

PRESENTAZIONE DEL CORSO DI TERMOFLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE

Enrico Nobile

Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi Trieste, 34127 TRIESTE



2 marzo 2024



OUTLINE

- 1 Obiettivi e finalità del corso
- 2 A chi interessa
- 3 Requisiti
- 4 Programma del corso
- 5 Testi e materiale didattico
 - Modalità di comunicazione
- 6 Esercitazioni in aula (o online)
- 7 Elaborato finale
 - Esempi di Student project
- 8 Esercizi assegnati - *Homework*
- 9 Modalità di esame
- 10 Problemi e Novità AA 2023/24
 - Problemi riscontrati
 - Novità AA 2023/24



Obiettivi

- Fornire gli elementi, teorici e pratici, per consentire un utilizzo consapevole delle tecniche di *Termofluidodinamica Computazionale* o *TCFD* (CFD – Computational Fluid Dynamics) in ambito applicativo e industriale;
- Verificare le modalità, ed i problemi relativi, con cui tecniche di CFD possano integrarsi nella *Design Chain*;
- Riconciliare i due aspetti della CFD – fondamenti teorici e modalità applicative – che spesso vengono trattati in modo disgiunto;
- Fornire spunti di riflessione sulla situazione attuale e sulle prospettive future della CFD nell'ambito del CAE (Computer Aided Engineering) e più in generale della *prototipazione virtuale* (*virtual prototyping*)¹
- To outline the possibility to integrate and/or to embed CFD models into the Digital Twin (DT) concept.

¹da Wikipedia: *Virtual prototyping is a technique in the process of product development. It involves using computer-aided design (CAD), computer-automated design (CAutoD) and computer-aided engineering (CAE) software to validate a design before committing to making a physical prototype. This is done by creating (using 3D) computer generated geometrical shapes (parts) and either combining them into an "assembly" and testing different mechanical motions, fit and function or just aesthetically appeal. The assembly or individual parts could be opened in CAE software to simulate the behavior of the product in the real world.*

Obiettivi - cont.

Nello specifico, quali saranno le **competenze ed abilità acquisite a fine corso** ?

- Conoscere, con un buon livello di dettaglio, le tecniche di discretizzazione, spaziali e temporali, più utilizzate nei pacchetti *commerciali* (industriali) e *Open Source* di CFD;
- Riconoscere e saper giudicare la correttezza dell'impostazione generale di una analisi CFD;
- Conoscere il tipico flusso di lavoro di un moderno package di CFD;
- Saper utilizzare, seppure per problemi di non elevata complessità geometrica e fisica - oltretutto computazionale - un moderno pacchetto *commerciale* ed in parte anche *Open Source* - di CFD;
- Essere in grado di affrontare e risolvere problemi termofluidodinamici di bassa/media difficoltà tramite strumenti CFD (ANSYS Fluent e ANSYS CFX);
- Saper utilizzare, in problemi di ridotta complessità geometrica, un *meshatore* commerciale (ANSYS Mesh e/o ANSYS ICEM CFD);
- Saper utilizzare MATLAB, ed il PDEToolbox (Partial Differential Equation Toolbox), per sviluppare script/functions che implementano quanto appreso a lezione.

- Studenti dei corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria:
 - ▶ **Meccanica;**
 - ▶ Navale;
 - ▶ Di Processo e dei Materiali;
 - ▶ Dell'Energia Elettrica e dei Sistemi;
 - ▶ Altri corsi...
- Studenti dei corsi di Laurea Magistrale in Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali:
 - ▶ Fisica
 - ▶ Matematica
 - ▶ Data Science and Scientific Computing
- Studenti di corsi di Dottorato di Ingegneria Industriale – **ma NON è un corso specifico per Dottorandi!**



Competenze necessarie

- Corsi fondamentali:
 - ▶ *V.O.*: Analisi I e II, Fisica Generale I, Fisica Tecnica, Fluidodinamica o Idraulica (consigliato);
 - ▶ *L.T.* + corso base Termodinamica e Trasmissione del calore (Fisica Tecnica I o Fisica Tecnica) e Fluidodinamica o Idraulica (consigliato) ;
- Competenze di calcolo numerico, programmazione, strumenti informatici:
 - ▶ Fondamenti di *Analisi Numerica*: molto utile ma non indispensabile.
 - ▶ Qualunque linguaggio, preferibilmente *MATLAB*[®], *Python* o *Julia*: estremamente utile, sebbene non strettamente indispensabile. L'uso di linguaggi compilati (*C*, *C++*, *Fortran*) possibile ma sconsigliato.
 - ▶ Strumenti informatici (*L^AT_EX*, programmi di grafica vettoriale etc.): utili ma non indispensabili.
 - ▶ Conoscenza di sistemi CAD 3D e fondamenti di modellazione solida: utile ma non indispensabile.



Course contents - summary

- Introduction to Computational Fluid Dynamics - CFD and Numerical Heat Transfer - NHT - Overview
 - ▶ Whats is CFD?
 - ▶ Applications of CFD
 - ▶ Applications and (present) limitations of CFD
- Historical notes
- Examples of application
- Introduction to conservation laws:
 - ▶ Mass, energy and momentum conservation equations;
 - ▶ Solution in terms of primitive variables and stream function-vorticity;
 - ▶ Algorithms for incompressible flows.
- *Dimensional Analysis and Similitude*²;

²Independent learning - flipping class



Course contents - summary- cont.

