

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

«Analisi dinamica e verifica strutturale agli
elementi finiti di una staffa di supporto satellitare
soggetta a carichi vibrazionali di tipo random»

Tutor universitario:

Dott. *Lorenzo Olivieri*

Laureando: *Luca Muscio*

Padova, 08/09/2026

Tipologia di Studio

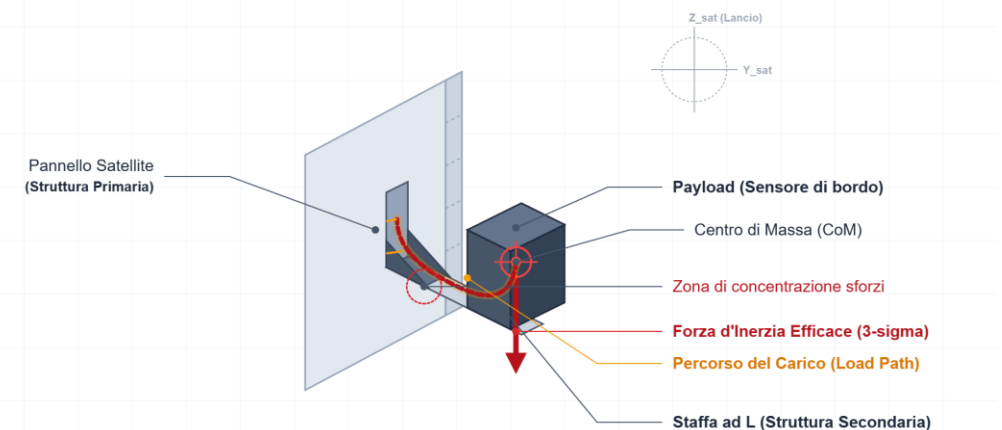
- Analisi strutturale e verifica componente di supporto (*L-Bracket*)

Contesto Aerospaziale

- Supporto payload in ambiente satellitare
- Carichi dinamici random durante il lancio (lanciatore **Falcon 9**)
- Lavoro NON legato a una specifica missione

