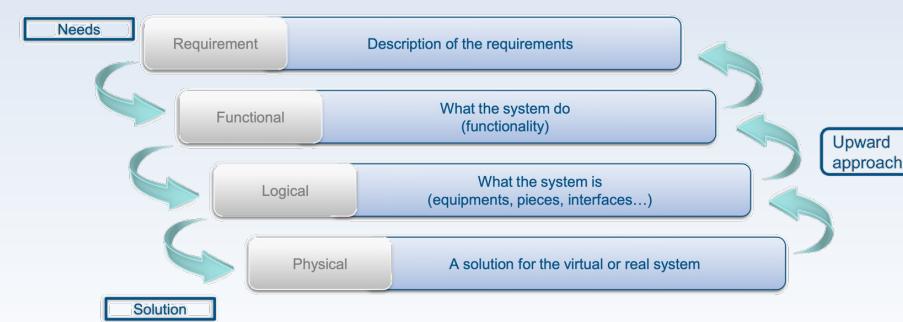
Il sistema potrà sfruttare le aperture laterali del mockup del **Vacuum Vessel** per accedere e operare nell'area interna, nonché per consentire l'accesso agli operatori.

Il sistema dovrà cooperare con l'operatore e potrebbe, quindi, essere da esso **attuato e manipolato**.

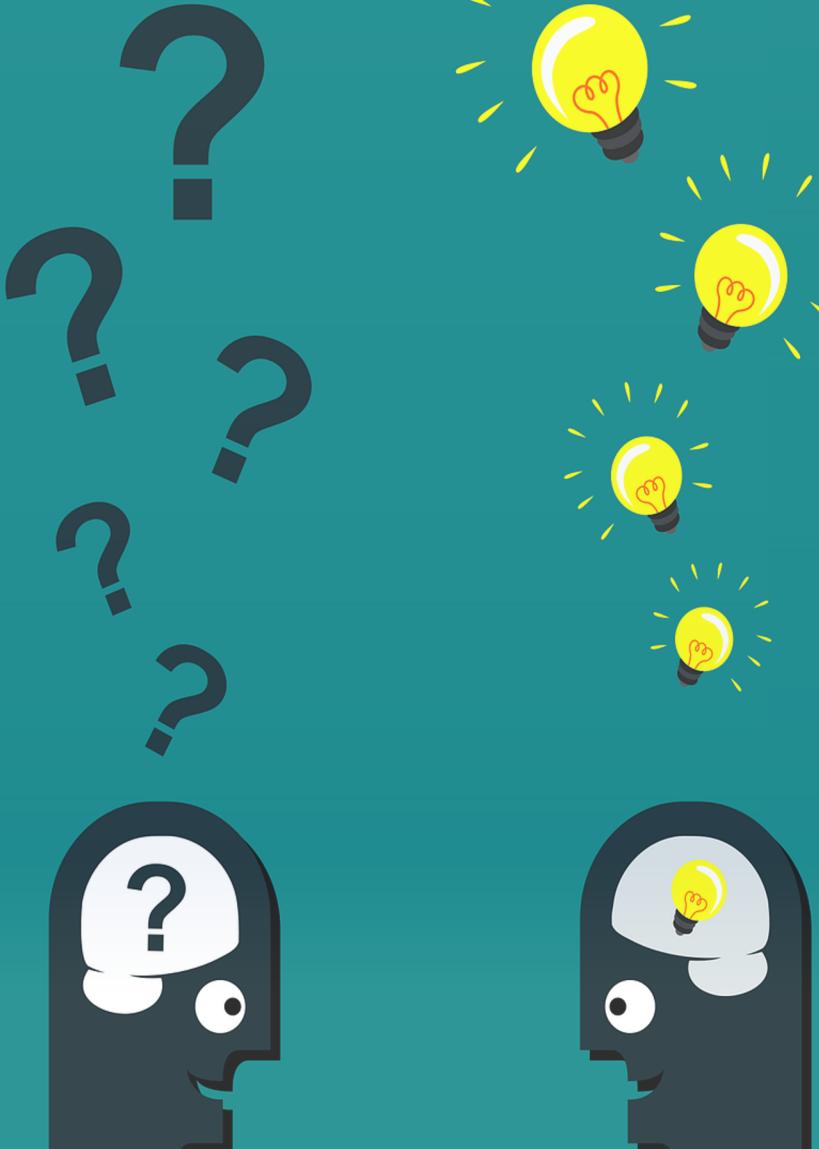
Modelling – Product V-Cycle



Metodología RFLP



Requirements Management

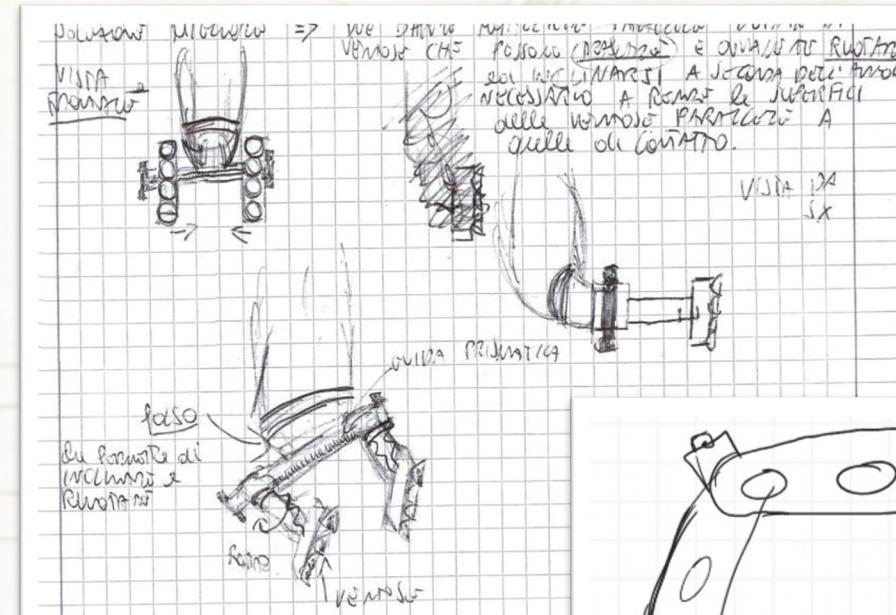


1. Deve consentire al lavoratore di operare all'interno dell'ambiente dei mockup, raggiungendo manualmente in ergonomia la superficie di ogni modulo di First Wall per le operazioni manuali di montaggio/smontaggio ed ispezione;
2. deve garantire il corretto afferraggio dei moduli di Outboard e Inboard First Wall, una volta smontati dall'operatore;
3. deve avere un numero di gradi di libertà tale da garantire il corretto posizionamento dei moduli di Outboard e Inboard First Wall in tutte le possibili posizioni di test;
4. deve avere una robustezza tale da poter trasportare i moduli di Outboard e Inboard First Wall assumendo che il modulo di First Wall più pesante abbia una massa stimata di 250 kg;
5. deve consentire l'ispezione visiva da parte degli operatori dei mockup di First Wall e divertore;
6. deve essere progettato in maniera tale da non arrecare danno al lavoratore durante il suo utilizzo;
7. deve essere progettato in maniera tale da non arrecare danno ai moduli di First Wall durante il suo utilizzo;
8. deve essere progettato in maniera tale da non arrecare danno agli altri componenti del sistema di mockup durante il suo utilizzo;
9. deve poter cooperare ed essere attuato dagli operatori in modo ergonomico;
10. deve consentire al lavoratore di avere sempre "a portata di mano" la cassetta degli attrezzi.

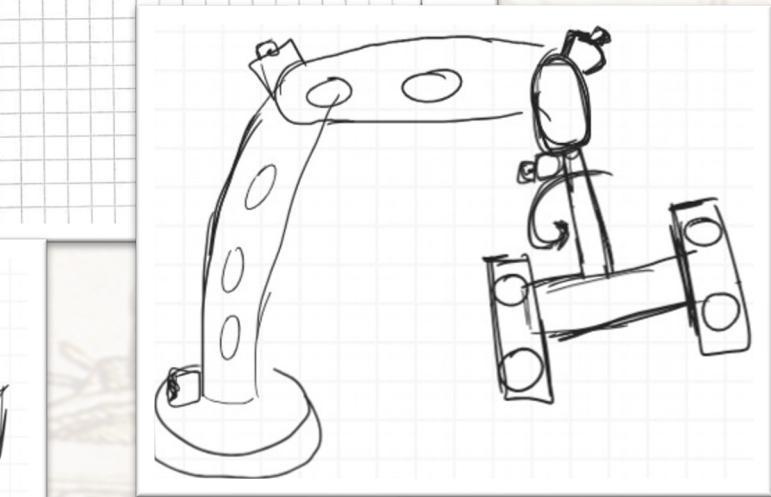
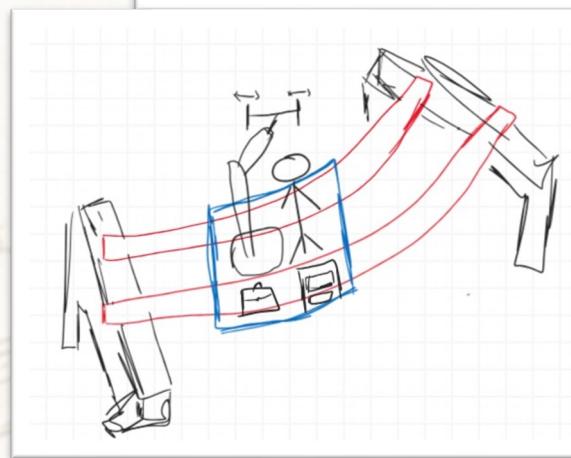
Functional Analysis - Sketches



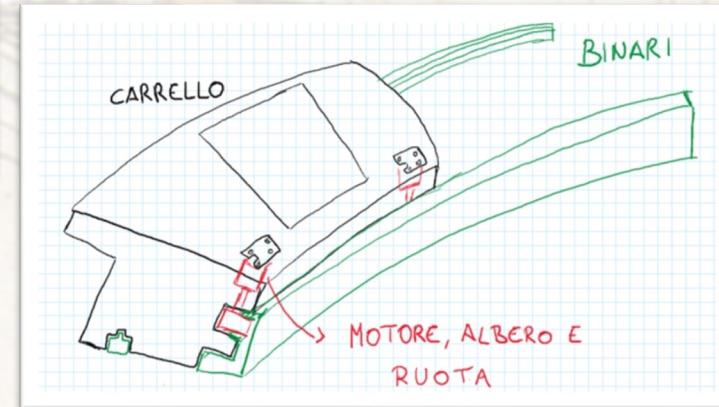
Requisiti di ingombro e operatività: struttura a 6gdl capace di raggiungere tutti i punti necessari alle operazioni di montaggio/smontaggio dei moduli all'interno del Tokamak con opportuno sistema di afferraggio per le differenti forme degli stessi.



Requisiti relativi all'operatore: piattaforma che permette di effettuare procedure di ispezione e operazioni manuali ai moduli garantendo sicurezza ed ergonomia con il manipolatore.



Sviluppo di un meccanismo di movimentazione che permetta, sia all'operatore che al manipolatore, di operare nei diversi settori del Vacuum Vessel



Logical Architecture Definition

Manipolatore

Al fine di soddisfare tutti i requisiti di ingombro e operatività è stato progettato **un manipolatore** a 6 gradi di libertà che presenta 3 giunti rotoidali e un giunto sferico per garantire il massimo volume di lavoro possibile.

End-Effectors

L'**end-effector** presenta delle barre metalliche capaci di traslare (mediante un sistema di attuazione lineare) sulle quali sono state applicate delle ventose per il vuoto che adempiono al compito di afferraggio dei moduli del First Wall.

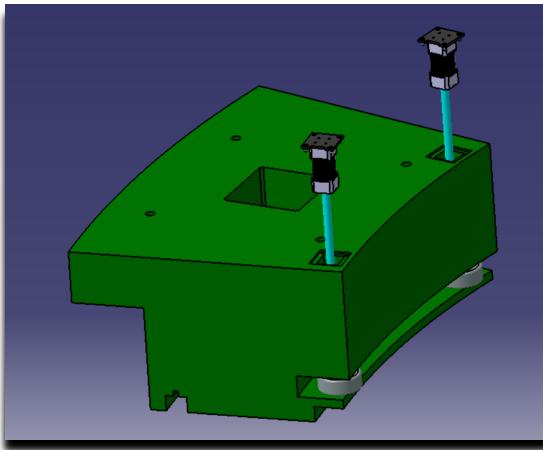
Binari e carrelli

Inoltre è stata costruita una struttura provvista di due **binari** sui quali possono scorrere due **carrelli**, uno destinato esclusivamente al manipolatore, l'altro destinato all'operatore per garantire completa autonomia e rafforzare i requisiti di ergonomia e sicurezza.

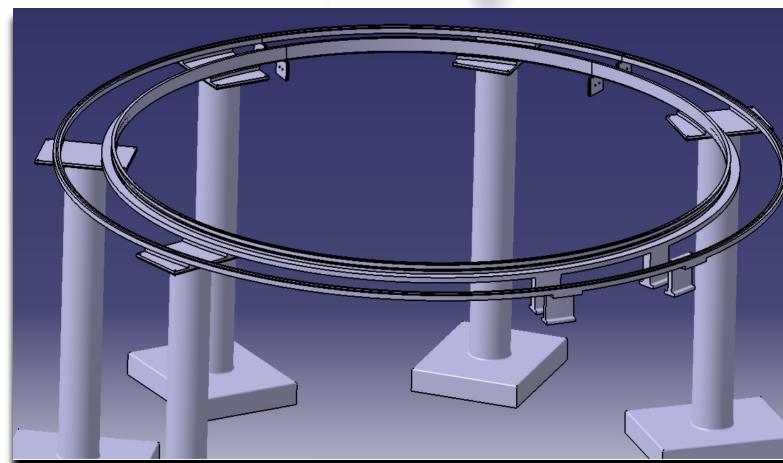
Physical Design

Nella realizzazione del progetto è stato utilizzato l'approccio **Bottom-Up** permettendo maggiore flessibilità e adattamento alle situazioni in evoluzione.