- Numerical methods for CFD and NHT:
 - ▶ Components of CFD: mathematical model, domain, grid et.
 - ▶ Properties of numerical methods
 - ▶ Stability
 - ▶ Discrete approaches: Finite Difference (FD), Finite Volume (FV), Finite Element (FE), some notes on other methods
- Fundamentals of Finite Difference method (FD);
- The Finite Volume method (FV) for incompressible flows:
 - ▶ Cartesian/structured grids
 - ▶ Unstructured grids
- The Finite Element method (FE) for incompressible flows;
- Turbulence and its models:
 - ▶ DNS - Direct Numerical Simulation
 - ▶ LES - Large Eddy Simulation
 - ▶ RANS - Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations
 - ▶ DES/DDES ((Delayed) Detached Eddy simulation) - few notes
- Verification & Validation (V & V);
- Accuracy and convergence.



- 1 G. Comini, G. Croce, E. Nobile, **FONDAMENTI DI TERMOFLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE**, SGEEditoriali, 4° Edizione, Padova, 2014. **Ora non più disponibile**, verranno fornite copie digitali dei capitoli d'interesse.
- 2 Note, lucidi, e testi esercitazioni distribuiti in formato elettronico su **MOODLE FEDERATO 005MI - TERMOFLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE 2023**
- 3 Ampia disponibilità di testi e articoli per approfondimenti presso l'Area biblioteche di scienze, tecnologie e scienze della vita (Via Valerio 10, Edificio C1, primo piano).



Qualche pagina dal testo

3.6. MAPPATURA DEGLI ELEMENTI

Figura 3.13: Regole per garantire la biunivocità della mappatura: (a) elementi monodimensionali parabolici a tre nodi; (b) elementi bilineari a quattro nodi; (c) elementi bidimensionali parabolici a otto nodi; (d) elementi bidimensionali parabolici a nove nodi.

che si riducono alla prima delle (3.91) se il punto appartiene a un dominio monodimensionale parallelo all'asse x . In questo caso, le derivate cartesiane delle funzioni di forma di un elemento isoparametrico monodimensionale possono essere ricavate ricordando che

$$N_i^x(\xi) = N_i^x[x(\xi)] \quad (3.92)$$

e applicando le regole di derivazione delle funzioni di funzione

$$\frac{dN_i^x}{d\xi} = \frac{dN_i^x}{dx} \frac{dx}{d\xi} \quad (3.93)$$

Quindi si ottiene

$$\frac{dN_i^x}{dx} = \left(\frac{dx}{d\xi}\right)^{-1} \frac{dN_i^x}{d\xi} \quad (3.94)$$

165

4. LA TURBOLENZA E I SUOI MODELLI

Figura 4.11: DNS del moto in canale piano per $Re_\tau = 5200$: distribuzione istantanea della velocità lungo x su una sezione longitudinale del piano xy del condotto. Zoom successivi consentono di apprezzare il livello di dettaglio dei risultati. Adattato da (Lee et al., 2013).

lungo x , 7680 nodi di Fourier lungo z e 1536 nodi di interpolazione lungo y . Per ragioni che gli specialisti di metodi spettrali chiamano *de-aliasing*, il numero di punti di collocazione, o quadratura, nelle direzioni omogenee x e z deve essere pari a $3/2$ volte il numero di modi di Fourier risolti, per cui i *gradi di libertà* DOF (ovvero *Degrees Of Freedom*) corrispondenti alla griglia sopracitata sono: $N_x = 15360$, $N_y = 1536$ e $N_z = 11520$, per un totale $N_{tot} = N_x N_y N_z \approx 240 \cdot 10^9$ DOF. Questo numero supera di 15 volte quello relativo alla precedente più spinta DNS in canali piani, condotta da Hoyas e Jiménez (2006) per $Re_\tau \approx 2000$. Ciò nonostante, la risoluzione spaziale non soddisfa, a rigore, i requisiti discussi in precedenza: infatti, per $Re_\tau = 5200$, $N_x = 24$ e $N_z = 16$, l'Eq. (4.32) dà $N_x \geq 3.4 \cdot 10^2$, molto maggiore dei presenti $240 \cdot 10^9$ DOF pur tenendo conto della grande accuratezza intrinseca dei metodi spettrali.

Per quel che riguarda il tempo, la simulazione di Lee et al. (2013) ha incluso 13 *flow-through times* (tempi di attraversamento) del condotto da parte del fluido, molto prossimi ai *LETOT* nella configurazione studiata), ciascuno risolto da $50 \cdot 10^3$ passi temporali, per un totale di $650 \cdot 10^3$ passi. Anche la durata della simulazione è inferiore a quella (20 *LETOT*) usualmente ritenuta necessaria per la convergenza statistica dei risultati, ma questo è in parte compensato dalle dimensioni del dominio di calcolo, più ampie di quelle ipotizzate nel paragrafo precedente.

