



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
INDUSTRIALE

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

# PROGETTAZIONE E PRODUZIONE DELLA STRUTTURA CILINDRICA DI UN VETTORE SONDA IN MATERIALE COMPOSITO

**Relatore**

Prof. Ugo Galvanetto

**Laureando**

Lorenzo Iaccarino

**ANNO ACCADEMICO 2024-2025**

**DATA DI LAUREA 21/03/2025**

# INTRODUZIONE

- **Obiettivo della tesi:** verificare la validità della *fibra di carbonio* come materiale alternativo all'*alluminio*
- **Analisi effettuate:**



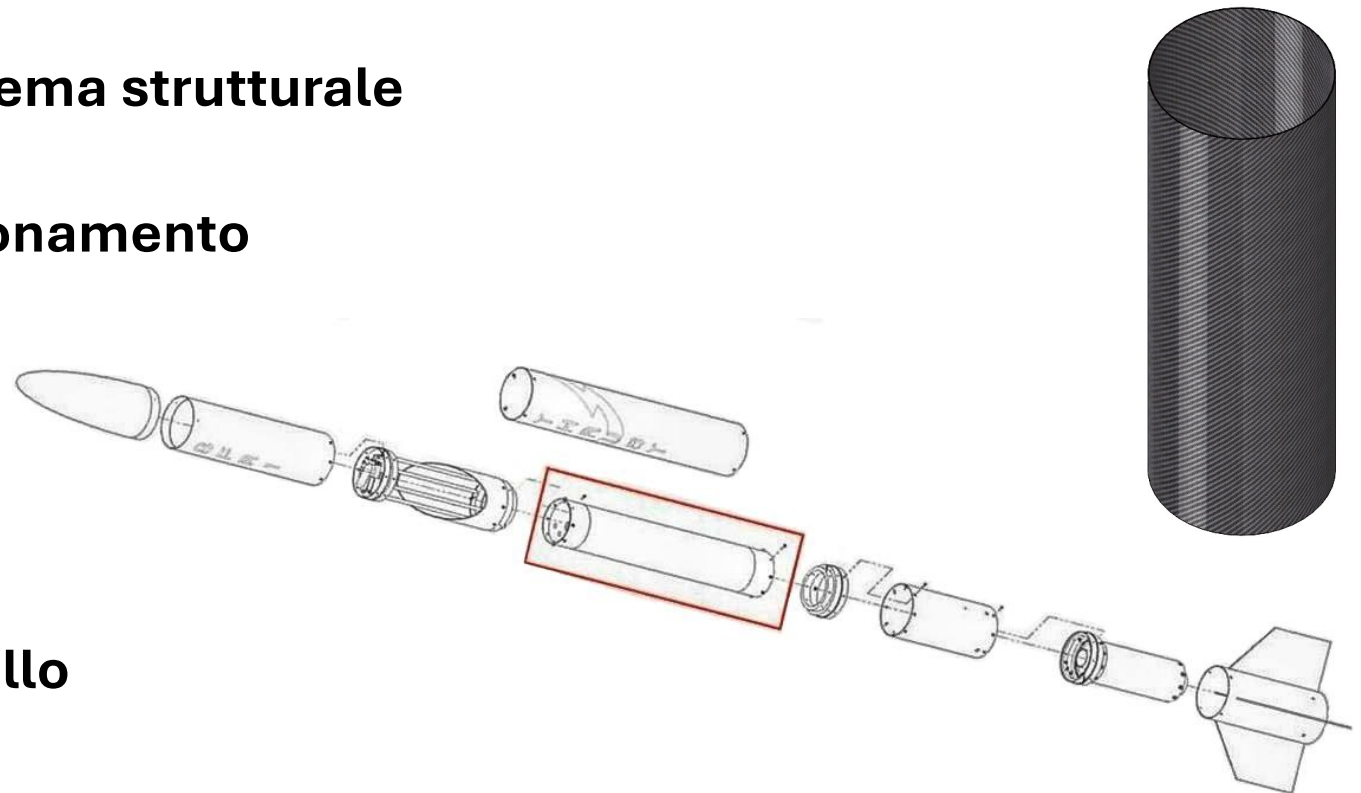
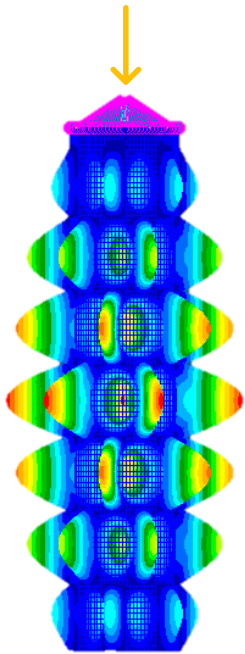
 **Definizione del problema strutturale**

