

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

Esercizio 1

Considera un'onda d'urto normale in un flusso d'aria che a monte dell'onda ha le seguenti proprietà: $u_1 = 680 \text{ m/s}$, $T_1 = 288 \text{ K}$ e $p_1 = 1 \text{ atm}$. Calcolare la velocità, la temperatura e la pressione a valle dell'onda d'urto.

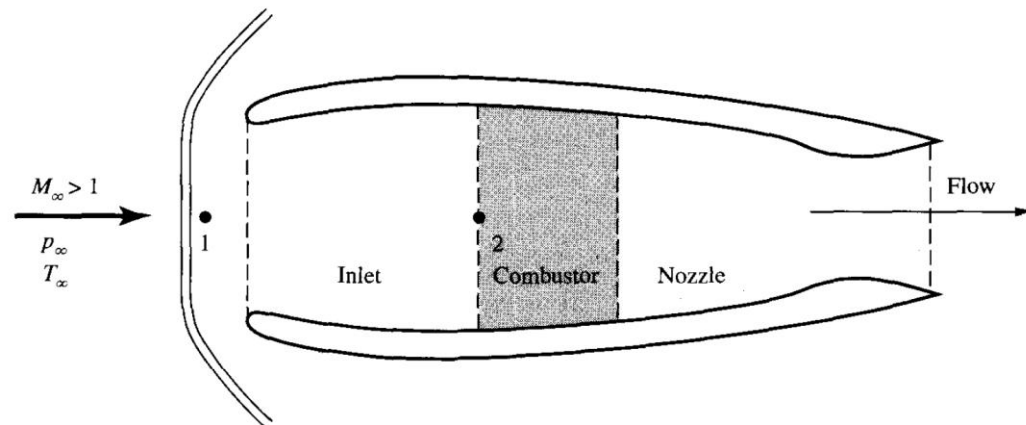
Esercizio 2

Una portata d'aria ($\gamma = 1.4$) fluente in un condotto a $M = 3$ e con pressione e temperatura eguali rispettivamente a $1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ e 288.15 K subisce un'onda d'urto normale. Determinare (ipotizzando un comportamento ideale) la pressione di ristagno e la velocità dell'aria a valle dell'onda d'urto e la variazione di entropia attraverso l'onda d'urto.

Onde d'urto

Un statoreattore (o ramjet) è un motore a getto d'aria, quindi un dispositivo di propulsione, privo di parti rotanti (senza pale del compressore, turbina, ecc.). Gli elementi di base di un ramjet convenzionale sono schematizzati in figura. Il flusso, muovendosi da sinistra a destra, entra nell'ingresso, dove viene compresso e rallentato. L'aria compressa entra quindi nel combustore a una velocità subsonica molto bassa, dove viene miscelata e bruciata con un combustibile. Il gas caldo si espande attraverso un ugello. Il risultato netto è la produzione di una spinta verso sinistra. In figura è mostrato un flusso indisturbato supersonico con un'onda d'urto staccata davanti all'ingresso. La porzione dell'onda d'urto appena a sinistra del punto 1 è un urto normale (NB. Un'onda d'urto normale staccata davanti all'ingresso di un ramjet in un flusso supersonico non è la condizione operativa ideale; è auspicabile che il flusso passi attraverso una o più onde d'urto oblique prima di entrare nell'ingresso).

Dopo aver attraversato l'onda d'urto, il flusso dal punto 1 al punto 2, situato all'ingresso del combustore, è isentropico.



Onde d'urto

Esercizio 3

Il ramjet vola a Mach $M_\infty = 2$ a un'altitudine standard di 10 km, dove la pressione e la temperatura dell'aria sono rispettivamente $2.65 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ e 223.3 K . Calcolare la temperatura e la pressione dell'aria al punto 2 quando il numero di Mach in quel punto è $M_2 = 0.2$.

