

Questionario di Autovalutazione per la Preparazione all'Esame di

“Termofluidodinamica ed elementi di CFD”

III° anno di Ingegneria Nucleare, Sicurezza e Protezione

Premessa

Il presente questionario ha lo scopo di fornire allo studente uno strumento per verificare la propria preparazione in vista dell'esame di Termofluidodinamica ed elementi di CFD.

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 ⁽¹⁾, permettono di costituirsi un'idea rappresentativa delle conoscenze ed abilità in uscita 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 dopo 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, 1 Giugno 2011

⁽¹⁾ 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.

- ***Generalità sui Fluidi e sul 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.
- 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

- Saper utilizzare le tabelle riportate nei libri di testo per la valutazione delle proprietà termodinamiche e fisiche dei fluidi.
- Saper utilizzare files Excel per il calcolo di grandezze legate alle proprietà dei fluidi (ad es., si faccia uso degli "add-in" reperibili su internet per il calcolo delle proprietà dell'acqua).
- 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.

- ***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 adottati nella scrittura di equazioni di bilancio, 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.
- Cosa 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)?

- 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 di base ad essi relativi.
- Saper eseguire semplici esercizi sui bilanci, sulla scorta di quelli proposti a lezione e di quelli presenti nei testi di riferimento (ad esempio, forze fluidodinamiche su tubazioni).
- 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.
- 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!!!
- 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).
- Saper utilizzare l’equazione di Bernoulli generalizzata per risolvere semplici problemi.

- ***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 e quali 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 “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!!!... non si confondano i valori di ϵ/D con un altro asse!!!).

- Come si valutano le perdite di carico distribuite in condotti a sezione non circolare?
- 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.

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 saper 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.

- ***Analisi Dimensionale e Similitudine***

Domande per l'autovalutazione

- Spiegare quale utilità ha utilizzare principi di similitudine in campo tecnico.
- 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 π 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 sullo 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.

- ***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 e in parallelo).

Abilità minime da conseguire

- Saper risolvere prontamente semplici problemi legati alle tubazioni in serie, distinguendo le difficoltà presentate dalle diverse classi.
- Saper risolvere prontamente semplici problemi legati alle tubazioni in parallelo.
- Risolvere problemi combinati di tubazioni in serie ed in parallelo.
- In questo ambito, è consigliato sia il calcolo manuale 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.

- ***Trattazione Statistica del Moto Turbolento***

Domande per l'autovalutazione

- Perché nel caso di moto turbolento è talora 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 temporale (secondo Reynolds) 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 variano l'intensità di turbolenza e il contributo della componente turbolenta allo sforzo di taglio in un fluido in funzione della distanza da una parete.
- Cosa è y^+ ? Qual è la forma del profilo universale di velocità in prossimità di una parete in un moto turbolento?
- Come appaiono qualitativamente i profili trasversali di velocità assiale nel moto laminare e nel moto turbolento in un condotto circolare? Con quali formule analitiche vengono descritti?
- 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.

- ***General Considerations on Numerical Discretization Schemes***

Domande per l'autovalutazione

- Descrivere il ruolo della classificazione delle equazioni della fisica matematica ai fini dell'elaborazione di metodi numerici per la loro soluzione.
- Caratterizzare matematicamente equazioni di tipo iperbolico parabolico ed ellittico, proponendo esempi tratti da ciascuna categoria e spiegandone il significato.
- Scrivere le equazioni monodimensionali di bilancio per fluido monofase (o bifase) ad un solo campo. Ricordare (bene) che la forma vista a lezione trascura la differenza tra prodotto delle variabili mediate sulla sezione e medie dei prodotti.
- Descrivere il ruolo delle tre radici caratteristiche delle equazioni monodimensionali di bilancio termo fluidodinamico in un condotto e proporre esempi di distribuzione delle corrispondenti linee caratteristiche in casi di flusso subsonico e supersonico verso destra e sinistra, menzionando le relative conseguenze in termini di flusso delle informazioni sulle perturbazioni di pressione e energia interna (o temperatura) e sulle condizioni al contorno necessarie.
- Scrivere la generica equazione di bilancio così come classicamente considerata in fluidodinamica, evidenziandone i termini principali. Descrivere il procedimento al limite con il quale viene ottenuta.

Abilità minime da conseguire

- Saper riconoscere prontamente in varie forme delle equazioni di bilancio i termini transitori, avvevativi (o convettivi), diffusivi e di sorgente.
- Saper ricondurre i termini di divergenza e gradiente presenti nelle equazioni di bilancio ai termini superficiali del bilancio integrale da cui derivano.

