

# Decompressione lenta, rapida, esplosiva

corso di *Strutture per Veicoli Spaziali*  
cod. 01SRMMT, 04LNUMT - A.A. 2020/2021

---

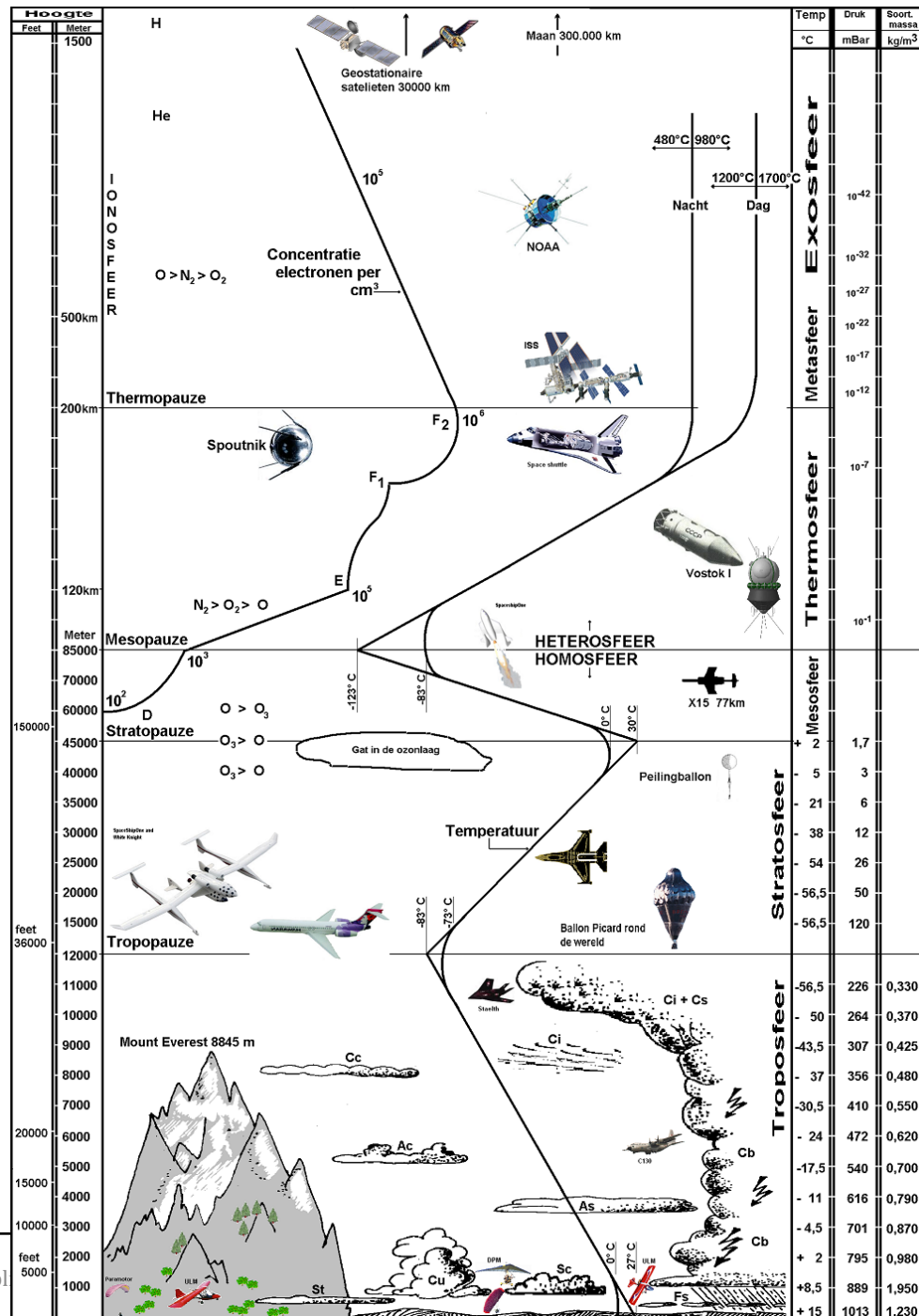
prof. A. Pagani

Politecnico di Torino

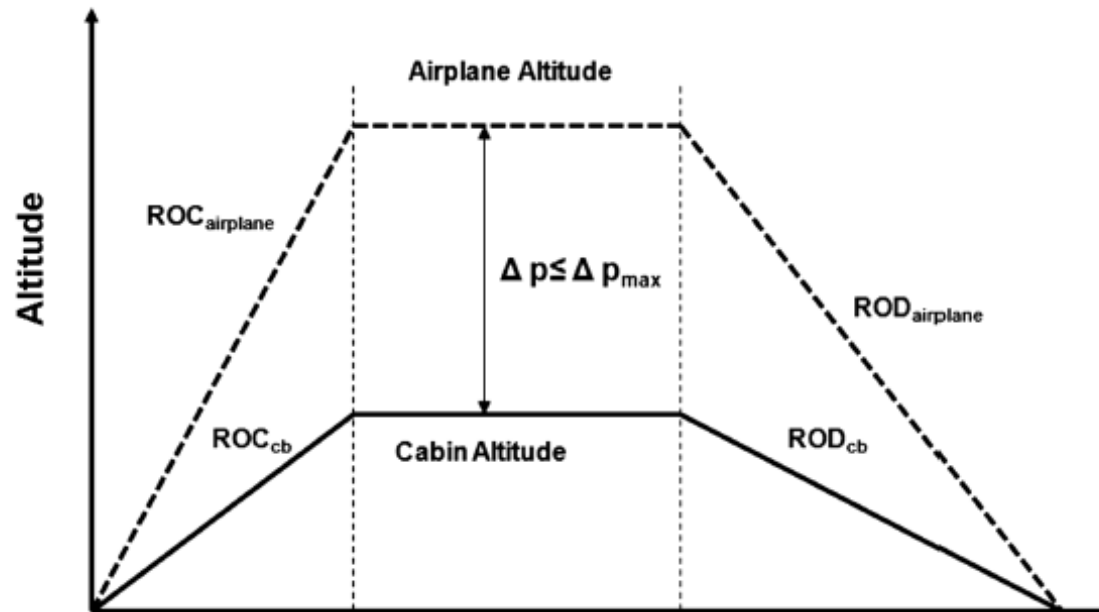
t: 011-090(5875)

e: [alfonso.pagani@polito.it](mailto:alfonso.pagani@polito.it)