Esercizio 4

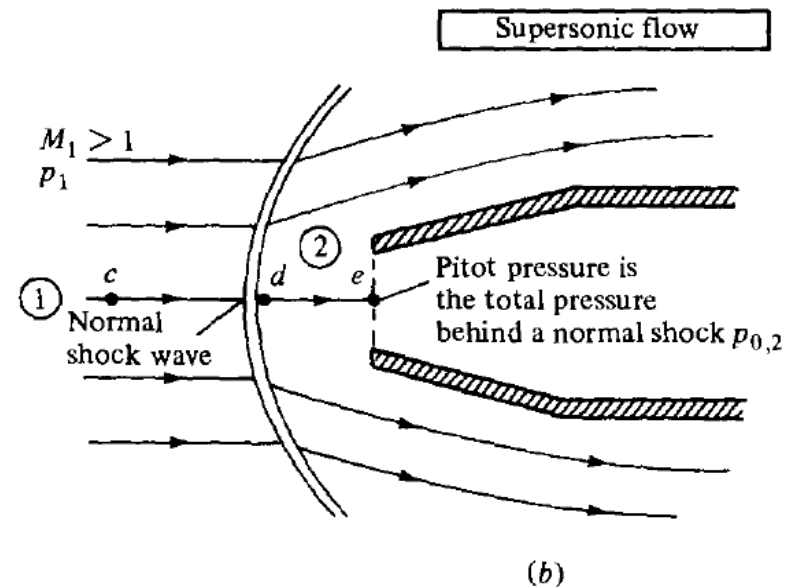
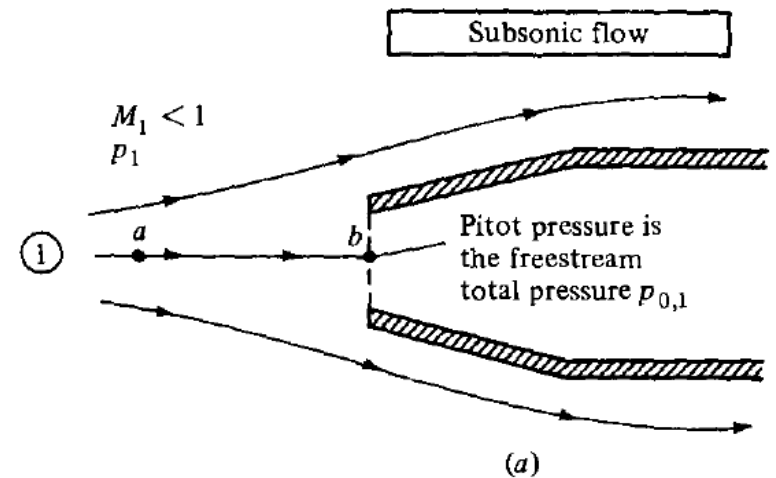
Ripetere l'*Esercizio 3*, ma con un numero di Mach indisturbato $M_\infty = 10$. Si supponga che il ramjet sia stato ridisegnato in modo che il numero di Mach al punto 2 rimanga uguale a 0.2.

Onde d'urto

Esercizio 5

Un tubo di Pitot è inserito in un flusso d'aria in cui la pressione statica è di 1 atm. Calcolare il numero di Mach del flusso quando il tubo di Pitot misura p_0/p :

- A. 1.276
- B. 2.714
- C. 12.06



Un tubo di Pitot (a) in flusso subsonico e (b) in flusso supersonico.

Onde d'urto

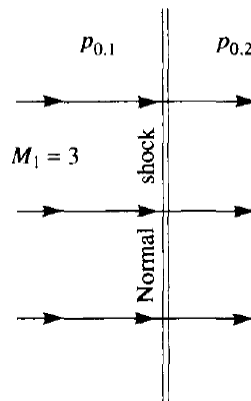
Esercizio 6

Si consideri un'onda d'urto obliqua con un angolo d'onda di 30° . Il numero di Mach del flusso a monte è 2.4. Calcolare l'angolo di deviazione del flusso, i rapporti di pressione e temperatura attraverso l'onda d'urto e il numero di Mach dietro l'onda.

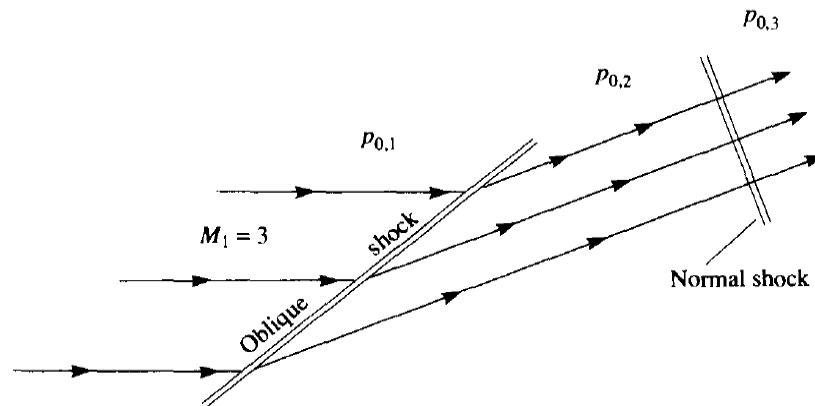
Onde d'urto

Esercizio 7

Si consideri un flusso a Mach 3. Si desidera rallentare questo flusso a una velocità subsonica. Consideriamo due modi diversi per ottenere questo risultato: (1) il flusso viene rallentato passando direttamente attraverso un'onda d'urto normale; (2) il flusso passa prima attraverso un'onda d'urto obliqua con un angolo d'onda di 40° , e poi successivamente attraverso un'onda d'urto normale. Questi due casi sono schematizzati in figura. Calcolare il rapporto tra i valori finali di pressione totale per i due casi, cioè p_{02}/p_{01} per il primo e p_{03}/p_{01} per il secondo. Commentate il significato del risultato.



