CAPITOLO 8

Design termico di strutture spaziali

Alfonso Pagani

MUL^2 Lab – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
Politecnico di Torino

Dall'ambiente termico alla risposta strutturale

Le temperature non sono soltanto un requisito di sopravvivenza: nelle strutture di precisione possono diventare un vero e proprio **carico strutturale**.

Capitolo 8 – Design termico

- ambiente termico durante la missione;
- conduzione, convezione e irraggiamento;
- coefficiente di espansione termica (CTE);
- impatto delle deformazioni termiche sulle prestazioni.

Capitolo 9 – Analisi termoelastica

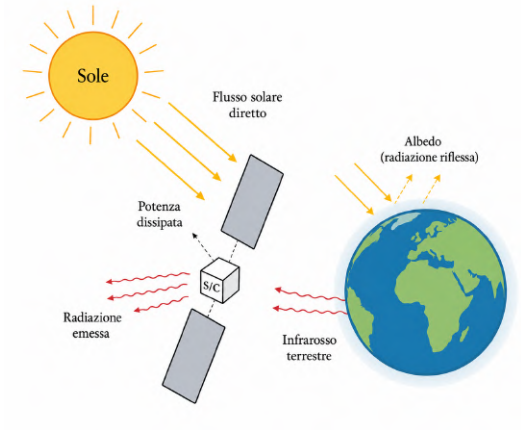
- campo di temperatura assegnato;
- deformazione termica libera;
- legge costitutiva termoelastica;
- carichi termici equivalenti nel FEM.



Nel seguito si adotta un approccio **disaccoppiato / one-way**: il campo termico è noto e viene trasferito al modello strutturale.

Ambiente termico durante la missione

Dal lancio alla fase operativa



Vita utile del veicolo

Terra / rampa – condizioni ambientali e apparecchiature già attive.

Ascesa – fairing, riscaldamento aerodinamico e IR di breve durata.

LEOP – assetti e configurazioni termiche transitorie.

Operativa – stabilità termica e geometrica diventano requisiti di prestazione.

Principali sorgenti in orbita

Sole diretto, albedo planetaria, infrarosso terrestre e dissipazione interna.

Conduzione, convezione e irraggiamento

Conduzione

Trasferimento attraverso un mezzo in presenza di un gradiente termico.

$$\mathbf{q} = -k\nabla T$$

- Nello spacecraft è fondamentale attraverso strutture, interfacce e collegamenti termici.

Convezione

Trasferimento associato al moto macroscopico di un fluido.

$$q = h(T_s - T_f)$$

- La convezione **esterna** è assente nel vuoto; resta rilevante a terra o in sistemi fluidici interni.

Irraggiamento

Trasferimento mediante onde elettromagnetiche, senza necessità di un mezzo.

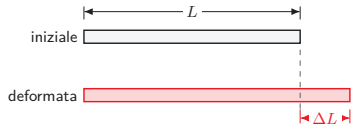
$$q_e = \varepsilon\sigma T_s^4$$

- Nel vuoto è il principale meccanismo di scambio con l'ambiente esterno.

Punto chiave: conduzione e convezione sono circa lineari in ΔT; l'irraggiamento dipende da T^4.

Coefficiente di espansione termica

Dalla temperatura alla variazione dimensionale



Per un elemento libero di lunghezza iniziale L soggetto a una variazione uniforme ΔT:

$$\boxed{\Delta L = \alpha L \Delta T}$$

$$\varepsilon^{th} = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \Delta T.$$

CTE, α

Misura la variazione relativa di lunghezza per unità di temperatura; ha dimensione $1/K$.

Materiali isotropi

Un unico coefficiente α descrive l'espansione in tutte le direzioni.

Materiali anisotropi e laminati

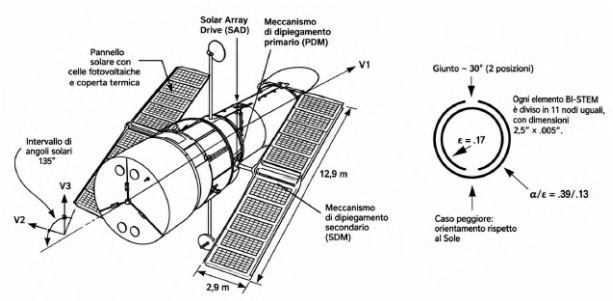
Il CTE dipende dalla direzione; nei compositi la sequenza di laminazione consente di controllare la stabilità dimensionale.

Quando nasce la termoelasticità?

L'espansione libera non genera necessariamente tensioni. Vincoli, collegamenti e materiali differenti trasformano invece le dilatazioni incompatibili in deformazioni e tensioni strutturali.