Requisiti di Progetto

- Massimizzazione resistenza e rigidezza
- Minimizzazione massa

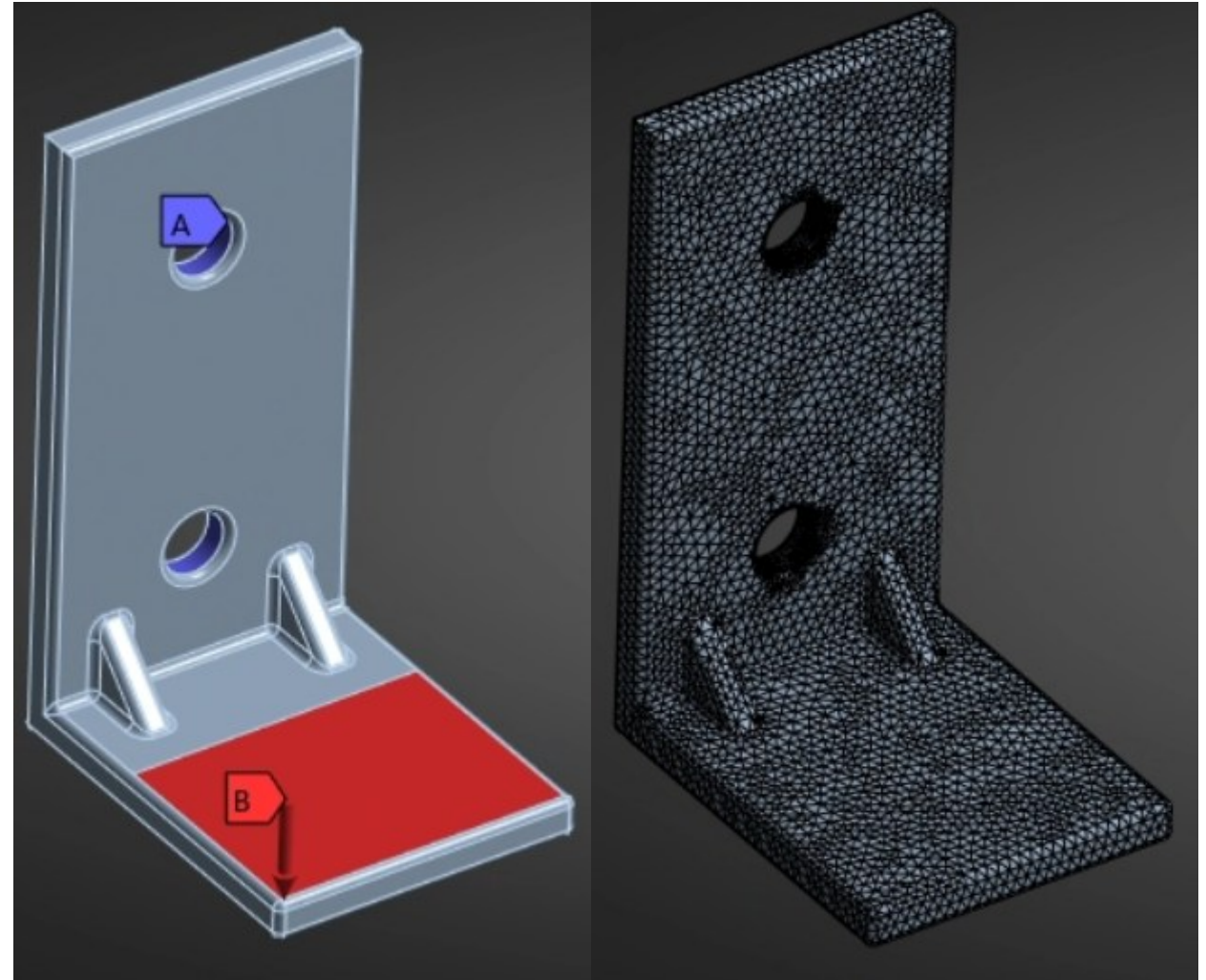


1. Modellazione Geometrica & FEM:

- CAD 3D
- discretizzazione a elementi finiti
- simulazione fissaggio e carichi

2. Verifica di Resistenza: valutazione tensioni equivalenti (von Mises) e determinazione Margini di Sicurezza.

3. Criticità & Ottimizzazione: valutazione criticità dell'analisi e proposte di ottimizzazione



VINCOLI PROGETTUALI:

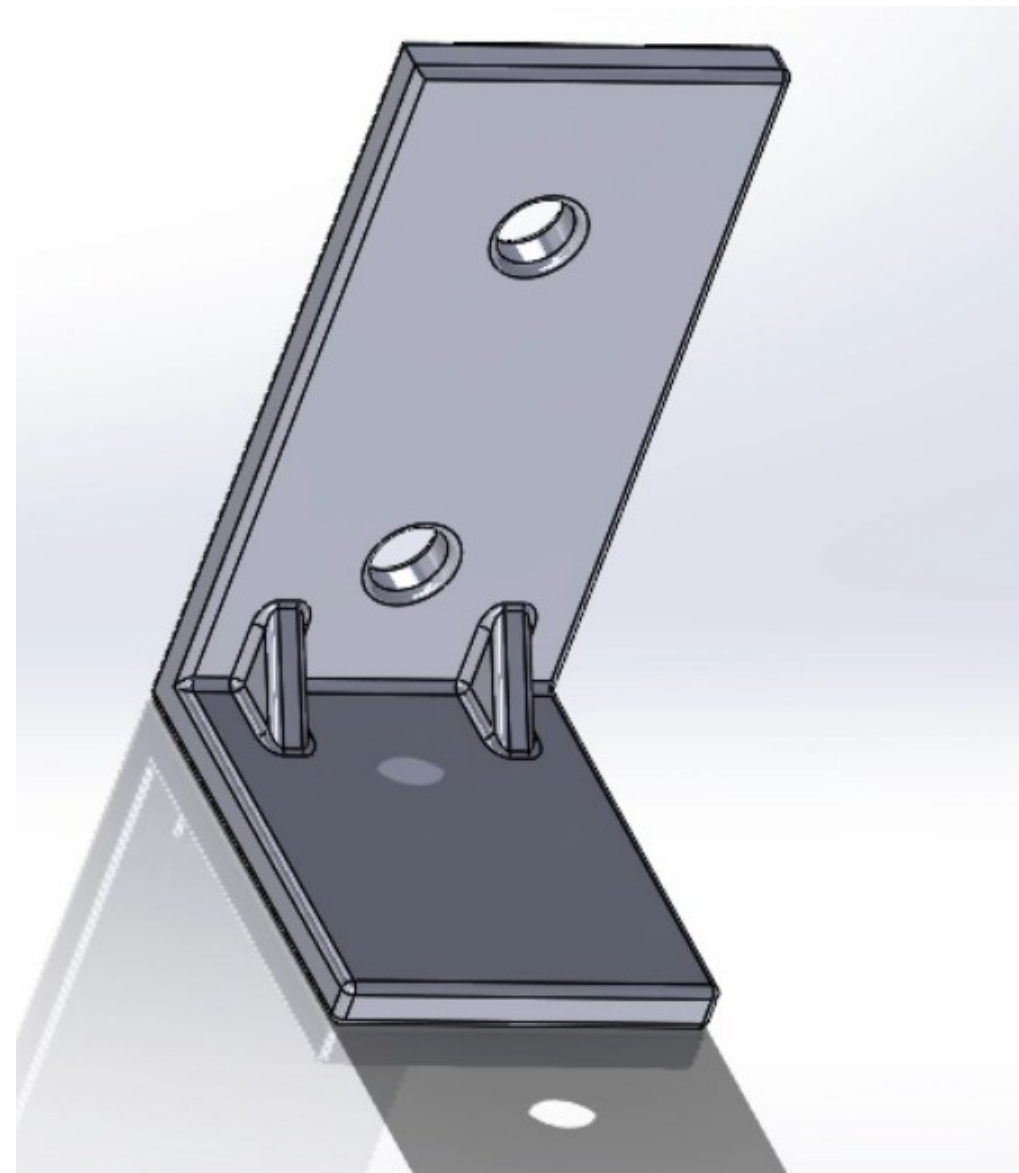
- Elevata resistenza e rigidezza per stabilità del payload
- Mass efficiency