Case 1

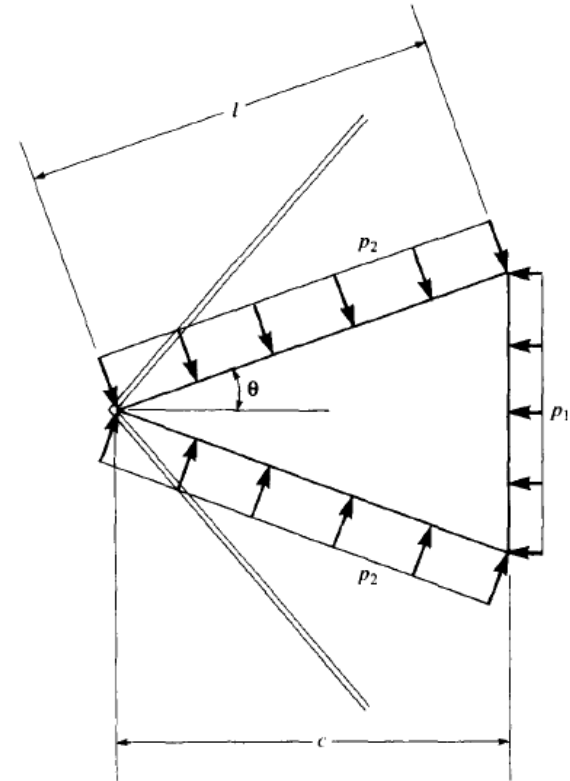


Case 2

Onde d'urto

Esercizio 8

Si consideri un cuneo con un semiangolo di apertura di 15° in un flusso a Mach 5, come schematizzato in figura. Calcolare il coefficiente di resistenza aerodinamica di questo cuneo. Si supponga che la pressione sulla base sia uguale alla pressione statica del flusso libero.

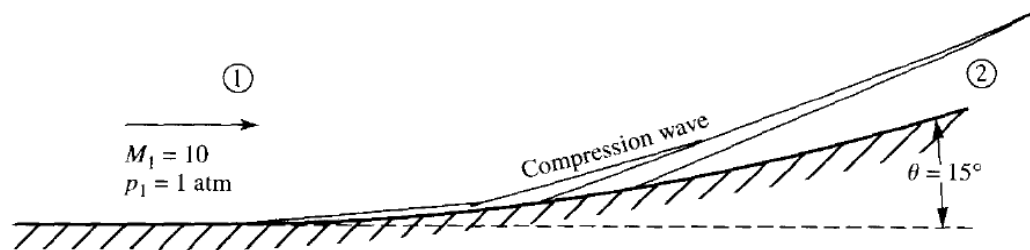


Nota: in questo caso, pur essendo il flusso non viscoso, c'è la resistenza aerodinamica. In un flusso non viscoso supersonico o ipersonico su un corpo bidimensionale, c'è sempre resistenza aerodinamica. Il paradosso di D' Alembert non è valido per i numeri di Mach del flusso indisturbato tali da provocare la comparsa di onde d'urto nel flusso. La ragione fondamentale per la generazione della resistenza aerodinamica è la presenza di onde d'urto. Le onde d'urto sono sempre un meccanismo dissipativo che produce resistenza. Per questo motivo, la resistenza in questo caso è chiamata resistenza d'onda (*wave drag*) e C_D è il coefficiente di resistenza d'onda, più propriamente indicato come $C_{D,W}$.

Onde d'urto

Esercizio 9

Negli SCRAMjet, un'onda di compressione isentropica è uno dei possibili meccanismi di compressione. Consideriamo la superficie di compressione isentropica, rappresentata in figura. Il numero di Mach e la pressione a monte dell'onda sono $M_1 = 10$ e $p_1 = 1 \text{ atm}$, rispettivamente. Il flusso viene ruotato di un angolo totale di 15° . Calcolare il numero di Mach e la pressione nella regione 2 dietro l'onda di compressione.



Onde d'urto

Esercizio 10

Calcolare i coefficienti di portanza e di resistenza aerodinamica per una lastra piana con angolo di attacco di 5° in un flusso a Mach 3.

