

# TERMOFLUIDODINAMICA APPLICATA

Docente: Paolo Di Marco

## FINALITÀ DEL CORSO

Il corso fornisce allo studente le conoscenze di base e le metodologie pratiche per lo studio termofluidodinamico degli impianti termici di potenza e di processo. Vengono illustrati il trasferimento di massa, energia e quantità di moto nei fluidi termovettori monofase. In particolare, vengono illustrati i principali metodi di analisi del moto dei fluidi e i più noti modelli dello scambio termico per convezione, utilizzando i principali concetti della meccanica dei continui.

## OBIETTIVI DEL CORSO

Al termine del corso l'allievo deve conoscere i principali fenomeni che sono alla base del trasporto di calore e del moto dei fluidi monofase e bifase negli impianti termici e nei processi di conversione energetica per essere in grado di:

- impostare correttamente i bilanci di massa, energia e quantità di moto applicati a corpi fluidi in movimento per eseguire calcoli di cadute di pressione, sforzi dovuti al moto di fluidi, trasmissione convettiva del calore.
- usare correttamente le tecniche di calcolo e le correlazioni fenomenologiche nella verifica e nel progetto di componenti e sistemi adibiti al trasporto di massa ed energia con fluidi monofase.

## METODOLOGIA

Il corso è composto di lezioni, in cui vengono esposti gli argomenti teorici; ad ogni nuovo concetto introdotto segue immediatamente un'applicazione dello stesso nelle esercitazioni, in cui vengono affrontati e risolti numericamente problemi di interesse pratico. Le esercitazioni sono pertanto strettamente integrate con le lezioni ed indistinguibili da esse. Il docente colloquia continuamente con gli studenti nei ricevimenti durante e dopo la fine del corso, ed anche tramite posta elettronica. Il materiale didattico ed informatico non soggetto a copyright viene reso disponibile su Internet nel sito del docente, assieme ad alcune dispense redatte dal docente stesso su temi particolari. Per quanto possibile, vengono eseguite applicazioni numeriche nelle aule informatiche del centro di calcolo della Facoltà.

## PRE-REQUISITI

*Dai corsi di Matematica:*

Derivate totali e parziali; operatori differenziali; integrali; equazioni differenziali.

*Dai corsi di Fisica*

Unità di misura e sistemi di misura. Concetti di forza, lavoro, energia, potenza; conservazione dell'energia meccanica.

*Dal corso di Fisica Tecnica*

Principali variabili di stato termodinamiche; principi della termodinamica; bilanci energetici aparametri concentrati per sistemi aperti e chiusi; nozioni di trasmissione del calore.

## COMPETENZE MINIME RICHIESTE PER IL SUPERAMENTO DELL'ESAME

Conoscenza critica e non mnemonica delle varie forme delle equazioni di bilancio di massa, energia e quantità di moto applicate al moto dei fluidi monofase.

Calcolo delle perdite di carico localizzate e distribuite nei condotti.

Determinazione degli sforzi sugli organi di contenimento causati dal moto dei fluidi.

Valutazione dello scambio termico convettivo. Calcolo dei coefficienti convettivi e delle superfici di scambio.

## MODALITÀ DI VERIFICA

L'esame consiste in una prova orale incentrata prevalentemente sulla risoluzione di problemi di progetto o di verifica nell'ambito delle competenze sopra indicate.

La valutazione dell'esame tiene conto:

- della familiarità acquisita sia con le nozioni impartite nel corso sia con le conoscenze pregresse che formano la base della cultura tecnica;
- della capacità di risolvere autonomamente i problemi utilizzando le nozioni apprese;
- della capacità di giustificare criticamente le scelte operate in tale ambito;
- ed infine della capacità di esprimersi in un linguaggio tecnico chiaro ed appropriato.