I risultati della simulazione sono illustrati nella Fig. 4.11 dove la distribuzione istantanea della velocità lungo x è riportata su una sezione longitudinale sul piano xy dell'intero condotto insieme con ingrandimenti successivi di alcuni particolari che consentono di apprezzare il livello di dettaglio dei risultati.

La simulazione è stata condotta utilizzando oltre $500 \cdot 10^3$ dei $760 \cdot 10^3$ core del supercomputer Mira degli Argonne National Laboratories di Chicago, che offre velocità di picco di circa 10 Pfllops. La velocità effettiva di calcolo è stata molto più bassa,

218

Alcune pagine dal testo **FONDAMENTI DI TERMOFLUIDODINAMICA COMPUTAZIONALE, 4a Ed.**



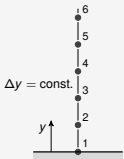
Esempi di slides

The Finite Difference Method, E. Nobile | Methods for obtaining Finite Difference equations | Polynomial fitting | Estimation of one-sided boundary derivative

Estimation of the heat flux at the wall - cont.

Example 1

Assume that the temperature distribution near the boundary is again a 2nd degree polynomial of the form $T = a + by + cy^2$, then, referring to the following figure, we note that $(\partial T / \partial y)_{y=0} = b$.



Furthermore, for $\Delta y = \text{const.}$, we can write:

$$T_1 = a$$
$$T_2 = a + b\Delta y + c(\Delta y)^2$$
$$T_3 = a + b(2\Delta y) + c(2\Delta y)^2$$

The resulting solutions for a , b , and c are:

$$a = T_1$$
$$b = \frac{-3T_1 + 4T_2 - T_3}{2\Delta y}$$
$$c = \frac{T_1 - 2T_2 + T_3}{2(\Delta y)^2}$$

This and other algebraic problems have been solved by the MATLAB[®] Symbolic toolbox.

6 marzo 2017 56 / 64

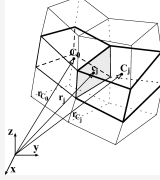
COMPUTATIONAL FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER - F.V.M. E. Nobile | GRIGLIE NON STRUTTURATE | Distribuzione spaziale delle variabili

Distribuzione spaziale delle variabili - 2

Formulazione simmetrica - CDS

$$\phi_j = \frac{1}{2} (\phi_{C_0} + \phi_{C_j}) + \frac{1}{2} \left[(\nabla \phi)_{C_0} \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_{C_0}) + (\nabla \phi)_{C_j} \cdot (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_{C_j}) \right]$$

dove il pedice j indica la faccia compresa fra i VC C_0 e C_j , adiacenti a tale faccia.



20 gennaio 2019 138 / 175

Esempi di slides usate a lezione e disponibili on-line.



Modalità di comunicazione

- Da alcuni anni, per segnalare gli aggiornamenti al materiale didattico on-line, possibili variazioni di aule, prossimi seminari ed altre comunicazioni, si utilizza *esclusivamente* il *Forum* del corso su *MOODLE*.
- Resta garantita la possibilità, da parte degli studenti, di contattare direttamente il docente via mail.



Esercitazioni - caratteristiche e finalità

- Le esercitazioni consisteranno nella soluzione passo passo, con il supporto dei docenti, di alcuni problemi, dai più semplici sino a casi di interesse applicativo-industriale, che illustreranno compiutamente le modalità di utilizzo di un pacchetto commerciale (industriale) di CFD.
- I problemi verranno selezionati, sulla base delle esigenze, fra i seguenti:
 - 1 Calcolo dello scambio termico da un'aletta (MATLAB)
 - 2 Calcolo di ponti termici secondo *EN ISO 10211: Thermal bridges in building construction* (MATLAB/PDEToolbox/Fluent)
 - 3 Flusso turbolento in un gomito a 90° (CFX/Fluent)
 - 4 Flusso laminare e turbolento attorno ad un cilindro (CFX - Fluent)
 - 5 Prediction of the thermal performance of a microchannel heat sink (Fluent)
 - 6 Flusso multifase di una colonna d'acqua - *breaking dam* (CFX)
 - 7 Analisi di una semplice pompa centrifuga (CFX)
 - 8 External aerodynamics over Ahmed's body (Fluent)
 - 9 Gallium melting in a rectangular cavity heated from the side (Fluent)
 - 10 Meshing of a static mixer (Fluent).
- Lo scopo è quello di consentire allo studente di familiarizzare con moderni strumenti CFD rivolti alle applicazioni CAE e, più in generale, ad una molteplicità di problemi termofluidodinamici.