 **Verifica del dimensionamento**

 **Simulazione FEM**

 **Analisi dei risultati**

 **Produzione del modello**



Il serbatoio del vettore è modellato come un tubo avente le seguenti caratteristiche

- **Specifiche geometriche:**

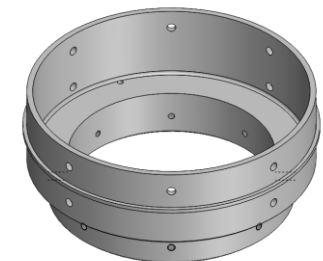
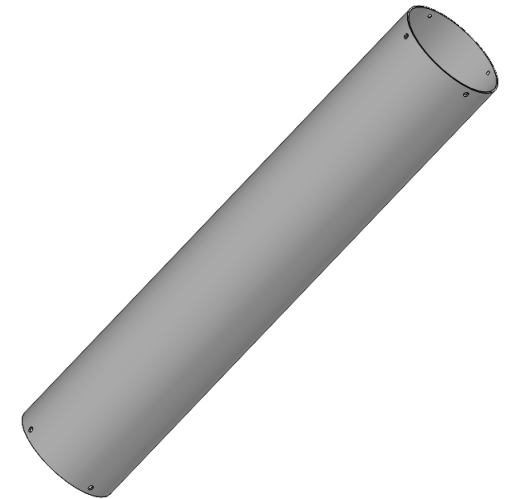
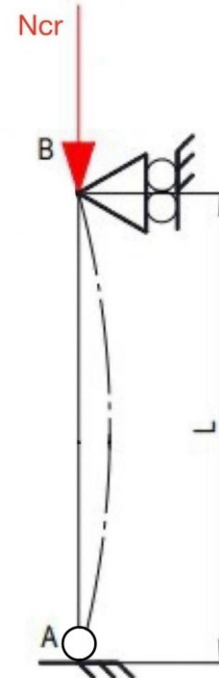
$$L = 750 \text{ [mm]} \mid d_{ext} = 150 \text{ [mm]} \mid t_c = 0.8 \text{ [mm]}$$

- **Carico assiale di compressione:**

$$N_{ax} = 1700 \text{ [N]}$$

- **Approssimazione del modello:**

1. Struttura priva di fori e flange
2. Fibra di carbonio trattata come isotropa





## Carico critico di Eulero

La formula di Eulero stima il carico critico che porta al collasso globale della trave snella:

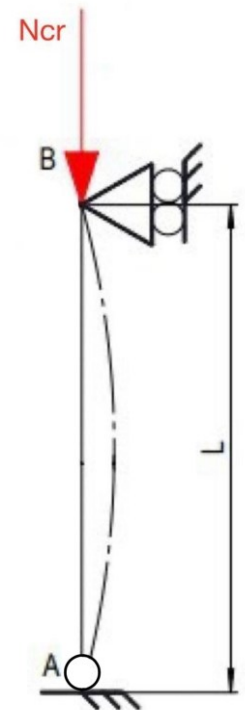
$$N_{cr}^{Eulero} = \frac{\pi EI}{(KL)^2} = 1.41 \times 10^6 [N]$$

Dove:

- $E = \frac{E_L + E_T}{2}$  → Modulo elastico equivalente del laminato
- $I = \frac{\pi(r_{ext}^4 - r_{int}^4)}{4}$  → Momento di inerzia di un tubo
- $K = 1$  → Fattore di vincolo per una trave incernierata

### ⚠ Limite della formula di Eulero

Considerare solo il cedimento globale può sovrastimare il carico critico!  
Per una valutazione più accurata del cedimento locale delle pareti, si utilizza il metodo NASA SP-8007, specifico per strutture a parete sottile.