- ***Basic Concepts about Computational Modelling of Turbulent Flows***

Domande per l'autovalutazione

- Descrivere il fenomeno della cascata dell'energia turbolenta, con riferimento alle scale di lunghezza coinvolte.
- Descrivere il ruolo della cascata dell'energia turbolenta nelle tre principali metodologie computazionali adottate per trattare i fenomeni turbolenti: DNS, LES e RANS. In quale modo e/o in quali termini delle relative equazioni si fa riferimento a fasi importanti del processo della cascata dell'energia turbolenta?
- Descrivere sommariamente gli obiettivi e le metodologie adottate nella metodologia DNS e in quella LES.
- Categorizzare i vari tipi di modelli adottati per le equazioni RANS (a zero, una e due equazioni) sapendoli distinguere in termini di "completezza"
- Chiarire come si ottengono le equazioni del modello di trasporto delle componenti del tensore di Reynolds (senza dimostrazione, ovviamente) e fare cenno al problema della "chiusura" delle equazioni della turbolenza in riferimento alla presenza di correlazioni multiple.
- Definire l'energia cinetica turbolenta.
- Scrivere l'equazione di bilancio dell'energia cinetica turbolenta nella sua forma classica (senza correlazioni triple). Chiarire come può essere ottenuta e descrivere il significato dei singoli termini che appaiono in essa.
- Spiegare cosa sono i modelli ad una equazione.
- Chiarire perché sia necessario, in generale, utilizzare modelli a due equazioni per ottenere modelli "completi".
- Spiegare cosa siano ϵ e ω . Scrivere le relative equazioni di bilancio nelle loro forma classica (fare riferimento al significato dei termini che vi compaiono).
- Spiegare come si possano calcolare le diffusività turbolente della quantità di moto e del calore sulla base dei valori di k ed ϵ e di k ed ω .
- Descrivere chiaramente le informazioni necessarie nelle equazioni di bilancio mediate di massa energia e quantità di moto che richiedono la soluzione delle equazioni della turbolenza e viceversa.
- Chiarire la differenza tra l'uso di "wall functions" e di modelli a basso numero di Reynolds per il trattamento delle regioni in prossimità delle pareti, insieme a vantaggi, svantaggi e potenzialità.

Abilità minime da conseguire

- Saper riconoscere il carattere dimensionale delle relazioni poste tra k , ϵ , ω , v_t , ecc. e ricordare le relazioni principali tra di esse.

- ***Numerical Discretization Methods***

Domande per l'autovalutazione

- Descrivere le fasi principali necessarie per passare da un problema differenziale alla sua soluzione approssimata per via numerica
- Definire le proprietà di convergenza, consistenza e stabilità.
- Definire il significato dell'errore di troncamento di un'approssimazione numerica e il significato del termine "ordine di accuratezza" in relazione ad esso.
- Descrivere le principali applicazioni del criterio di stabilità di von Neumann considerate a lezione in relazione a metodi espliciti ed impliciti ed i risultati ottenuti, accennando alla metodologia seguita per ottenerli.
- Definire i vari tipi di griglie di discretizzazione che è possibile introdurre (cartesiane, a nodi centrati e a facce centrate, strutturate e non strutturate, collocated e staggered, ...)
- Descrivere le tecniche di discretizzazione alle differenze finite, sapendo proporre esempi per la discretizzazione di derivate prime e seconde con varia accuratezza.
- Descrivere i vari tipi di discretizzazione temporale comunemente usati.
- Discutere in dettaglio i risultati dell'analisi dell'equazione dell'avvezione discretizzata con i metodi upwind implicito ed esplicito in relazione alla loro consistenza e alla loro stabilità. Definire il numero di Courant e la condizione di CFL (Courant-Friederichs-Lewy) nel caso del metodo upwind esplicito.
- Descrivere i problemi derivanti dalla diffusione numerica.
- Discutere i problemi che si incontrano nella scrittura di equazioni discretizzate ai volumi finiti (integrali di volume e di superficie), con particolare riferimento alla valutazione delle variabili all'interfaccia (metodi upwind, CDS e QUICK, cenni all'approccio di Patankar sulla base del numero di Peclet). Descrivere il principio della "cella donatrice".
- (Elementi finiti solo se trattati a lezione: non è questo il caso nel 2011).