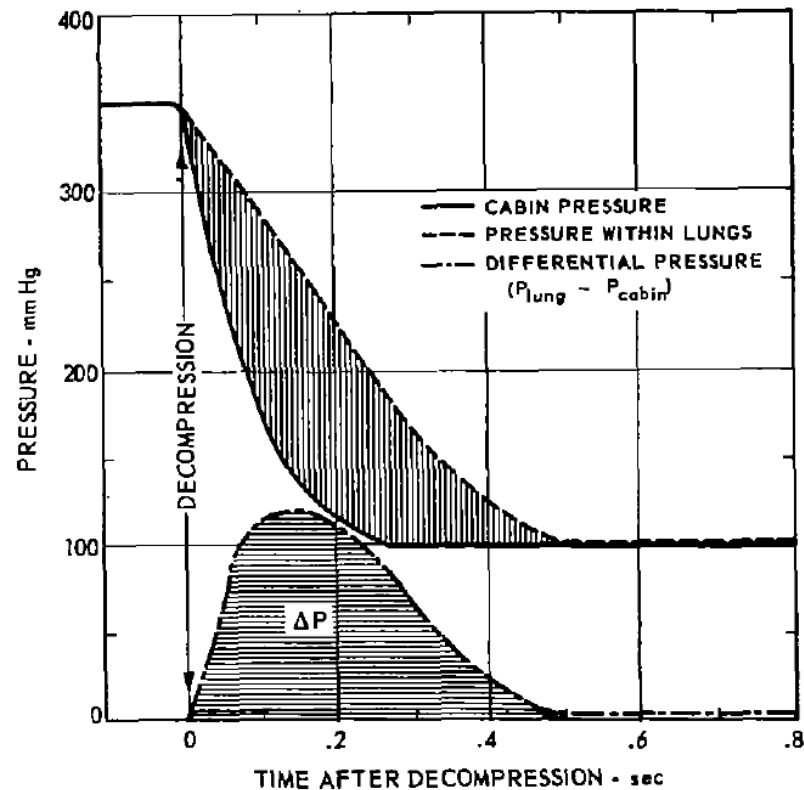
w: [www.mul2.com](http://www.mul2.com) | [www.pre-eco.eu](http://www.pre-eco.eu)



# Velivoli commerciali



# Effetto della decompressione sui passeggeri



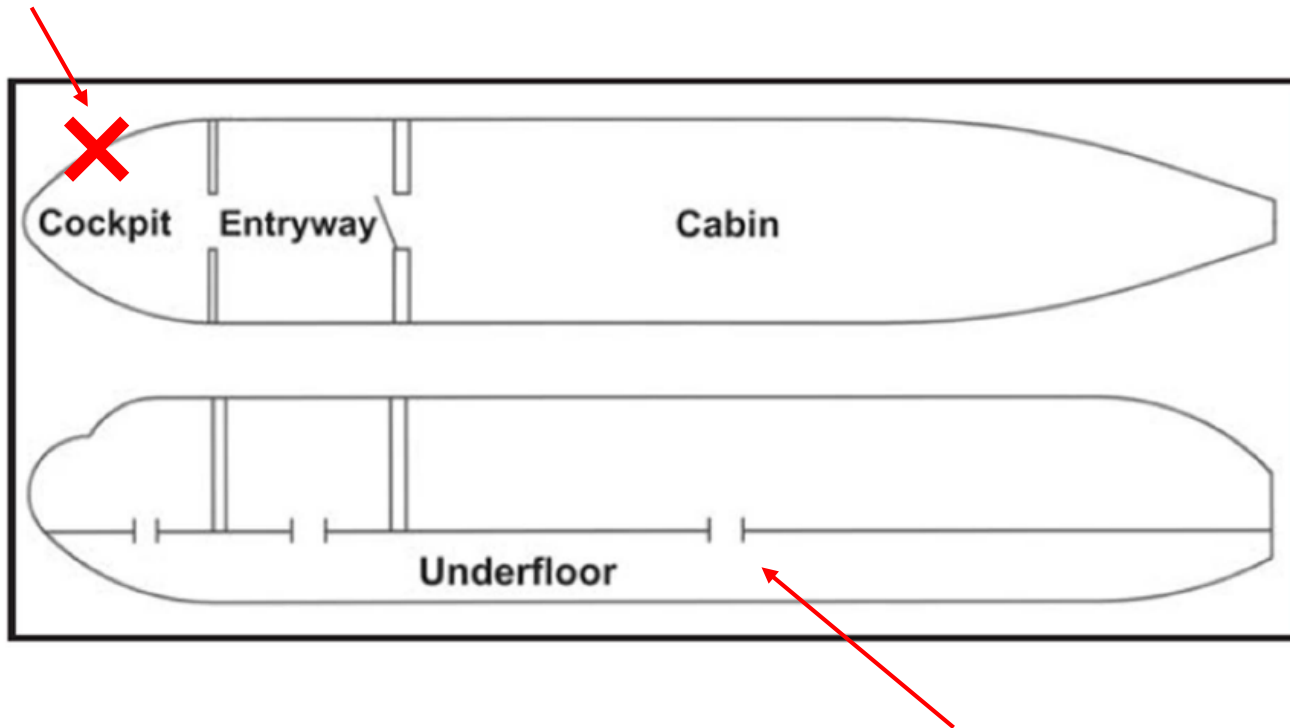
# Effetto della decompressione sui passeggeri

Table 1. Mortality in Relation to Decompression Time in Experimental Animals

Reference	Species	Decompression		$P_i - P_f$ mm Hg	$P_i/P_f$ mm Hg	Decompression time, sec	$V/A$ , m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	Mortality, percent
		Initial pressure, $P_i$ , mm Hg	Final pressure, $P_f$ , mm Hg					
Corey ..51.	Rat.....	760	21	739	36.2	0.630	33.0	0
Eggleton 64.	Rabbit .....	760	122	638	6.2	.200	18.0	0
Eggleton 64.	Rat.....	760	122	638	6.2	.200	18.0	0
Kolder 109.	Rat.....	735	73	662	10.0	.180	15.0	0
Kolder .109.	Rat.....	735	73	662	10.0	.041	3.3	10
Kolder 109.	Rat.....	735	73	662	10.0	.015	1.2	50
Stickney 173	Rat.....	738	32	706	23.1	.019	1.14	50
Kolder 109.	Rat.....	735	73	662	10.0	.0014	.12	100

# Effetto sulle strutture secondarie

Breccia



$\Delta p$  ?

Ventilazioni  
attive/passive

# Considerazioni sulla modellizzazione

- Temperatura

- Cali di temperatura molto elevati accompagnano i processi di depressurizzazione rapida ( $\sim 100^{\circ}\text{C}$ ).
- È un processo chiaramente non isoterma.
- È un processo chiaramente non adiabatico (scambio di calore tra aria e pareti dell'aeroplano).