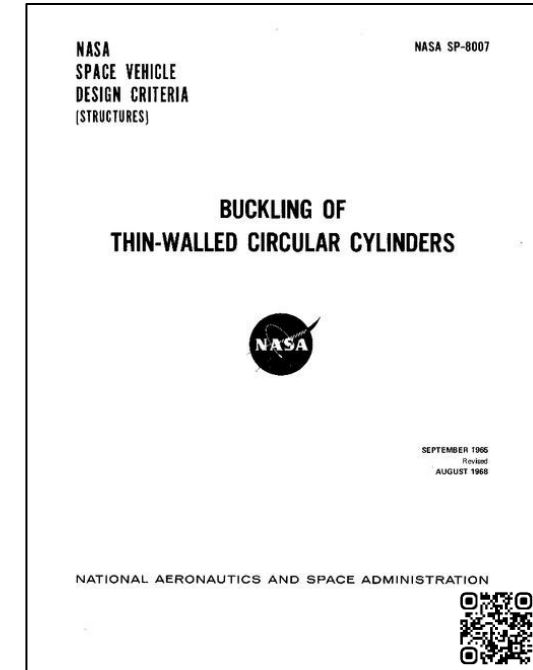
## Carico critico, NASA SP-8007

Stima il carico critico di buckling per cilindri circolari a parete sottile.  
Il cedimento avviene per instabilità locale delle pareti.

$$N_{cr}^{nasa} = K_x \frac{\pi^2 D}{L^2} = \frac{\gamma Et^2}{r_m \sqrt{3(1-\nu^2)}} 2\pi r_m = 1.102 \times 10^5 [N]$$

Dove:

- $K_x = \frac{4\sqrt{3}\gamma Z}{\pi^2} \rightarrow$  Fattore di buckling
- $D = \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)} \rightarrow$  Rigidezza flessionale
- $\gamma = 1 - 0.901(1 - e^{-\phi}) \rightarrow$  Knockdown factor (KDF)



### ✓ Risultati

Dalle verifiche,  $N_{cr}^{nasa} \ll N_{cr}^{Eulero}$ . Il buckling locale avviene prima ed il **FoS = 64**.



## Obiettivo analisi FEM:

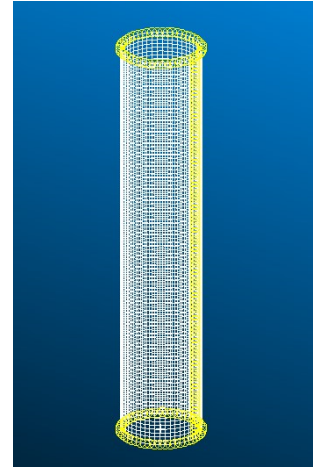
Verificare il valore del carico critico per un cilindro cavo in fibra di carbonio (approssimato come isotropo).



## Geometria del modello e mesh:

$$L = 750 [mm] \mid r_m = 74.6 [mm] \mid t = 0.8 [mm]$$

mesh (2D shell) = 100 × 90 elementi



## Proprietà del materiale:

- Modulo elastico  $\rightarrow E = 7.7 \times 10^{10} [Pa]$
- Coefficiente di Poisson  $\rightarrow \nu = 0.28$
- Modulo a taglio  $\rightarrow G = \frac{E}{2(1+\nu^2)} = 3.0 \times 10^{10} [Pa]$
- Densità di massa  $\rightarrow \rho = 1528 [kg/m^3]$