Esercitazioni - modalità

- Il pacchetto commerciale scelto è *ANSYS CFD*[®], costituito da due solvers *general purpose* distinti:
 - 1 *ANSYS CFX*[®]: ragioni storiche; focalizzato sulle turbomacchine.
 - 2 *ANSYS Fluent*[®]: general-purpose; maggiormente sviluppato.
- Passaggio, per l'Anno Accademico 2023-24, alla release ANSYS 2024 R1 (o ANSYS 2023 R2), al fine di eliminare e/o ridurre eventuali problemi di compatibilità con i sistemi operativi più recenti, schede grafiche ad alte prestazioni etc.
- Dal 17 agosto 2015 l'*ANSYS*[®] Student Portal non è più disponibile (v. seguenti), ma è disponibile *Ansys for Students* (<https://www.ansys.com/academic/students>).
- Le griglie (mesh) ibride e/o strutturate necessarie per l'esecuzione delle simulazioni saranno generate mediante i tool di meshatura commerciali ANSYS[®] Mesh o, nel caso, ANSYS-ICEM[®] CFD.
- Le esercitazioni verranno svolte in presenza, in opportuna aula dotata, oltre che di connessione WI-FI, anche di prese elettriche per i laptop degli studenti:
 - ▶ Resta garantita la possibilità di fruizione delle lezioni e delle esercitazioni on-line per gli studenti che ne abbiano diritto.
 - ▶ Le lezioni e le esercitazioni verranno registrate sulla piattaforma Microsoft Teams.



- Per consentire l'utilizzo del pacchetto in luoghi ed orari diversi, gli studenti che dispongono di un proprio Laptop - Windows, Linux o Mac - potranno installare il prodotto sulla loro macchina, con l'evidente vantaggio di poterlo utilizzare in biblioteca, a casa, *al mare* etc.
- Per poter utilizzare il programma a casa, è necessario procedere all'installazione di una *Virtual Private Network* (VPN, [dettagliate istruzioni disponibili](#)), per poter accedere ai *Servers di Licenza*:
 - ▶ Numero *limitato* – 100 – di licenze *ANSYS Academic Multiphysics Campus Solution* (da Da Novembre 2022) disponibili;
 - ▶ Licenze limitate a 4-16 core.
- Non è strettamente necessario utilizzare un Laptop per ogni studente durante le esercitazioni se queste verranno svolte in presenza: è sufficiente disporre di un Laptop ogni 2-3 studenti.



ANSYS® Student

- Contemporaneamente alla dismissione dell'ANSYS® Student Portal, i prodotti ANSYS® (con alcune limitazioni), sono stati resi disponibili gratuitamente (*free of charge*) agli studenti.
- Oltre a ciò, ANSYS® fornisce agli studenti l'accesso a materiale per l'autoapprendimento all'indirizzo <https://www.ansys.com/academic>, che include:
 - 1 Guide e video per l'installazione e configurazione dei prodotti.
 - 2 FAQ (PDF download).
 - 3 Video a livello introduttivo sulle modalità di simulazione e video "how to".
 - 4 Link a siti accademici che rendono disponibili materiali curricolari e tutorials.
- **Attenzione:** I prodotti ANSYS® student ottenuti con tali modalità NON possono essere usati in classe, e nemmeno per lo svolgimento delle attività previste dal corso, per le quali è viceversa necessario utilizzare le licenze didattiche indicate dal docente.
- **Nota:** La licenza ANSYS Student è inoltre caratterizzata da limitazioni - moduli disponibili, n.ro max celle/elementi et. - non presenti per la licenza Campus disponibile in Ateneo.



- Elaborato finale (*Student project* o *tesina*);
- Analisi completa e, in generale, validazione, attraverso il pacchetto ANSYS® CFD (preferibilmente Fluent o, per casi specifici, CFX) più eventualmente ANSYS ICEM CFD®, di un problema fluidodinamico:
 - ▶ Il problema scelto, nell'interesse dello studente, va concordato con il docente;
 - ▶ La scelta del problema da analizzare potrà anche venir suggerita da altri docenti, ma andrà in ogni caso concordata con il docente;
 - ▶ Il problema può essere proposto dallo studente o, in alternativa (Novità), dal docente;
 - ▶ Nel caso il problema venga scelto dallo studente, si suggerisce di individuare uno o (meglio) più problemi, in modo da agevolare la selezione da parte del docente (v. avanti).
- In alternativa sviluppo *autonomo*, attraverso un linguaggio per prototipazione rapida (MATLAB®, Python, Julia, etc.) o generico, di un codice/applicazione rivolta ad un problema specifico.



Elaborato finale: tipologia del problema

In generale, a meno di diversi accordi con il docente, l'obiettivo dello *Student project* è quello di condurre una *validazione* del modello numerico proposto attraverso il confronto con risultati sperimentali riportati da altri autori.

Per tale finalità il problema va scelto in base alle seguenti osservazioni:

- Individuare casi/problemi per i quali siano disponibili accurati rilievi sperimentali e, se disponibili, risultati di calcoli di altri autori, al fine di procedere al confronto critico fra risultati CFD e misure sperimentali e, se possibile, fra risultati CFD attuali e risultati CFD di altri autori;
- Preferire, in generale, dati sperimentali e scartare risultati *solo* numerici, in modo da privilegiare il confronto CFD-sperimentale rispetto a quello CFD-CFD o CFD-analitico;
- Privilegiare la disponibilità di dati puntuali oltre alle grandezze globali (es. disponibilità di profili di velocità oltre al *drag coefficient*; valori e profili di temperatura oltre al numero di *Nusselt* medio, etc.);
- Scegliere opportunamente la fonte (rivista ISI, report di Istituzione qualificata, etc.), scartare i cosiddetti *predatory journals* v. più avanti;
- Scartare problemi di elevata complessità geometrica (preparazione e riparazione dei file CAD, difficoltà nella meshatura etc.) che in generale richiedono più tempo per la messa a punto;
- Non trascurare la letteratura più *datata*: geometrie più semplici, talvolta maggior cura ed affidabilità dei dati etc.