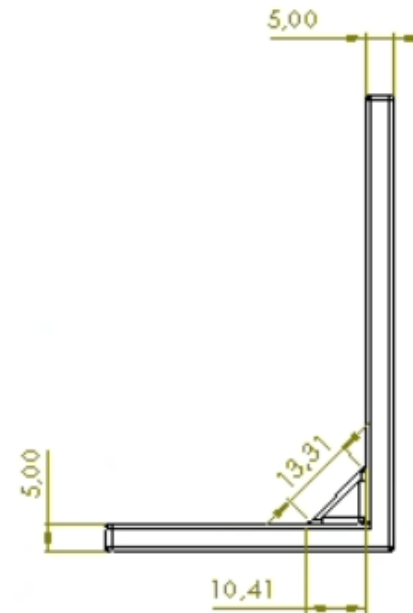
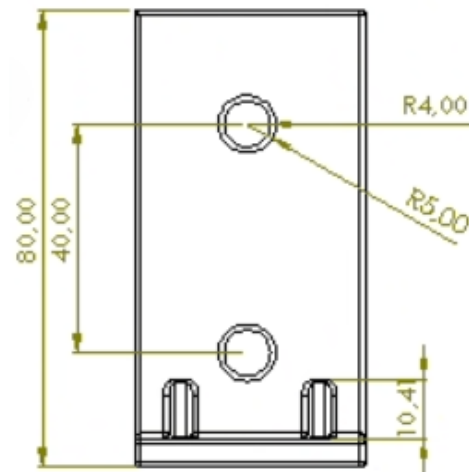
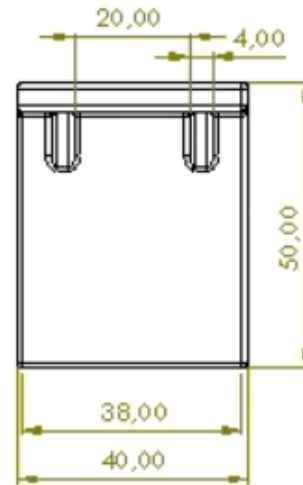
MATERIALE OTTIMALE: ERGAL 7075-T6

- Lega di alluminio legata con zinco e magnesio sottoposta a trattamento T6
- Eccezionale rapporto resistenza/peso
- Stato dell'arte per componenti strutturali satellitari