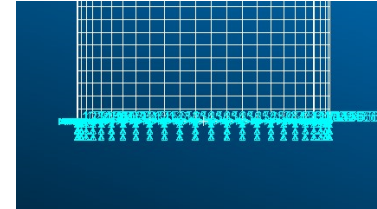
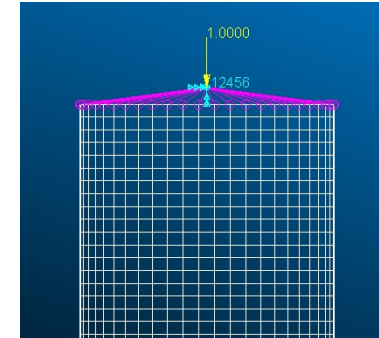
Property Name	Value
Elastic Modulus 11 =	1.4644E+11
Elastic Modulus 22 =	7.66E+09
Poisson Ratio 12 =	0.28
Shear Modulus 12 =	7.1699E+09
Shear Modulus 23 =	7.1699E+09
Shear Modulus 13 =	7.1699E+09
Density =	1600

	Material Name	Thickness	Orientation
1	Carbon_Uni	2.000000E-04	0.000000E+00
2	Carbon_Uni	2.000000E-04	9.000000E+01
3	Carbon_Uni	2.000000E-04	9.000000E+01
4	Carbon_Uni	2.000000E-04	0.000000E+00



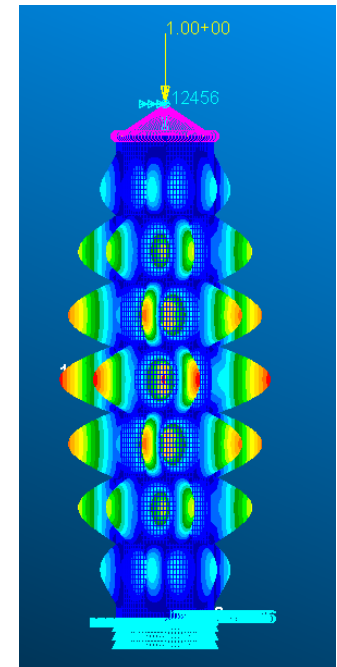
## Vincoli applicati:

- **Estremità superiore:** - Bloccata in x, y, z per la rotazione  
- Libera di traslare solo lungo z
- **Estremità inferiore:** completamente incastrata



## Carico applicato:

- Carico assiale **unitario** applicato in direzione -z.
- Patran restituisce un fattore moltiplicativo del carico unitario



## Risultato dell'analisi:

Il carico critico di buckling risulta:  $N_{cr}^{sim} = 184 [kN] \neq N_{cr}^{nasa}$

⚠ Patran analizza un modello ideale con  $\gamma = 1$ .

## 1 Approssimazione carbonio isotropo

Differenza tra modello isotropo e ortotropo: - **Errore relativo**  $\rightarrow \varepsilon_{rel} = 47\%$

- **Fattore di sicurezza**  $\rightarrow FoS = 43$

✗ L'approssimazione isotropa sovrastima il carico critico rispetto al caso reale

## 2 Riduzione della massa


• **Riduzione della massa:** 77% rispetto all'alluminio

✓ Si ottiene un componente con  $FoS$  elevato con una massa drasticamente inferiore

## 3 Proprietà meccaniche a parità di massa

Condizione di confronto:  $m_A = m_C$ , da cui si ottiene  $t_A = 0.45 [mm]$

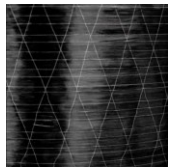
• Confronto del carico critico:  $N_{cr\_A}^{nasa} = 5.37 \times 10^4 [N] \ll N_{cr\_C}^{nasa} = 1.25 \times 10^5 [N]$

• Incremento del carico critico: **+132.6%** rispetto all'alluminio. 

## Infusione sottovuoto

La produzione del cilindro avviene tramite **infusione sottovuoto**, un processo che garantisce un'elevata qualità strutturale. Questo avviene grazie ad un controllo accurato del contenuto di resina ( $V_m$ ), riducendo la formazione di bolle e migliorando l'omogeneità del composito.

