

# Questionario di Autovalutazione per la Preparazione all'Esame di “*Termodinamica e Termoidraulica*”

*2° anno di Ingegneria della Sicurezza Industriale e Nucleare*

## Modulo di Termoidraulica

### *Premessa*

Il presente questionario ha lo scopo di fornire allo studente uno strumento per verificare la propria preparazione in vista dell'esame di Termodinamica e Termoidraulica, per quanto concerne le tematiche relative al modulo di Termoidraulica.

Esso contiene domande tipiche relative agli argomenti trattati nel Corso che, pur non esaurendo la tipologia dei quesiti che possono essere posti in sede d'esame<sup>1</sup>, permettono di costituirsi un'idea rappresentativa delle conoscenze considerate necessarie per sostenere con successo la prova.

In particolare, si assume che lo studente, dopo aver debitamente studiato la letteratura indicata nell'elenco delle letture consigliate, ai vari livelli di approfondimento, e aver preso visione di copia dei trasparenti utilizzati dal docente nelle lezioni, si ponga i quesiti contenuti nel questionario per verificare se riesce agevolmente a dare loro una risposta presumibilmente corretta. Allo scopo di assicurare coerenza con le lezioni svolte, i quesiti sono suddivisi secondo la stessa ripartizione tematica usata nei trasparenti.

Il questionario propone sia “*domande per l'autovalutazione*” che elenchi di “*abilità minime da conseguire*”. Queste ultime sono relative alle capacità di applicazione pratica dei concetti teorici interiorizzati e possono essere acquisite, ad esempio, svolgendo esercizi tratti dai testi consigliati, sulla scorta di quelli svolti a lezione e delle attività consigliate in relazione agli stessi.

Per evitare che il questionario si configuri come una sorta di sunto minimale del Corso, esso non include le risposte ai quesiti proposti, che devono invece essere ricercate dallo studente stesso nel materiale consigliato, eventualmente con l'aiuto del docente durante il ricevimento. E' infatti appena necessario sottolineare che nulla può sostituire in efficacia lo studio personale delle fonti originali consigliate per la preparazione all'esame.

Il Docente

*Walter Ambrosini*

Pisa, 8 Luglio 2003

---

<sup>1</sup> Il questionario vuole essere un ulteriore sussidio, da aggiornare sulla base dell'esperienza didattica, non un manuale di precettistica. Il materiale a disposizione dello studente contiene molto di più di quanto strettamente necessario per rispondere alle domande incluse nel questionario.

# **1. Generalità sui Fluidi ed il loro Comportamento Dinamico**

## Domande per l'autovalutazione

- Spiegare cosa si intende per “fluido” secondo le definizioni comunemente accettate in Fluidodinamica e fornire esempi significativi di sostanze che, sotto opportune condizioni, possono essere considerate tali.
- Descrivere brevemente concordanze e differenze tra le relazioni matematiche adottate in Fisica Generale e quelle utilizzate per i fluidi.
- Spiegare cosa si intende per “ipotesi del continuo”.
- Definire in modo intuitivo i punti di vista euleriano e lagrangiano per la descrizione del comportamento dei fluidi. Completare la descrizione facendo uso dei concetti di derivata temporale euleriana e lagrangiana. (v. le lezioni sui Modelli Matematici).
- Definire il numero di Knudsen e spiegarne il significato.
- Definire le variabili principali necessarie per la descrizione dello stato termodinamico e fluidodinamico di un sistema.
- Facendo uso della regola di Gibbs, specificare il numero di variabili necessarie a definire univocamente lo stato termodinamico di un fluido monofase o bifase, monocomponente o multicomponente. Proporre esempi significativi di applicazione di questa regola a casi di interesse generale.
- Spiegare cosa si intende per “relazione (o equazione o legge) di stato” per un fluido. Fornire esempi di relazioni di stato comunemente accettate come modelli più o meno realistici del comportamento di fluidi.
- Spiegare in quali casi l'ipotesi di fluido di Boussinesq possa considerarsi applicabile.
- Definire il coefficiente di dilatazione (o espansione) termica isobaro. Dire quanto vale per un gas perfetto.
- Definire il concetto di “pressione”, spiegandone il significato fisico ed elencando le unità di misura più frequentemente adottate per esprimerne quantitativamente il valore. Saper definire il valore che questa variabile assume in unità SI in condizioni atmosferiche e in applicazioni industriali tipiche.
- Definire i concetti di fluido newtoniano e non-newtoniano.
- Definire il concetto di viscosità dinamica in un fluido newtoniano e le relative unità di misura. Definire quantitativamente il valore della viscosità dinamica dei fluidi più comuni (ad es. aria e acqua) in condizioni di riferimento.
- Definire la viscosità cinematica e le relative unità di misura. Dire con quale variabile di natura “termica” essa può essere significativamente confrontata e per quali motivi.
- Descrivere il comportamento della viscosità dinamica al variare della temperatura nei liquidi e nei gas e proporre una semplice spiegazione fisica.
- Classificare i fluidi non-newtoniani in base al loro comportamento sotto l'azione di sforzi di taglio.