Elaborato finale: scelta del problema I

Un elenco (non esaustivo) di fonti per la scelta del problema per lo *Student project*:

Link	Commenti
https://turbmodels.larc.nasa.gov/	<ul style="list-style-type: none">● Documentazione relativa a modelli di turbolenza tipo RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes).● Per la validazione v. <i>Turbulence Model Validation Cases and Grids</i>.
https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/archive.html	<ul style="list-style-type: none">● NASA NPARC Alliance Verification and Validation Archive.● Perlopiù comprimibile.
http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/doku.php	<ul style="list-style-type: none">● ERCOFTAC <i>Classic Collection Database</i>.● Possibilità di ricerca in base alla tipologia di flusso.
http://www.rpmturbo.com/testcases/index.html	<ul style="list-style-type: none">● RPMTurbo is an engineering consultancy firm.● List of test cases for unsteady flow in turbomachinery. Steady-flow solutions are included.



Elaborato finale: scelta del problema II

Link	Commenti
https://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm	<ul style="list-style-type: none">● Guidebook for CFD Predictions of Urban Wind Environment.● Casi di interesse per l'Ingegneria Civile.
https://thtlab.jp/DNS/dns_database.html	<ul style="list-style-type: none">● Turbulence and Heat Transfer Laboratory (THTLAB), University of Tokyo.● DNS Database of Turbulence and Heat Transfer for simple (fundamental) geometries.
https://www.sciencedirect.com/	<ul style="list-style-type: none">● Piattaforma <i>Elsevier</i> che include numerose riviste di Ingegneria e di CFD, es. <i>Computers & Fluids</i>, <i>Exp. Thermal and Fluid Science</i>, <i>Int. J. Heat and Mass Transfer</i>, etc.● Accesso attraverso la rete Universitaria o via VPN. Alcuni articoli <i>Open Access</i>.



[Link](#) [Commenti](#)



Elaborato finale: modalità

- Regole e suggerimenti per l'elaborato finale distribuito in classe, e disponibile in rete (aggiornato - quasi - ogni AA);
- Lo *Student project* va svolto in gruppi di 2-3 (Max 4) studenti:
 - ▶ La possibilità di svolgere lo Student project da soli è possibile solo in casi eccezionali e va concordata con il docente.
- Va inviato, in formato *PDF*, **almeno dieci giorni prima della prova orale**, e va consegnata una copia cartacea (solamente una volta) in tale occasione:
 - ▶ Possibilità di una revisione da parte del docente, e rinvio di una versione corretta/modificata, se invio fatto con adeguato anticipo.
 - ▶ La sua valutazione - positiva o negativa - costituisce parte integrante del voto d'esame;
 - ▶ Disponibilità a un (molto limitato) supporto nella messa a punto del modello numerico/matematico;
 - ▶ Disponibile un esempio di *Student Project* preparato dai docenti.
 - ▶ Disponibile un *template* \LaTeX .

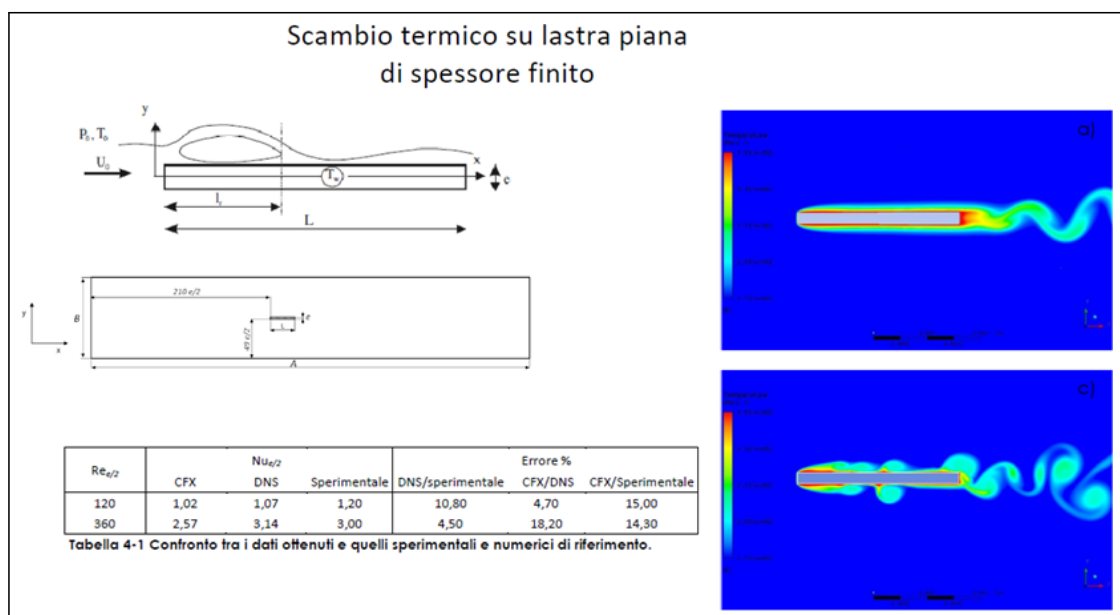


- Dimostrare capacità di affrontare un problema in forma autonoma, utilizzando metodologie di simulazione avanzata;
- Sviluppare capacità di lavorare *in team*;
- Sviluppare capacità di *problem solving*;
- Verificare *hands-on* potenzialità e limiti della CFD;
- Apprendere una metodologia il più possibile rigorosa per l'uso di tecniche CFD, ma di validità generale per altre applicazioni CAE (Computer Aided Engineering), ad esempio analisi strutturali, statiche e dinamiche, resistenza a fatica, calcolo elettromagnetico etc.