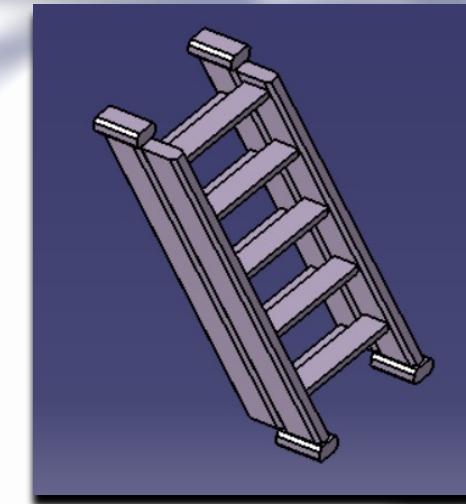
Di seguito sono mostrati i componenti prodotti:



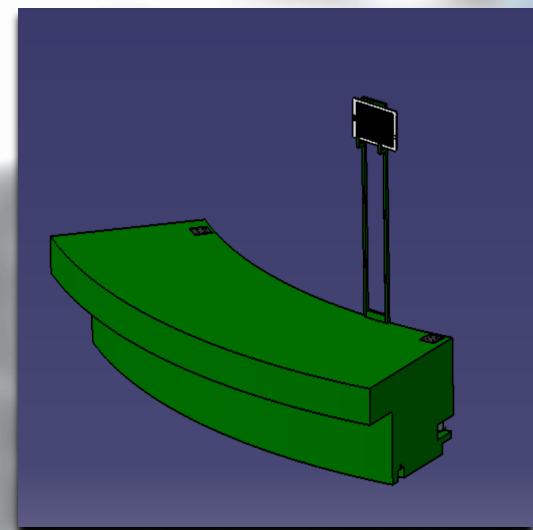
Carrello con coperchi, motori, adattatori e ruote per trasporto Robot



Struttura di sostegno e binari



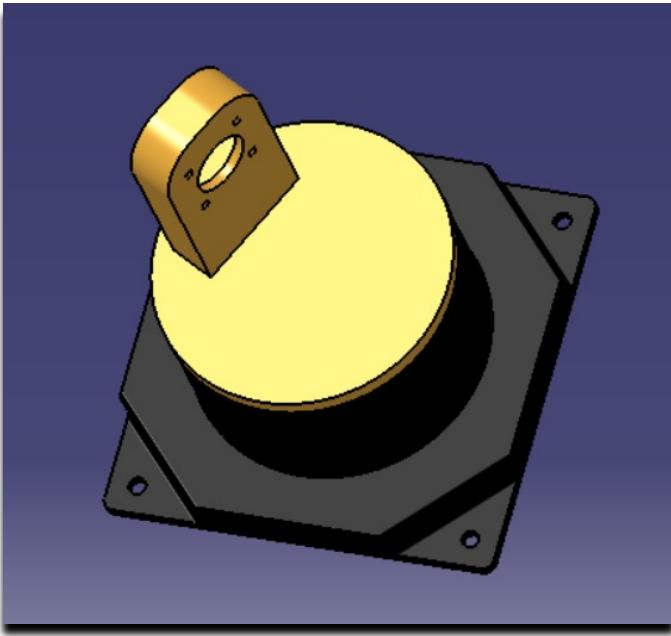
Scala estensibile



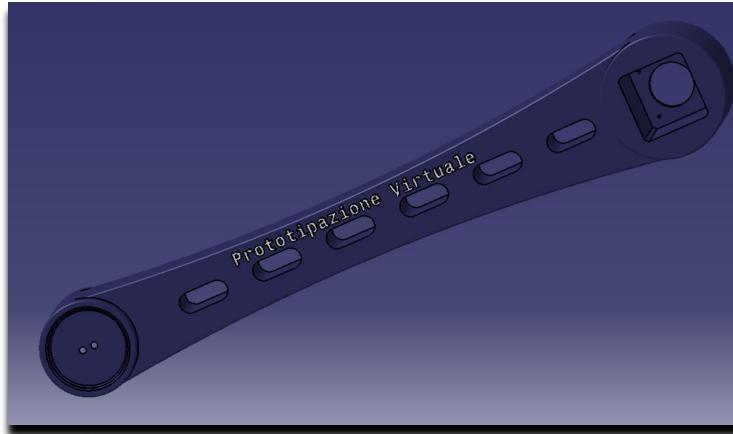
Carrello per trasporto operatore con stazione di comando

Physical Design - Robot

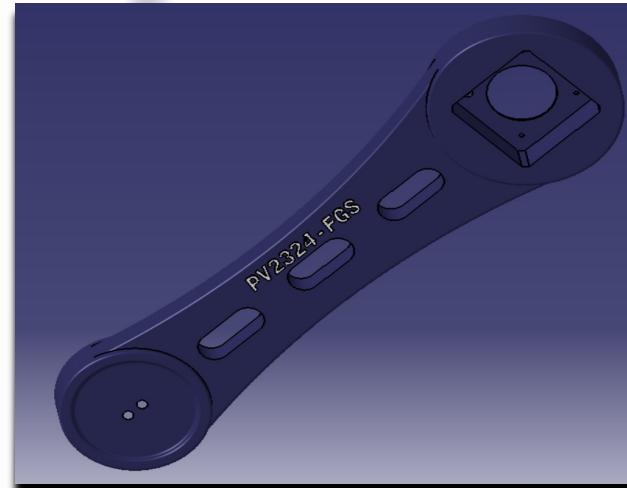
Di seguito sono mostrati i componenti prodotti:



Basamento

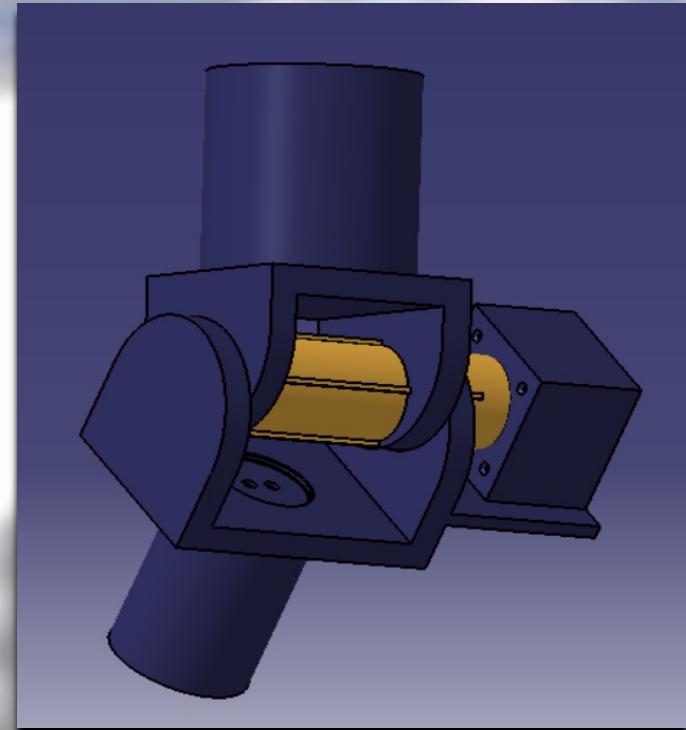


Link 2



Link 1

Giunto sferico

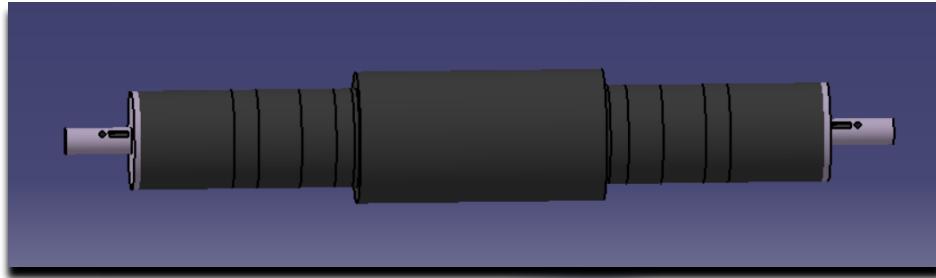


Physical Design – End Effector

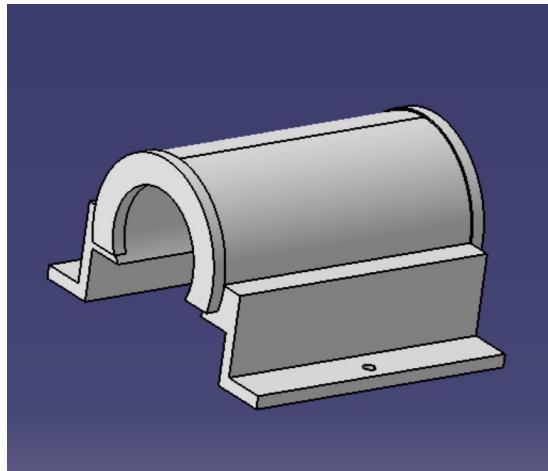
Di seguito sono mostrati i componenti prodotti:



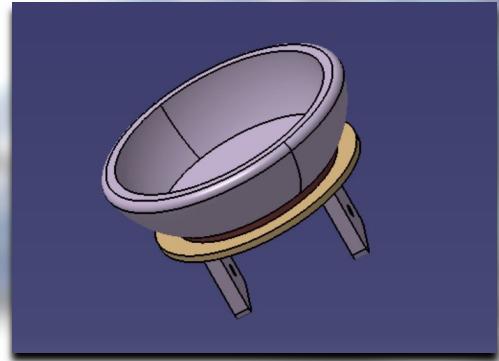
End-Effector



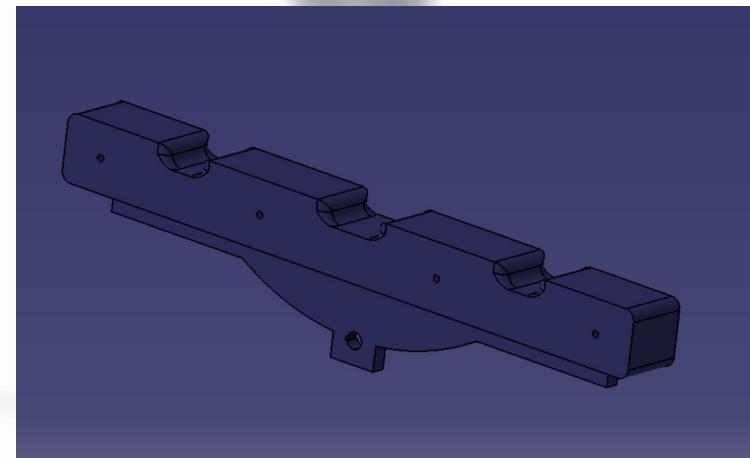
Attuatore lineare



Coperchio



Ventosa

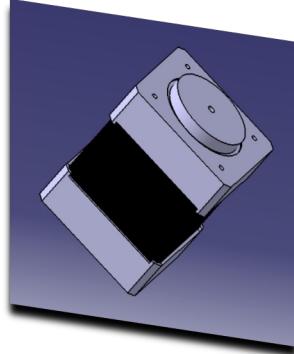


Barra metallica

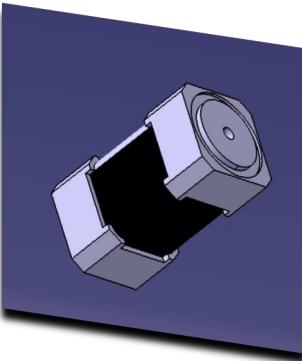
Physical Design - Actuators

Il sistema motrice per la movimentazione del manipolatore prevede l'utilizzo di **motori passo-passo** (stepper) della serie NEMA, da 24 a 42, con una riduzione di velocità a favore di un incremento di coppia mediante riduttore planetare implementato direttamente nella parte.

Di seguito sono mostrati i componenti realizzati:



Motori per comando link, basamento ed end-effector

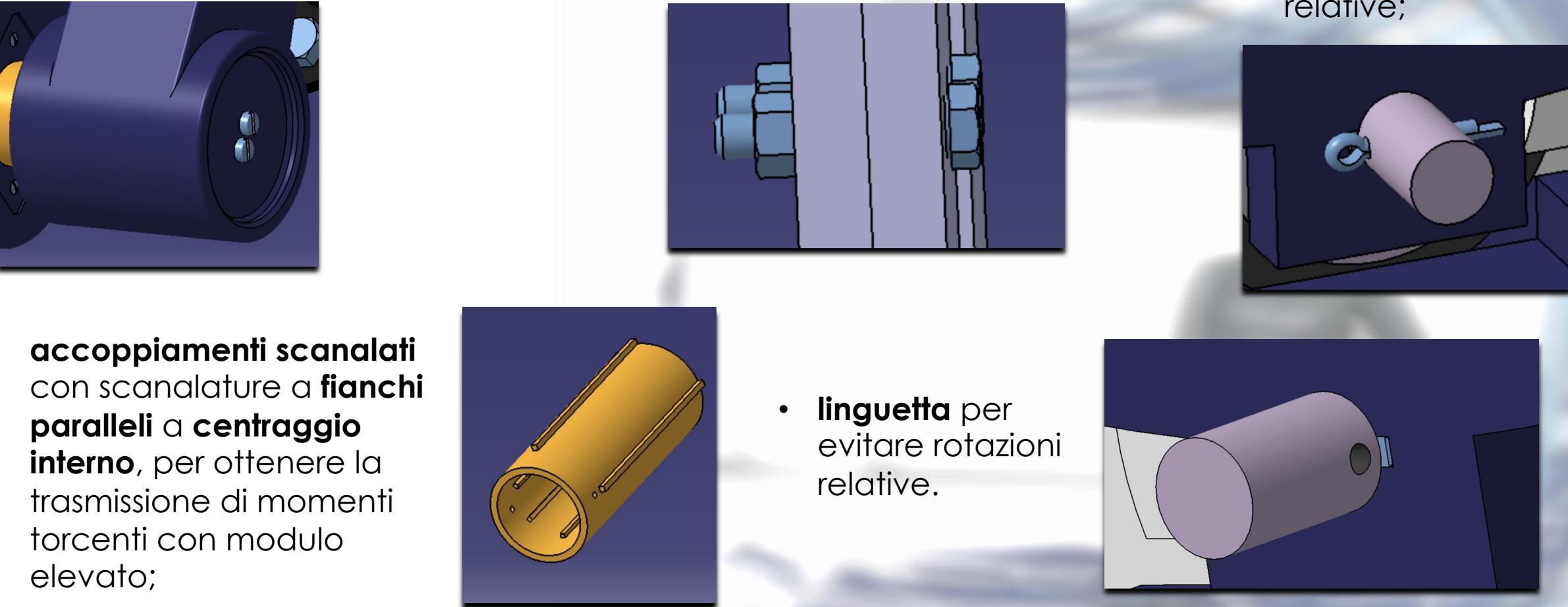


Motori per comando carrelli

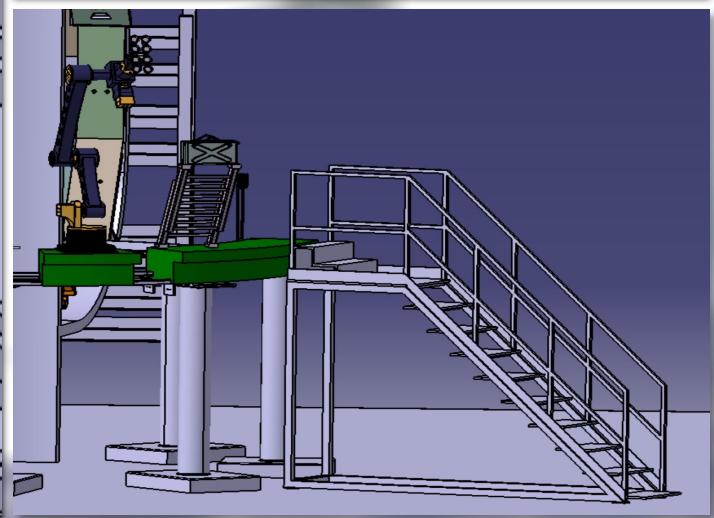
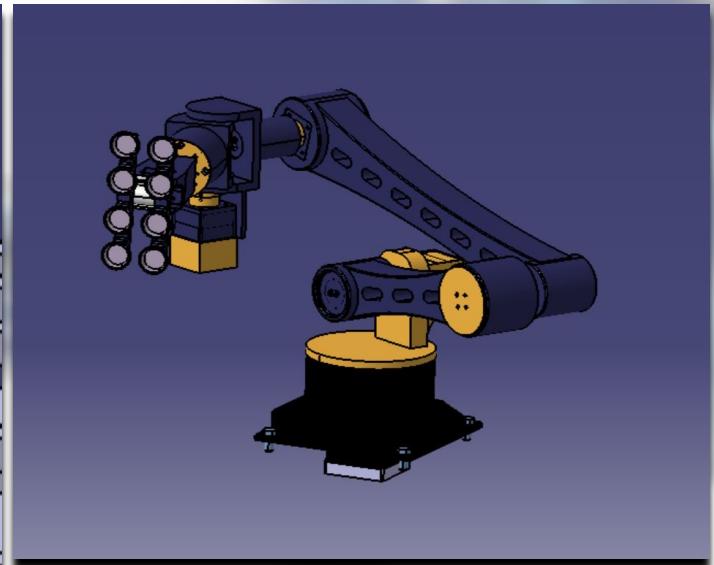
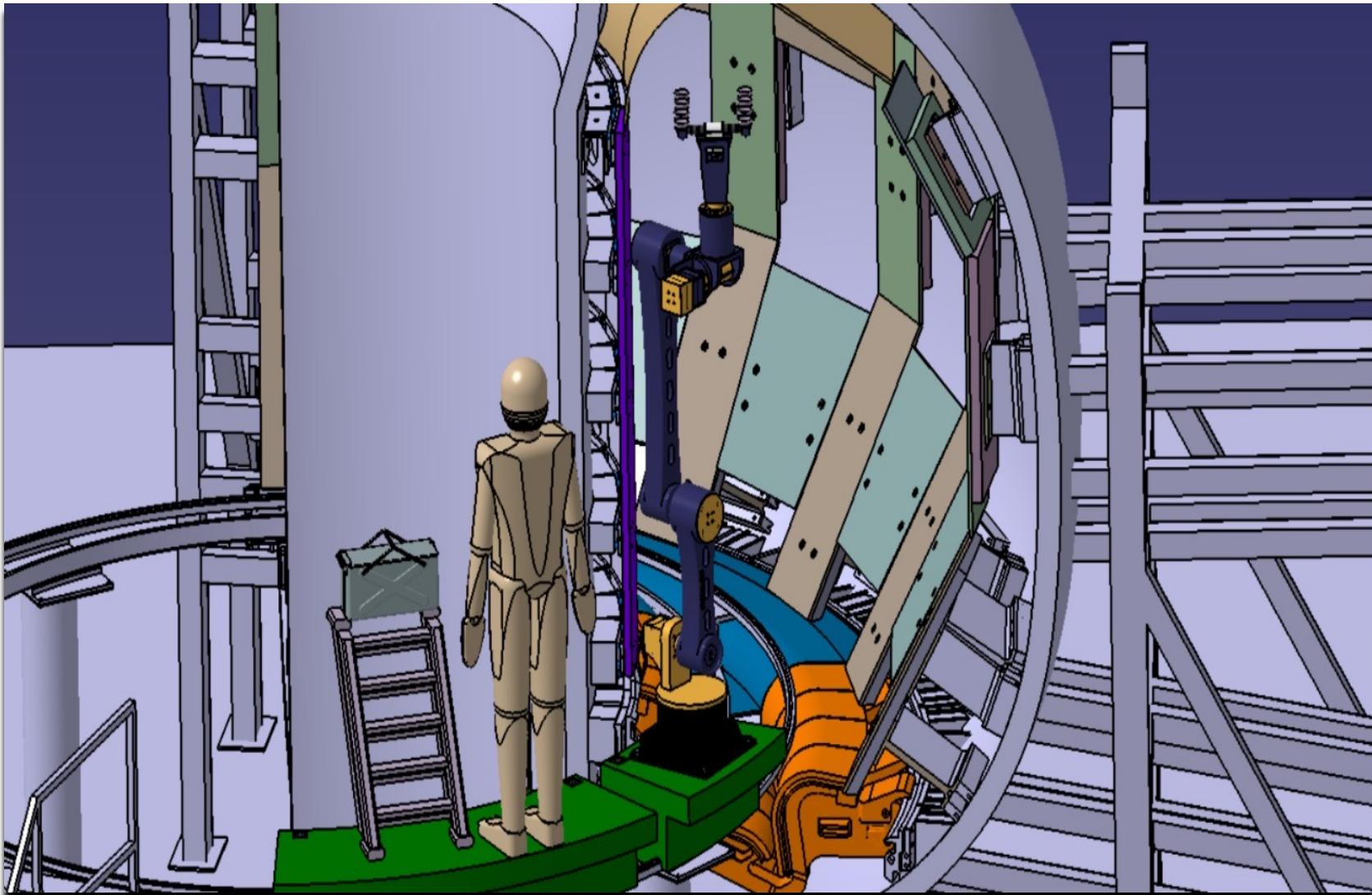


Physical Design - Connections

Sono stati utilizzati i seguenti organi di collegamento e trasmissione:

- **collegamenti a vite mordente;**
 - **collegamento tramite bulloni** per realizzare un **collegamento per serraggio**;
 - **copiglia** per evitare traslazioni relative;
 - **accoppiamenti scanalati** con scanalature a **fianchi paralleli a centraggio interno**, per ottenere la trasmissione di momenti torcenti con modulo elevato;
 - **linguetta** per evitare rotazioni relative.
- 

Physical Design – Total Implementation



Validation & Simulation

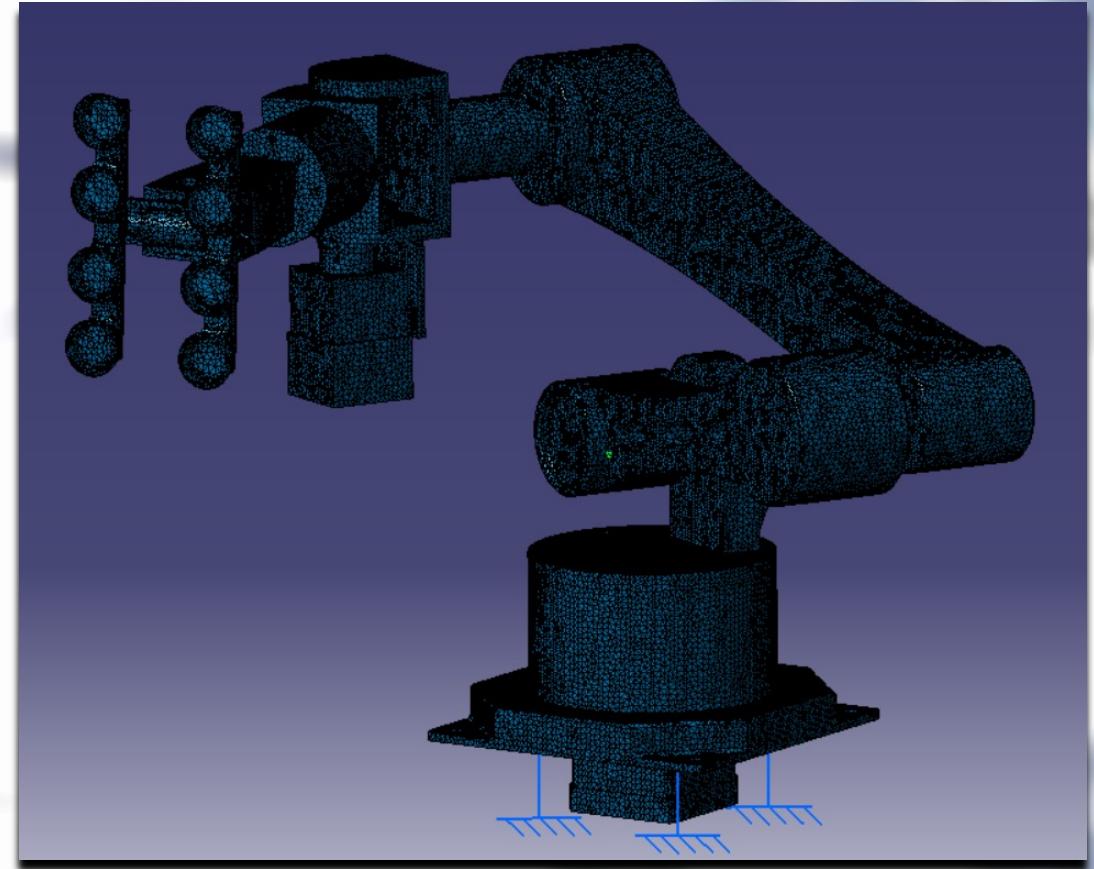
Analisi FEM – configurazione per i moduli di IFW #1

Materiale:

- Acciaio
- Tensione di snervamento: 250 MPa
- Coefficiente di sicurezza: 1,5

Impostazioni:

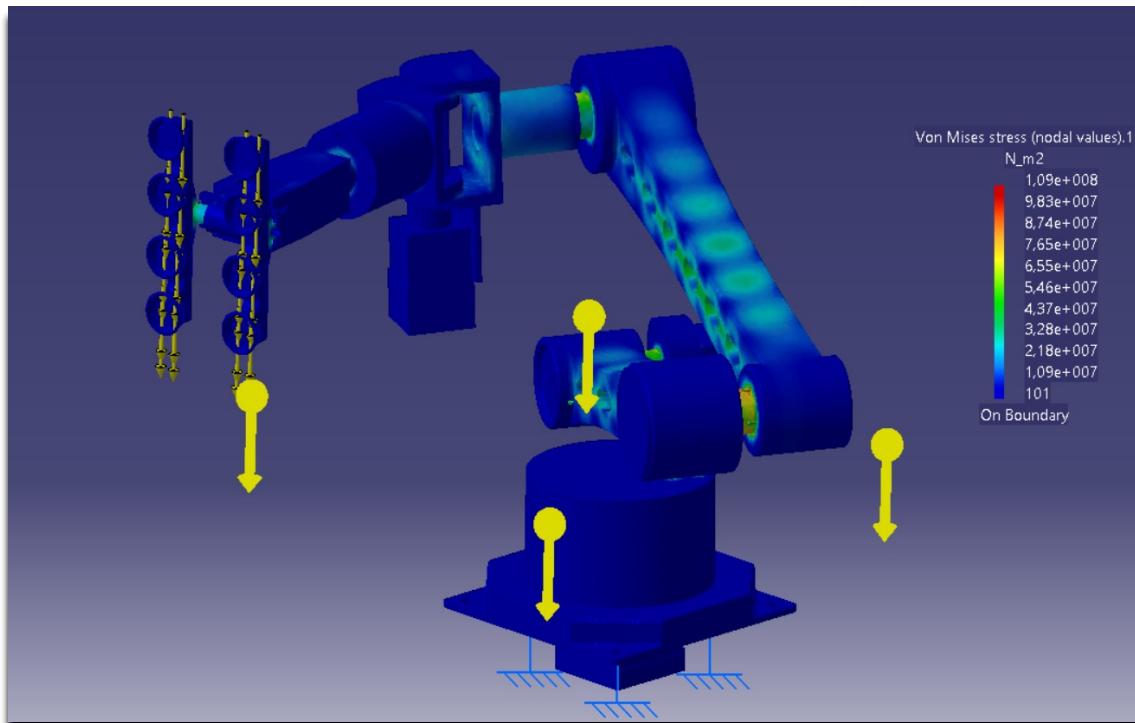
- Incastro alla base della struttura
- Carico di 2500 N sull'end effector per reggere e movimentare il modulo da assemblare di peso 250kg
- Accelerazione gravitazionale su tutta la struttura
- Dimensione: 7 mm
- Saggitta: 1 mm



Mesh Manipolatore in configurazione montaggio modulo IFW #1

Validation & Simulation

Analisi FEM - configurazione per i moduli di IFW#1

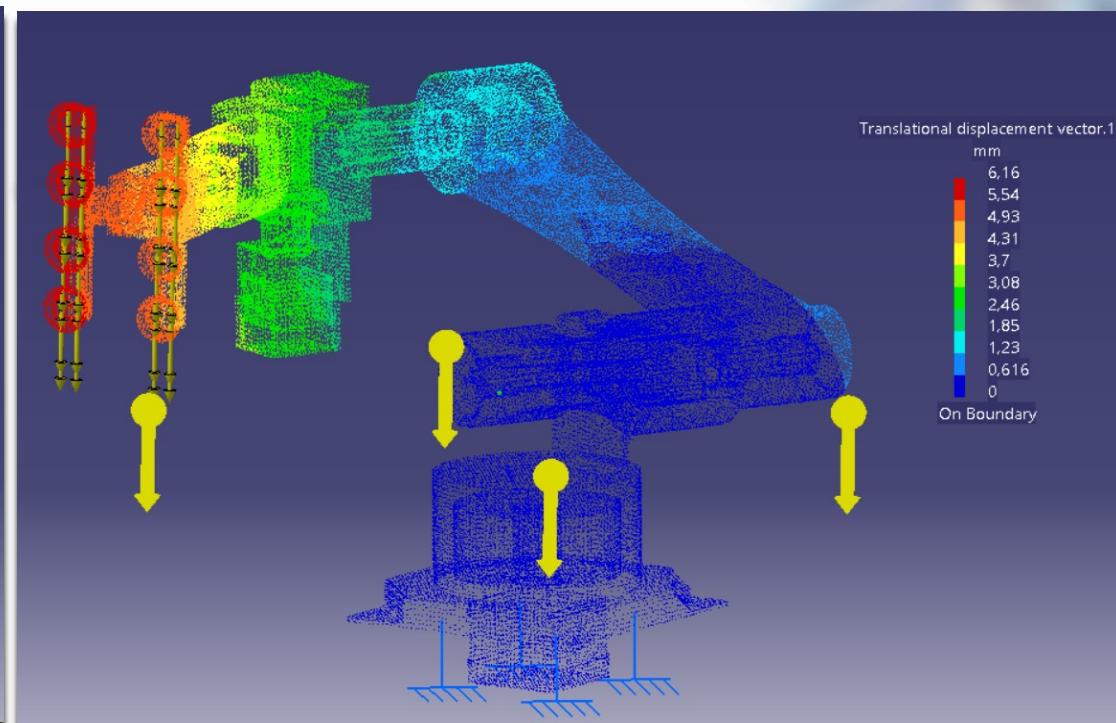


Risultati degli sforzi alla Von Mises:

Sforzo massimo rilevato: 109 MPa

Sforzo ammissibile: 156 MPa

$$109 \text{ MPa} < 156 \text{ MPa}$$



Risultati ottenuti dal translational displacement vector:

Spostamento massimo: 6,16 mm

Validation & Simulation

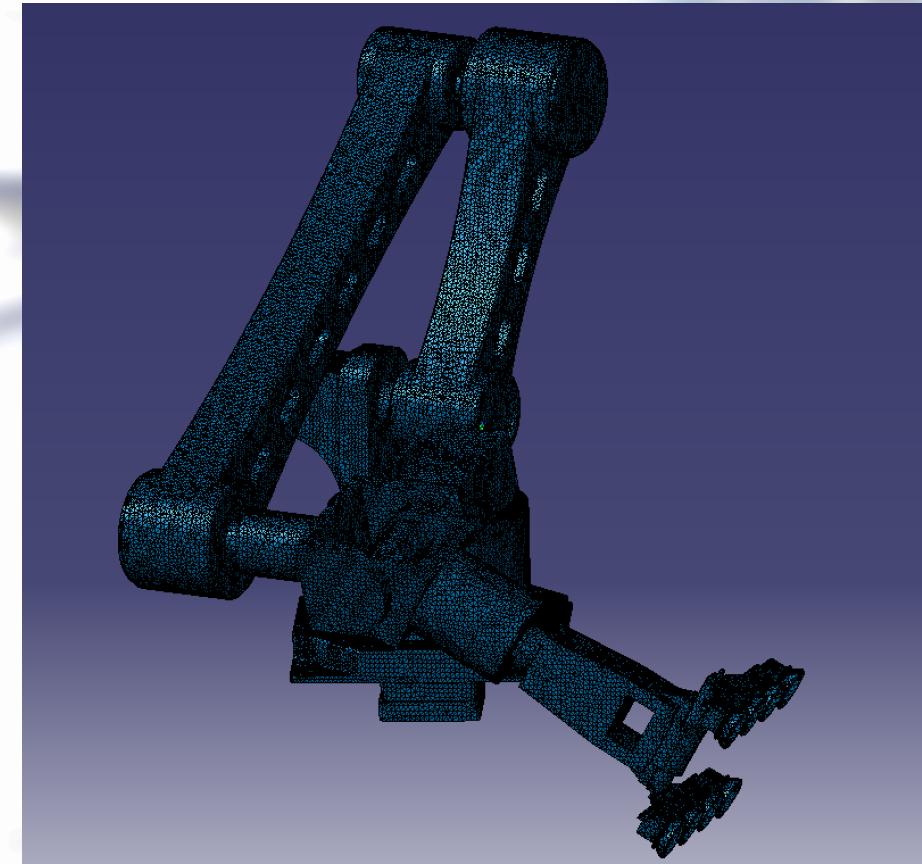
Analisi FEM - configurazione per i moduli OFW#3

Materiale:

- Acciaio
- Tensione di snervamento: 250 MPa
- Coefficiente di sicurezza: 1,5

Impostazioni:

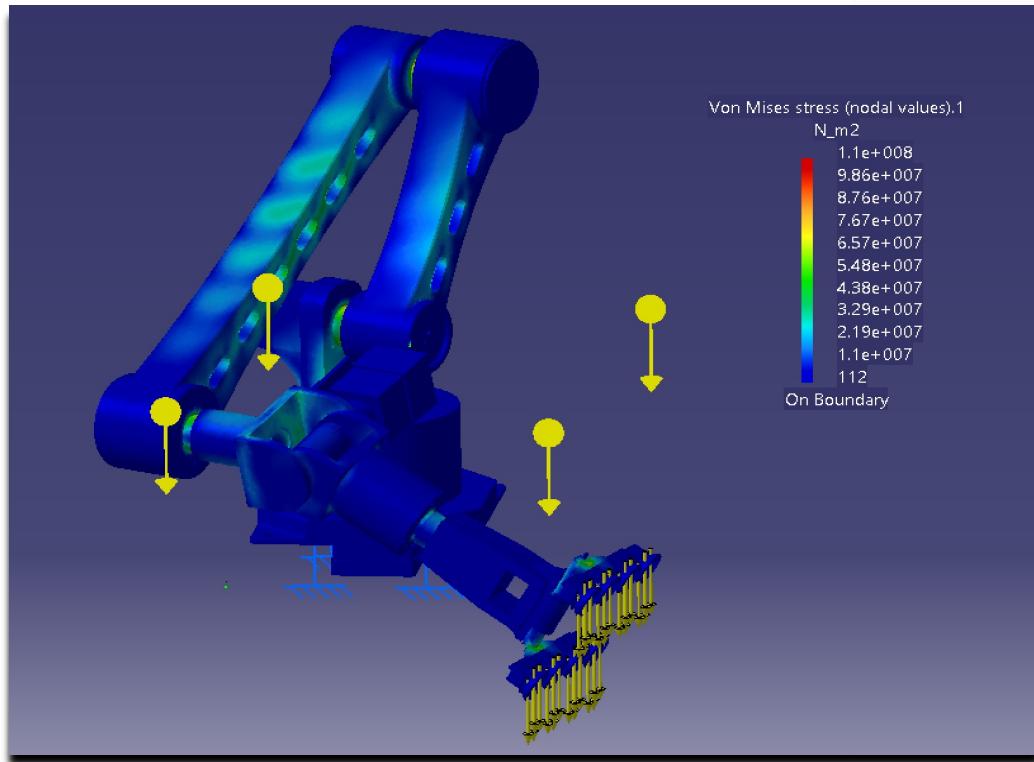
- Incastro alla base della struttura
- Carico di 2500 N sull'end effector per reggere e movimentare il modulo da assemblare di peso 250kg
- Accelerazione gravitazionale su tutta la struttura
- Dimensione: 7 mm
- Saggitta: 1 mm



Mesh Manipolatore in configurazione montaggio/smontaggio modulo OFW#3

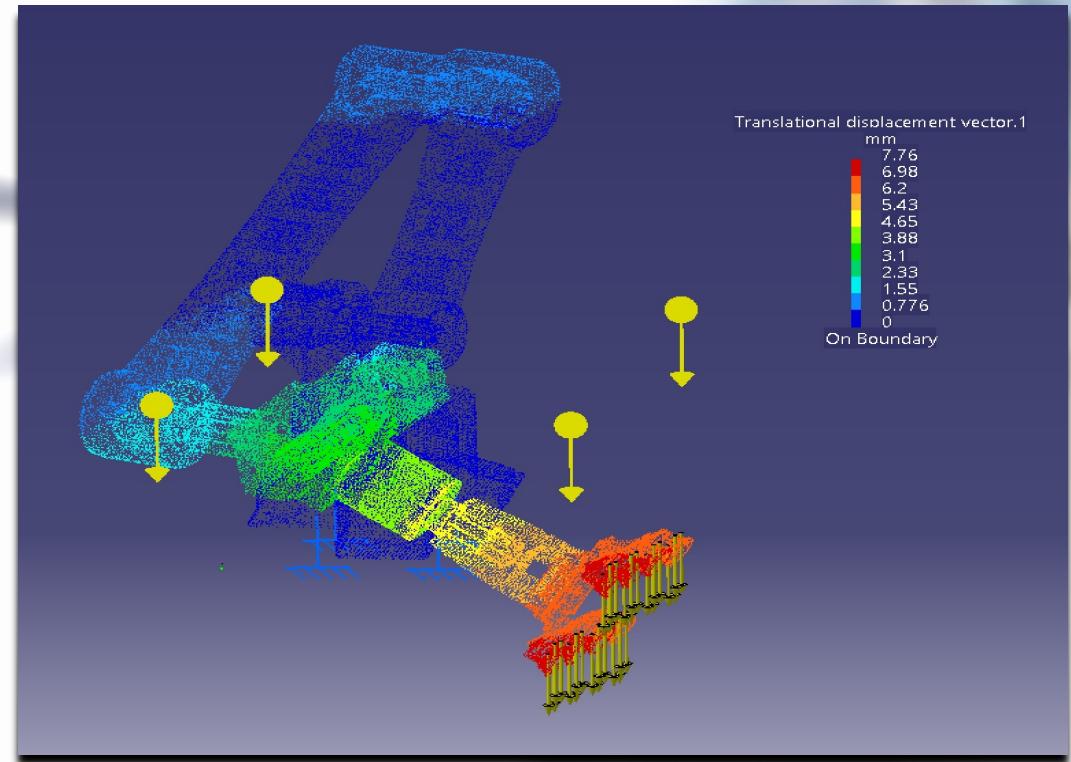
Validation & Simulation

Analisi FEM - configurazione per i moduli OFW#3



Risultati degli sforzi alla Von Mises:
Sforzo massimo rilevato: 110 MPa
Sforzo ammissibile: 156 Mpa

$$110 \text{ MPa} < 156 \text{ MPa}$$



Risultati ottenuti dal translational displacement vector:

Spostamento massimo: 7,76 mm

Validation & Simulation

Analisi FEM - configurazione per i moduli OFW#1

Materiale:

- Acciaio
- Tensione di snervamento: 250 MPa
- Coefficiente di sicurezza: 1,5

Impostazioni:

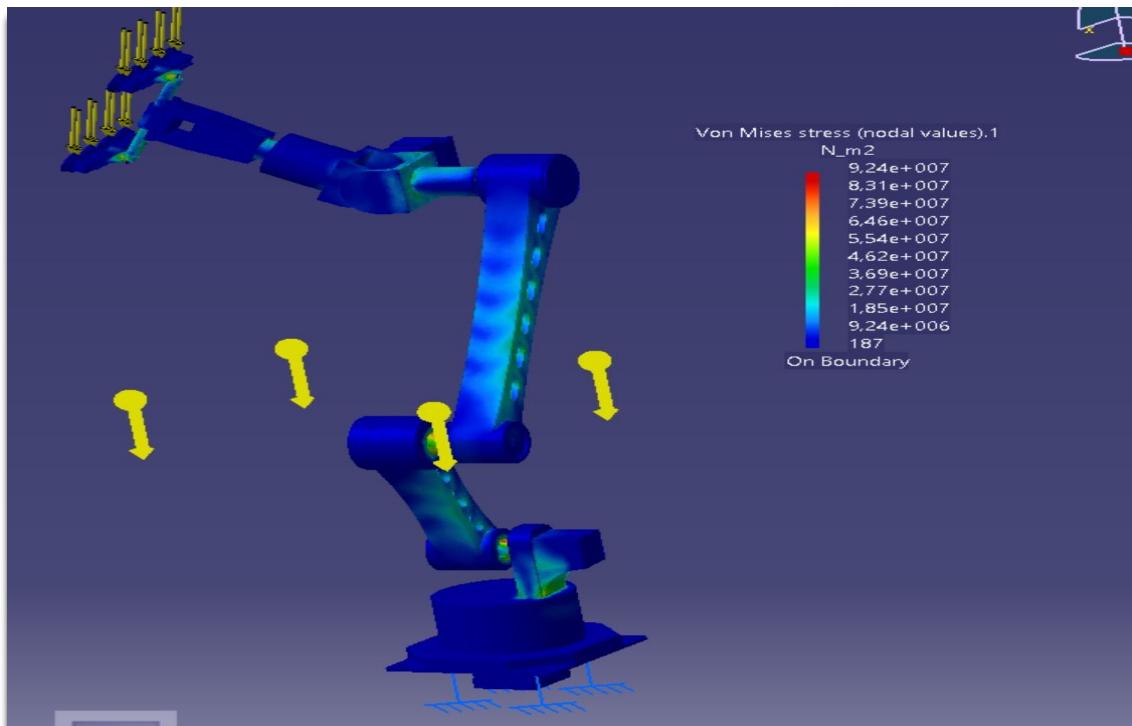
- Incastro alla base della struttura
- Carico di 2500 N sull'end effector per reggere e movimentare il modulo da assemblare di peso 250kg
- Accelerazione gravitazionale su tutta la struttura
- Dimensione: 7 mm
- Saggitta: 1 mm



Mesh Manipolatore in configurazione montaggio modulo OFW#1

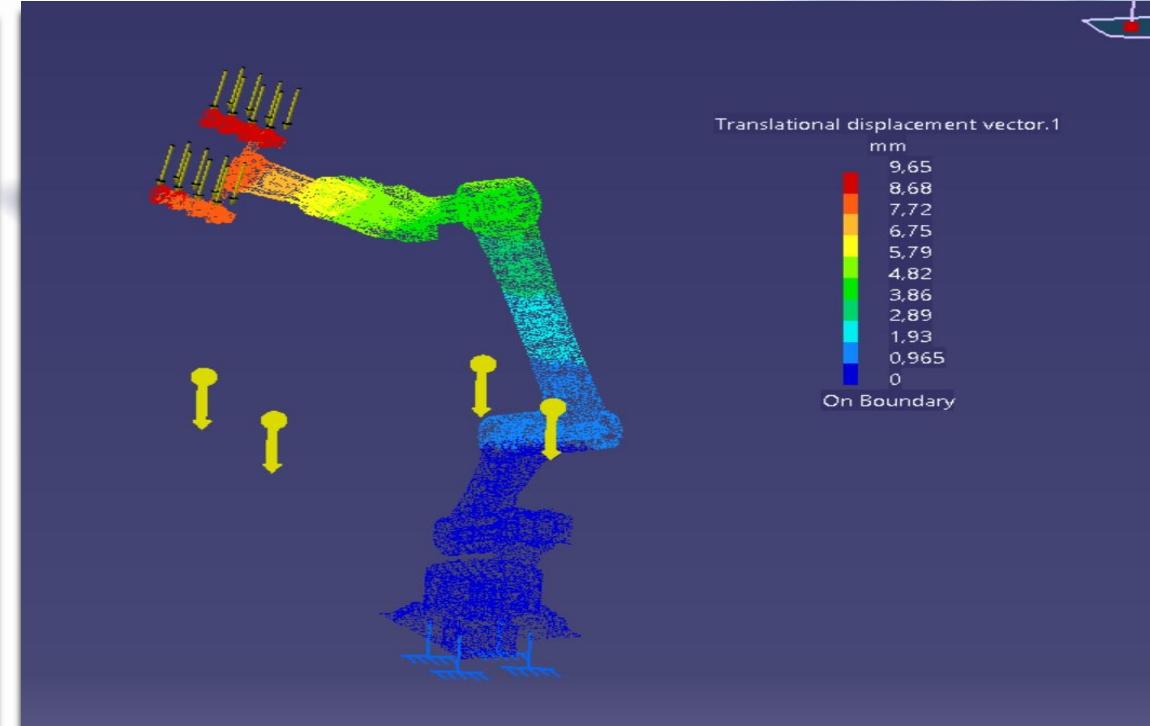
Validation & Simulation

Analisi FEM - configurazione per i moduli OFW#1



Risultati degli sforzi alla Von Mises:
Sforzo massimo rilevato: 92,4 MPa
Sforzo ammissibile: 156 MPa

$$92,4 \text{ MPa} < 156 \text{ MPa}$$



Risultati ottenuti dal translational displacement vector:

Spostamento massimo: 9,65 mm

Validation & Simulation

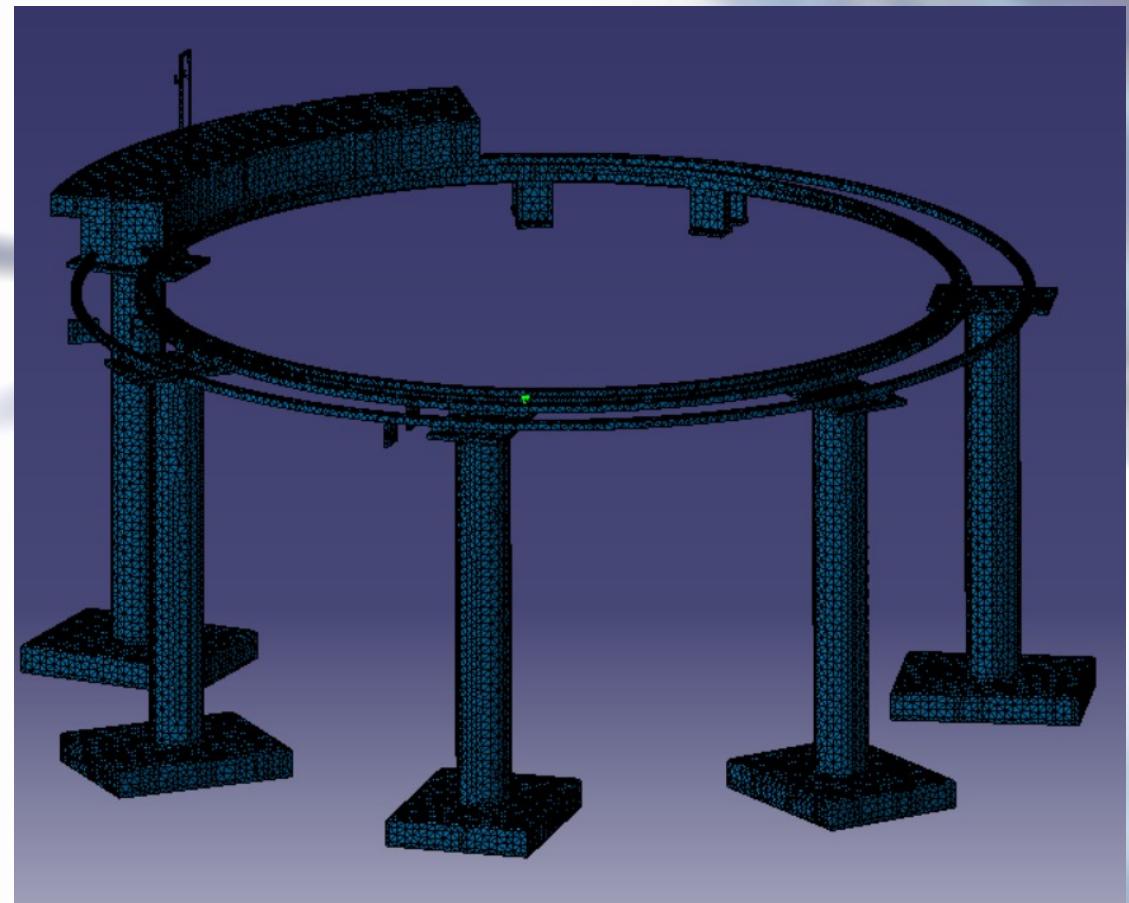
Analisi FEM – Binari e carrelli

Materiale:

- Acciaio
- Tensione di snervamento: 250 MPa
- Coefficiente di sicurezza: 1,5

Impostazioni:

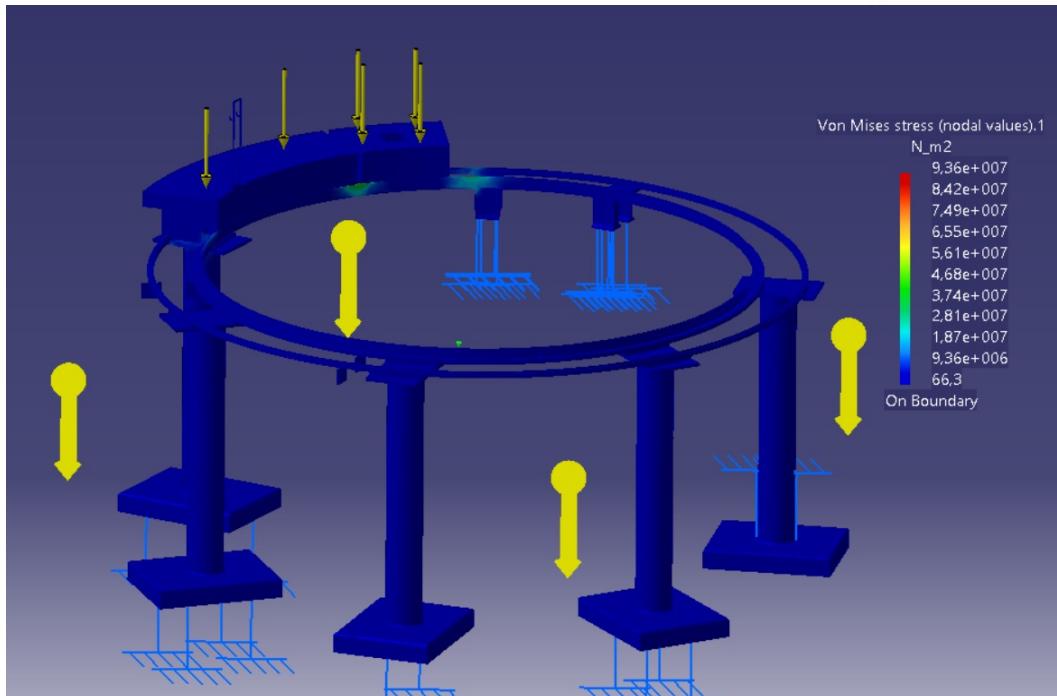
- Incastro alle basi della struttura
- Carico di 6700 N sul carrello riservato al robot (420 kg del robot e 250 kg del pannello)
- Accelerazione gravitazionale su tutta la struttura
- Dimensione: 35 mm
- Saggitta: 2 mm



Mesh struttura binari e carrelli

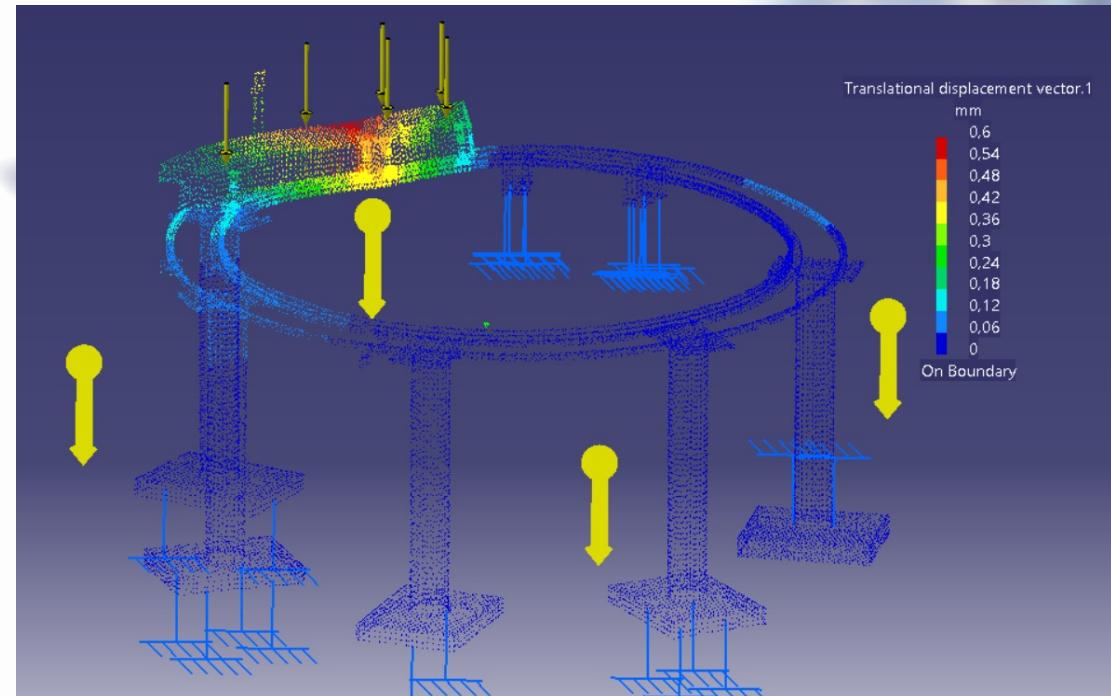
Validation & Simulation

Analisi FEM – Binari e carrelli



Risultati degli sforzi alla Von Mises:
Sforzo massimo rilevato: 93,6 MPa
Sforzo ammissibile: 156 MPa

$$93,6 \text{ MPa} < 156 \text{ MPa}$$



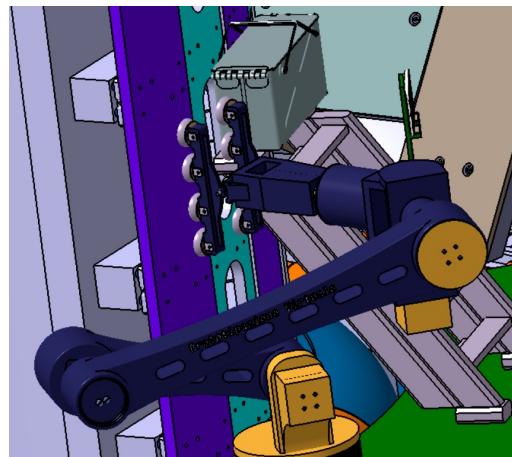
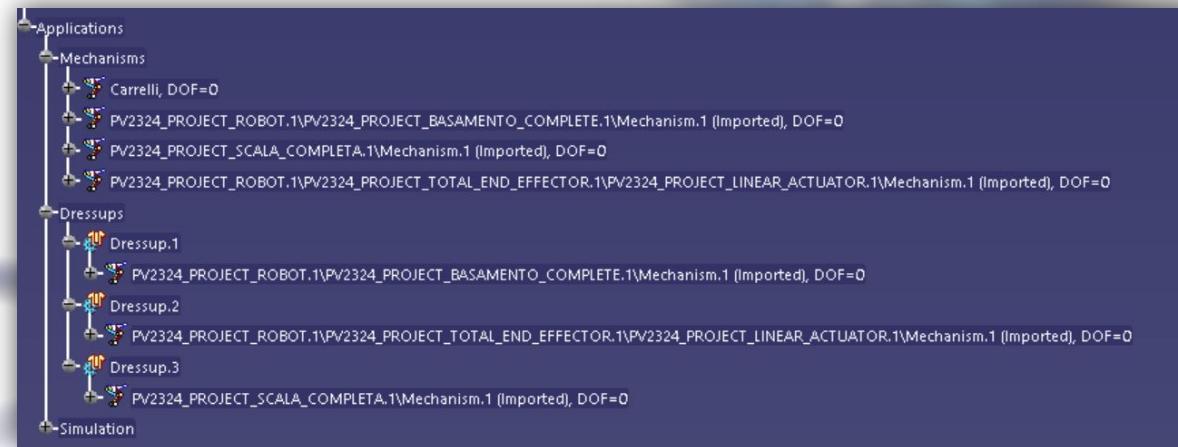
Risultati ottenuti dal translational displacement vector:

Spostamento massimo: 0,6 mm

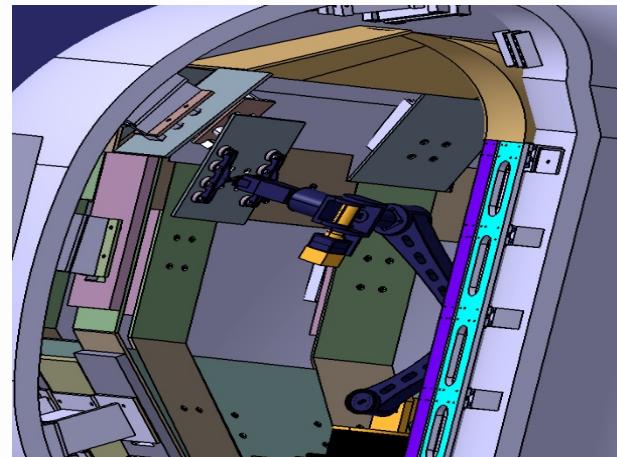
Validation & Simulation – Kinematics Simulations

Imponendo come parte fissa il Tokamak sono stati implementati tutti i **cinematismi e i dressup** necessari alla movimentazione delle componenti interessate attraverso l'utilizzo di **giunti rigidi, rotoidali e prismatici**.

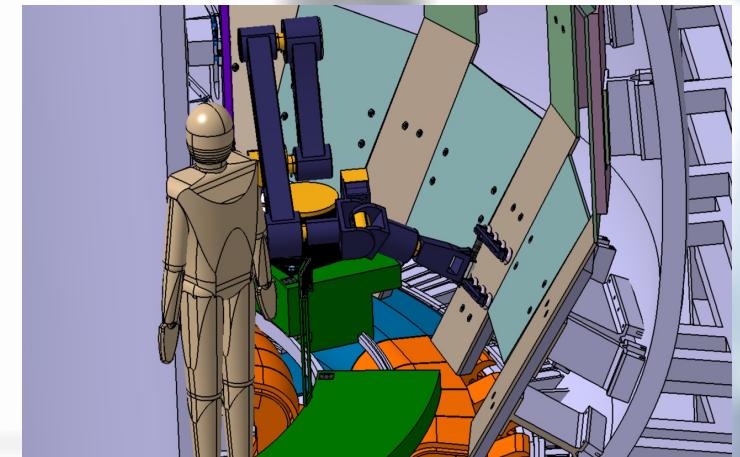
Di seguito si analizzano **3 differenti simulazioni** cinematiche dell'intero sistema.



**Posizionamento montaggio
modulo IFW #1**



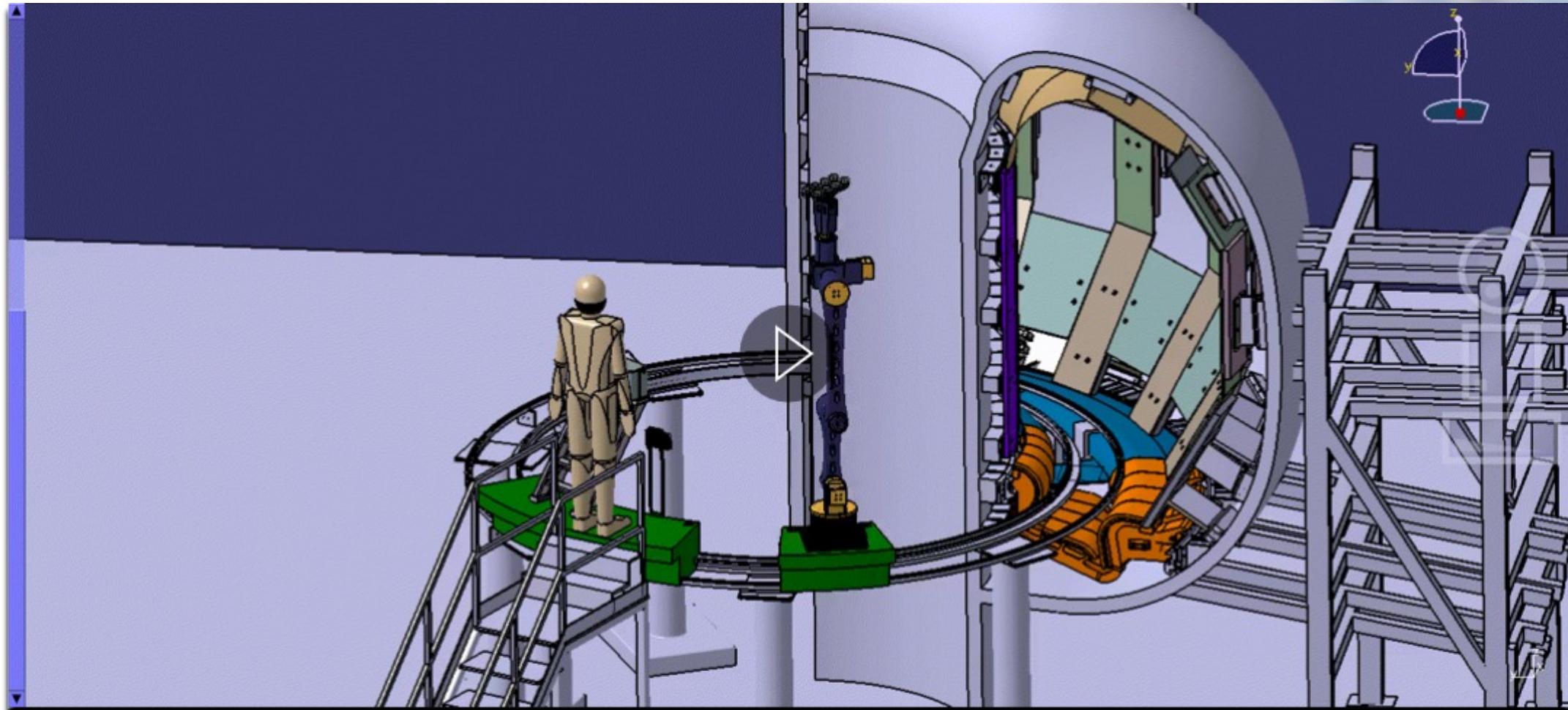
**Posizionamento montaggio
modulo OFW #1**