Abilità minime da conseguire

- Saper impostare l'analisi di errore di troncamento di una formula alle differenze finite con l'uso dell'espansione in serie di Taylor.
- Saper impostare l'analisi di stabilità dei semplici metodi numerici alle differenze finite trattati a lezione sulla base del metodo di von Neumann, sapendo spiegare le definizioni di base, la procedura da adottare ed il significato del procedimento (ad es., definizione del valore della parte reale di α al variare del numero d'onda β)

- ***Solving Coupled Equations***

Domande per l'autovalutazione

- Giustificare la necessità di accoppiamento tra campo di pressione e campo di velocità nella soluzione simultanea di equazioni di bilancio di massa e quantità di moto.
- Delineare la procedura di trattazione dell'accoppiamento tra pressione e velocità nei metodi SIMPLE e SIMPLER, con riferimento alle equazioni di bilancio di quantità di moto in termini di pressioni stimate e correzioni di pressione, loro introduzione nell'equazione di bilancio di massa e soluzione dell'equazione di Poisson.
- Spiegare il significato delle procedure di sottorilassamento e della loro necessità.

- **Esercitazioni con RELAP5 e STAR-CCM+**

Il materiale messo a disposizione dal docente (e disponibile sul web) in relazione alle esercitazioni svolte con il codice RELAP e il codice di CFD STAR-CCM+ ha lo scopo di rendere tangibili alcuni dei concetti discussi a lezione e può essere oggetto di domande durante l'esame.

- L'esercitazione con il codice RELAP ha avuto lo scopo di esemplificare l'utilizzo di un codice di calcolo che fa uso di "nodi" e "giunzioni" con "staggered meshes" e "upwind differencing" per l'analisi di esperimenti di circolazione naturale.

L'obiettivo non era, ovviamente, rendere gli studenti esperti nell'uso del codice, ma introdurli ai problemi legati all'uso del codice stesso e alla struttura del file dei dati di ingresso. In particolare, si ricordino i seguenti aspetti rilevanti:

- La struttura della nodalizzazione, fatta di componenti "pipe", "branch", "time-dependent volumes", "time dependent junctions", strutture termiche con condizioni al contorno assegnate ai volumi idrodinamici o esterne.
 - La possibilità di assegnare potenza termica nelle strutture attive tramite tabelle (analisi di sensitività fatta in aula).
 - La dipendenza della portata di circolazione naturale dalla potenza.
 - La possibilità di imporre condizioni al contorno con giunzioni dipendenti dal tempo ("time-dependent-junctions") e volumi dipendenti dal tempo ("time-dependent-junctions") a monte o a valle di componenti idrodinamici.
- Le esercitazioni svolte con STAR-CCM+ hanno invece avuto lo scopo di introdurre all'utilizzo del codice, con "tutorials" messi a punto appositamente. Gli aspetti che si ritiene debbano entrare a far parte del bagaglio di conoscenze ed abilità degli studenti sono principalmente i seguenti:
 - Modelli disponibili per la scelta della meshatura (sebbene non sia stata eseguita un'esercitazione specifica sulla discretizzazione spaziale): meshatura ad esaedri (trimmed) e con poliedri, definizione dello strato prismatico in vicinanza della parete ("prism layer");
 - Modelli fisici, con particolare riferimento ai modelli di turbolenza basati sull'approccio RANS: $k-\epsilon$, $k-\omega$ (e relative varianti) modello di trasporto delle componenti del tensore di Reynolds;
 - Uso di modelli per alto "y+" e basso "y+" (low Reynolds) e conseguenze del loro utilizzo sulla meshatura;
 - Modalità di assegnazione delle variabili di riferimento e delle condizioni al contorno: ad es., "wall", "velocity inlet", "pressure outlet", ecc., con diverse opzioni fluidodinamiche ("slip", "no-slip") e termiche (parete adiabatica, flusso termico imposto, ecc.);
 - Schemi numerici (ed es., "coupled" e "segregated") con la presenza di parametri di controllo quali i fattori di sottorilassamento o il numero di Courant;
 - Monitoraggio della convergenza durante le iterazioni tramite il grafico dei residui;
 - Presentazione e monitoraggio dei risultati tramite grafici a due assi e "contour plots" delle variabili calcolate;

- Come esempio di alcuni dei risultati interessanti osservati nei casi considerati si ricorda:
 - La turbolenza generata dal complesso flow pattern a valle di una curva.
 - La tipica distribuzione radiale della componente assiale della velocità in un condotto circolare in presenza di turbolenza (profilo appiattito...).
 - La tipica distribuzione radiale dell'energia cinetica turbolenta in prossimità della parete, la cui rapida variazione rende ragione delle difficoltà che si incontrano nella simulazione della near-wall region.
 - L'effetto del galleggiamento sullo scambio termico in regime turbolento con fluidi supercritici.

Ci si attende che lo studente sappia adeguatamente commentare l'esperienza acquisita durante le esercitazioni rispondendo a domande specifiche in sede di esame orale.