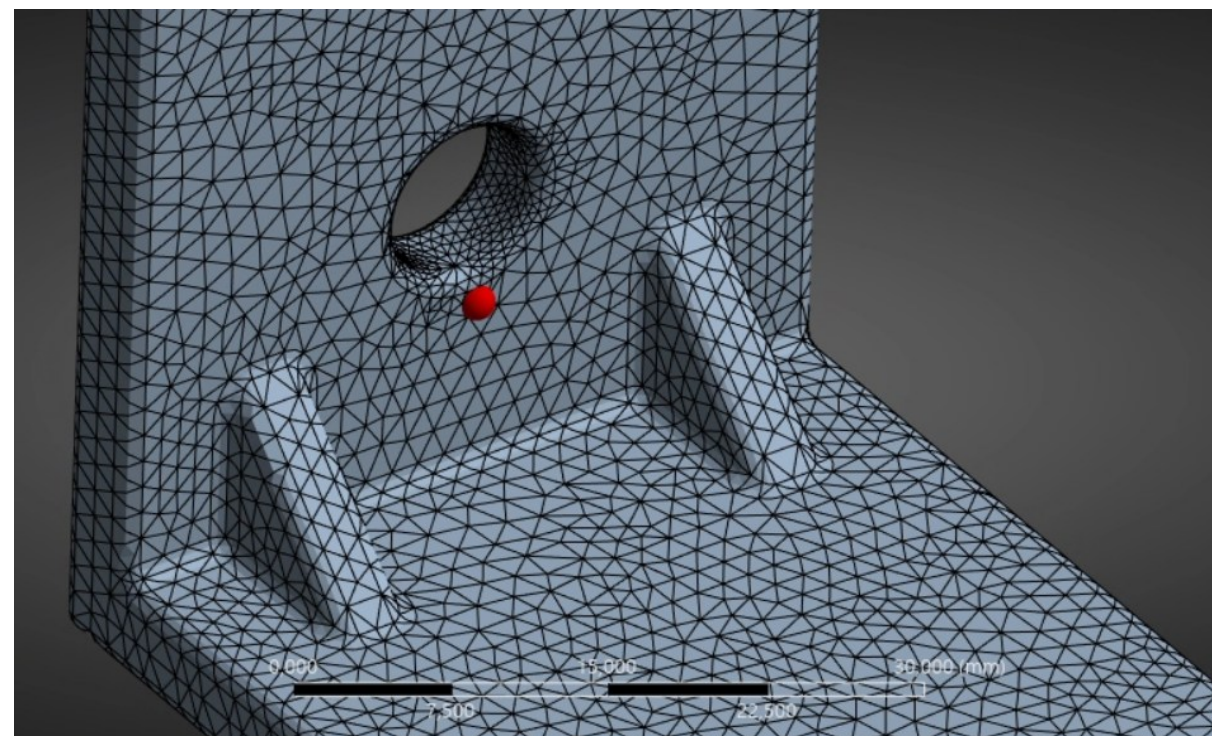


- CAD realizzato in ambiente SolidWorks
- 2x fori destinati a bullonaggio
- 2x nervature di irrigidimento (fazzoletti) per attenuazione picchi tensionali zona critica
- Raccordi per evitare spigoli vivi