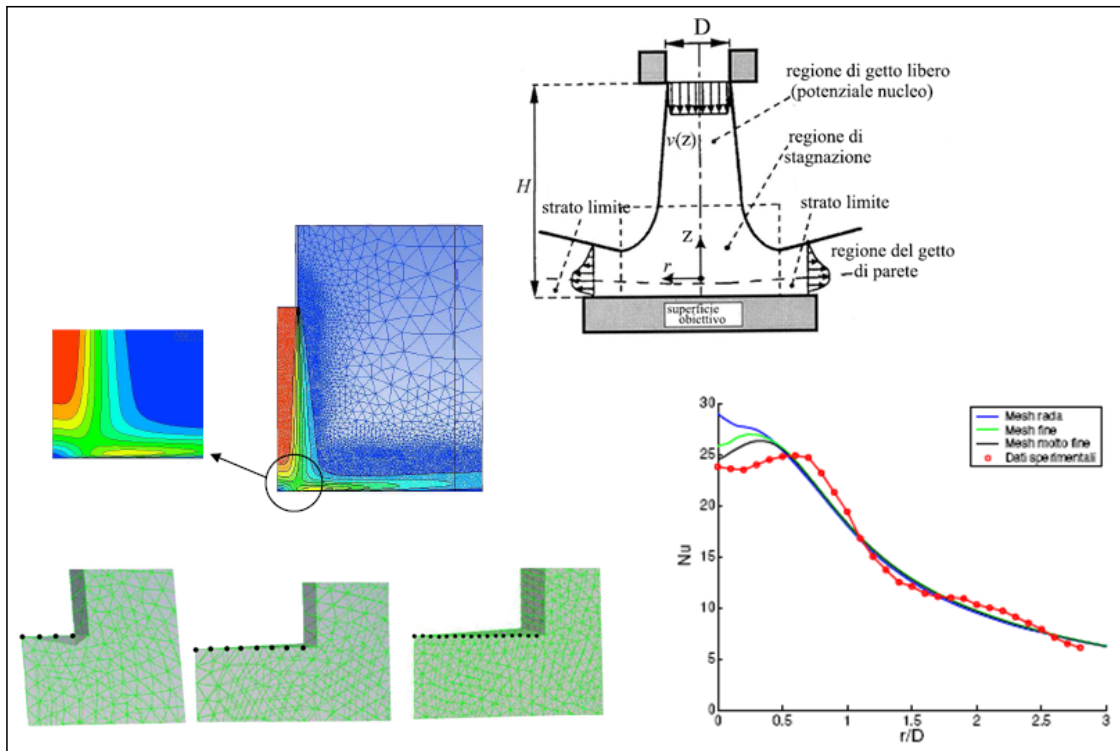
Scambio termico su una lastra piana di lunghezza e spessore finiti