# Considerazioni sulla modellizzazione

- Umidità

- Siccome la temperatura scende sotto il punto di rugiada durante i primi istanti di una depressurizzazione rapida, la restante parte di questa avviene in aria con 100% di umidità (indipendentemente dall'umidità iniziale).
- Il calore rilasciato dalla formazione di condensa di vapore acqueo fa sì che il processo reale si allontani da un processo adiabatico di un gas ideale.
- Il processo dovrebbe quindi essere trattato come un processo politropico.





# Considerazioni sulla modellizzazione

- Area effettiva

- In pratica il flusso d'aria attraverso un orifizio si discosta dal flusso teorico.
- Cause: velocità ridotta nell'orifizio per via di effetti d'attrito; formazione di vortici; etc.
- Tali differenze vengono introdotte nel modello solitamente tramite l'utilizzo di un coefficiente di efflusso  $CD$ .
- Tale coefficiente è il rapporto tra il flusso reale dovuto ad un processo diabatico irreversibile e il flusso teorico massimo possibile in seguito ad un processo isentropico.
- $CD < 1$ .
- Il prodotto di tale coefficiente con l'area dell'orifizio è l'area effettiva da considerare nelle analisi.

# Considerazioni sulla modellizzazione

- Assunzioni

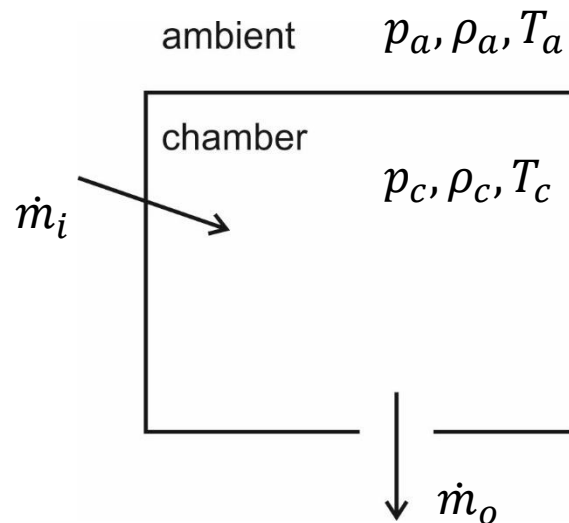
- Il volume delle camere rimane costante durante la depressurizzazione.
- L'atmosfera è ipotizzata come un volume infinito di aria le cui condizioni non cambiano per via del flusso di massa proveniente dall'aereo.
- L'aria viene considerata come gas perfetto ideale.
- Le proprietà dell'aria sono uniformi nel volume -> modello 0D.
- L'aeroplano mantiene la quota durante la depressurizzazione.
- L'effetto dell'umidità relativa e il calore latente di condensazione e sublimazione viene trascurato.

# Considerazioni sulla modellizzazione

- Depressurizzazione esplosiva, rapida e lenta
  - Depressurizzazione esplosiva,  $t < 500 \text{ ms}$
  - Depressurizzazione rapida,  $t < 10 \text{ s}$
  - Depressurizzazione lenta,  $t > 10 \text{ s}$



# Definizione del problema



*Legge di conservazione della massa* nel **caso di gas perfetto in volume costante**:

$$\frac{dp_c(t)}{dt} = \frac{nRT_c(t)}{V_c} (\dot{m}_i(t) - \dot{m}_o(t))$$

# Portata critica e subcritica

$$\begin{aligned}
 p_c \geq p_c^* &\rightarrow \text{choked or sonic flow } (M = 1) & \dot{m}_o &= f(p_c) \\
 p_c < p_c^* &\rightarrow \text{subsonic flow } (M < 1), & \dot{m}_o &= f(p_c, p_a)
 \end{aligned}$$

Flusso sonico:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{o,\max} &= C_D A \psi \frac{p_c}{RT_c} \sqrt{\kappa RT_c} = \frac{A_{\text{eff}} \psi \sqrt{\kappa}}{\sqrt{RT_c}} p_c = A_{\text{eff}} \psi' \frac{p_c}{\sqrt{RT_c}} \\
 \psi &\equiv \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} = 0.5787 & \psi' &\equiv \psi \cdot \sqrt{\kappa} = 0.6847
 \end{aligned}$$

Flusso subsonico:

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_o &= C_D A \bar{u} \rho_c = A_{\text{eff}} \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1}} \rho_c p_c \left[ \left( \frac{p_a}{p_c} \right)^{\left( \frac{2}{\kappa} \right)} - \left( \frac{p_a}{p_c} \right)^{\left( \frac{\kappa+1}{\kappa} \right)} \right] \\
 &= A_{\text{eff}} p_a \left( \frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{RT_c} \right)^{1/2} \tilde{p}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} [1 - \tilde{p}^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}]^{1/2} \\
 \tilde{p} &= p_c / p_a
 \end{aligned}$$

# Modello isentropico: flusso critico

Bilancio della massa secondo le ipotesi di depressurizzazione isentropica ( $n = k$ ) e flusso critico:

$$\frac{dp_c(t)}{dt} = \frac{\kappa R T_c}{V_c} (\dot{m}_i - \dot{m}_o) = (\kappa R) \left( \frac{\dot{m}_i}{V_c} \right) T_c(t) - \left( \frac{A_{\text{eff}}}{V_c} \right) (\psi' \kappa \sqrt{R}) \sqrt{T_c(t)} p_c(t)$$

Sostituendo le relazioni dell'isentropica:

$$\frac{T_c}{T_c^0} = \left( \frac{p_c}{p_c^0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \Rightarrow T_c(t) = T_c^0 \cdot \left[ \frac{p_c(t)}{p_c^0} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\frac{dp_c(t)}{dt} = (\kappa R) \zeta \left( \frac{\dot{m}_i}{V_c} \right) p_c^{(\kappa-1)/\kappa} - \left( \frac{A_{\text{eff}}}{V_c} \right) (\psi' \kappa \sqrt{R}) \zeta^{1/2} p_c^{(3\kappa-1)/2\kappa}$$

$$\zeta = T_c^0 / (p_c^0)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

In caso di ripressurizzazione nulla, l'equazione può essere risolta analiticamente:

$$\frac{dp_c(t)}{dt} = - \left( \frac{A_{\text{eff}}}{V_c} \right) (\psi' \kappa \sqrt{R}) \zeta^{1/2} p_c^{(3\kappa-1)/2\kappa}$$

$$p_c(t) = p_c^0 \left[ 1 - \left( \frac{A_{\text{eff}}}{V_c} \right) \left( \psi' \frac{1-\kappa}{2} \sqrt{RT_c^0} \right) t \right]^{2\kappa/(1-\kappa)}$$

Formula approssimata per la durata della depressurizzazione in campo sonico nel caso di ripressurizzazione nulla e temperatura dell'aria pari a 23°

$$\Omega \approx 0.025 \left( \frac{V_c}{A_{\text{eff}}} \right) [(0.5283 \tilde{p}^o)^{1/7} - 1]$$

