



**V Scuola Estiva di Termofluidodinamica**

# **TERMOFLUIDODINAMICA DI FLUSSI TURBOLENTI**

**Certosa di Pontignano, 5-10 Settembre 2005  
Direttore: Prof. Alfonso Niro - Politecnico di Milano**

## **Corpo docente**

**M. Ciofalo**, Università di Palermo, **G. Cossali**, Università di Bergamo, **W. Grassi**, Università di Pisa, **A.M. Lezzi**, Università di Brescia, **A. Niro**, Politecnico di Milano, **P. Poesio**, Università di Brescia, **M. Quadrio**, Politecnico di Milano, **S. Rainieri**, Università di Parma, **G. Tanda**, Università di Genova.

- **Introduzione ai fenomeni fisici della turbolenza**
  - **Stabilità e transizione alla turbolenza**
    - **Descrizione statistica e scale spazio-temporali**
      - **Termofluidodinamica di flussi liberi e di parete**
        - **Modelli di turbolenza**
          - **Misure termofluidodinamiche in flussi turbolenti**
            - **Turbolenza di parete**

## **Obiettivi Generali**

Il corso è rivolto a studenti di dottorato in Energetica e in Ingegneria Nucleare, ma può essere di interesse anche per allievi di altri corsi di dottorato, e per ingegneri e per ricercatori che operano nel campo della termofluidodinamica. Affrontare problemi di scambio termico in flussi monofase turbolenti è una situazione che si presenta molto frequentemente sia nella ricerca di base e applicata sia nella pratica progettistica. La complessità dei fenomeni, e la conseguente varietà di tecniche di analisi e previsione, fanno sì che gli strumenti a disposizione non possano essere utilizzati a pieno senza una formazione specifica che, normalmente, non viene fornita nei corsi di laurea.

Il corso mira a fornire le basi formative, gli strumenti teorici e le tecniche sperimentali per l'analisi ingegneristica di tali problemi; in particolare, il corso si articola in sette cicli coordinati di lezioni e intende rispondere a domande come: quali sono i fenomeni fisici connessi con la turbolenza? Come si comportano i flussi turbolenti? Come è possibile descriverli quantitativamente? Quali sono i modelli e i metodi di soluzione? Quali le tecniche di misura? Degli esempi ricavati da problemi di scambio termico monofase, sia per flussi interni che per getti liberi, di particolare interesse tecnologico aiuteranno a chiarire gli argomenti trattati.



V Scuola Estiva di Termofluidodinamica  
**TERMOFLUIDODINAMICA DI FLUSSI TURBOLENTI**  
Certosa di Pontignano, 5-10 Settembre 2005  
Direttore: Prof. Alfonso Niro - Politecnico di Milano

*Affrontare problemi di scambio termico in flussi monofase turbolenti è una situazione che si presenta molto frequentemente sia nella ricerca di base e applicata sia nella pratica progettistica. La complessità dei fenomeni, e la conseguente varietà di tecniche di analisi e previsione, fanno sì che gli strumenti a disposizione non possano essere utilizzati a pieno senza una formazione specifica che, normalmente, non viene fornita nei corsi di laurea.*

*Il corso mira a fornire le basi formative, gli strumenti teorici e le tecniche sperimentali per l'analisi ingegneristica di tali problemi; in particolare, il corso si articola in sette cicli coordinati di lezioni e intende rispondere a domande come: quali sono i fenomeni fisici connessi con la turbolenza? Come si comportano i flussi turbolenti? Come è possibile descriverli quantitativamente? Quali sono i modelli e i metodi di soluzione? Quali le tecniche di misura? Degli esempi ricavati da problemi di scambio termico monofase, sia per flussi interni che per getti liberi, di particolare interesse tecnologico aiuteranno a chiarire gli argomenti trattati.*