D. Vatta – AA. 2007-08



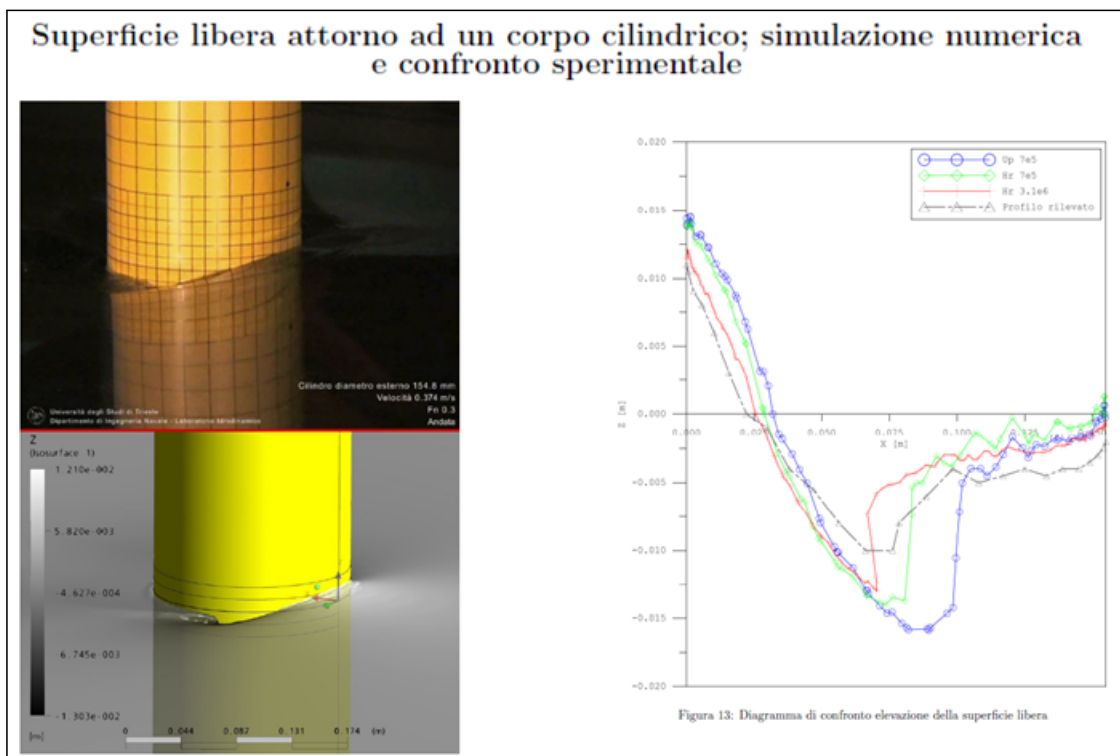
Scambio termico con un getto impingente

C. Curti, K. Meneguz – AA. 2005-06



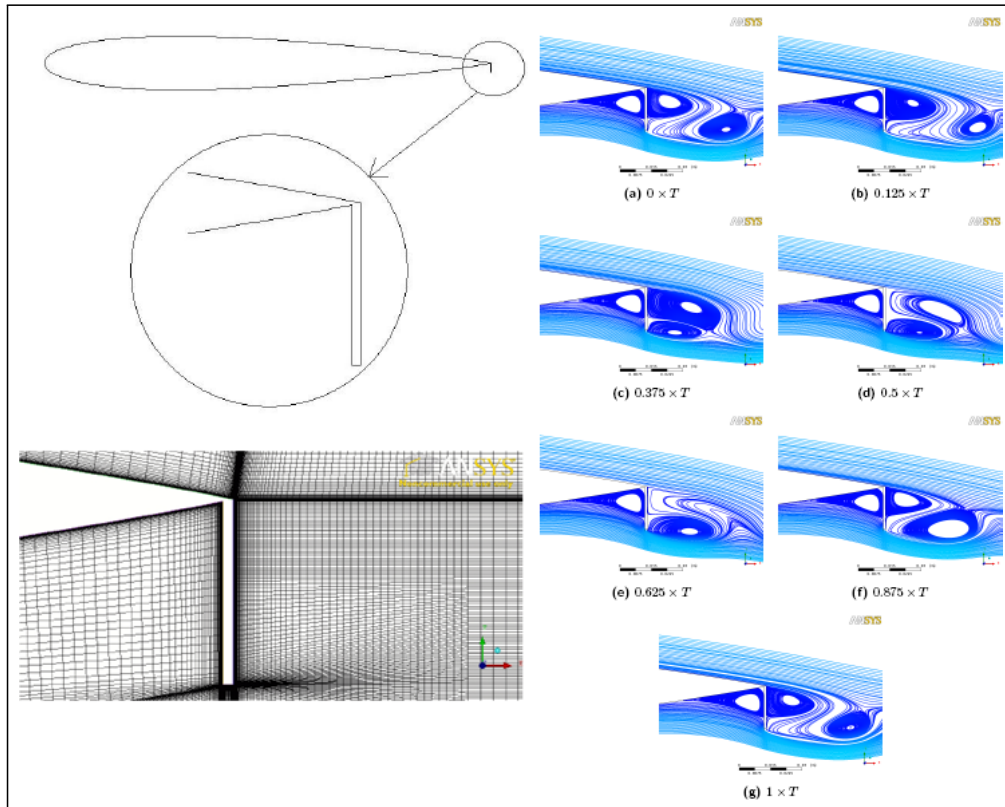
Superficie libera attorno ad un cilindro