# Modello isentropico: flusso subcritico

Al contrario, nel caso subcritico abbiamo:

$$\frac{dp_c}{dt} = \kappa R T_c(t) \left( \frac{\dot{m}_i}{V_c} \right) - \kappa R T_c(t) \left( \frac{A_{\text{eff}}}{V_c} \right) \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \rho_c p_c \left[ \left( \frac{p_a}{p_c} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_a}{p_c} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}$$

Sostituendo le relazioni dell'isentropica, assumendo  $\dot{m}_i = 0$  e riarrangiando:

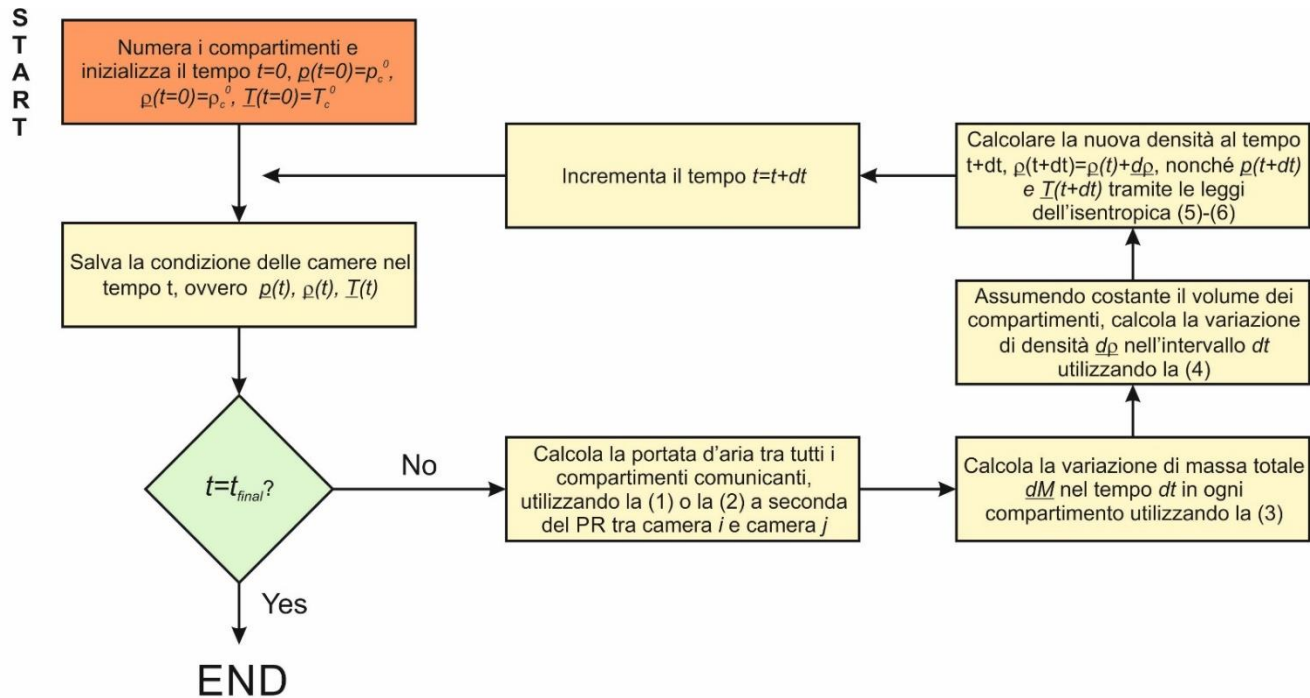
$$\frac{d\tilde{p}}{dt} = - \left( \frac{A_{\text{eff}}}{V_c} \right) \cdot \kappa \cdot \left( \frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \right)^{1/2} \sqrt{R \cdot T_c^o} \cdot \tilde{p}^{o(\frac{1-\kappa}{2\kappa})} \cdot \tilde{p}^{\frac{3(\kappa-1)}{2\kappa}} \cdot (1 - \tilde{p}^{\frac{1-\kappa}{\kappa}})^{1/2}$$

Formula approssimata per la durata della depressurizzazione in campo subsonico nel caso di ripressurizzazione nulla e temperatura dell'aria pari a 23°

$$\tau = 3.5 \cdot 10^{-3} \left( \frac{V_c}{A_{\text{eff}}} \right)$$



# Algoritmo per un modello quasi-stazionario



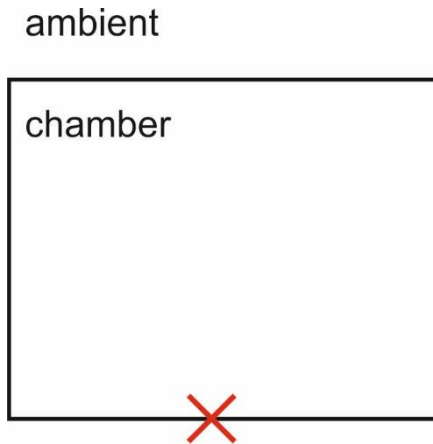
$$(1) \quad \dot{m}_{ij} = \rho_i \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k+1}} A_{ij} C D_{ij} \sqrt{\frac{2kRT_i}{k+1}}$$

$$(2) \quad \dot{m}_{ij} = A_{ij} C D_{ij} \sqrt{2p_i \rho_i \frac{k}{k-1} \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\frac{2}{k}} \left[ 1 - \left( \frac{p_j}{p_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

$$(3) \quad dM(t+dt) = (\dot{m}_i(t) - \dot{m}_o(t)) dt \quad (5) \quad p(t+dt) = p_c^0 \left( \frac{\rho(t+dt)}{\rho_c^0} \right)^k$$

$$(4) \quad d\rho(t+dt) = \frac{dM(t+dt)}{V} \quad (6) \quad T(t+dt) = T_c^0 \left( \frac{\rho(t+dt)}{\rho_c^0} \right)^{k-1}$$