- Spiegare su basi fisiche l'origine della tensione superficiale nei liquidi e i suoi principali effetti macroscopici (pressione all'interno di superfici curve, bagnabilità, menischi, fenomeni di capillarità).
- Descrivere fenomenologicamente il moto laminare ed il moto turbolento.
- Descrivere i motivi per cui il numero di Reynolds rappresenta il parametro critico nel determinare la stabilità del moto laminare e l'insorgere della turbolenza.
- Definire la compressibilità isoterma di un fluido. Dire quanto vale per un gas perfetto.
- Discutere brevemente le condizioni che devono essere soddisfatte per poter ragionevolmente considerare incompressibile un fluido.
- Definire il numero di Mach e discutere il valore della velocità del suono in liquidi e gas.
- Classificare il moto di un fluido in base al suo comportamento stazionario o transitorio e alla geometria delle superfici sulle quali o all'interno delle quali scorre (moto esterni ed interni e relative fenomenologie).

Abilità minime da conseguire

- Prendere confidenza con l'uso delle tabelle riportate nei libri di testo per la valutazione delle proprietà termodinamiche e fisiche dei fluidi.
- Memorizzare gli ordini di grandezza, in unità SI, dei valori delle principali variabili termodinamiche e fisiche dei fluidi più comuni in condizioni operative usuali (densità, viscosità, conducibilità termica, tensione superficiale, ecc.).
- Saper applicare la regola di Gibbs per sistemi monofase e multifase, monocomponente e multicomponente, chiarendo quale tipologia di variabili è necessario o possibile scegliere per caratterizzarne lo stato termofluidodinamico.

## 2. *Statica dei Fluidi*

### Domande per l'autovalutazione

- Definire cosa si intende per “principio di isotropia delle pressioni” in un fluido in quiete e richiamare brevemente la sua dimostrazione.
- Definire quantitativamente la variazione della pressione in un fluido in quiete in presenza della sola forza di gravità.
- Descrivere brevemente le tipologie di strumenti usati per misurare la pressione.
- Descrivere come si opera per il calcolo delle forze di pressione agenti su superfici sommerse, aventi forma ed orientazione arbitrarie.
- In particolare, saper giustificare le semplici regole pratiche suggerite dai testi per la valutazione delle componenti verticale ed orizzontale delle forze di pressione su di una qualunque superficie sommersa.
- Descrivere la relazione esistente tra la legge di Stevino e il principio di Archimede.
- Descrivere qualitativamente i principi sulla base dei quali è possibile valutare la stabilità del galleggiamento o della posizione in affondamento<sup>2</sup> per corpi completamente o parzialmente sommersi.
- Descrivere le variazioni che intervengono nella distribuzione delle pressioni in un fluido accelerato con moto di corpo rigido.
- Descrivere la relazione esistente tra distribuzione delle pressioni in un fluido accelerato con moto di corpo rigido e la configurazione della superficie libera.

### Abilità minime da conseguire

- Saper applicare la legge di Stevino per valutare battenti gravimetrici in condizioni tipiche delle applicazioni pratiche (ad esempio: a che pressione equivale un battente di 5 m di acqua? ecc.)
- Saper svolgere semplici esercizi di manometria.
- Saper risolvere esercizi che coinvolgano il calcolo di forze di pressione su superfici sommerse.
- Saper svolgere semplici esercizi sui fluidi accelerati con moto di corpo rigido.

---

<sup>2</sup> Nel caso dell'affondamento, si escludano gli effetti delle forze idrodinamiche dovute alla forma dell'oggetto.

