



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## FLUID DYNAMICS OF PROPULSION SYSTEMS II

**ANGELO PASINI**

Anno accademico 2023/24  
CdS INGEGNERIA AEROSPAZIALE  
Codice 753II  
CFU 6

| Moduli                                  | Settore/i  | Tipo    | Ore | Docente/i     |
|---|------------|---------|-----|---------------|
| FLUID DYNAMICS OF PROPULSION SYSTEMS II | ING-IND/07 | LEZIONI | 60  | ANGELO PASINI |

### Obiettivi di apprendimento

#### *Conoscenze*

Coprire i principali argomenti più avanzati delle discipline termofluidodinamiche necessari per comprendere il funzionamento dei sistemi di propulsione chimici a razzo oggetto del successivo corso di Rocket Propulsion e affrontare i problemi principali della loro concezione, analisi, progettazione, integrazione e uso.

#### *Modalità di verifica delle conoscenze*

Esame dello studente consistente nella illustrazione, discussione ed applicazione degli argomenti trattati nelle lezioni. L'esame ha lo scopo di verificare il grado di comprensione degli argomenti del corso e la capacità di utilizzarlo per sviluppare soluzioni originali.

#### *Capacità*

Alla fine del corso lo studente dovrà essere in grado di:

- Formulare, discutere e risolvere problemi tecnici ed ingegneristici inerenti la termofluidodinamica dei propulsori aerospaziali a propellenti chimici applicando le conoscenze ed i metodi illustrati nel corso.
- Ideare e risolvere modelli originali per l'analisi e lo studio di problemi ingegneristici inerenti il programma del corso utilizzando in modo originale e creativo gli approcci illustrati nelle lezioni.

#### *Modalità di verifica delle capacità*

Esame dello studente, consistente nella soluzione (scritta o sulla lavagna) di uno o più problemi relativi al programma del corso. L'uso del materiale distribuito dal docente durante il corso è consentito, salvo diversa indicazione al momento dell'assegnazione del problema.

#### *Comportamenti*

Lo studente deve dimostrare di saper lavorare in collaborazione e di comportarsi lealmente e rispettosamente nei confronti del docente, del personale universitario, dei suoi colleghi ed in generale dell'Università nel suo complesso.

#### *Modalità di verifica dei comportamenti*

Interazione diretta con lo studente durante le lezioni, le esercitazioni e gli esami.

#### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

Tutti i contenuti di:

- i corsi della laurea triennale in ingegneria aerospaziale ed in particolare quelli dei corsi di Termodinamica Applicata, Fisica II, Elettronica, Fluidodinamica e Motori per Aeromobili;
- del corso di Fluids Dynamics of Propulsion Systems I del primo anno della laurea magistrale in ingegneria aerospaziale.

Più in generale i fondamenti di:

*Scienze Termofluidodinamiche:*

- termodinamica applicata, trasferimento di calore (conduzione, convezione, radiazione)
- meccanica dei fluidi, aerodinamica, dinamica dei gas

*Fisica e Meccanica:*

- meccanica, acustica, termodinamica, elettromagnetismo, ottica



## UNIVERSITÀ DI PISA

- meccanica analitica (cinematica, statica, dinamica)
- meccanica della struttura e dinamica

### Matematica applicata:

- analisi di calcolo, serie, ODE, PDE, geometria, vettoriale e tensoriale
- calcolo complesso, ODE, funzioni speciali, EVP e BVP
- analisi numerica, equazioni multiple non lineari, integrazione, ODE, PDE
- programmazione per computer, BASIC, FORTRAN, C, MathLab, MathCad, ecc.

### Tecnologie di produzione

#### Propulsione aeronautica:

- cicli, motori, turbomacchine, parametri di funzionamento, requisiti, applicazioni

### Indicazioni metodologiche

- Le lezioni frontali vengono svolte con l'ausilio di trasparenze.
- Il materiale didattico utilizzato a lezione è messo a disposizione degli studenti tramite il sito elearning.
- Il sito elearning è utilizzato per le comunicazioni agli studenti e la gestione degli esami.
- Il ricevimento settimanale è accessibile agli studenti senza prenotazione.
- Gli esercizi del corso sono analoghi a quelli proposti all'esame, sono corredati dalla soluzione per consentirne la verifica, e consistono dello svolgimento indipendente di problemi applicativi degli argomenti trattati.

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

**Funzioni speciali.** Equazioni Differenziali Ordinarie (EDO) quasi-lineari di primo e secondo ordine e loro soluzione, integrali impropri. Le funzioni Gamma, Bessel e Legendre. Problemi ai Valori al Contorno (PVC) omogenei di Sturm-Liouville del 2° ordine: autovettori, autofunzioni e ortogonalità. PVC di Sturm-Liouville non omogenei.

