

A.A. 2025-2026 ELEMENTI DI TERMOFLUIDODINAMICA PER LE MACCHINE

Lucia Parussini

Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste

Via Valerio 10 - 34127 Trieste - ITALY

E-mail: lparussini@units.it

Onde d'urto normali

onda d'urto

- viaggia a velocità supersoniche
- le variazioni delle proprietà del fluido attraverso un'onda d'urto sono grandi e irreversibili

onda sonora

- viaggia alla velocità del suono
- le variazioni delle proprietà del fluido attraverso un'onda sonora sono infinitesime e isoentropiche

Onde d'urto normali

Equazioni che governano il flusso

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

$$p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2$$

$$h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2}$$

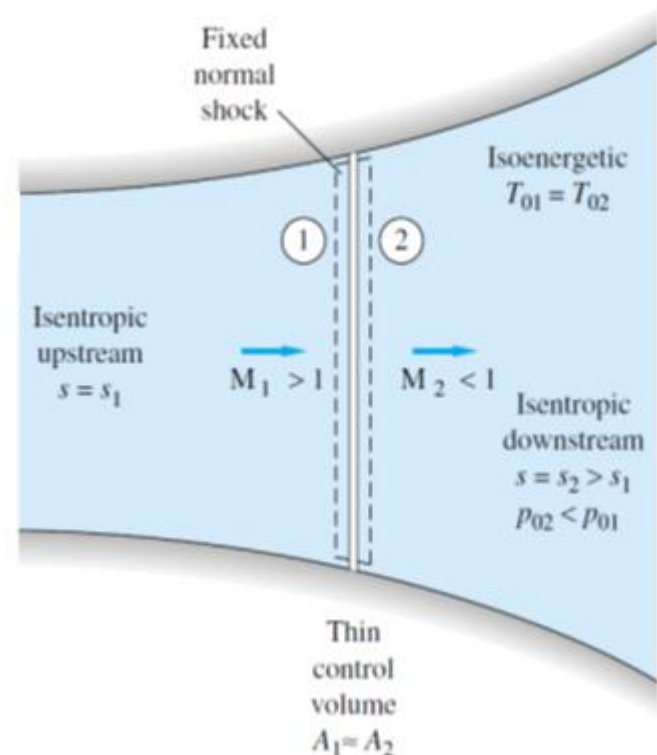
$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

T_0 è costante attraverso un'onda d'urto, poiché la trasformazione è adiabatica.