### 3. *Modelli Matematici per il Moto di Fluidi*

#### Domande per l'autovalutazione

- Descrivere la tipologia delle principali equazioni di bilancio adottate per la risoluzione di problemi dinamici legati al moto dei fluidi.
- Classificare le variabili che caratterizzano lo stato termodinamico e fluidodinamico di un fluido in *estensive* ed *intensive*, proponendo esempi significativi per ciascuna classe.
- Descrivere i punti di vista euleriano e lagrangiano, proponendo esempi significativi per illustrarne i concetti.
- Scrivere le equazioni di bilancio di massa, quantità di moto ed energia in forma integrale per volumi finiti.
- Descrivere la differenza esistente tra equazioni integrali in forma euleriana ed in forma lagrangiana. Quali termini aggiuntivi compaiono nella forma euleriana rispetto a quella lagrangiana? In che senso questi termini descrivono un “flusso”?
- Cosa rappresenta il “lavoro di pulsione”? Proporre una spiegazione convincente per l'introduzione del prodotto  $p v$  nei termini “in ingresso” ed “in uscita” nel bilancio di energia di sistemi aperti.
- Cos'è l'entalpia? In cosa si distingue dall'energia interna? Per quali motivi è spesso vantaggioso introdurla nei bilanci di energia?
- Da quale principio di conservazione deriva il “teorema di Bernoulli”? Come viene espresso tale teorema nel caso di fluidi incompressibili ed inviscidi? Qual è il significato fisico dei tre termini che lo compongono?
- Descrivere alcune applicazioni fondamentali del “teorema di Bernoulli”; almeno le seguenti:
  - effetto della variazione di sezione in un condotto sull'andamento della pressione in un fluido inviscido;
  - tubo di Venturi; tubo di Pitot; teorema di Torricelli; forza di portanza su un profilo alare e forze trasversali su corpi rotanti.
- Descrivere l'utilità dell'applicazione del principio di conservazione del momento della quantità di moto in fluidodinamica. Cosa esprime? A quali situazioni può essere utilmente applicato?
- Scrivere le equazioni di bilancio di massa, quantità di moto ed energia in forma differenziale, spiegando il significato fisico dei vari termini (per quanto riguarda la loro derivazione, si richiede solo di ricordarne le linee generali).
- Cos'è il tensore degli sforzi di Cauchy? Come viene normalmente decomposto in fluidodinamica?
- Scrivere le equazioni di Navier-Stokes e dire a quale tipo di fluido e in che regime di flusso possono essere applicate. Quale relazione costitutiva è necessario introdurre per ottenerle dalle equazioni di bilancio della quantità di moto? In che relazione si trova tale legge costitutiva con la semplice formulazione detta “legge di Newton della viscosità” vista nelle “Generalità”?
- In quale modo è possibile ottenere il bilancio di energia termica da quello di energia totale (meccanica + termica)? Si chiede solo di spiegare a parole il procedimento.

- In che relazione sta il bilancio di energia termica in forma lagrangiana con il primo principio della termodinamica?
- Da quale principio di conservazione discende “l’equazione del calore”? In quali casi essa può essere applicata? Quale “legge costitutiva” viene utilizzata per la sua derivazione?
- Scrivere “l’Equazione di Bernoulli Generalizzata”, contenente i termini di lavoro e di perdita di carico per attrito per fluidi compressibili e incompressibili.