Hubble Space Telescope

Un problema termoelastico diventa un problema di puntamento



I pannelli solari originari erano sostenuti da boom costituiti da due sottili lamine metalliche accoppiate.

uscita dall'eclissi

↓

ΔT tra le due lamine

↓

dilatazioni differenziali

↓

micro-scatti del boom

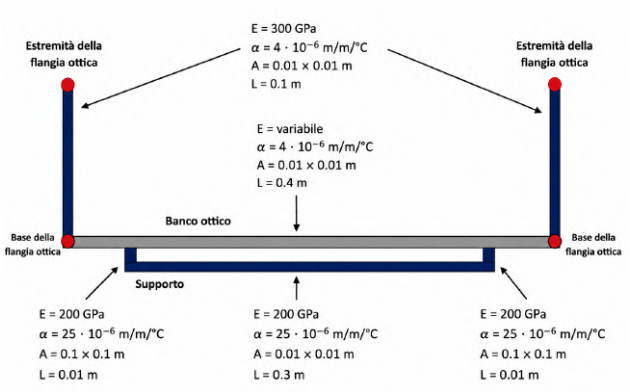
↓

disturbo di puntamento

La sostituzione con pannelli più rigidi eliminò il problema, dopo verifica termoelastica in camera termovuoto.

Caso numerico: banco ottico

Geometria e incompatibilità termica



Condizioni

Incremento uniforme di temperatura:

$$\boxed{\Delta T = 20°\mathrm{C}}$$

Il modulo elastico del banco

$$E_{bench}$$

è il parametro variabile.

Coefficienti di espansione

$$\alpha_{sup} = 25 \cdot 10^{-6}/°\mathrm{C}$$

$$\alpha_{bench} = 4 \cdot 10^{-6}/°\mathrm{C}$$

Il supporto tende a dilatarsi molto più del banco ottico.

Caso numerico: ruolo della rigidezza relativa

Due casi limite

Banco ottico molto flessibile

Il banco segue quasi completamente l'espansione del supporto.

Dilatazione del supporto:

$$\Delta L_{sup} = L_{sup}\alpha_{sup}\Delta T$$

La parte di banco che sporge oltre il supporto è

$$L_{bo} = L_{bench} - L_{sup}$$

Il relativo contributo termico è

$$\Delta L_{bo} = L_{bo}\alpha_{bench}\Delta T$$

Pertanto:

$$\boxed{\Delta L \simeq \Delta L_{sup} + \Delta L_{bo}}$$

Banco ottico molto rigido

Il supporto si adatta alla deformazione imposta dal banco ottico.

La risposta tende quindi alla dilatazione libera del banco:

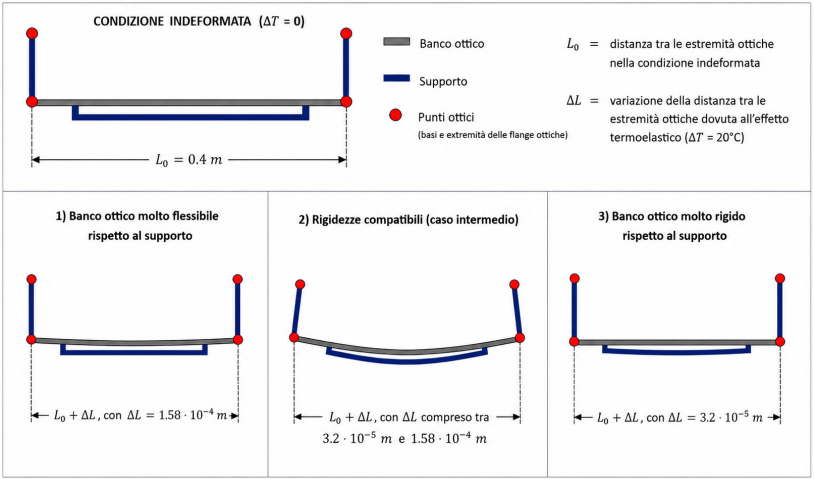
$$\boxed{\Delta L \simeq L_{bench}\alpha_{bench}\Delta T}$$

Tra i due casi limite, nessuno dei componenti riesce a imporre completamente la propria dilatazione libera.

Poiché gli assi dei due elementi non coincidono, l'incompatibilità deformativa produce **flessione dell'intero sistema**.

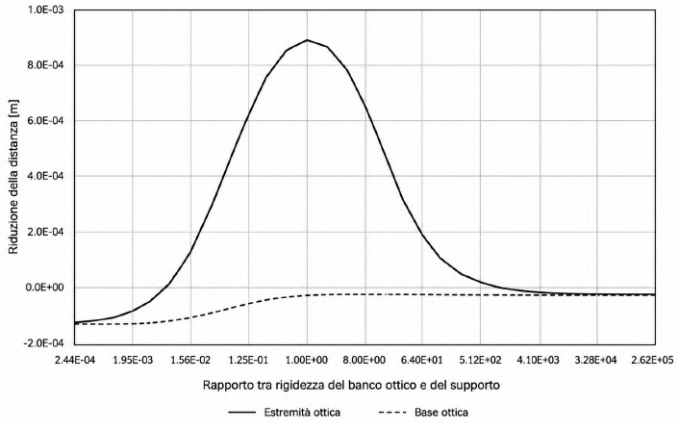
Caso numerico: ruolo della rigidezza relativa

Tre regimi di risposta



Caso numerico: conflitto termico

La massima distorsione compare per rigidezze confrontabili



Il rapporto di rigidezza governa quale componente riesce a imporre la propria dilatazione libera.

Regione critica

Quando le rigidezze sono confrontabili, i due componenti si contrastano reciprocamente e la deformazione flessionale amplifica lo spostamento delle estremità ottiche.

Non basta minimizzare il CTE: conta la rigidezza dell'intero sistema.