$$\frac{s_2 - s_1}{R} = \ln \frac{p_{01}}{p_{02}}$$

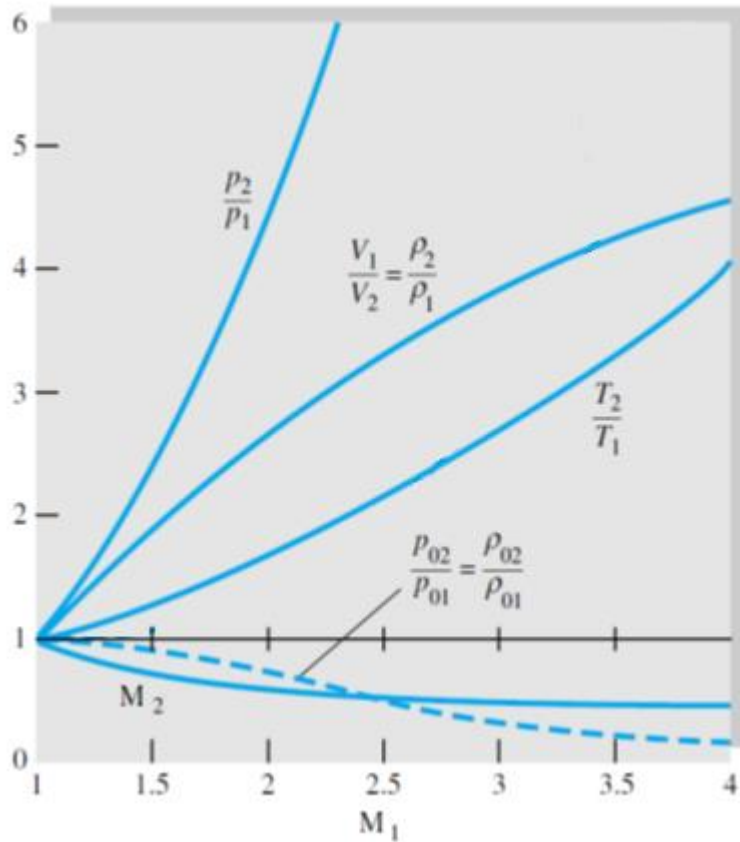
Relazione di Prandtl

$$M_1^* M_2^* = 1$$



Flusso attraverso un'onda d'urto normale.

Onde d'urto normali



Variazione delle proprietà del fluido attraverso un'onda d'urto normale con $\gamma=1.4$.

$$M_2^2 = \frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{(\gamma + 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_1^2}$$

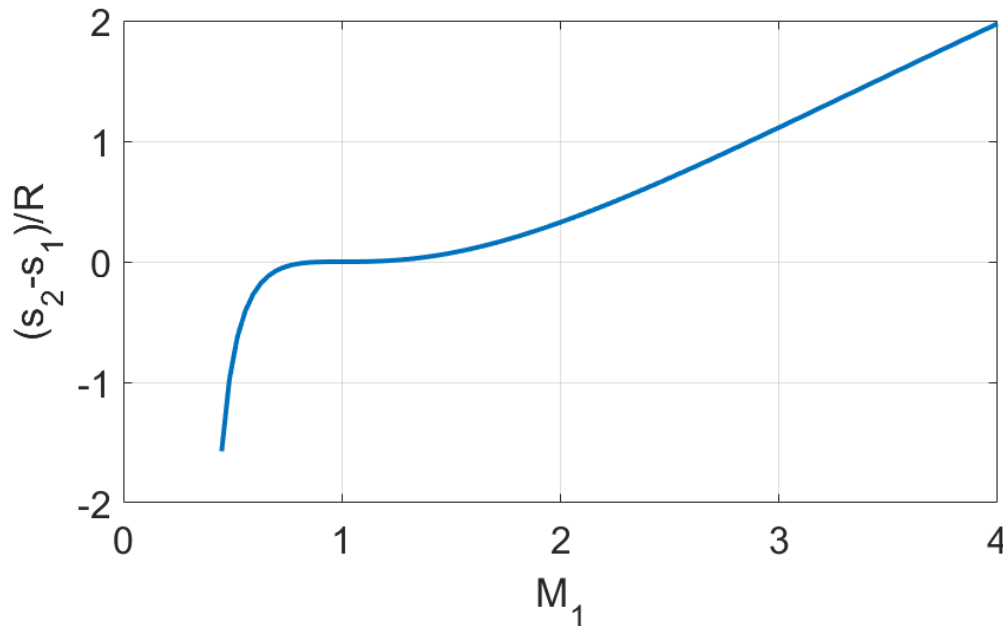
$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1)\right) \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_1^2}{(\gamma + 1)M_1^2}\right)$$

$$\frac{p_{0,2}}{p_{0,1}} = \frac{\left(\frac{(\gamma + 1)M_1^2}{2 + (\gamma - 1)M_1^2}\right)^{\gamma/(\gamma - 1)}}{\left(\frac{2\gamma M_1^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}\right)^{1/(\gamma - 1)}}$$