# Esempio 1



$$T_o = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_c^0 = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_o = 26.4289\text{ kPa}$$

$$p_c^0 = 117.016\text{ kPa}$$

$$V_c = 4\text{ m}^3$$

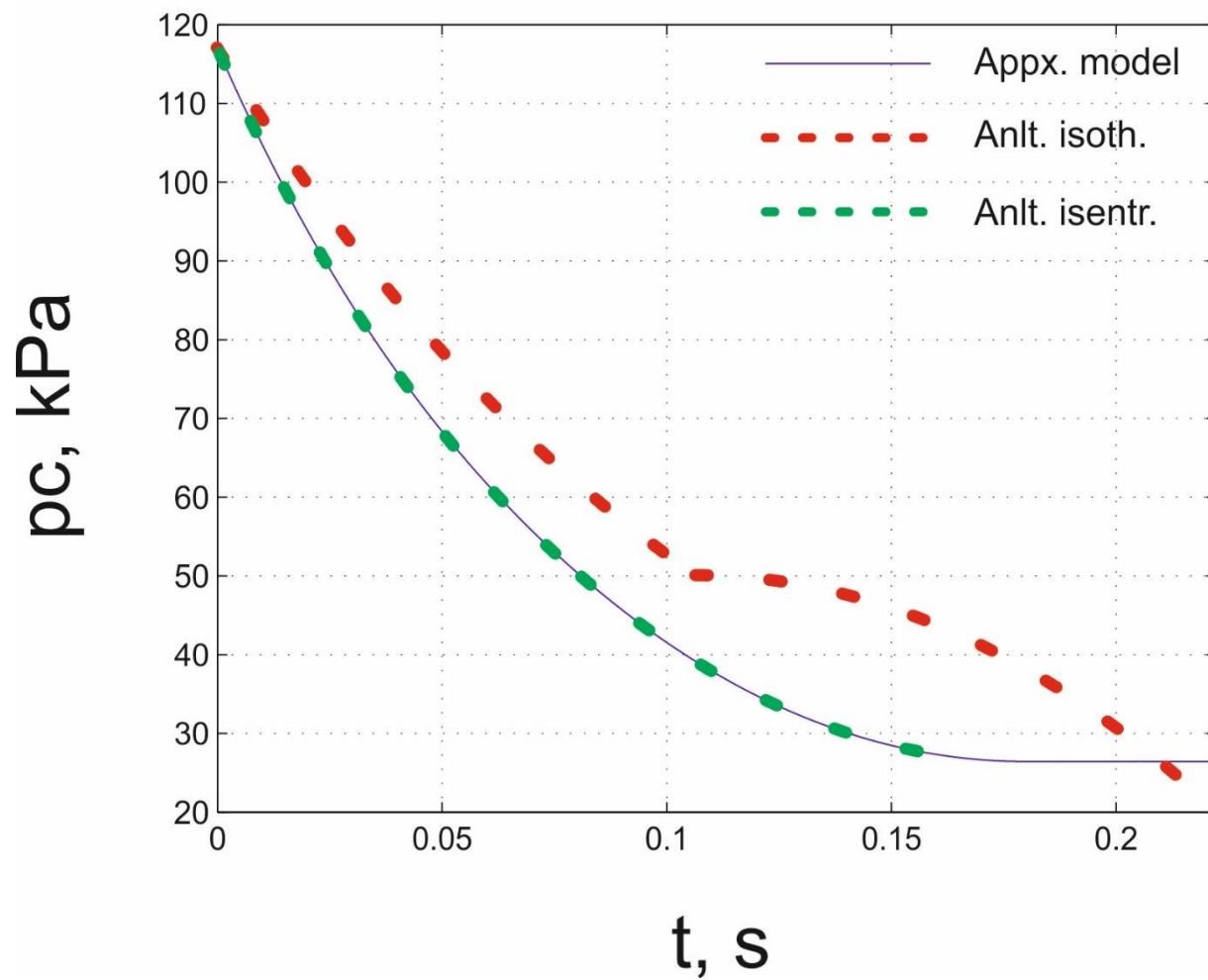
$$A = 0.2\text{ m}^2$$

$$CD = 0.8$$

1. Utilizzando il modello numerico quasi-stazionario fornito, calcolare la durata della depressurizzazione nonché l'andamento nel tempo della pressione, densità e temperatura nella camera.
2. Confrontare i risultati con quelli precedentemente ottenuti tramite le soluzioni analitiche (isotermo e isentropico).

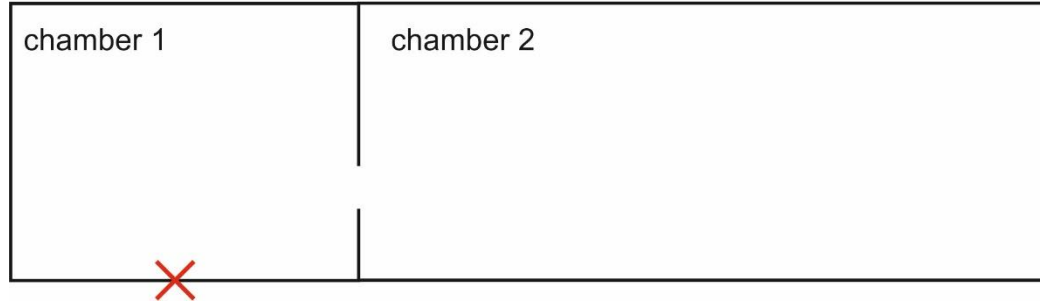
Durata della depressurizzazione in campo supercritico, subcritico e durata totale.

	$t_{sup}$ (ms)	$t_{sub}$ (ms)	$t_{tot}$ (ms)
Anlt. Isotermo	106.433	115.859	222.292
Anlt. Isentropico	80.669	87.500	168.169
Approx.	80.800	98.100	178.900



# Esempio 2

ambient



$$T_o = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_c^0 = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$p_o = 62.8812\text{ kPa}$$

