



- **Incorretta definizione del problema**
  - Fisica; geometria; condizioni al contorno; proprietà termofisiche; aspetti numerici e computazionali
- **Capacità e limiti del solutore**
  - Soluzione e condizioni iniziali; fisica più semplice; approccio incrementale; gruppi adimensionali; clipping; upwinding sì o no?; supporto
- **Suggerimenti specifici per:**
  - Problemi turbolenti
  - Scambio termico in convezione forzata e coniugato
  - Convezione naturale e mista



- **Incorretta definizione del problema**
  - Fisica; geometria; proprietà termofisiche; condizioni al contorno; aspetti numerici e computazionali
- **Capacità e limiti del solutore**
  - Soluzione e condizioni iniziali; fisica più semplice; approccio incrementale; gruppi adimensionali; clipping; upwinding sì o no?; supporto
- **Suggerimenti specifici per:**
  - Problemi turbolenti
  - Scambio termico in convezione forzata e coniugato
  - Convezione naturale e mista



## Fisica

- Scelta attenta del regime + modelli:
  - Difficoltà di convergenza utilizzando un *modello laminare* per un *problema turbolento*;
  - Difficoltà di convergenza forzando una *soluzione stazionaria* per problemi inerentemente *non stazionari*;
  - Unità di misura (S.I.).

## Geometria

- Estensione della geometria, in particolare nelle *sezioni di uscita*;
- Sfruttare le *simmetrie, anti-simmetrie e periodicità*.

## Proprietà termofisiche

- In caso di *fitting* da dati tabellari, verificare la compatibilità del range con il problema in esame;
- Per proprietà funzione della soluzione, attenzione alle iterazioni iniziali.



## Condizioni al contorno

- Definizione incorretta delle condizioni al contorno: soluzione di un problema diverso o difficoltà nella soluzione;
- Condizioni al contorno rispettose delle leggi di conservazione e compatibili con la fisica del problema;
- Condizioni al contorno sufficienti e necessarie (sovra- o sotto-specificazione);
- Condizioni in ingresso delle grandezze turbolente ( $k$  e  $\epsilon$ ).

## Aspetti numerici

- Qualità della griglia: risoluzione; gradualità dell'infittimento; ortogonalità e allungamento delle celle;
- Scelta appropriata dei *solutori dei sistemi di equazioni lineari*;
- Scelta appropriata dei *criteri di convergenza* delle iterazioni interne;
- Fattori di *sottorilassamento* adeguati: mancata convergenza se alti, ma lenta (o falsa) convergenza se troppo bassi.



## Aspetti computazionali

- Gli errori di arrotondamento, di solito, non rappresentano un problema, ma in taluni casi può essere conveniente adottare un'opportuna adimensionalizzazione;
- I moderni pacchetti di CFD forniscono strumenti di controllo dei dati (data check), in fase di pre-processing (generazione griglia) e prima della fase di soluzione;
- Verificare, in modalità interattiva o batch, l'andamento della convergenza (residui, errore di massa) sin dalle prime fasi della soluzione;
- È conveniente, talvolta, verificare qualitativamente la soluzione dopo poche iterazioni (condizioni al contorno, valori della soluzione).



## • **Incorretta definizione del problema**

- **Fisica; geometria; proprietà termofisiche; condizioni al contorno; aspetti numerici e computazionali**

## • **Capacità e limiti del solutore**

- **Soluzione e condizioni iniziali; fisica più semplice; approccio incrementale; gruppi adimensionali; clipping; upwinding sì o no?; supporto**

## • **Suggerimenti specifici per:**

- **Problemi turbolenti**
- **Scambio termico in convezione forzata e coniugato**
- **Convezione naturale e mista**