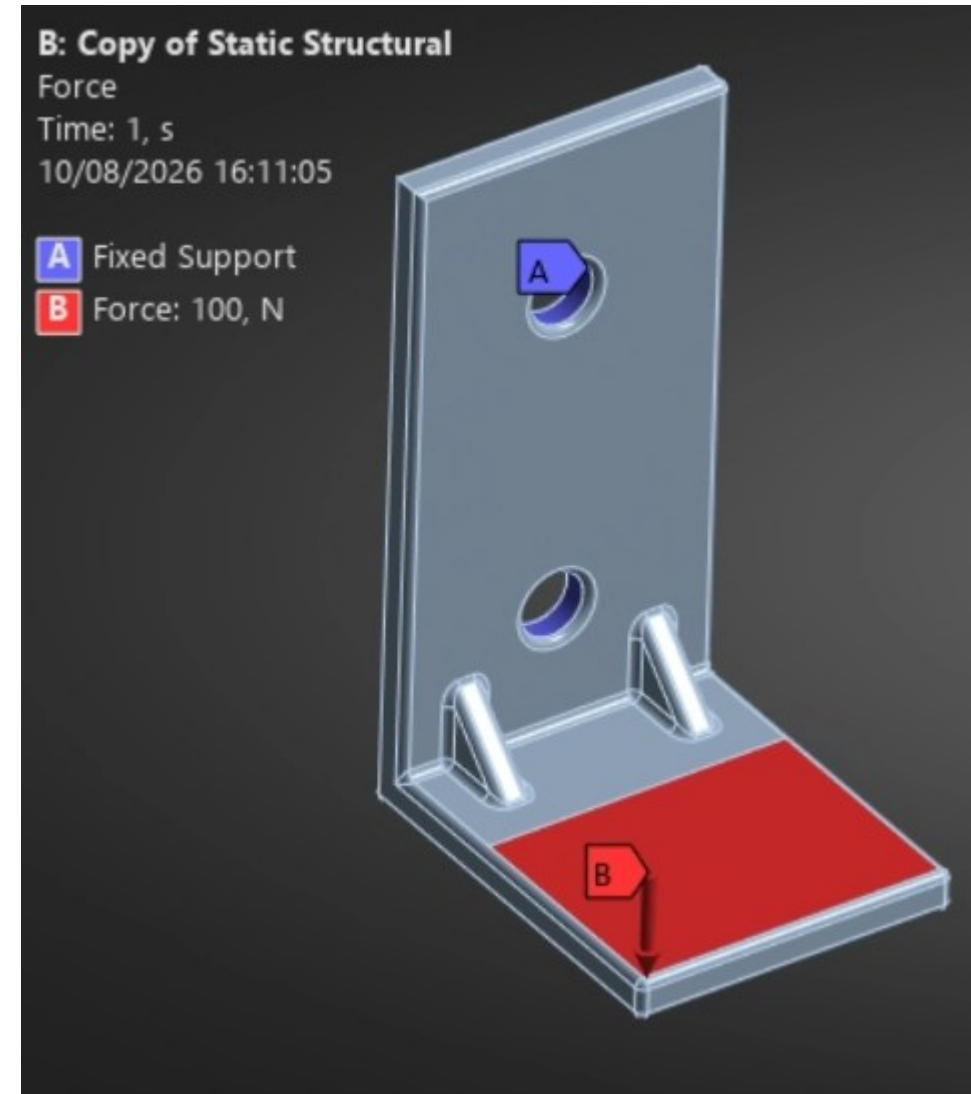




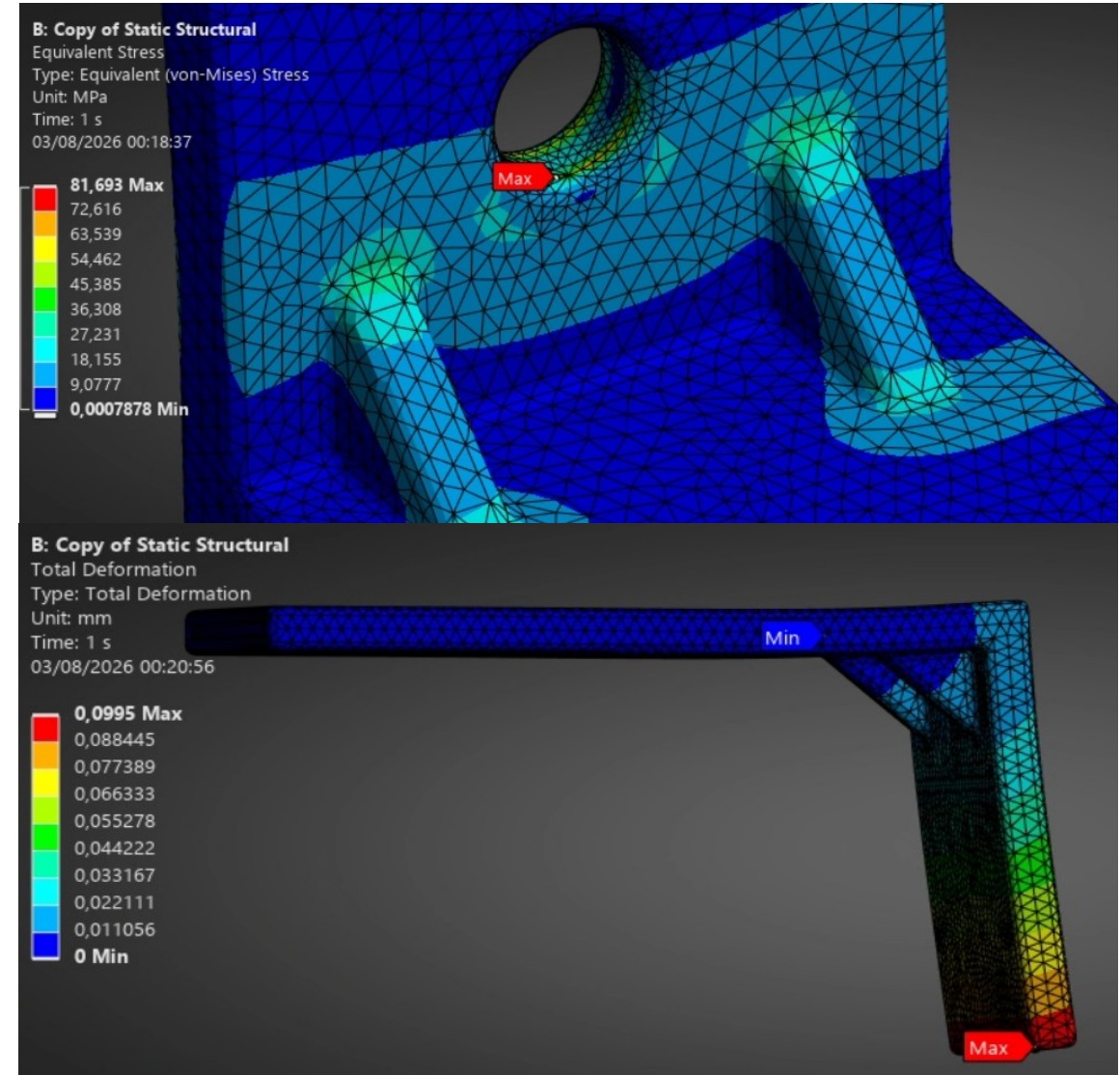
- Modellazione nel modulo Ansys Mechanical
- Elementi tetraedrici
- Funzioni di forma quadratiche (10 nodi per elemento)
- Infittimento mesh sulle zone critiche



- **VINCOLI:**
Fixed Support all'interno dei fori per simulare bullonaggio e bloccare tutte le traslazioni e rotazioni
- **CARICHI:**
Carico statico di modulo 100 N applicato nel verso negativo dell'asse Y di struttura