$$p_c^0 = 117.0162\text{ kPa}$$

$$V_{c1} = 4\text{ m}^3$$

$$V_{c2} = 16\text{ m}^3$$

$$A_{1o} = 0.2\text{ m}^2$$

$$CD_{10} = 0.8$$

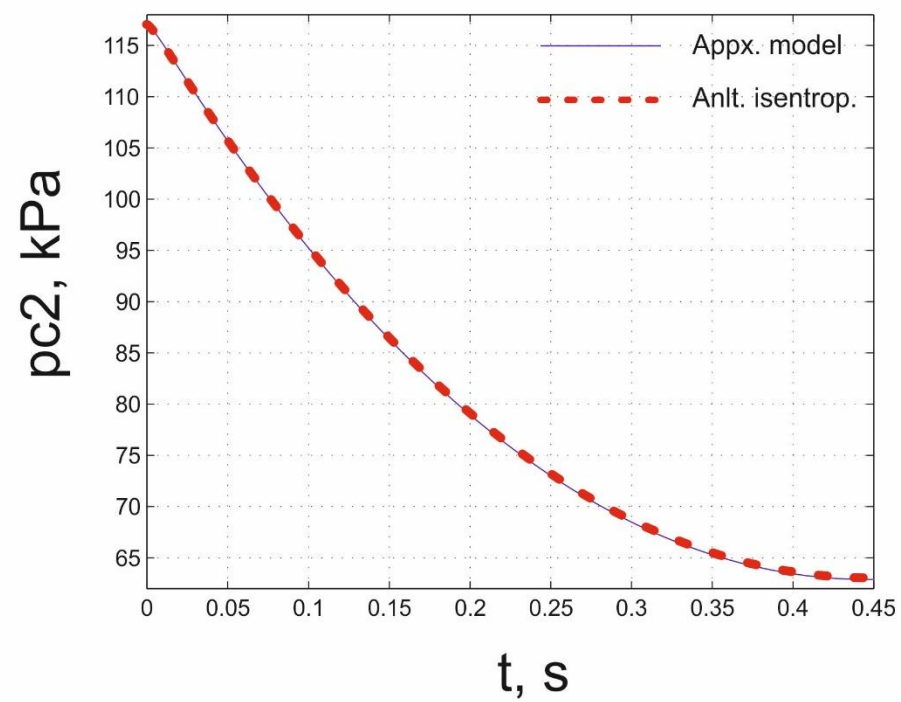
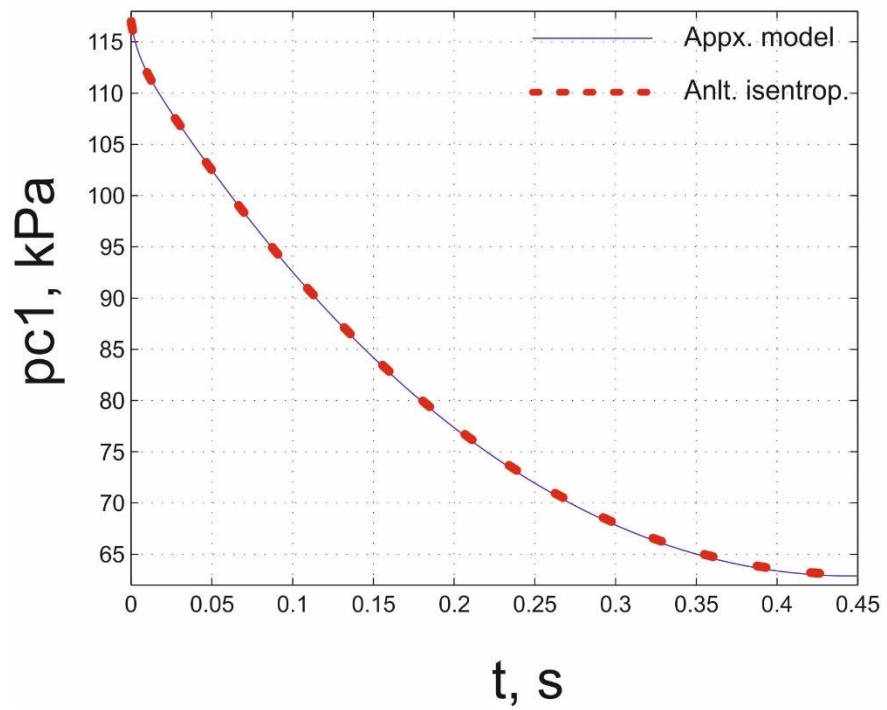
$$A_{12} = 0.5\text{ m}^2$$

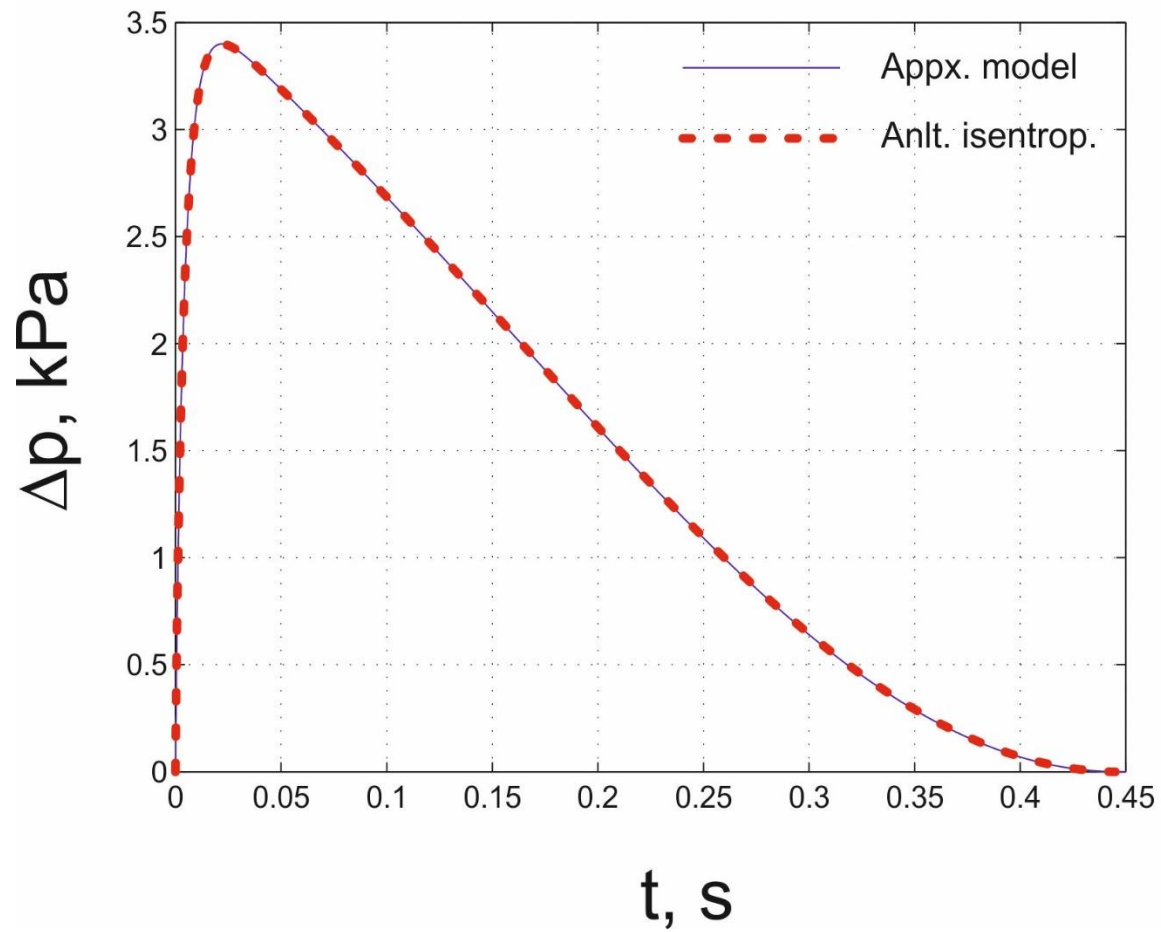
$$CD_{12} = 0.7$$

1. Utilizzando il modello numerico quasi-stazionario fornito, calcolare la durata della depressurizzazione, l'andamento nel tempo della pressione nelle due camere e l'andamento nel tempo della pressione agente sulla parete divisoria tra le due camere.
2. Confrontare i risultati con quelli precedentemente ottenuti tramite il modelli analitico isentropico.