## Soluzione e condizioni iniziali

- Ovviamente la convergenza è facilitata partendo da una condizione iniziale (spesso assunta nulla) vicina alla soluzione finale:
  - Assegnazione di valori alle variabili - ad esempio, per il campo di temperatura, dando un valore intermedio fra le temperature sul contorno;
  - Individuazione di una soluzione semplificata, ma che comunque costituisca un buon punto di partenza - soluzione conduttiva per l'equazione dell'energia; soluzione dell'equazione lineare di Stokes o dell'equazione di Eulero;
  - Utilizzo di altra soluzione prossima a quella in esame - *interpolazione* da griglia più rada; soluzione con modello di turbolenza più semplice; solo miscelamento e non combustione;
  - Per taluni problemi 3D, è conveniente utilizzare una soluzione 2D, replicata sulla terza direzione, come base di partenza.



## Fisica più semplice

- La presenza di numerosi modelli (turbolenza, combustione, multifase) può provocare problemi di convergenza;
- È conveniente, a volte, partire da una situazione semplificata, ed aggiungere i modelli in modo incrementale;
- L'inserimento di nuovi modelli può avvenire in modo graduale (sottorilassamento; deferred correction).

## Approccio incrementale

- Un'altra possibilità è quella di utilizzare il *re-start* e *re-load*, in modo da inserire gradualmente le non-linearità: ad esempio incrementare progressivamente il numero di Reynolds o di Grashof.

## Gruppi adimensionali

- A volte, l'individuazione del valore dei gruppi adimensionali può aiutare ad evitare problemi di convergenza (es. elevati valori di Grashof, modelli di turbolenza per valori modesti di Reynolds).



## Clipping

- Se possibile, specificare i limiti di alcune variabili (es viscosità turbolenta  $> 0$ ), soprattutto nelle prime iterazioni.

## Upwinding sì o no?;

- Come già osservato, l'utilizzo di schemi del 1° ordine (UDS, Hybrid) introduce un'elevata diffusività numerica, e quindi errori spesso inaccettabili;
- Tuttavia, tali schemi tendono a stabilizzare la soluzione ( $Re \rightarrow Re_{eff}$ );
- Per tali ragioni, UDS (o Hybrid) possono venire usati per l'avvio della soluzione, e/o per generare una prima soluzione approssimata, dalla quale ripartire (re-start);
- L'utilizzo di UDS e Hybrid è talvolta accettabile per quelle situazioni nelle quali le equazioni di trasporto sono dominate dai termini sorgenti, e gli errori si manifestano sulla soluzione in modo indiretto (es.  $k$  e  $\epsilon$ ).



## Supporto

- In casi di difficoltà all'apparenza insuperabili, è conveniente ricorrere a supporti esterni (in ordine sparso):
  - Colleghi con maggiore esperienza generale in CFD e specifica sul problema;
  - Rivenditore, fornitore, società di consulenza;
  - Gruppi di utenti (Conferenze specifiche; User groups);
  - Internet: newsgroups; best practice guidelines ([www.nafems.org](http://www.nafems.org)); forums ([www.cfd-online.com](http://www.cfd-online.com): forum generale e forum specifici);
  - Riviste e newsletter di settore.



- **Incorretta definizione del problema**
  - Fisica; geometria; proprietà termofisiche; condizioni al contorno; aspetti numerici e computazionali
- **Capacità e limiti del solutore**
  - Soluzione e condizioni iniziali; fisica più semplice; approccio incrementale; gruppi adimensionali; clipping; upwinding sì o no?; supporto
- **Suggerimenti specifici per:**
  - Problemi turbolenti
  - Scambio termico in convezione forzata e coniugato
  - Convezione naturale e mista