**Posizionamento smontaggio
modulo OFW #3**

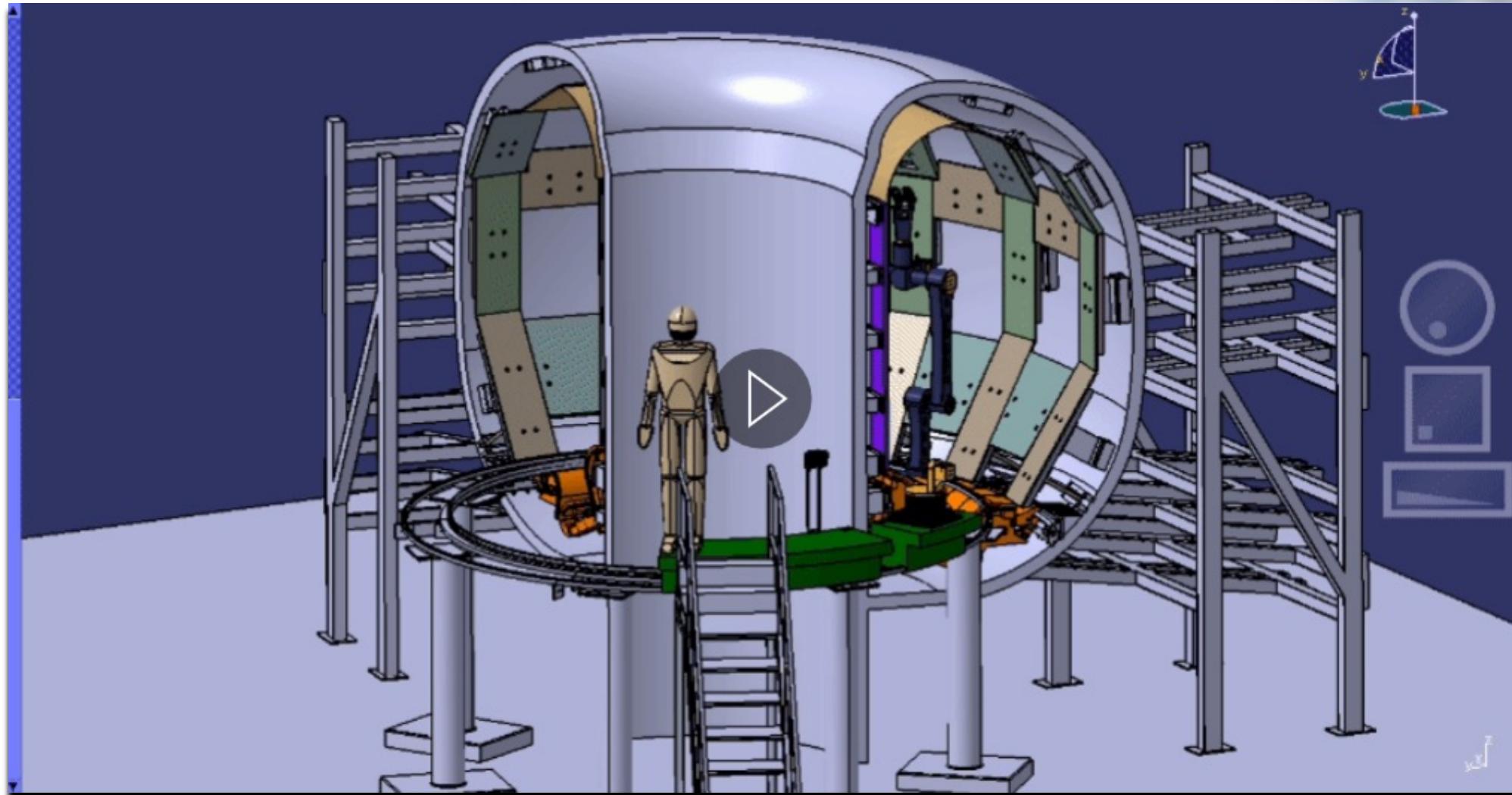
Validation & Simulation – Kinematics Simulations

Posizionamento montaggio modulo IFW #1



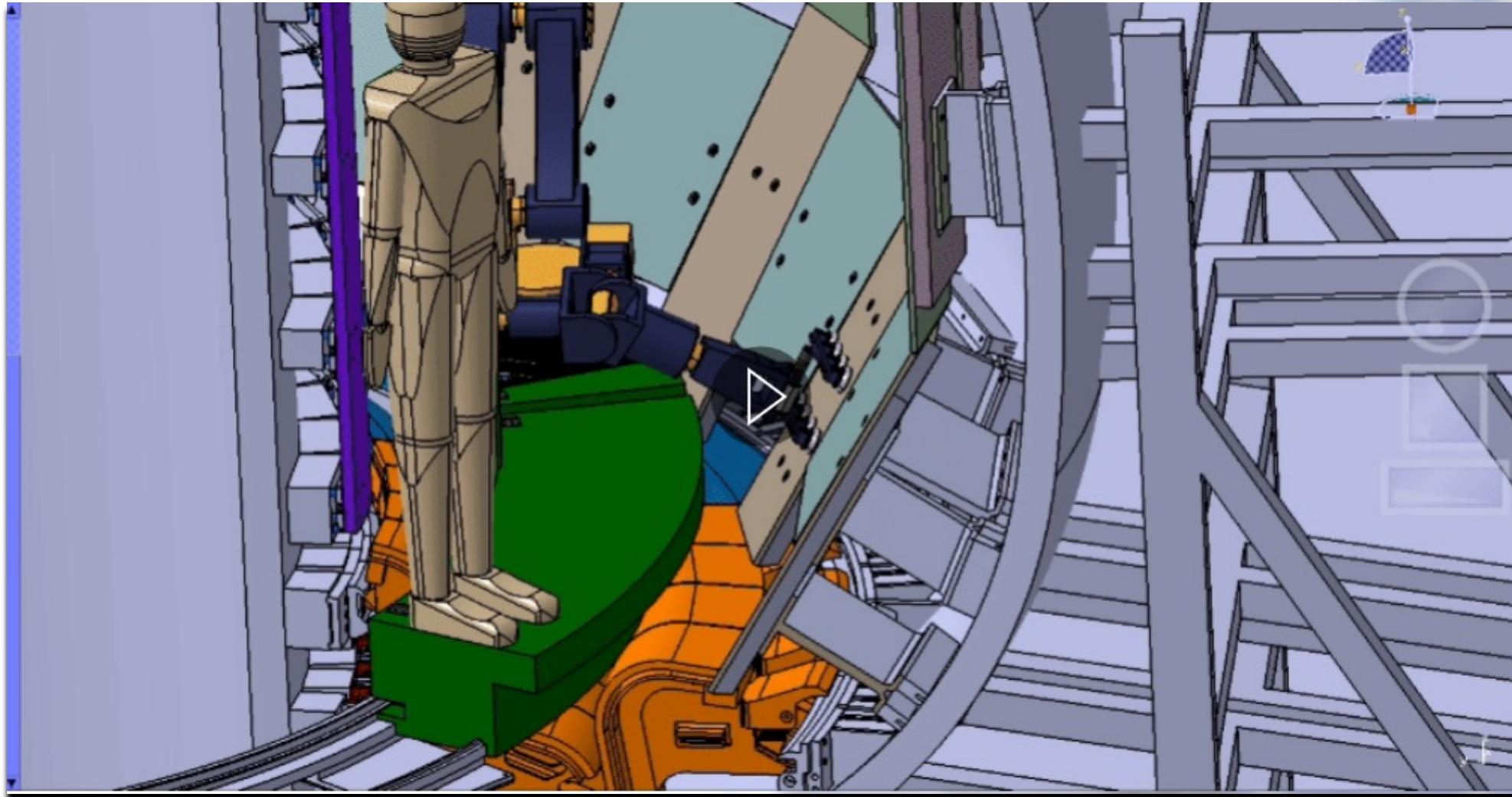
Validation & Simulation – Kinematics Simulations

Posizionamento su modulo OFW #3



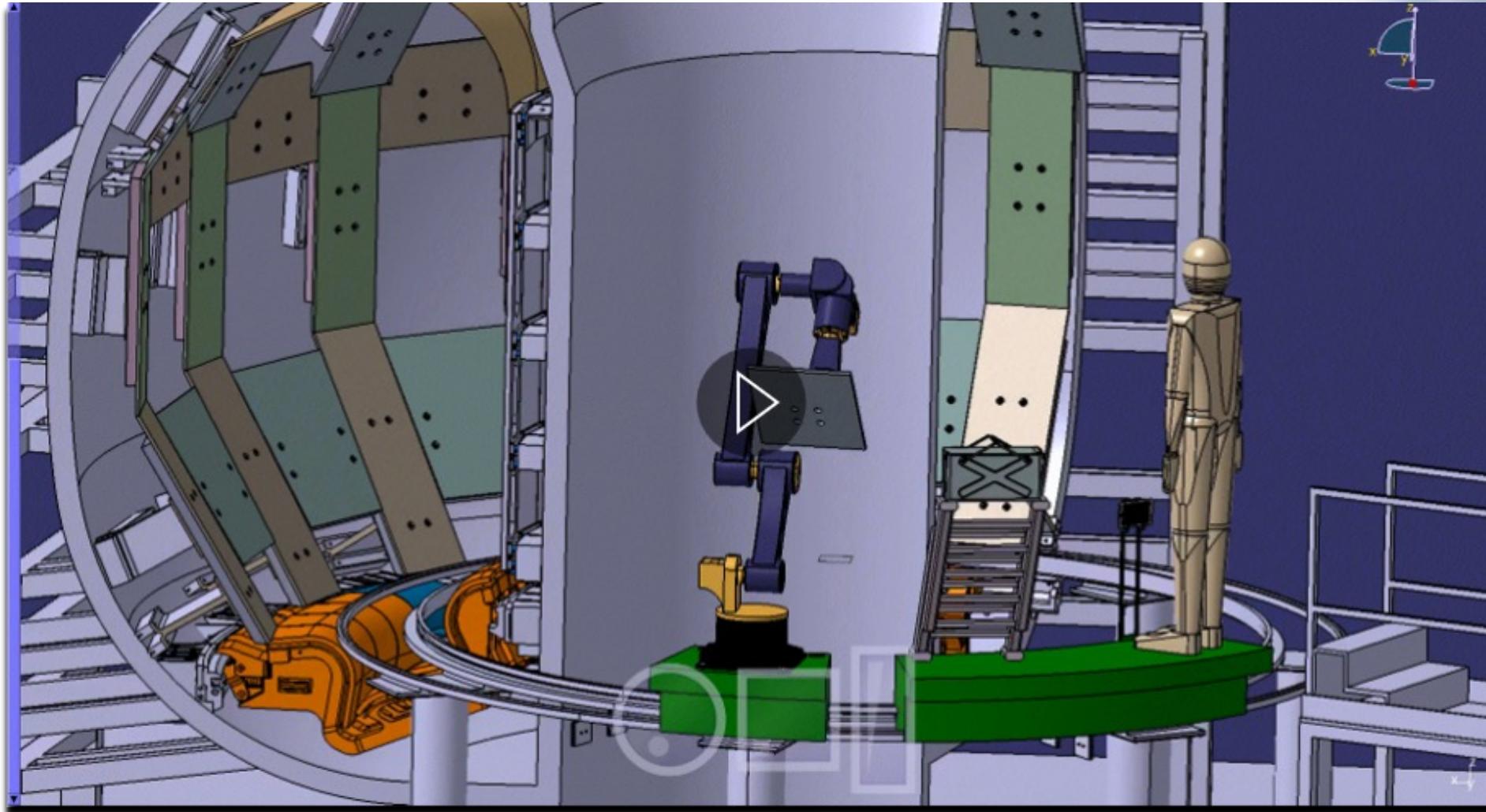
Validation & Simulation – Kinematics Simulations

Smontaggio modulo OFW #3



Validation & Simulation – Kinematics Simulations

Posizionamento montaggio modulo OFW #1



Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Software Siemens Tecnomatix Jack 9.0

Il modello umano di default utilizzato, corrispondente ad un maschio del 50esimo percentile, alto 175cm e dal peso di 78kg.

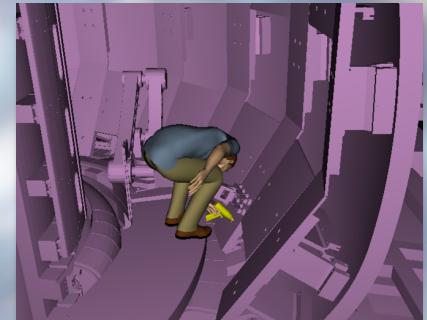
Per effettuare l'analisi si è ipotizzata la presenza, ove necessario, di una forza di 20N rappresentata dalla tenuta di un avvitatore applicata nel palmo della mano dell'operatore che lo regge durante l'operazione di montaggio/smontaggio.