### Abilità minime da conseguire

- Interiorizzare i concetti legati ai bilanci di massa, energia e quantità di moto, proponendo esempi di applicazione ed affrontando esercizi ad essi relativi.
- Saper eseguire semplici esercizi sui bilanci di quantità di moto, sulla scorta di quelli proposti a lezione e di quelli presenti nei testi di riferimento (ad esempio, forze fluidodinamiche su tubazioni, ostacoli, palette di turbomacchine, ecc.).
- Saper eseguire semplici bilanci di energia termica in sistemi aperti come scambiatori ed ebollitori. A questo scopo ci si riferisca al materiale presentato nei testi di riferimento e nel modulo di Termodinamica.
- Saper applicare il teorema di Bernoulli a sistemi di interesse tecnico e di uso quotidiano (tubazioni a sezione variabile, sifoni, ecc.). Cercare di interiorizzare bene il suo significato fisico e le sue principali applicazioni. Non lasciare dubbi sul suo significato!!!
- Interiorizzare bene il principio di conservazione del momento della quantità di moto, svolgendo esercizi.
- Saper utilizzare gli operatori matematici che intervengono nelle equazioni di bilancio della termofluidodinamica (derivate, divergenza, gradiente, ecc.), identificandone prontamente il significato fisico in modo intuitivo. Non lasciare mai che un’equazione resti senza una sua “lettura” fisica! Ricordare la forma matematica di un’equazione senza capirne il significato serve a pochissimo: pochi giorni dopo l’esame la si dimenticherà e non resterà nulla di essa nel bagaglio culturale!!!
- Interiorizzare il significato di “bilancio di quantità di moto” (e quindi anche di bilancio di forze) delle equazioni di Navier-Stokes, analizzando i due esempi di applicazione proposti a lezione (film su piastra piana, moto alla Poiseuille in un tubo circolare).
- Utilizzare l’equazione di Bernoulli generalizzata per risolvere semplici problemi.

## 4. *Analisi Dimensionale e Similitudine*

### Domande per l'autovalutazione

- Spiegare quale utilità ha in campo tecnico utilizzare principi di similitudine.
- Cosa significa stabilire una similitudine dinamica tra due sistemi fluidodinamici?
- Quali sono le metodologie applicabili per ricavare i numeri adimensionali che caratterizzano un determinato sistema in termini di similitudine dinamica? Quando è opportuno utilizzare l'una o l'altra di tali tecniche?
- Enunciare il teorema  $\pi$  di Buckingham.
- Esprimere nella loro formulazione classica ed, eventualmente, in forma più significativa ai fini della spiegazione del loro significato, i seguenti numeri adimensionali: di Reynolds, di Froude, di Prandtl, di Peclet, di Mach, di Grashof, di Fourier, di Biot, e di Nusselt (attenzione a mettere bene in evidenza la differenza tra gli ultimi due!).
- Descrivere in dettaglio il significato del numero di Biot e la sua utilizzazione per individuare condizioni di scambio termico limitato dalla convezione o dalla conduzione.
- Descrivere in dettaglio il significato del numero di Nusselt e dire in funzione di quali parametri adimensionali esso viene comunemente "correlato" sulla base di dati sperimentali.
- Accennare al significato del numero di Stanton e del numero di Colburn ai fini della valutazione dei coefficienti di scambio termico in funzione dei coefficienti di attrito tramite l'analogia tra scambio termico e scambio di quantità di moto.

### Abilità minime da conseguire

- Saper interpretare grafici che riportano dati sperimentali o risultati di calcoli in forma adimensionale. Fare attenzione, in particolare, agli andamenti che possono assumere le leggi di potenza, spesso usate a questo scopo, in scala logaritmica o bi-logaritmica.

Per esercitarsi a questo scopo, consultare, ad esempio, i testi consigliati per quanto riguarda lo scambio termico e la fluidodinamica, considerando i capitoli che presentano risultati di calcolo sulla conduzione, correlazioni di scambio termico e correlazioni per i coefficienti di attrito.