- **Materiali utilizzati:**



FibraZOLTEK PX35



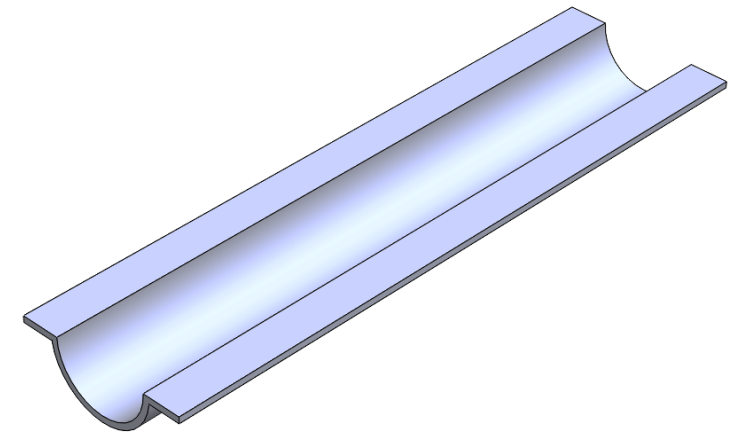
Peel-ply



Sacco a vuoto



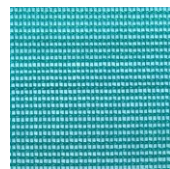
Canalina e spirale



Stampo semicilindrico



Resina IN2 + indurente  
VAT30 SLOW



Mesh flow

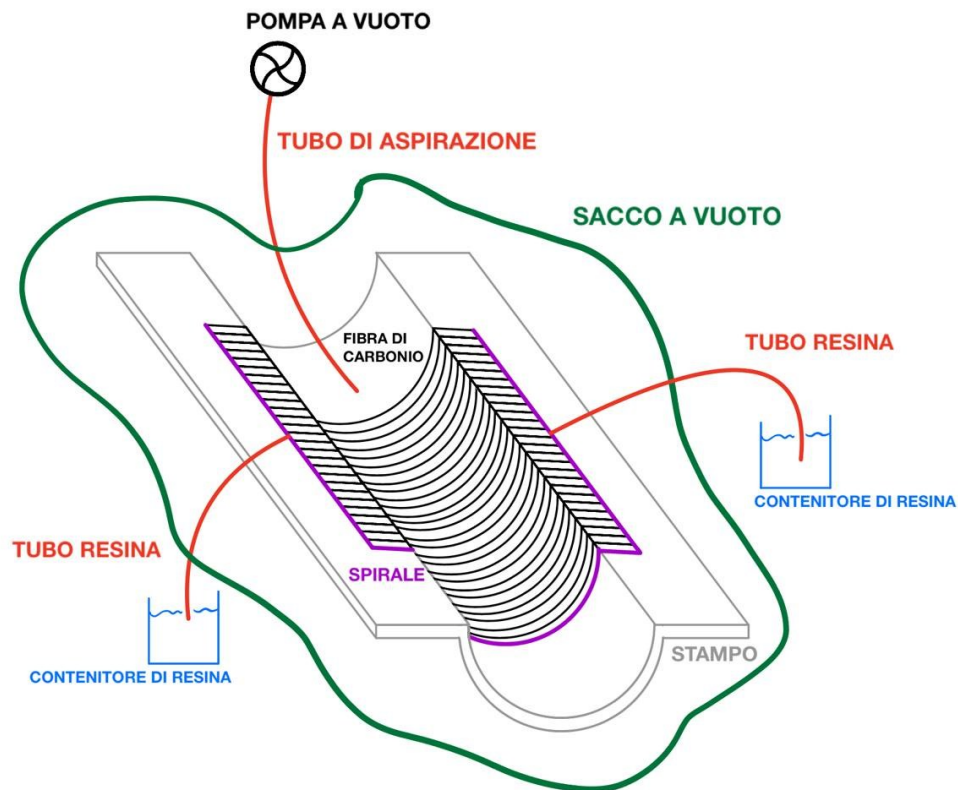


Butilene



Tessuto Bleeder

## • Processo:



### 1 Preparazione dello stampo

- Pulizia accurata dello stampo per evitare impurità.
- Applicazione del distaccante.