## CONTENUTI E ARTICOLAZIONE TEMPORALE

*0 – Introduzione e richiami (L 7 E 3 T 10)*

Richiami sui principali strumenti matematici utilizzati nel corso: operatori differenziali, teoremi di Gauss, Stokes. Sistemi di riferimento, derivate sostanziali e totali. I mezzi continui: richiami sulle principali proprietà termofisiche dei fluidi.

*1 - Fluidi monofase. (L 7 E 7 T 14)*

Equazioni di conservazione di massa, quantità di moto ed energia. Cenni alla statica dei fluidi. Equazioni di Navier-Stokes e di Eulero. Moto di fluidi ideali; moto irrotazionale; equazione di Bernoulli per fluidi ideali e reali. I principali moti potenziali. Similitudine ed analisi dimensionale: gruppi adimensionali. Cenni ai fenomeni di turbolenza e alla loro trattazione.

*2 – Moti esterni viscosi. (L 5 E 5 T 10)*

Moto esterno di fluidi viscosi: equazioni dello strato limite in condizioni laminari e turbolente. Flusso attorno ai corpi immersi: fenomeni di resistenza e portanza, distacco dello strato limite e scie. Coefficiente di scambio termico convettivo nei moti esterni. Analogie tra trasporto di quantità di moto e di calore.

*3 – Moti interni viscosi. (L 5 E 3 T 8)*

Moto di fluidi viscosi in condotti: profilo di velocità e fattore d'attrito nel moto laminare e turbolento; cadute di pressione continue e localizzate. Scambio termico nel moto laminare e turbolento in condotti: modelli teorici e semiempirici.

## TESTI DI RIFERIMENTO

- Dispense redatte dal docente su alcuni temi particolari (disponibili in rete).
- B.R. Munson, D.F. Young e T.H. Okishishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4<sup>th</sup> ed., Wiley, 2002, ISBN 0-471-44250-X, capp. 1-9. Coll. Bib. Centrale Ingegneria: [620.106 MUN]
- A. Bejan, *Heat Transfer*, Wiley, 1993, ISBN 0-471-59952-2, capp. 5-6-7. Coll. Bib. Centrale Ingegneria: [621.402 2 BEJ HEA]
- N.E. Todreas, M.S. Kazimi, *Nuclear Systems I – Thermalhydraulic Fundamentals*, Taylor & Francis, 1989, ISBN 1-56032-051-6, capp. 4, 5, 11, 12. Coll. Bib. Centrale Ingegneria: [621.483 TOD I]

GUIDA ALLO STUDIO (versione 05 - definitiva)