## Durata della depressurizzazione (in campo subcritico)

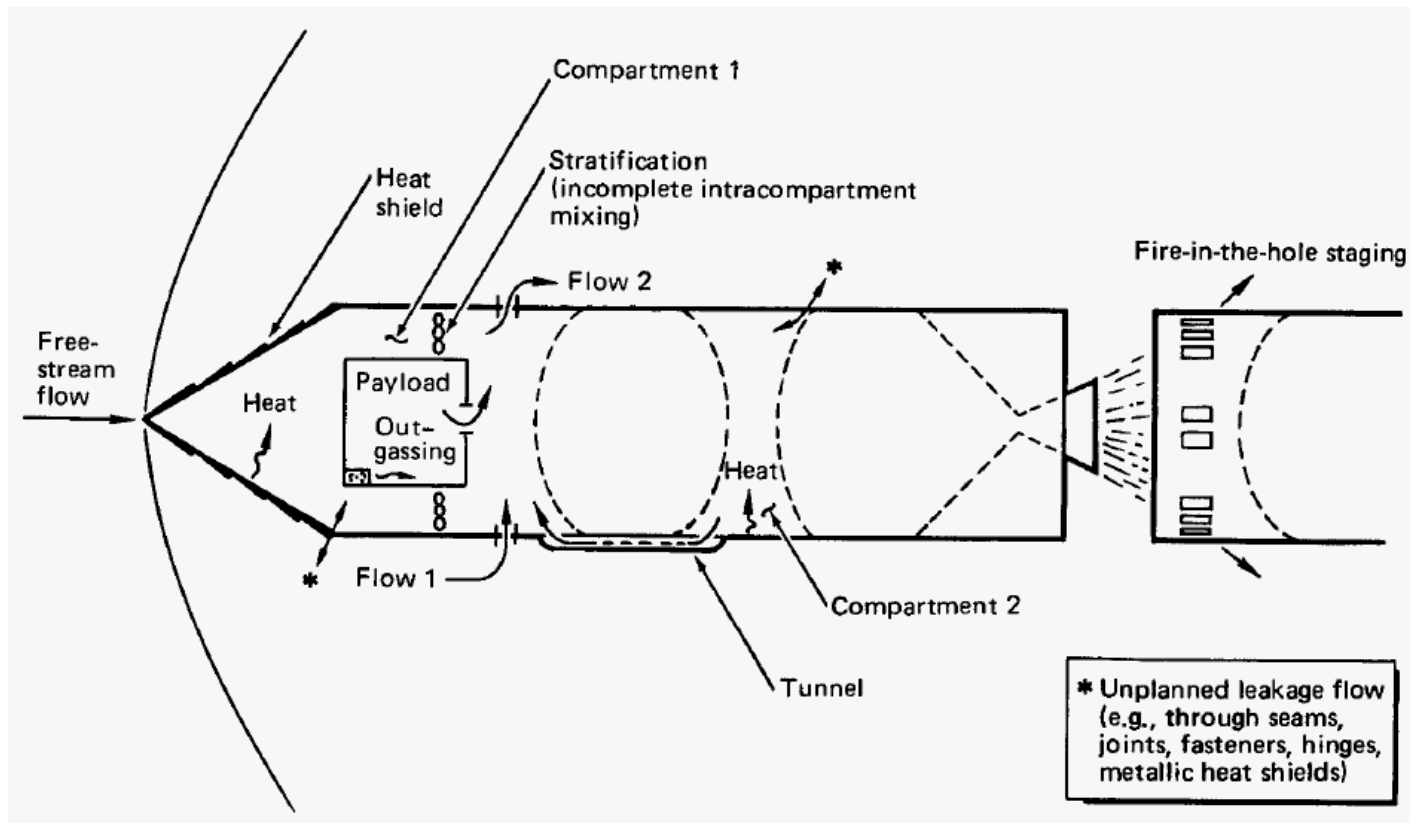
	$t_{tot}$ (ms)
Anlt. Isentropico	446.933
Approx.	444.500