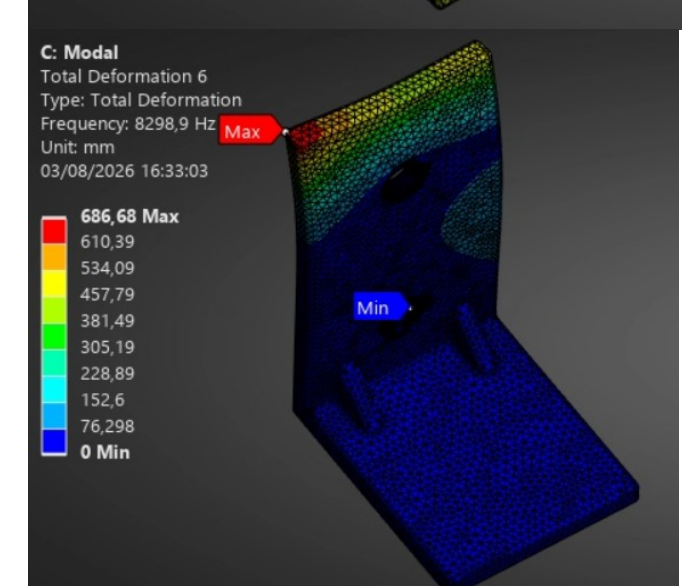
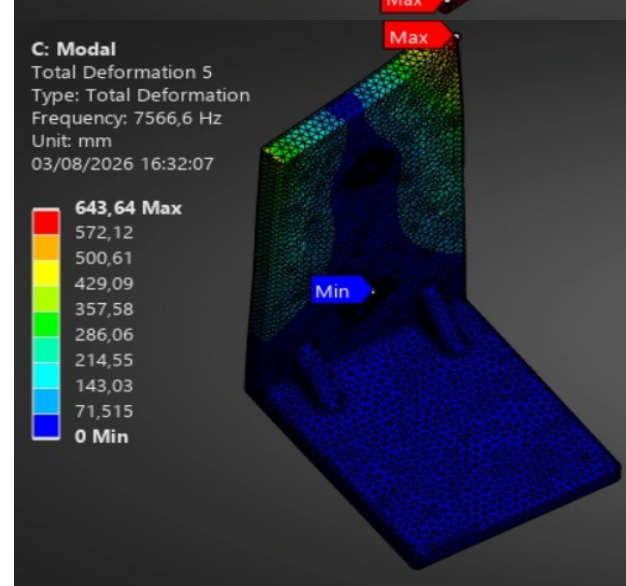
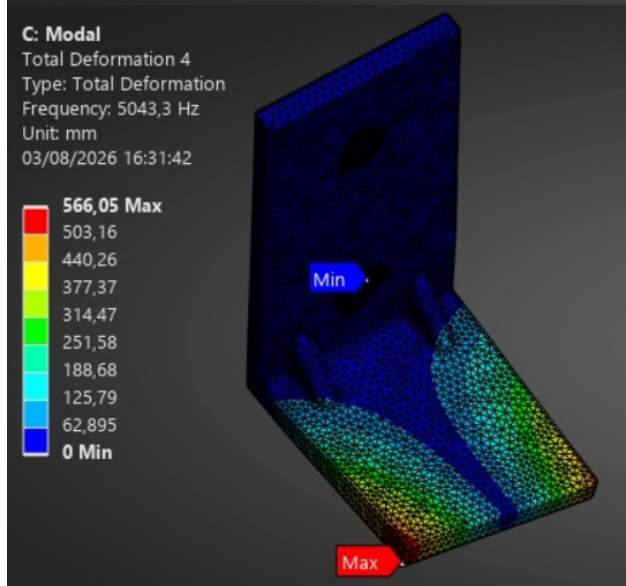
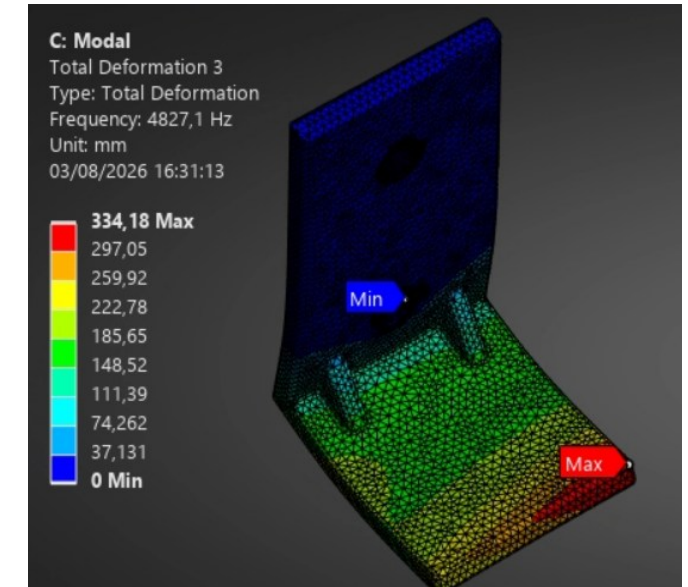
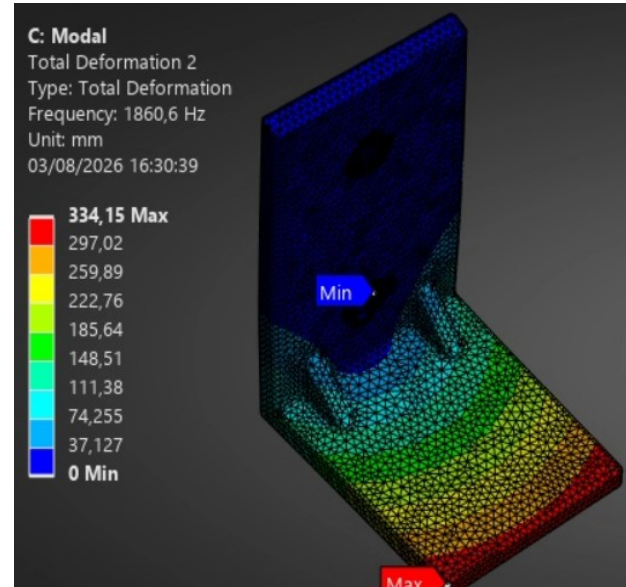
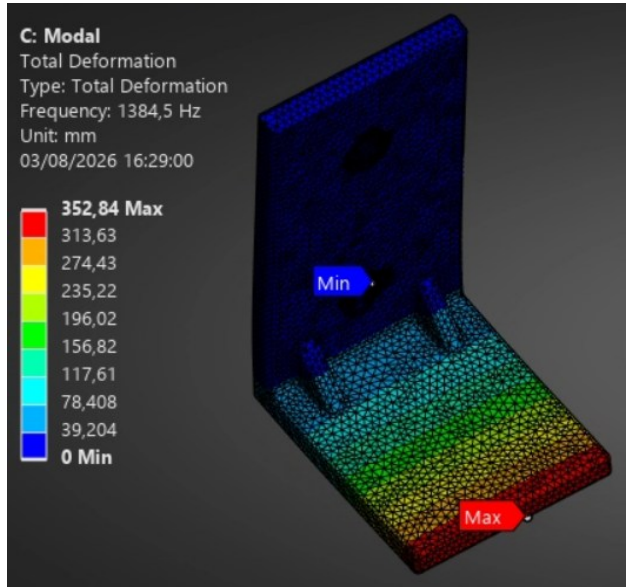
- Picco di tensione sulla zona interna del raccordo del foro
- Abbattimento dell'insorgenza dei picchi di tensione nell'angolo a "L" tramite nervature
- Deformazione massima al bordo libero della flangia che sorregge il carico