## Programma del corso

- **Introduzione ai fenomeni fisici della turbolenza** (2 ore, Prof. Niro). Richiamo delle equazioni di trasporto di massa, quantità di moto ed energia; natura, origine e caratteristiche della turbolenza; diffusività della turbolenza e scale caratteristiche multiple. Fluttuazioni e decomposizione di Reynolds; equazioni medie.
- **Stabilità e transizione alla turbolenza** (4 ore, Prof. Lezzi). Teoria lineare della stabilità di flussi laminari; metodo delle piccole perturbazioni; equazione di Orr-Sommerfeld. Stabilità di flussi piani e tra cilindri rotanti; stabilità dello strato limite; onde di Tolmienn-Schlichting. Cenni alla teoria non lineare.
- **Descrizione statistica e scale spazio-temporali** (7 ore, Dr. Poesio). Descrizione statistica di processi e campi casuali; visione di Richardson-Kolmogorov della turbolenza, cascata di energia. Turbolenza omogenea ed isotropa nello spazio reale: funzioni di struttura, di cross e auto correlazione; ipotesi di Taylor; equazione di Kármán-Howarth; integrale di Loitsyanskii. Turbolenza omogenea ed isotropa nel dominio delle frequenze: equazioni di Navier-Stokes nello spazio di Fourier; forma spettrale dell'equazione dell'energia cinetica; spettro dell'energia cinetica turbolenta; spettro di Kolmogorov. Scale di temperatura: scale associate alle fluttuazioni di temperatura; equazione di trasporto per l'energia termica e sua rappresentazione spettrale.
- **Termofluidodinamica di flussi liberi e di parete. Flussi liberi** (2 ore, Prof. Grassi): il getto cilindrico; descrizione del flusso, equazioni di strato limite, similitudine; energia cinetica: la componente media e quella turbolenti; scambio termico; cenni a getti piani, strati di rimescolamento, scie piane, schiere di cilindri. **Flussi di parete** (2 ore, Prof. Niro): il canale piano; sforzi vicino alla parete, legge della velocità, scale di lunghezza; flussi in condotti: le leggi di attrito per condotti lisci. Scambio termico in canali, condotti e in alcune geometrie particolari.
- **Modelli di turbolenza** (7 ore, Prof. Ciofalo). Introduzione alla modellazione della turbolenza, filtraggio spaziale e filtraggio temporale. Approccio basato sul filtraggio spaziale (LES): sforzi e flussi irrisolti, origine dalla non-linearità delle equazioni e loro significato fisico; problema della chiusura. Modelli sub-grid e loro classificazione; modelli a viscosità sub-grid (Smagorinsky, dinamico). Approccio basato su medie temporali (modelli alla Reynolds): sforzi e flussi di Reynolds; problemi che nascono per flussi dipendenti dal tempo; modelli di turbolenza di tipo RANS: modelli a zero e a una equazione; modelli a due equazioni:  $k-\epsilon$  e sue varianti ("low Reynolds number models", con correzioni per curvatura,  $k-\omega$ ); introduzione ai modelli del secondo ordine (ASM, RSM).
- **Turbolenza di parete** (4 ore, Prof. Quadrio). Strato limite turbolento: trattazione asintotica di Mellor. Turbolenza e strutture coerenti; esistenza di un ciclo autonomo di rigenerazione della turbolenza di parete: descrizione cinematica e dinamica; interazione del ciclo di parete con il resto dello strato limite: ciclo di co-supporto. Rugosità di tipo K: estensione della legge di parete; esperimenti di Nikuradse, rugosità omogenea equivalente. Incongruenze nella descrizione classica di rugosità: superfici lisce, rugosità di transizione e non-classica; rugosità di tipo D. Superfici che permettono di ridurre l'attrito e superfici che incrementano lo scambio termico.
- **Misure termofluidodinamiche in flussi turbolenti. Misure fluidodinamiche** (4 ore, Prof. Cossali): Tecniche di misura e trattamento dei dati; risoluzione spaziale e risposta in frequenza; traccianti e tecniche di visualizzazione; misure di velocità: anemometria a filo caldo, velocimetria laser doppler (LDV), velocimetria a immagini di particelle (PIV); valutazione di spettri di turbolenza. **Misure di temperature e visualizzazione di campi termici** (2 ore, Prof. Tanda): tecniche tradizionali, termografia infrarossa e a cristalli liquidi; misure di coefficienti convettivi mediante film sottili e rilevazione termografica. **Tecniche di filtraggio per la determinazione dei flussi termici** (Prof. Rainieri, 1ora).

## Docenti del corso

- Prof. Michele Ciofalo, Università di Palermo
- Prof. Elvio Cossali, Università di Bergamo
- Prof. Adriano M. Lezzi, Università di Brescia
- Prof. Alfonso Niro, Politecnico di Milano
- Dr. Pietro Poesio, Università di Brescia
- Prof. Maurizio Quadrio, Politecnico di Milano
- Prof. Sara Rainieri, Università di Parma
- Prof. Giovanni Tanda, Università di Genova