Sono state ottenute le analisi nelle seguenti **simulazioni**:

- Smontaggio/montaggio pannello OFW #3
- Smontaggio/montaggio pannello OFW #1
- Ispezione Divertore Tokamak

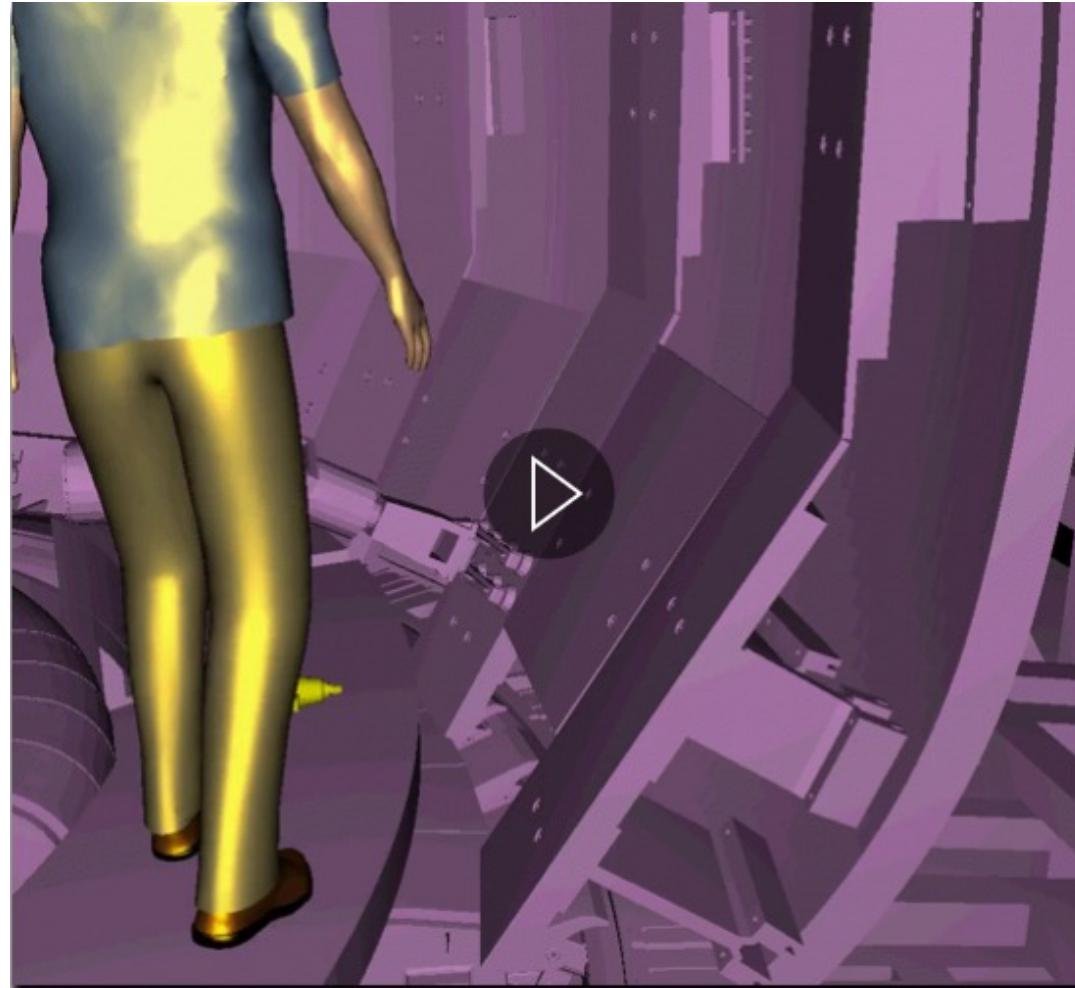
Per ogni posizione critica è stato calcolato l'indice **PEI** mediante la seguente formula:

$$P.E.I. = \frac{LBA}{3400} + \frac{OWSA}{3} + \frac{RULA}{5}$$



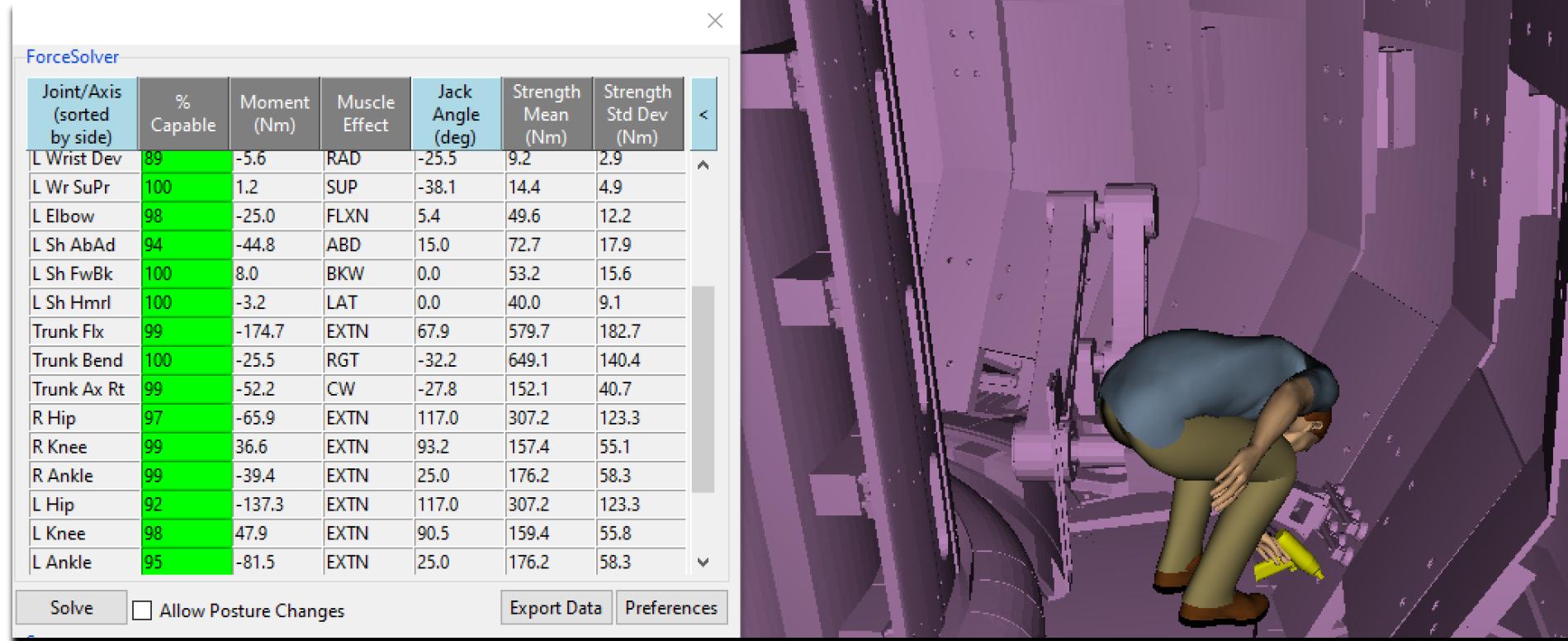
Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Smontaggio/Montaggio pannello OFW #3



Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

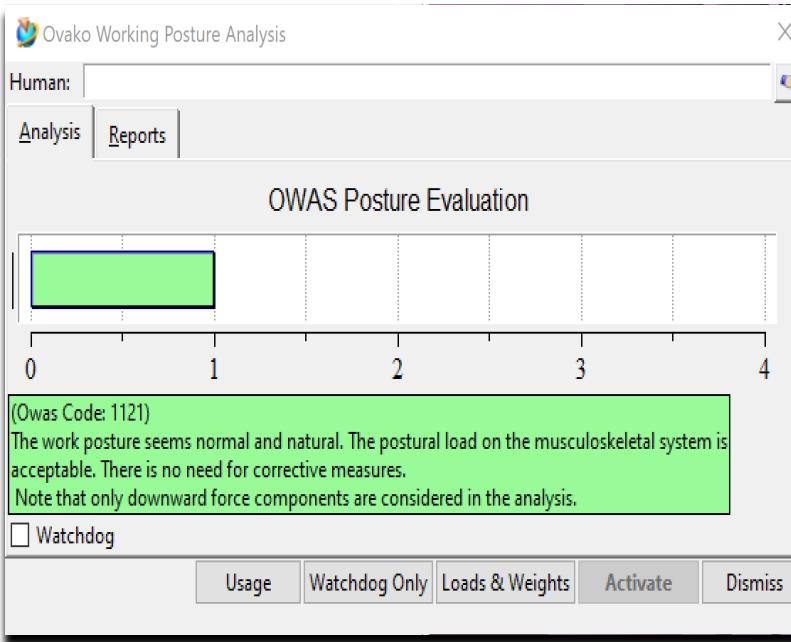
Analisi Ergonomica – Smontaggio/Montaggio pannello OFW #3



Dal **ForceSolver** si evince la possibilità di svolgimento dell'operazione da parte di almeno l'89% degli operatori senza rischi

Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

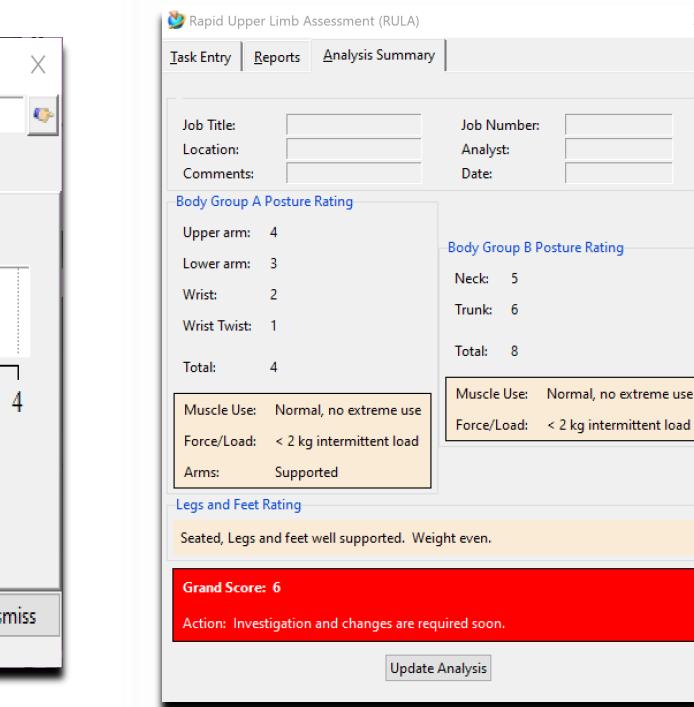
Analisi Ergonomica – Smontaggio/Montaggio pannello OFW #3



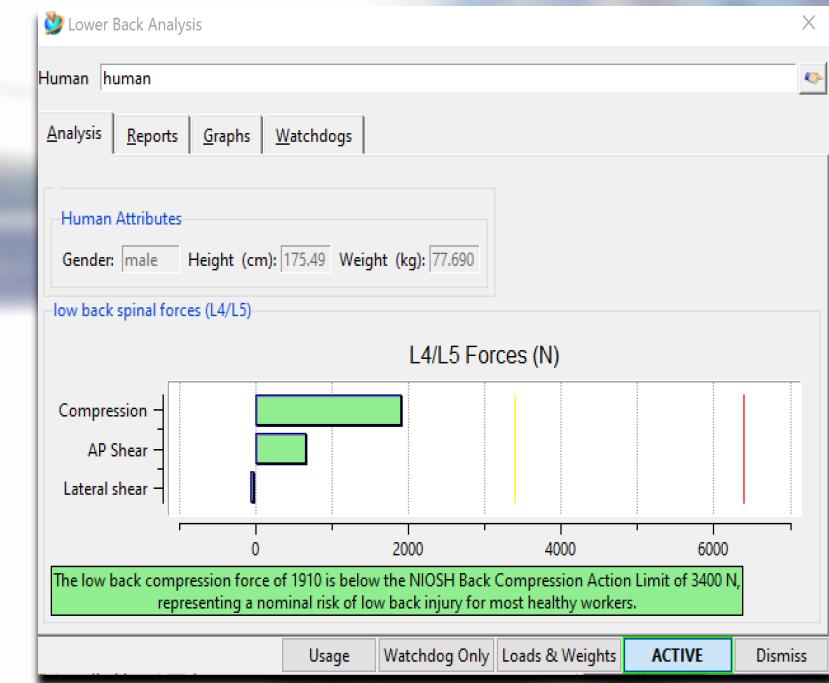
RULA: 6

LBA: 1910

OWAS: 1



$$PEI = \frac{1910}{3400} + \frac{1}{3} + \frac{6}{5} = 2,09$$



$2,09 < 3$ (Valore massimo ammissibile)

L'operatore non risulta in una condizione critica

Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Smontaggio/Montaggio pannello OFW #1



Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Smontaggio/Montaggio pannello OFW #1

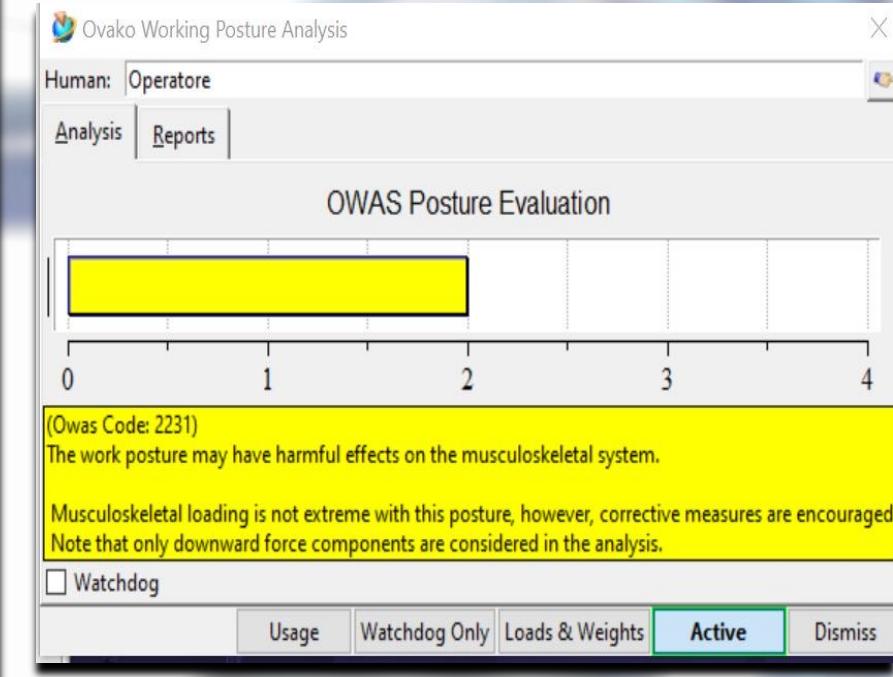
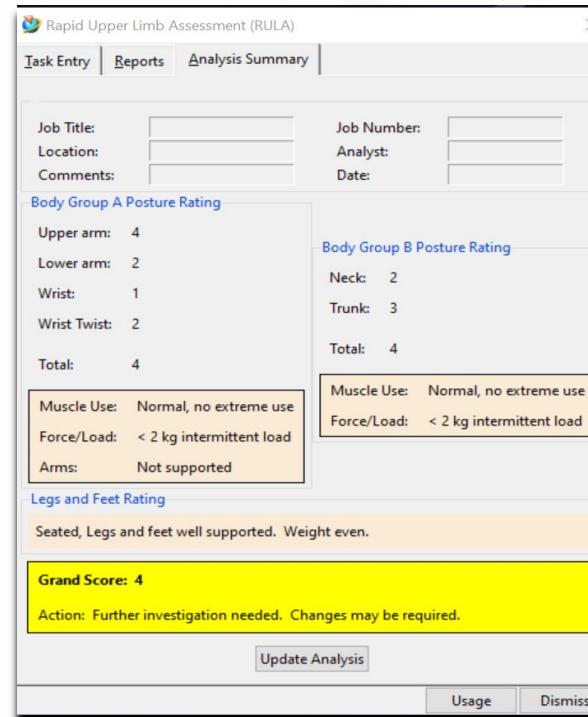
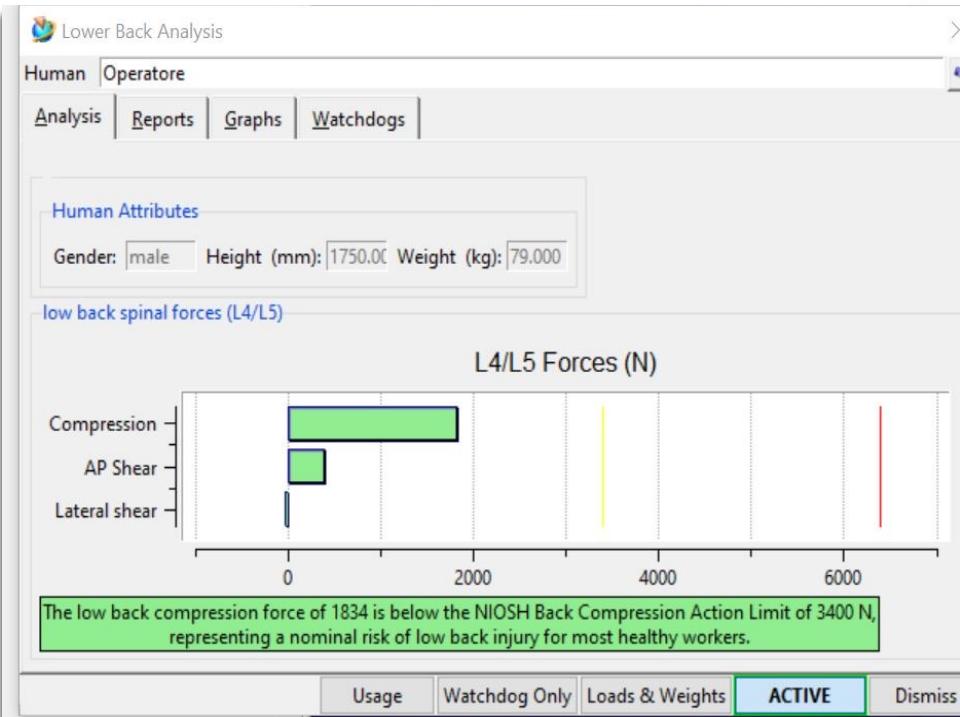