## 5. Moto su Superfici Esterne ed in Condotti

### Domande per l'autovalutazione

- Cosa significa che il moto di un fluido può essere rotazionale o irrotazionale? Accennare brevemente al significato di “vorticità” e “circolazione”.
- Spiegare brevemente perché un fluido inviscido può, sotto certe condizioni, essere irrotazionale.
- Cosa significa che una parete viene considerata “impermeabile”? Cosa significa la condizione di adesione (“no-slip”)? Quali di queste condizioni al contorno (alla parete) possono essere applicate ad un fluido viscoso o ad un fluido inviscido?
- Cosa rappresenta lo “strato limite” fluidodinamico? Come è definito quantitativamente?
- Come viene classificato lo strato limite in funzione del gradiente di pressione nella corrente libera?
- Descrivere brevemente la fenomenologia del distacco dello strato limite da una superficie e le sue conseguenze sulle forze fluidodinamiche agenti su di un corpo.
- Accennare al “paradosso di d’Alembert” descrivendo, ad esempio, l’andamento della distribuzione delle pressioni sulla superficie di un corpo cilindrico investito da un fluido, come calcolato dalle equazioni di Eulero (per fluido inviscido) e come effettivamente osservato.
- Definire la forza di attrito (o resistenza o “drag”) esercitata da un fluido su di un corpo e la forza di portanza (o “lift”), descrivendo le formule generalmente introdotte per quantificarne l’entità.
- Descrivere l’andamento in funzione della velocità della resistenza viscosa (“viscous drag”) e della resistenza di forma (“form drag”).
- Cosa sono le cosiddette “equazioni dello strato limite (laminare)”? In cosa si distinguono dalle equazioni di Navier-Stokes? Quale tipo di soluzione è stata cercata e trovata da Blasius per l’andamento della velocità nello strato limite laminare?
- Descrivere fenomenologicamente la transizione alla turbolenza in strati limite su superfici esterne, in condotti, in getti.
- Cosa sono i vortici di von Karman? Cos’è il numero di Strouhal?
- Secondo quali forme funzionali è distribuita la velocità in uno strato limite turbolento in funzione della distanza dalla parete?
- Confrontare e discutere qualitativamente le distribuzioni di velocità in un condotto a sezione circolare contenente un fluido nel caso di moto laminare e nel caso di moto turbolento.
- Come vengono valutate le perdite di carico distribuite per attrito nei condotti a sezione circolare? In che cosa il fattore di attrito di Darcy-Weisbach si distingue dal fattore di Fanning? (v. discussione moto alla Poiseuille in un condotto a sezione circolare).
- Descrivere brevemente le relazioni adimensionali adottate per valutare il fattore di attrito in moto laminare e turbolento in condotti circolari. Si ponga particolare attenzione all’esponente delle leggi di potenza adottate.
- Descrivere in dettaglio il diagramma di Moody, distinguendo in esso le regioni di moto laminare, transizione, turbolento e completamente turbolento, anche in relazione al ruolo della rugosità superficiale (fondamentale!!!).



- Come si valutano le perdite di carico distribuite in condotti a sezione non circolare?
- Quali sono le limitazioni e i vantaggi della formula di Hazen-Williams per la valutazione diretta della portata in un condotto di date caratteristiche?
- Discutere le cause della presenza nei condotti di perdite di carico localizzate (o singolari o concentrate o minori).
- Descrivere in dettaglio la casistica relativa alle perdite di carico localizzate e le formule adottate per la loro valutazione quantitativa.
- Descrivere brevemente i principali tipi di valvole comunemente incontrati.
- Descrivere il ruolo delle pompe nei condotti e classificarle sulla base del principio di funzionamento.
- Descrivere qualitativamente la curva caratteristica di una pompa centrifuga e determinare il suo punto di funzionamento nota la caratteristica delle perdite di carico del circuito in cui è inserita.
- A cosa servono le leggi di affinità delle pompe?
- Che cos'è l'NPSH richiesto da una pompa e quali limitazioni esso pone alla sua collocazione in un circuito? A quale fenomeno fisico fa riferimento?

#### Abilità minime da conseguire

- Acquisire padronanza dei concetti fondamentali legati allo strato limite. Allo scopo ci si aiuti con le letture consigliate e con i testi che riportano fotografie ottenute tramite la visualizzazione di flussi. Ciò che conta a questo proposito è la comprensione della fenomenologia coinvolta.
- Prendere familiarità con l'ordine di grandezza dei valori numerici del fattore di attrito e della rugosità per condotti di interesse tecnico.
- Saper valutare le perdite di carico distribuite e localizzate in condotti di interesse tecnico. In particolare, dato un circuito di geometria nota, saper individuare immediatamente quali sono i contributi da tenere in conto in termini di perdite di carico distribuite e localizzate e reperire le leggi ed i coefficienti opportuni per valutarli.
- Acquisire dimestichezza con gli ordini di grandezza delle variabili fluidodinamiche più importanti (velocità, portate, perdite di carico, ecc.) in applicazioni tecniche tipiche.

## **6. Soluzione di Problemi Relativi a Sistemi di Tubazioni**

### Domande per l'autovalutazione

- Proporre una classificazione dei principali problemi da risolvere per determinare il comportamento di impianti complessi (tubazioni in serie, parallelo, con ramificazioni, reti).