Onde d'urto normali

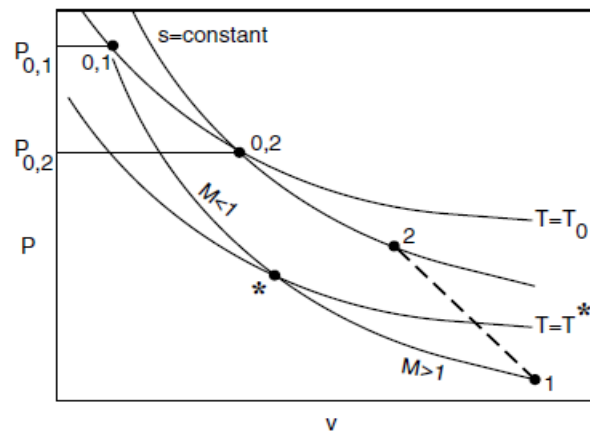
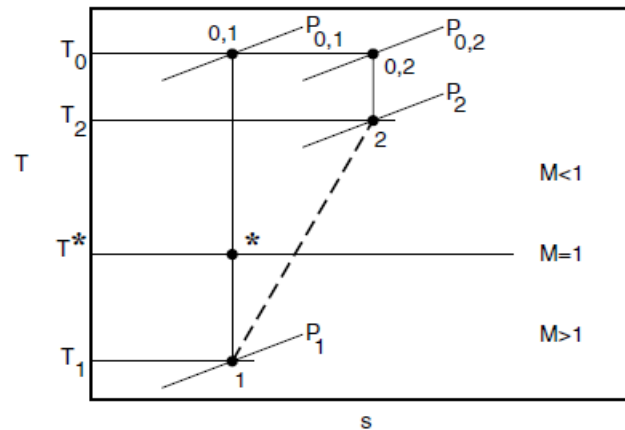
$$\frac{s_2 - s_1}{R} = \frac{1}{\gamma - 1} \ln \left(1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_1^2 - 1) \right) + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \ln \left(1 - \frac{2}{\gamma + 1} \left(1 - \frac{1}{M_1^2} \right) \right)$$



Variazione di entropia
attraverso un'onda d'urto
normale con $\gamma=1.4$.

Onde d'urto normali

Onda d'urto normale sui diagrammi T-s e P-v



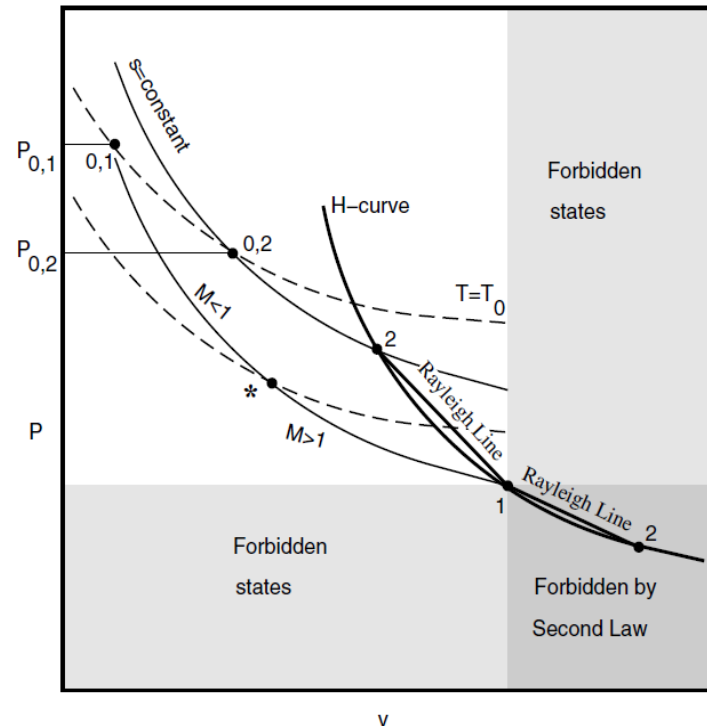
Onde d'urto normali

Relazione di Rankine-Hugoniot

$$e_2 - e_1 = \frac{p_2 + p_1}{2} (v_1 - v_2)$$

Per un gas p.c.p.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{(\gamma + 1)v_1 - (\gamma - 1)v_2}{(\gamma + 1)v_2 - (\gamma - 1)v_1}$$



Curva di Hugoniot e linea di Rayleigh. Per un dato stato iniziale 1, gli stati finali non sono permessi nelle zone ombreggiate.