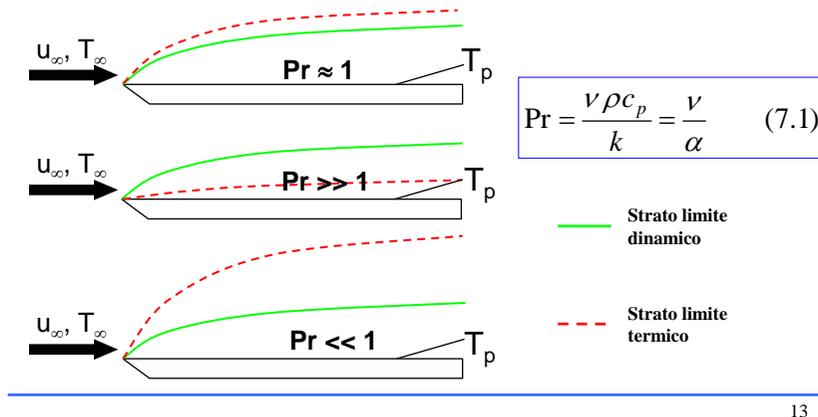
## **Problemi turbolenti**

***(NAFEMS CFD Working Group – CFD tips for Turbulent Flow)***

- Conoscenza della fisica del problema: partenza da soluzione laminare, ed introduzione graduale della viscosità turbolenta;
- Scelta opportuna del modello di turbolenza;
- Scelta dei valori di ingresso delle grandezze turbolente (estensione a monte delle sezioni di ingresso);
- Bassi valori dei fattori di sotto-rilassamento, nelle fasi iniziali, e successivo incremento a convergenza ormai prossima;
- *Triggering* della transizione laminare-turbolenta in casi particolari (difficile a priori).

## Scambio termico in convezione forzata

- Significato fisico del numero di Prandtl (Pr):



13

## Scambio termico in convezione forzata - cont.

- Scelta opportuna della risoluzione della griglia in prossimità delle pareti termicamente attive, in laminare e turbolento;
- Assenza di particolari difficoltà per l'aria ( $Pr \approx 1$ ) e gas;
- Maggiori difficoltà per acqua ( $Pr \approx 3.5 - 7$ ) ed altri liquidi (oli lubrificanti  $Pr \approx 50 - 50,000$ ).

## Scambio termico coniugato

- Contemporanea presenza di convezione (fluido) + conduzione (solidi/liquidi);
- Proprietà termofisiche (conducibilità termica) a volte molto variabili nei solidi: metalli -  $k \approx 10 - 400$ ; isolanti -  $k \approx 0.005 - 0.1$ ;
- Difficoltà nella soluzione dell'equazione dell'energia - scelta del solver e verifica del residuo.

14



## Convezione naturale e mista

- Parametri adimensionali:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{u_\infty L}{\nu} & \text{Gr} &= \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \\ \text{Ra} &= \text{Gr} \times \text{Pr} & \text{Ri} &= \text{Gr} / \text{Re}^2 \end{aligned} \quad (7.2)$$

- $\text{Ri} \ll 1 \rightarrow$  convezione forzata
  - $\text{Ri} \gg 1 \rightarrow$  convezione naturale
  - $\text{Ri} \approx 1 \rightarrow$  convezione mista
- 
- Difficoltà fisiche per  $\text{Ri} \gg 1$ :
    - Accoppiamento bi-direzionale velocità-temperatura;
    - Compresenza di zone laminari e turbolente;
    - Difficoltà nello stabilire a priori il regime di moto;
    - Difficoltà nella scelta del modello di turbolenza;
    - Problemi inerentemente 3D (convezione di Rayleigh-Benard).



## Convezione naturale e mista - cont.

- *Difficoltà numeriche per  $\text{Ri} \gg 1$ :*
  - Convergenza lenta o difficoltosa;
  - Tendenza della soluzione a laminarizzare (modelli k- $\epsilon$  low-Re);
- *...e possibili strategie:*
  - Sottorilassamento;
  - Soluzione simultanea del campo di moto e termico, se possibile e/o prevista;
  - Approccio incrementale;
  - Stazionario  $\rightarrow$  pseudo non-stazionario  $\rightarrow$  non-stazionario  $\rightarrow$  riduzione del passo di tempo nelle primissime iterazioni (ognuno di questi passaggi comporta un aumento dei tempi di calcolo).