ARGOMENTO.	Testo di riferimento	Altri testi(*) - note
<p><b>Richiami di matematica</b> Calcolo vettoriale e tensoriale. Operatori differenziali. Teoremi della divergenza e di Stokes. Il sistema continuo ed il suo moto. Punto di vista euleriano e lagrangiano. Derivate temporali: derivata locale e materiale. Regola di Leibnitz, teorema del trasporto.</p>	Dispense cap. 1	Mattei, parte VII
<p><b>Cinematica dei continui</b> Velocità ed espressioni lagrangiana ed euleriane dell'accelerazione. Accelerazione convettiva. Spostamenti elementari di una particella: significato fisico di <math>\text{div } v</math> e <math>\text{rot } v</math>. Tensore di velocità di deformazione. Linee di flusso, di corrente, di fumo. Vorticità e tubi di vorticità.</p>	Dispense cap. 1	Mattei, parte VII
<p><b>Forze nei continui</b> Tensore degli sforzi. Equazioni di equilibrio di Cauchy. Relazioni di chiusura: equazioni di stato ed equazioni costitutive.</p>	Dispense cap. 1	Mattei, parte VII
<p><b>Proprietà dei fluidi</b> Definizione di fluido e sue proprietà termodinamiche. Coefficienti termodinamici <math>\alpha</math>, <math>\beta</math>, <math>\kappa</math>. Proprietà di trasporto dei fluidi: conducibilità termica, postulato ed equazione di Fourier; diffusività termica. Viscosità: significato fisico; viscosità cinematica, numero di Prandtl; fluidi newtoniani e non newtoniani. Legame tra tensore degli sforzi e tensore velocità di deformazione per fluido newtoniano. Relazioni per il calcolo della viscosità.</p>	Dispense cap. 2	Todreas, p.414  Whitaker, p.134
<p><b>Equazioni di bilancio</b> Bilancio di massa, quantità di moto, momento, energia ed entropia in forma generale. Altre forme delle equazioni integrali di bilancio (massa di controllo, sistema stazionario). Bilancio integrale dell'energia. Passaggio dal bilancio integrale a quello differenziale. Forme dell'equazione di bilancio dell'energia: energia totale, energia interna, energia cinetica, entalpia. Forze di massa conservative ed energia potenziale. Flusso di energia, quantità di moto e massa attraverso un'apertura: confronto tra velocità medie. Espressione generale del teorema di Bernoulli e applicazione a fluidi incompruibili ed a moto isoentropico comprimibile.</p>	Todreas cap. 4 Dispense cap. 3 (°)	Munson cap.5 (esempi)   Whitaker, p. 242 Batchelor, p. 156
<p><b>Moto turbolento</b> Turbolenza: metodo delle medie di Reynolds, diffusività turbolenta. Moto turbolento: medie dei termini fluttuanti, diffusività turbolente di quantità di moto ed energia. Viscosità turbolenta.</p>	Dispense cap.3 (°)	Todreas, p.112
<p><b>Similitudine ed analisi dimensionale</b> Teorema di Buckingham, scelta dei gruppi adimensionali. Adimensionalizzazione delle equazioni di N-S.</p>	Dispense cap.5 (°) Munson cap. 7	
<p><b>Moto incompruibili non viscoso</b> Funzione di corrente, linee di corrente. Moto irrotazionale: cenno all'equazione di vorticità. Moti potenziali. Moti potenziali piani: casi fondamentali. Applicazione al caso di cilindro fermo e rotante: calcolo delle forze di lift e di drag, paradosso di D'Alembert. Moto potenziale attorno ad una sfera.</p>	Dispense cap.4 Munson cap. 6	Batchelor, p. 265
<p><b>Moto viscoso esterno</b> Moto laminare esterno: soluzione di Stokes per la sfera. Concetto di strato limite. Strato limite laminare su piastra piana. Equazioni dello strato limite, soluzione di Blasius, determinazione del taglio alla parete. Strato limite turbolento su piastra piana, bilancio di quantità di moto, calcolo del coefficiente di attrito locale e globale. Resistenza e portanza: coefficienti di resistenza e di portanza. Coefficiente di resistenza totale e suo andamento con il numero di Reynolds. Distacco dello strato limite. Portanza, cenni al teorema di Kutta-Joukowski.</p>	Dispense cap.6 (°) Munson cap. 9 Bejan cap. 5	Olson, p.609 Schlichting, p.128  Olson, p.260  Olson, p.430

<b>Convezione forzata esterna</b> Classificazione, legge di Newton, significato del coefficiente di convezione. Equazione di bilancio termico in termini di temperatura e sua espressione nello strato limite. Moto laminare strato limite termico, relazioni per il numero di Nusselt locale e medio. Effetto della turbolenza sulla convezione, diffusività termica e numero di Prandtl turbolenti. Convezione su piastra piana: analogie di Reynolds e di Reynolds-Colburn.	Dispense cap.6 (*) Bejan cap. 5	
<b>Moto nei condotti</b> Moto viscoso stazionario incomprimibile: flusso in condotto circolare. Applicazione dei bilanci integrali al moto nel condotto: andamento del taglio alla parete e sua espressione in caso di moto laminare (Poiseuille). Profilo universale di velocità turbolento, sottostrato laminare. Profilo turbolento di Blasius. Determinazione del taglio alla parete in regime turbolento. Equazioni di Blasius e Prandtl. Condotti scabri: relazioni di Colebrook e Haaland.	Munson cap. 8 Bejan cap. 6	Olson, p.167 Whitaker, p.200, Schlichting, p.600 Olson, p.318
<b>Convezione forzata nei condotti</b> Lunghezze di sviluppo dinamica e termica. Equazioni integrali e differenziali di bilancio nel moto sviluppato. Correlazioni di scambio termico per moto laminare e turbolento nei condotti.	Bejan cap. 6	