### Abilità minime da conseguire

- Saper risolvere prontamente problemi legati alle tubazioni in serie, distinguendo le difficoltà presentate dalle diverse classi.
- Saper risolvere prontamente problemi legati alle tubazioni in parallelo e con ramificazioni.
- Conoscere le tecniche risolutive adottate per trattare le reti di tubazioni.
- Risolvere problemi combinati di tubazioni in serie ed in parallelo.
- In questo ambito, è consigliato sia il calcolo manuale (per la soluzione di semplici problemi) che l'uso di fogli di calcolo elettronico o di programmi per il calcolo simbolico che permettano con rapidità ed efficienza l'esecuzione di analisi di sensitività. Ciò si rende necessario per acquisire sensibilità circa l'effetto di ipotesi di calcolo e parametri del problema sui risultati ottenuti.
- A questo proposito si consiglia, tra l'altro, l'utilizzazione dei fogli di calcolo messi a punto dal docente per la soluzione di problemi campione e disponibili in rete sulla pagina personale del docente.

## 7. *Trattazione Statistica del Moto Turbolento*

### Domande per l'autovalutazione

- Perché in moto turbolento è conveniente esprimere le equazioni di bilancio in termini di variabili mediate nel tempo? Quali semplificazioni comporta questo procedimento nella soluzione dei problemi fluidodinamici con moto turbolento?
- Quali termini legati alle fluttuazioni turbolente compaiono nelle equazioni di bilancio dopo l'operazione di media e quale è il loro significato?
- Che effetto ha complessivamente la turbolenza sullo scambio termico e di quantità di moto e perché?
- Cos'è l'intensità di turbolenza? Che significato ha?
- Cos'è il tensore di Reynolds? Cosa rappresentano la diffusività turbolenta della quantità di moto e la diffusività turbolenta del calore? Quali somiglianze e differenze ci sono tra esse e la viscosità cinematica, da un lato, e la diffusività termica (molecolare), dall'altro?
- Che caratteristiche ha la turbolenza in prossimità di una parete?
- Descrivere come varia il contributo della componente turbolenta allo sforzo di taglio in un fluido in funzione della distanza da una parete.
- Cosa rappresenta il numero di Prandtl turbolento?

### Abilità minime da conseguire

- Acquisire dimestichezza con i concetti principali legati alla trattazione del moto turbolento, sulla base di esempi tratti dalla vita quotidiana e dalle applicazioni tecniche. A tale scopo si utilizzino le letture consigliate.

## 8. Moto Monodimensionale di Fluidi Compressibili

### Domande per l'autovalutazione

- In quali casi un fluido deve essere necessariamente considerato compressibile?
- Definire matematicamente la compressibilità isoterma di un fluido.
- Che cosa rappresenta la velocità del suono? Che valori assume in fluidi tipici in condizioni di riferimento?
- Come si sovrappone il moto di un fluido rispetto ad un sistema di riferimento al moto delle perturbazioni di pressione e quali conseguenze questo ha sulla propagazione del suono? (si parli, ad esempio, del “cono di Mach”).
- Cosa esprime la relazione di Hugoniot per il moto di un fluido compressibile in condotti a sezione variabile? (Si discutano i casi di moto subsonico, sonico e supersonico).
- Che cos'è la portata critica? Quale spiegazione fisica può essere data alla presenza di un limite superiore alla portata di fluido compressibile che fluisce tra due ambienti a diversa pressione?
- Quale è il valore approssimativo del rapporto tra la “pressione critica” al termine di un ugello convergente in cui fluisce un gas perfetto e la pressione a monte? Quali possono essere le conseguenze pratiche di una tale osservazione?
- Si discuta qualitativamente l'andamento della portata di un gas perfetto attraverso un ugello convergente in funzione del rapporto tra pressione a monte e pressione nella sezione di uscita. In particolare:
  - si accenni alle ipotesi adottate nella formulazione del problema e alla forma della relazione ottenuta per la portata specifica  $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$ ;
  - si descriva qualitativamente l'andamento della portata specifica in funzione del rapporto tra pressioni a monte e a valle nel caso teorico ed in quello reale;
  - si proponga una spiegazione per la discrepanza tra i due.
- Si discuta la fenomenologia del moto di un fluido compressibile in un ugello di De Laval. In particolare, si discutano:
  - le possibilità offerte dal suo uso in termini di utilizzo dell'entalpia del fluido in ingresso;
  - la possibilità dell'instaurarsi di condizioni di moto sonico e supersonico;
  - la possibile presenza di onde d'urto stazionarie nella zona divergente.