Calcolo delle prime 6 frequenze proprie:

- Primi quattro modi: flangia inferiore orizzontale
- Flangia verticale entra in risonanza a frequenze nettamente superiori (oltre i 7.5 kHz)

Modo	Frequenza [Hz]
1	1384,5
2	1860,6
3	4827,1
4	5043,3
5	7566,6
6	8298,9



0,00

- Applicazione carico sui vincoli come *base excitation*
- Inserimento tabella PSD del Falcon 9 nel software
- Coefficiente di smorzamento impostato cautelativamente pari all'1% ($\zeta = 0.01$)
- Selezione dei tre assi separatamente per l'analisi

Frequency	Falcon 9/Falcon Heavy payload Random Vibration MPE (P95/50) (g ² /Hz), All axes
20	0.0044
100	0.0044
300	0.01
700	0.01
800	0.03
925	0.03
2000	0.00644
GRMS	5.13

Sollecitazioni lungo l'asse Y risultano le più severe:

- Braccio di leva (geometria)
- Maggior momento d'inerzia (massa)

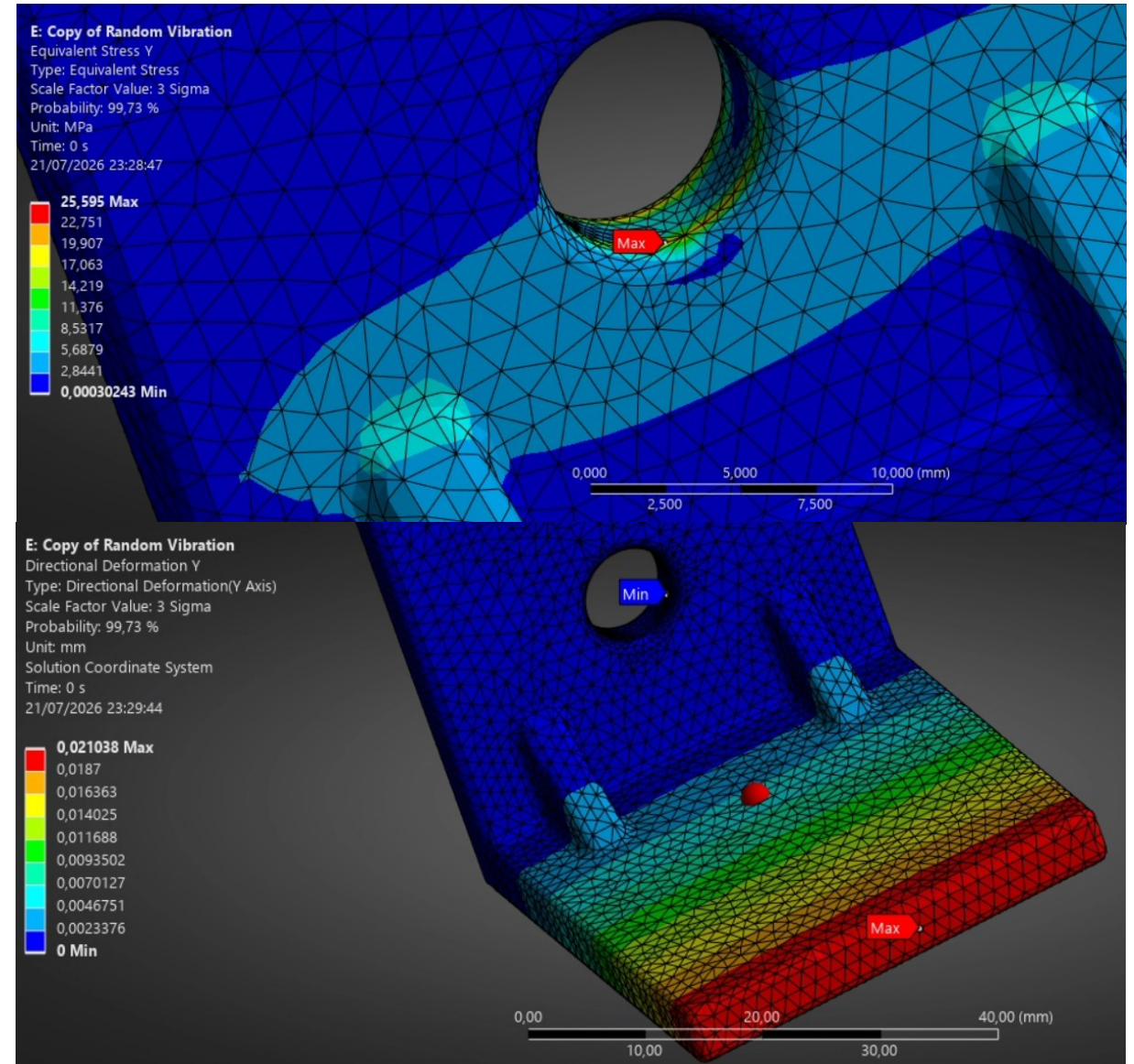
Tensione ammissibile:

$$\sigma_{amm} = \frac{\sigma_y}{SF} \quad \sigma_y = 503 \text{ MPa} \quad SF = 1.5$$

Margine di Sicurezza:

$$MS = \frac{\sigma_{amm}}{\sigma_{max,3\sigma}} - 1$$

$$MS = \frac{335.33}{25.595} - 1 = 13.10 - 1 = 12.10$$



- Tensione di picco dovuta al carico statico molto maggiore di quella dovuta al carico dinamico a causa della severità del carico applicato
- Criticità: - vincolo reale non perfetto
 - involuppo di carichi di diversa natura nella realtà
 - proprietà del materiale impostate a temperatura ambiente (20°C)
- Possibili ottimizzazioni: - riduzione massa
 - affinamento aree critiche

- [1] James R. Wertz, David F. Everett, and Jeffery J. Puschell. Space Mission Engineering: The New SMAD. Microcosm Press, Hawthorne, CA, 4th edition, 2011.
- [2] Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX). Falcon 9 Launch Vehicle Payload User's Guide, 2020. Rev. 3.
- [3] Thomas P. Sarafin and Wiley J. Larson. Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch. Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers, Torrance, CA, 1995.
- [4] Paolo Teofilatto. Trajectories of Launch and Reentry Systems. Springer, Cham, Switzerland, 2025.
- [5] Peter W. Fortescue, Graham Swinerd, and John P. W. Stark. Spacecraft Systems Engineering. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 4th edition, 2011.
- [6] Colleen E. Anderson. Rocketdyne f-1, 2022. Accesso: 22 luglio 2026.
- [7] SpaceX. Falcon 9 overview, 2026. Accesso: 20 luglio 2026.
- [8] Engineering at Alberta. Base excitation in a damped system. Accesso: 25 luglio 2026.
- [9] ESA. Launcher-spacecraft coupled loads analysis, 2013. Accesso: 24 luglio 2026.
- [10] Giacomo Boffi. Multi degrees of freedom systems. https://boffi.github.io/dati_2020/05/slides.pdf, 2020. [Accesso: 26 Luglio 2026].
- [11] . Processi stocastici, stazionarietà ed ergodicità e densità spettrale di potenza, 2022. Accesso: 26 luglio 2026.
- [12] National Aeronautics and Space Administration (NASA). DYNAMIC ENVIRONMENTAL CRITERIA- NASA TECHNICAL HANDBOOK, 2001. NASA-HDBK-7005.
- [13] Lorenzo Finesso. Segnali e Sistemi. Edizioni Libreria Progetto Padova, Padova, IT, 4th edition, 2025.
- [14] William D. Mark Stephen H. Crandall. Random Vibration in Mechanical Systems. Academic Press, New York and London, 1963.
- [15] Dario Trevisan. Probabilità e processi stocastici. 1:145–150, 2023. 46
- [16] Christian Lalanne. Mechanical Vibration and Shock Analysis: Random Vibrations. Wiley, ISTE, London SW19 4EU, Hoboken, NJ 07030, 2nd edition, 2009.
- [17] Y.K. Lin, C.A. Mercer, S. Wirsching. Random Vibrations: Theory and Practice. DOVER PUBLICATIONS, INC., Mineola, NY, 1st edition, 2006.
- [18] Matweb. Al 7075-t6. Accesso: 2 luglio 2026.
- [19] Zhuming Bi, Walter D. Pilkey, Deborah F. Pilkey. Peterson's Stress Concentration Factors. Wiley, 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA, 4th edition, 2020.
- [20] ANSYS. ANSYS Theory Reference, 2024.
- [21] European Cooperation for Space Standardization. ECSS-E-ST-32C Rev. 1, 2008

GRAZIE PER L'ATTENZIONE