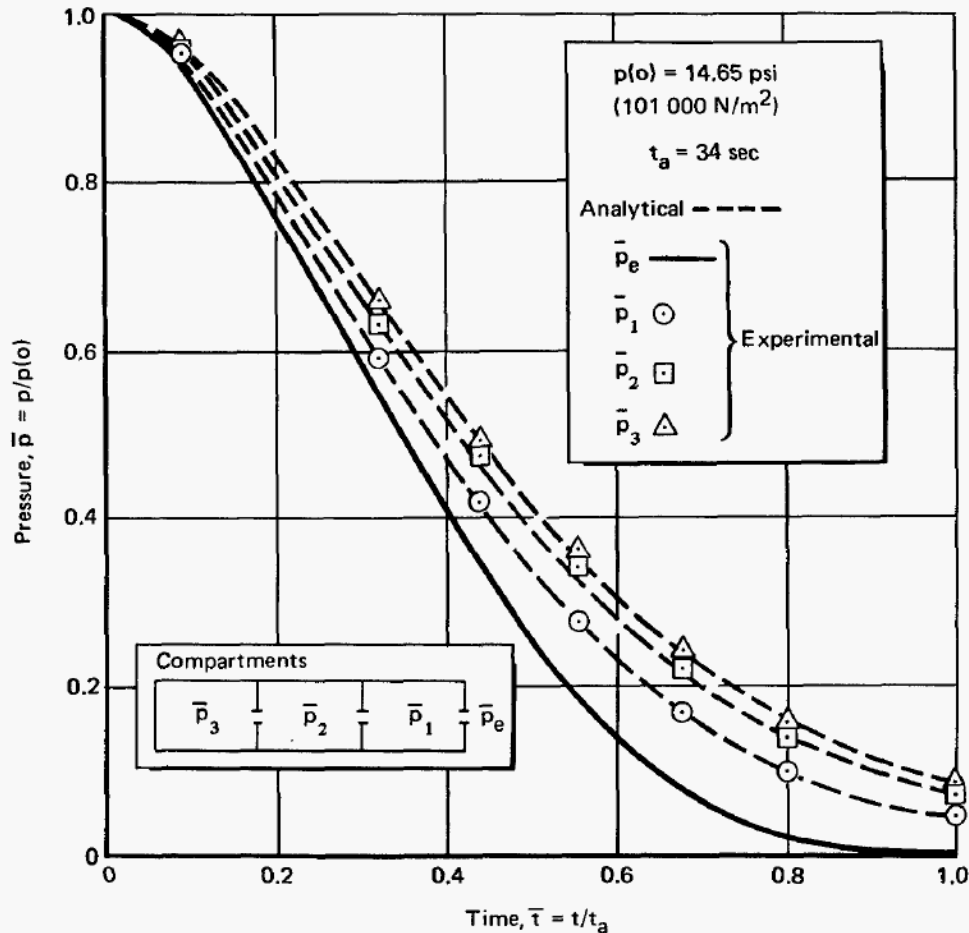


# Ventilazione veicoli spaziali

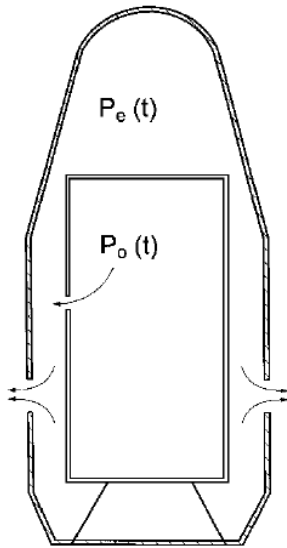


## **COMPARTMENT VENTING**

Bursting or crushing and buckling pressure loads have caused structural failure during space-vehicle flights. A complete launch vehicle failed because an external vent was in the region of a normal shock. Tests were conducted on a small-scale model with orifices spaced close together; however, on the full-scale vehicle, where the pressure data points were spaced farther apart by the scale factor, a vent was inadvertently placed on the wrong side of the normal shock, causing excessive pressure under a heat shield, followed by a destructive failure. At least one other flight failure has been attributed to the improper consideration of differential pressures across a payload-adaptor section.



- La pressione esterna non è costante. Questa varia da punto a punto sulla superficie del mezzo in funzione della quota, della posizione e della velocità.
- Il coefficiente di efflusso  $CD$  da valori pari a 0.9 per  $M < 0.5$  a  $CD = 0.1$  per  $3.5 < M < 4$ .



$$\frac{p_e}{p_i} = e^{-(KT)^2}$$

$p_i$  pressione iniziale

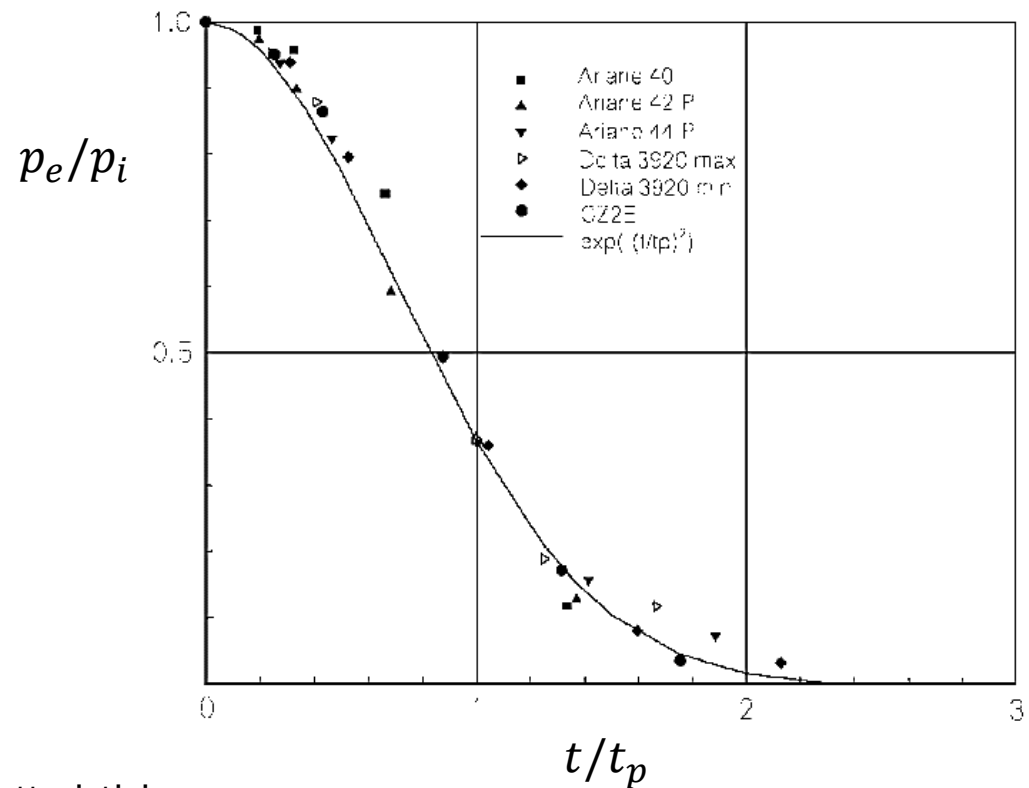
$K = t_c/t_p$  rapporto dei tempi caratteristici

$T = t/t_c$ , tempo adimensionalizzato

$t_c$ , tempo di ventilazione caratteristico. Dipende da area ventilazione e volume d'aria.

$t_p$ , tempo caratteristico relativo alla variazione di pressione all'interno del fairing.

Nota:  $KT = t/t_p$

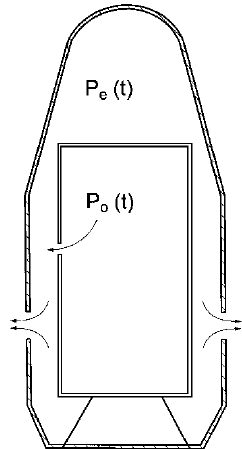


Ariane 40, 75 s	Ariane 42P, 73 s
Ariane 44P, 53 s	Delta 3920, 57 s
Delta 3920, 44 s	CZ2E, 58 s

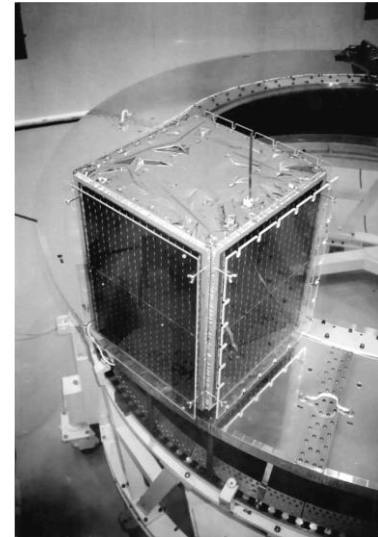
**Tipici valori di  $t_p$**

A. Sanz-Andés et al., 1997  
ESA Launch Vehicle Catalogue

# Esempio 3



$S$	$V$	$a_i$	$\xi$
$24 \times 10^{-5} \text{ m}^2$	$0.13 \text{ m}^3$	$335 \text{ m/s } (\gamma = 1.4)$	1



**UPM-Sat 1 mounted for launch on the ASAP platform of the 75th Ariane 4 flight**

1. Calcolare la variazione di pressione all'interno dell' UPM-Sat1 per  $KT$  compreso tra 0 e 3.
2. Calcolare il  $\Delta p$  agente sulle pareti del satellite.