ForceSolver						
Joint/Axis (sorted by name)	% Capable	Moment (Nm)	Muscle Effect	Jack Angle (deg)	Strength Mean (Nm)	Strength Std Dev (Nm)
R Wrist Flx	100	0.5	EXTN	68.6	6.2	2.0
L Wrist Flx	100	-0.1	--	9.3	--	--
R Wrist Dev	89	4.2	ULN	-34.2	6.8	2.2
L Wrist Dev	100	-0.4	--	35.1	--	--
R Wr SuPr	99	-0.9	PRO	-27.7	11.9	4.3
L Wr SuPr	100	0.1	--	-9.2	--	--
R Elbow	100	-2.9	FLXN	74.8	68.0	16.7
L Elbow	100	-18.9	FLXN	81.5	70.8	17.4
R Sh AbAd	95	-40.8	ABD	0.0	68.1	16.8
L Sh AbAd	100	-4.8	ABD	0.0	76.1	18.7
R Sh FwBk	100	14.8	BKW	0.0	65.0	19.0
L Sh FwBk	100	4.8	BKW	0.0	69.1	20.2
R Sh Hmrl	82	-27.9	LAT	0.0	35.3	8.0
L Sh Hmrl	100	1.2	MED	0.0	12.7	3.3
Trunk Flx	94	-138.1	EXTN	27.0	268.0	84.5
Trunk Bend	100	-36.8	RGT	-13.9	351.8	76.1
Trunk Ax Rt	100	9.1	CCW	10.4	106.6	28.5
R Hip	99	-6.1	EXTN	1.7	196.6	78.9
L Hip	80	-138.1	EXTN	45.7	210.5	84.5
R Knee	100	-2.6	FLXN	5.1	145.2	42.8
L Knee	96	67.0	EXTN	61.1	170.3	59.6
R Ankle	100	-2.3	EXTN	4.7	145.7	48.2
L Ankle	99	-35.5	EXTN	20.8	169.9	56.2
Force (N)						
L4/L5 Comp	3399.0					
L4/L5 AP	740.9					
L4/L5 Lat	-36.2					

Dal **ForceSolver** si evince la possibilità di svolgimento dell'operazione da parte del 100% degli operatori senza rischi.

Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Smontaggio/Montaggio pannello OFW #1



2,006 < 3 (Valore massimo ammesso)

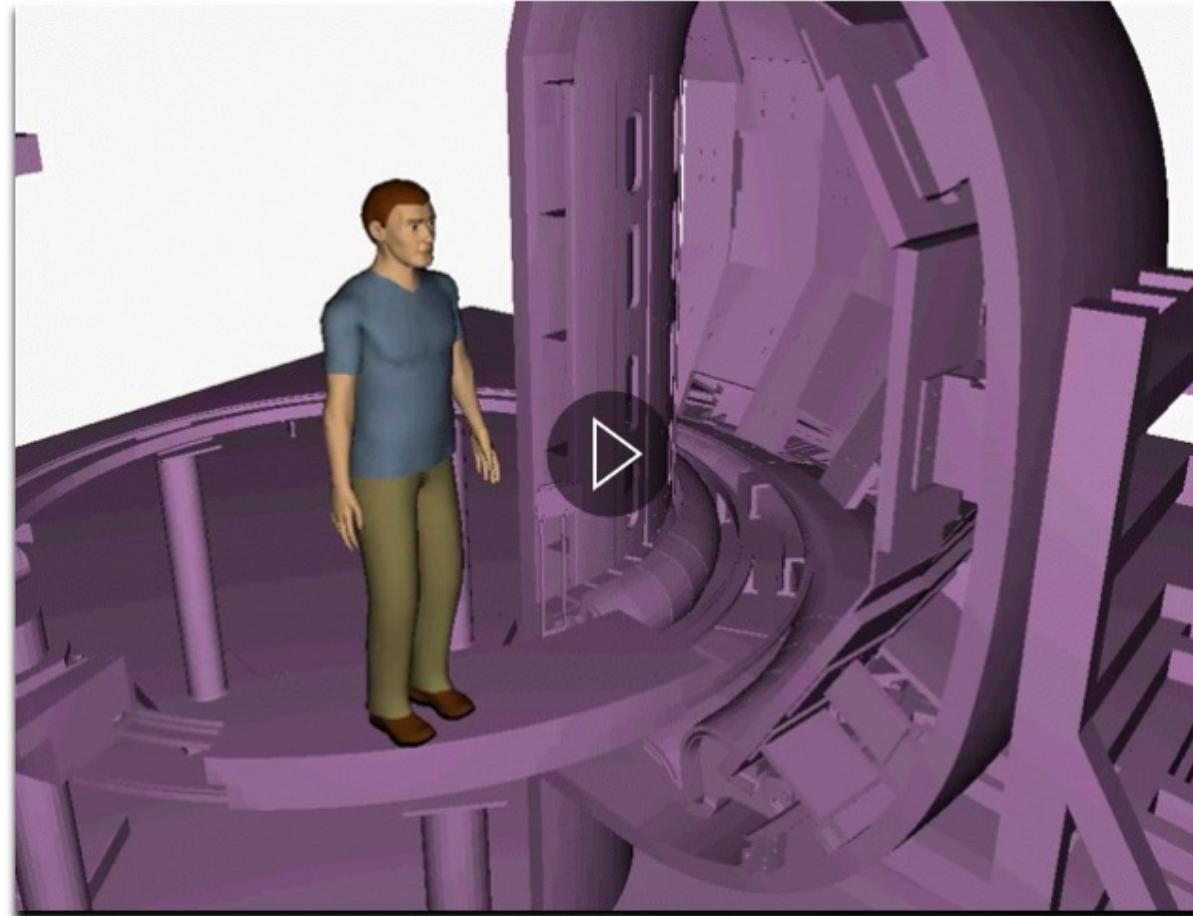
RULA: 4
LBA: 1843
OWAS: 2

$$PEI = \frac{1843}{3400} + \frac{2}{3} + \frac{4}{5} = 2,006$$

L'operatore non risulta in una condizione critica.

Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Ispezione Divertore



Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Ispezione Divertore

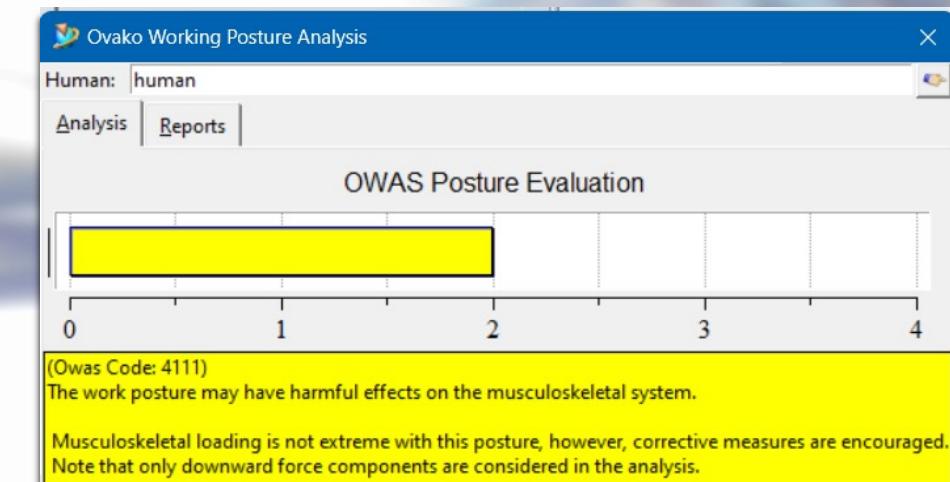
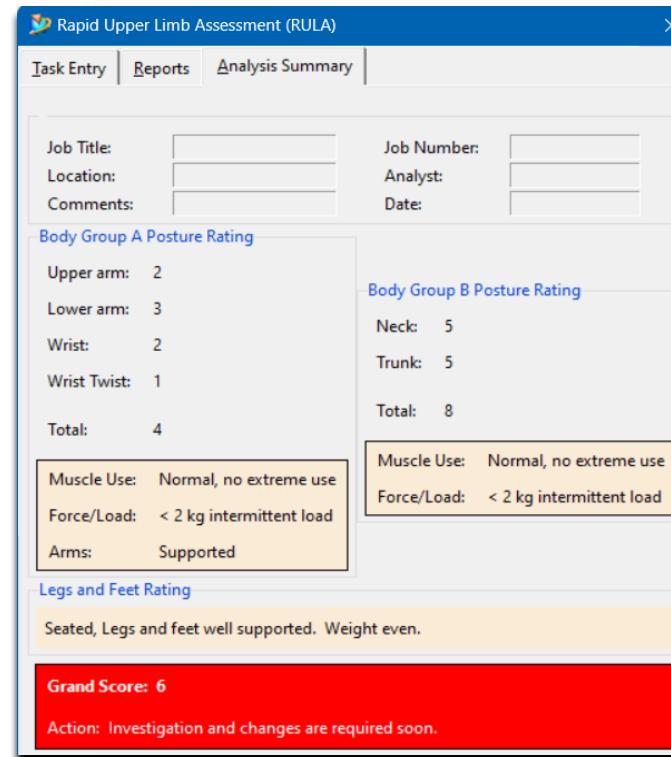
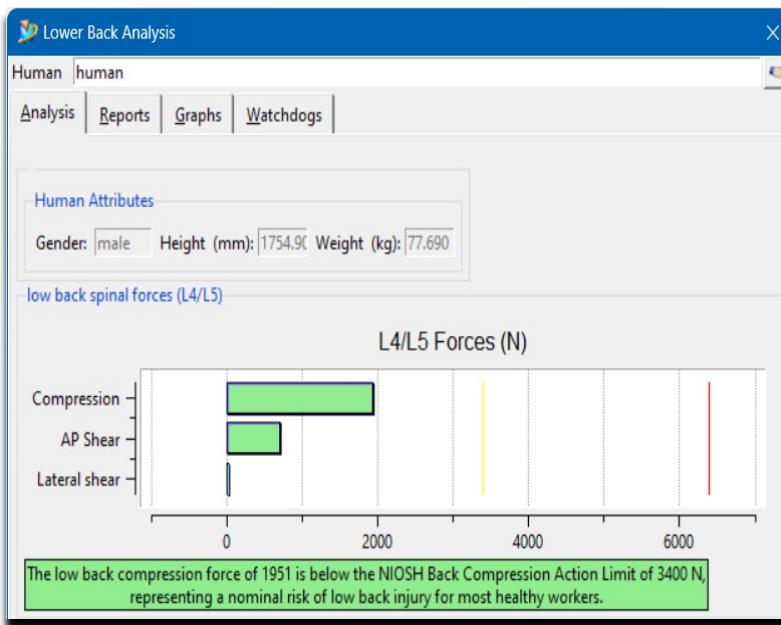


Dal **ForceSolver** si evince che almeno il 98% degli operatori può assumere questa posizione senza rischi.

ForceSolver						
Joint/Axis (sorted by name)	% Capable	Moment (Nm)	Muscle Effect	Jack Angle (deg)	Strength Mean (Nm)	Strength Std Dev (Nm)
R Wrist Flx	100	-0.5	--	53.5	--	--
L Wrist Flx	98	2.4	EXTN	43.7	6.8	2.2
R Wrist Dev	99	-2.5	RAD	-5.4	11.0	3.5
L Wrist Dev	100	-0.8	RAD	-9.8	10.1	3.2
R Wr SuPr	100	0.6	SUP	-3.0	14.4	4.9
L Wr SuPr	100	0.1	--	-77.0	--	--
R Elbow	100	-13.5	FLXN	31.8	59.6	14.7
L Elbow	100	-10.2	FLXN	76.9	66.8	16.4
R Sh AbAd	100	5.9	ADD	81.0	85.5	26.8
L Sh AbAd	100	1.8	ADD	81.0	88.6	27.8
R Sh FwBk	100	-20.6	FWD	60.7	84.4	23.0
L Sh FwBk	100	-2.3	FWD	60.7	92.4	25.2
R Sh Hmrl	100	2.4	MED	-11.8	61.8	15.8
L Sh Hmrl	100	2.4	MED	-11.8	54.3	13.9
Trunk Flx	99	-107.3	EXTN	19.0	361.4	113.9
Trunk Bend	100	32.8	LFT	-0.8	295.3	66.4
Trunk Ax Rt	100	-26.0	CW	-11.0	103.0	27.6
Force (N)						
L4/L5 Comp	2227.2					
L4/L5 AP	993.5					
L4/L5 Lat	16.3					

Validation & Simulation – Ergonomic Analysis

Analisi Ergonomica – Ispezione Divertore



RULA: 6

LBA: 1951

OWAS: 2

$$PEI = \frac{1951}{3400} + \frac{2}{3} + \frac{6}{5} = 2,4$$

$2,4 < 3$ (Valore massimo ammissibile)

L'operatore non risulta in una condizione critica

Conclusion

Il manipolatore realizzato soddisfa pienamente tutti i requisiti richiesti superando con successo sia le analisi strutturali che le analisi cinematiche ed ergonomiche.

In futuro potrebbero essere apportate le seguenti modifiche al fine di migliorare alcuni aspetti del progetto:

- Aggiungere all'end-effector dei prolungamenti metallici (simili al becco di una pinza) che possano rendere più sicura l'operazione di afferragio dei moduli;
- Usare dei materiali meno costosi e che allo stesso tempo permettano di avere dei risultati degli sforzi alla Von Mises ugualmente validi;
- Creare dei supporti elevatori che possano migliorare l'ergonomia soprattutto nell'operazione di ispezione del divertore in modo da ottenere dei valori del PEI migliori.



GRAZIE PER L'ATTENZIONE