(\*) Gli "altri testi" danno elementi per ampliare la conoscenza dei temi particolari accanto a cui sono riportati.

(\*) I capitoli 3,5,6 delle dispense sono attualmente in preparazione.

### TESTI CITATI

Disponibili in biblioteca centrale [COLLOCAZIONE TRA PARENTESI] e presso il docente

- G.K. Batchelor, *Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 1967 [532.05 BAT INT].
- A. Bejan, *Heat Transfer*, Wiley, 1993 [621.402 2 BEJ HEA].
- R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, Wiley, 1960 [532.5 BIR TRA].
- G. Mattei, *Lezioni di Meccanica Razionale*, Mencarini, Pisa, 1977, Parte VII, Meccanica dei Continui [531 MAT r].
- B.R. Munson, D.F. Young e T.H. Okishishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4<sup>th</sup> ed., Wiley, 2002, ISBN 0-471-44250-X [620.106 MUN].
- R.M. Olson, S.J. Wright, *Essentials of Engineering Fluid Mechanics*, Harper & Row, NY, 1990 [620.106 OLS].
- H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, Mc Graw-Hill, 1955 [532.051 SCH r]
- N.E. Todreas, M.S. Kazimi, *Nuclear Systems I – Thermalhydraulic Fundamentals*, Taylor & Francis, 1989, ISBN 1-56032-051-6 [621.483 TOD I].
- S. Whitaker, *Introduction to Fluid Mechanics*, Krieger, 1992 [532.05 WHI r].

### TESTI ADDIZIONALI (se non ne avete abbastanza ...)

- R.L. Panton, *Incompressible flow*, 3<sup>rd</sup> ed., Wiley, NY, 2003.
- D.J. Tritton, *Physical Fluid Dynamics*, Oxford, 1988 [532.05 TRI 88]
- V.L. Streeter, E.B. Wylie, *Fluid Mechanics*, 8<sup>th</sup> ed., McGraw Hill, 1958, [602.106.STR].
- F.M. White, *Fluid Mechanics*, 3<sup>rd</sup> ed., McGraw Hill, 1994, [602.106.WHI].
- A. Bejan, *Convection Heat Transfer*, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, 1995, [621.402.2.BEJ].

## INFORMAZIONI UTILI SUL DOCENTE

**DOCENTE:** Paolo Di Marco

**Orario di ricevimento:** Venerdì ore 9-13. (da modificarsi sulla base dell'orario definitivo per evitare interferenze con le lezioni). Disponibile comunque anche negli altri giorni. E' possibile richiedere appuntamenti telefonici o (nei limiti del possibile) ricevere chiarimenti per telefono od e-mail.

**Luogo di ricevimento:** Dipartimento di Energetica - Settore Fisica Tecnica - Edificio del triennio (polo A) - (entrata principale, piano terreno, sulla destra).

**RECAPITI**      **Telefono:** 050 2217107 (uff.), 050 25259 (abitaz.),  
**E-mail:** p.dimarco@ing.unipi.it

**FAX:** 050 2217150

**WWW:** <http://docenti.ing.unipi.it/~d6600/>

La pagina web (accessibile anche dalla homepage della Facoltà di Ingegneria) contiene comunicazioni e materiale didattico che è possibile scaricare.

Altro materiale preliminare (appunti, versioni preliminari dei capitoli etc.) è disponibili presso il docente.