**Acustica.** Equazione delle onde. Intensità e potenza acustiche. Onde armoniche planari e sferiche. Monopoli, dipoli e quadrupoli. Generazione/attenuazione acustica da sorgenti, forze e rilascio di calore distribuiti. Interazioni onda-superficie. Onde stazionarie. Guide d'onda. Dissipatori acustici.

**Idrodinamica.** Flussi idrodinamici quasi-1D in condotti: velocità del suono, flussi costanti, oscillazioni acustiche, colpi d'ariete.

**Trasferimento di calore.** Conduzione: equazione del calore, reti termiche stazionarie, problemi stazionari 1D e quasi-1D; conduzione 1D non stazionaria, ablazione. Convezione: meccanismi, traspirazione e raffreddamento ad iniezione da fessure e fori. Radiazione: generalità, radiazione termica, proprietà radianti dei materiali, reti radiative in cavità con/senza mezzo di trasmissione, radiazione di fiamme.

**Flussi viscosi laminari.** Flussi sviluppati in tubi, flussi di taglio, flussi intorno a cilindri e sfere. Flussi incomprimibili quasi paralleli: strati limite cinematici e termici, parametri ed equazioni integrali, strati limite planari e assialsimmetrici; getti; scie e flussi di taglio. Flussi comprimibili quasi paralleli: strati limite planari e assialsimmetrici, flussi di ristagno, teoria newtoniana dei flussi ad alta velocità.

**Stabilità fluidodinamica e transizione turbolenta.** Effetti dinamici non lineari, stabilità lineare di flussi paralleli, equazioni di Reynolds e Orr-Sommerfeld. Transizione turbolenta: sviluppo, dipendenza parametrica e previsione.

**Flussi turbolenti.** Descrizione del flusso turbolento incomprimibile, equazioni e analisi; energia cinetica turbolenta. Strati limite planari e assialsimmetrici. Flussi in condotti; getti e scie liberi. Modelli di turbolenza. Strati limite comprimibili.

**Elementi di combustione e flussi chimicamente reagenti.** Trasferimento di massa. Equazioni di conservazione per flussi chimicamente reagenti. Fiamme laminari, premiscelate e diffusive. Evaporazione e combustione di gocce. Fiamme turbolente.

**Flussi bifase e cavitazione.** Conservazione e equazioni costitutive. Flussi con polveri e con nebbia. Cambiamenti di fase, ebollizione e cavitazione, nucleazione e dinamica delle bolle. Forme di cavitazione e parametri di similitudine. Flusso liquido/gas, liquido/gas/vapore e liquido/vapore. Effetti termici. Simulazione di flussi cavitanti.

### Bibliografia e materiale didattico

#### Riferimenti

Dispense del docente.

I riferimenti bibliografici consigliati per l'approfondimento dei principali argomenti trattati nel corso sono:

Anderson J. D. Jr., 1990, "Modern Compressible Flow with Historical Perspective", McGraw-Hill (dinamica del gas 1D, onde lineari e non lineari).

Brennen C. E., 1995, "Cavitation and Bubble Dynamics", Oxford University Press (flussi bifase, idrodinamica 1D, cavitazione).

Callen H.B., 1985, "Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics", John Wiley & Sons (termodinamica avanzata)

Currie I. G., 1993, "Fundamental Mechanics of Fluids", McGraw-Hill (equazioni fluidodinamiche, flussi ideali)

Eckert & Drake, 1972, "Analysis of Heat and Mass Transfer", McGraw Hill Inc. (conduzione del calore, convezione e irraggiamento).

Turns, S.R., 1996, "An Introduction to Combustion", McGraw Hill (termochimica, cinetica chimica, flussi che reagiscono chimicamente ed elementi di combustione)

Vincenti W.G. & Kruger C.H., 1986, "Physical Gas Dynamics", Krieger Publ. Co., Malabar, FL, USA (cinetica dei gas).

White F.E., 1974, "Viscous Fluid Flow", McGraw Hill (flussi viscosi laminari, stabilità fluidodinamica e transizione turbolenta, flussi turbolenti).

### Indicazioni per non frequentanti

Si consiglia di integrare lo studio con lo svolgimento degli esercizi proposti, reperibili su e-learn.

I contenuti del corso sono ogni anno in parte rielaborati. Si consiglia di tenersi aggiornati sulle ultime versioni dei documenti a supporto delle lezioni tramite e-learn e consultando il docente.



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

### Modalità d'esame

Esame dello studente consistente in:

- Illustrazione e discussione degli argomenti trattati nel corso.
- La soluzione (scritta o sulla lavagna) di uno o più problemi relativi al programma del corso.

L'uso del materiale distribuito dal docente durante il corso è consentito, salvo diversa indicazione al momento dell'assegnazione del problema. L'esame ha lo scopo di verificare il grado di comprensione degli argomenti del corso e la capacità di utilizzarlo per sviluppare soluzioni originali.

*Ultimo aggiornamento 05/11/2023 19:53*