### 2 Taglio e posizionamento dei materiali

- Stratificazione dei materiali: fibra di carbonio, peel-ply e rete di flusso.
- Sistemazione di canalina e spirale per ottimizzare l'infusione

### 3 Sigillatura e creazione del vuoto

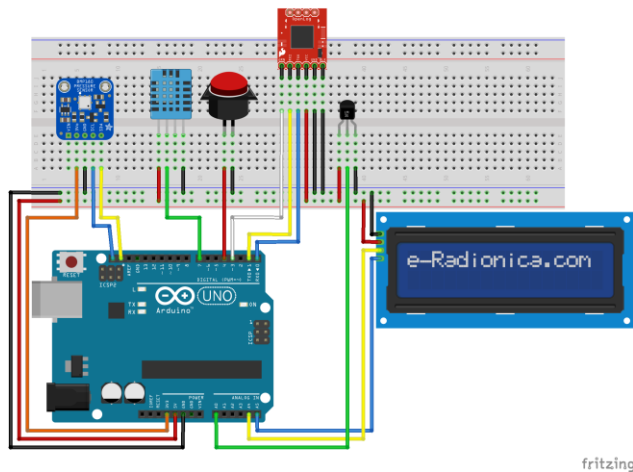
- Chiusura del sistema con sacco a vuoto.
- Controllo della tenuta per evitare perdite d'aria.

## 4 Infusione della resina

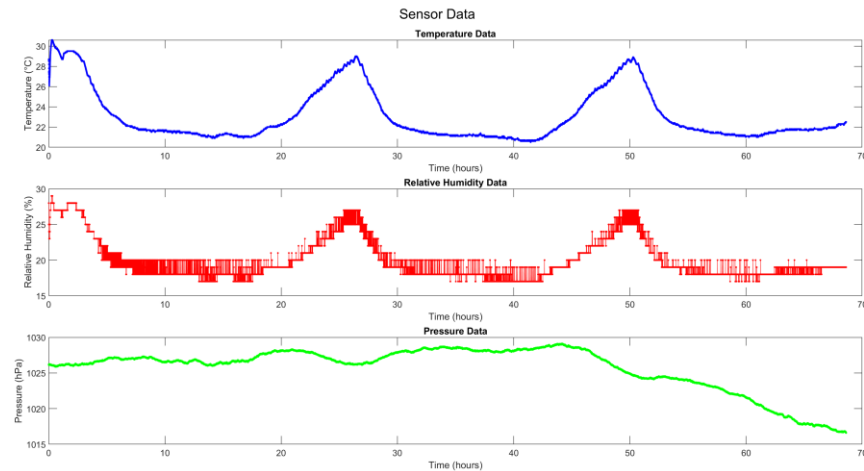
- Preparazione della resina e del catalizzatore.
- La resina viene aspirata nel sacco sottovuoto grazie alla differenza di pressione tra interno ed esterno del sacco ed impregna completamente il laminato.

## 5 Cura della resina

- Polimerizzazione a temperatura ambiente.



fritzing



Monitoraggio delle condizioni al contorno durante la polimerizzazione con Arduino.



- [1] **Thrust team.** «Thrust team.» (2024), web: <https://thrust-team.it/>
- [2] **S. Lenci, Lezioni di meccanica strutturale.** Esculapio, 2020,  
isbn:9781234567890
- [3] **L. Gray, Composite Materials, Design and Applications.** CRC Press LLC, 2003,  
isbn: 9780201157901
- [4] **NASA, «Shell Buckling Design Criteria for Cylindrical Structures».** NASA,  
Washington, DC, USA, Technical Report SP-8007, 1968
- [5] **Easy Composites.** «Easy Composites.» (2024), web: <https://www.easycomposites.eu/>