### Abilità minime da conseguire

- Acquisire sensibilità alla valutazione delle condizioni nelle quali, in un dato sistema, può stabilirsi o meno la portata critica.
- Acquisire sensibilità quantitativa ai valori della portata critica specifica di un gas perfetto in condizioni tipiche. A questo scopo si utilizzino le formule studiate introducendo opportuni valori per le proprietà del gas.

## 9. Cenni ai Circuiti con Circolazione Naturale Monofase <sup>3</sup>

### Domande per l'autovalutazione

- Quali sono le equazioni di bilancio applicabili al moto di fluidi monofase in un condotto a sezione variabile?
- **Quale è il ruolo dell'approssimazione di Boussinesq nella valutazione della circolazione naturale?**
- **Quali sono le forze che, in condizioni stazionarie, si fanno equilibrio in un circuito sede di circolazione naturale?**
- **Dato un circuito in circolazione naturale, come varia il valore della portata di circolazione stazionaria in funzione della potenza di riscaldamento?**

---

<sup>3</sup> Nell'anno Accademico 2002-2003, per limiti di tempo e la richiesta di introduzione di un argomento aggiuntivo, la circolazione naturale non è stata trattata a lezione. Gli studenti che hanno seguito il Corso durante tale anno considerino perciò solo le domande riportate in grassetto, che si ritengono in ogni caso di importanza fondamentale, e si riferiscano al materiale ad essi distribuito e comunque disponibile sulla pagina personale del docente.

## 10. Cenni alla Fenomenologia dei Flussi Bifase <sup>4</sup>

### Domande per l'autovalutazione

- Quali sono le ragioni che rendono i flussi bifase più complessi da trattarsi quantitativamente dei flussi monofase?
- Definire quantitativamente le grandezze fondamentali necessarie per trattare i flussi bifase (grado di vuoto, velocità di fase e superficiali, frazione volumetrica di portata, velocità relativa, rapporto di scorrimento, titolo statico, titolo dinamico, titolo di equilibrio termodinamico, ecc.).
- Che relazione esiste tra titolo, grado di vuoto e rapporto di scorrimento? Che effetto ha il rapporto di scorrimento sul grado di vuoto a parità di titolo e pressione? Che effetto ha il titolo sul grado di vuoto a parità di rapporto di scorrimento e pressione? Che effetto ha la pressione sul grado di vuoto a parità di titolo e rapporto di scorrimento? Dare una breve spiegazione per gli effetti illustrati.
- Descrivere brevemente i principali regimi di flusso in condizioni adiabatiche e di ebollizione in condotti verticali ed in condizioni adiabatiche in condotti orizzontali.
- Cosa è una mappa di flusso e a che cosa serve? Perché non esiste una sola mappa di flusso ma la letteratura ne riporta molte e talora non perfettamente concordanti tra loro?
- Si descrivano brevemente i vari regimi di flusso e di scambio termico che si susseguono lungo un condotto verticale in condizioni di ebollizione, partendo da flusso monofase di solo liquido fino alle condizioni di “dry-out” e, al di là di questo, al flusso monofase di solo vapore.
- Si descriva la fenomenologia dell'ebollizione di un liquido in un recipiente con un riscaldatore (“pool boiling”). In particolare:
  - si descrivano i possibili regimi di scambio in funzione del surriscaldamento della parete e del flusso termico;
  - si descriva la fenomenologia della crisi termica e le sue conseguenze nei casi in cui siano la temperatura di parete o il flusso termico ad essere “controllati”.
- Si accenni brevemente alla fenomenologia della crisi termica in “flow boiling” a basso e ad alto grado di vuoto.
- Si descriva brevemente l'uso del “moltiplicatore bifase” per la valutazione delle perdite di carico in condotti sede di flussi bifase.
- Come è definito il moltiplicatore bifase nel caso del modello HEM?
- Citare brevemente gli altri modelli esistenti per la valutazione delle perdite di carico in regime bifase.

### Bibliografia consigliata per questo argomento:

N.E. Todreas and M.S. Kazimi “Nuclear Systems”, Vol. I, Hemisphere, 1990.

J.G. Collier, J.R. Thome “Convective Boiling and Condensation”, Oxford Engineering Science, 1996.

---

<sup>4</sup> L'argomento è stato trattato solo a partire dall'anno accademico 2002-2003.