L. Ceolin, F. Fucile, D. H. Genuzio, M. Sidari – AA. 2005-06



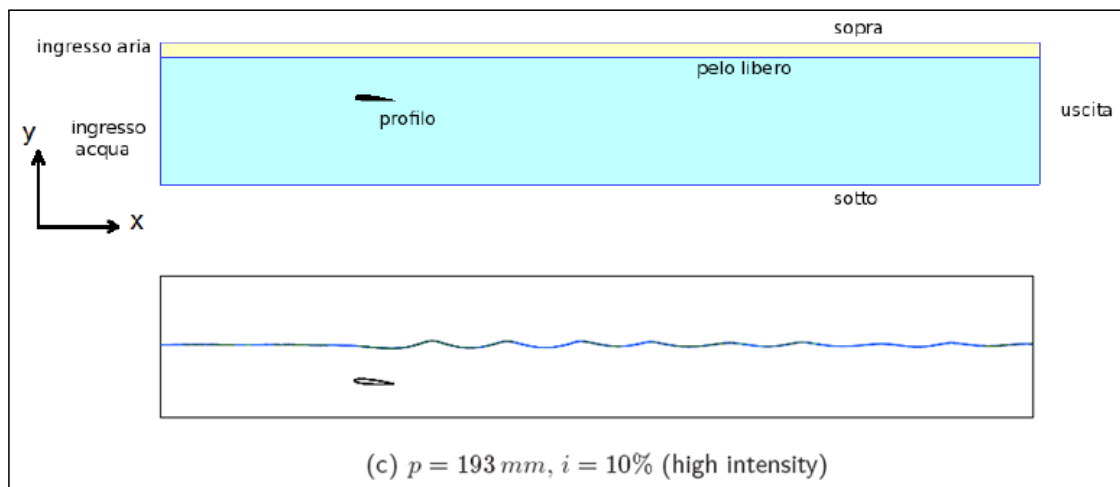
Gurney flap

M. Almerigogna, A. Scheri – AA. 2007-08



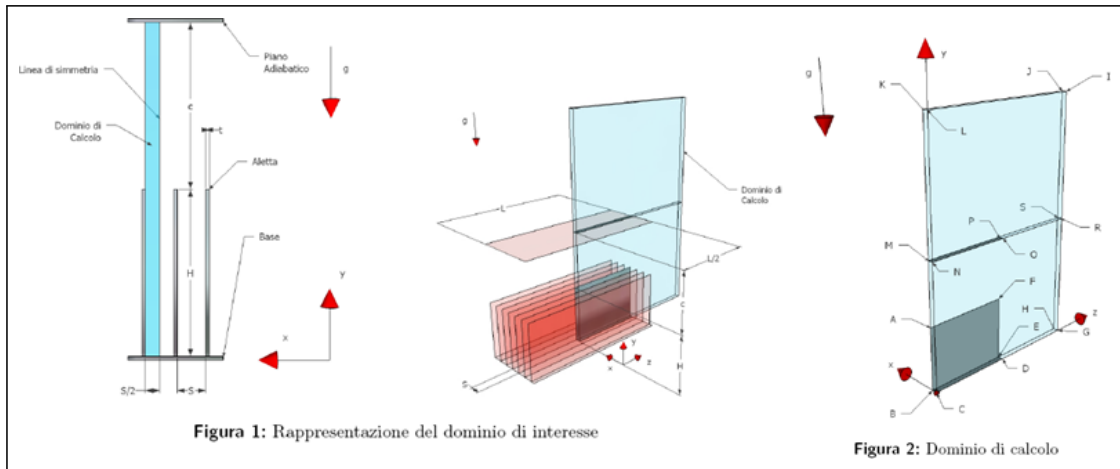
Hydrofoil

R. Boico, G. Stipcich – AA. 2009-10



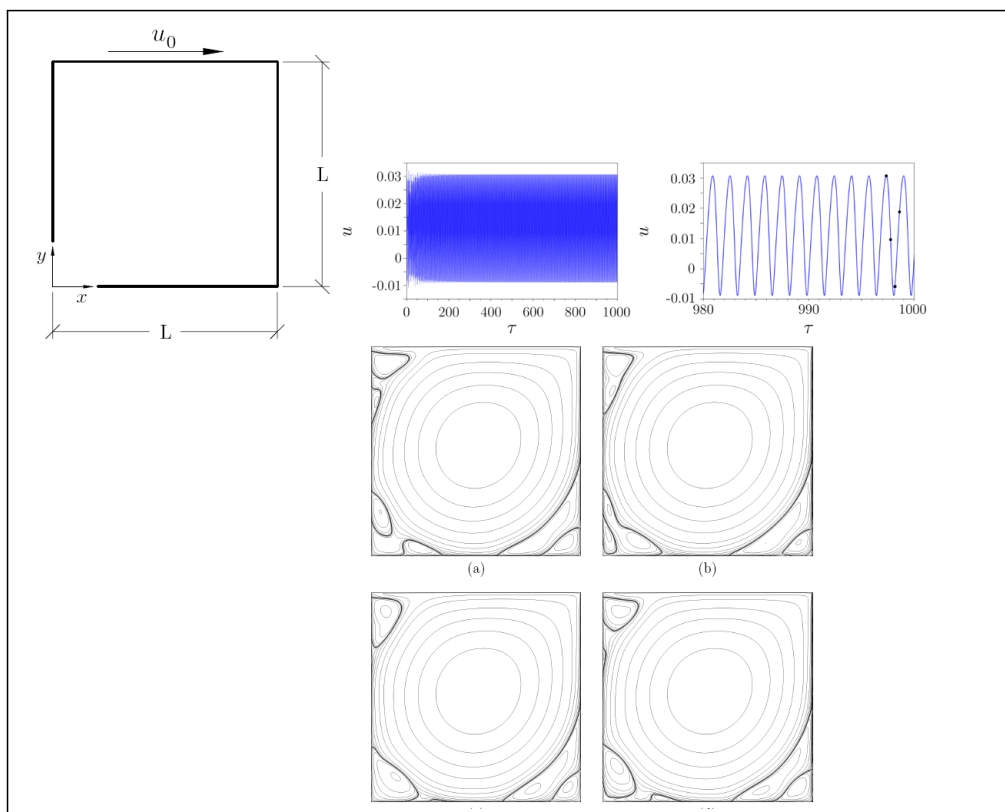
Semplificazione del dominio di calcolo

L. Mezzetti, G. Gustin, D. Rainone – AA. 2009-10



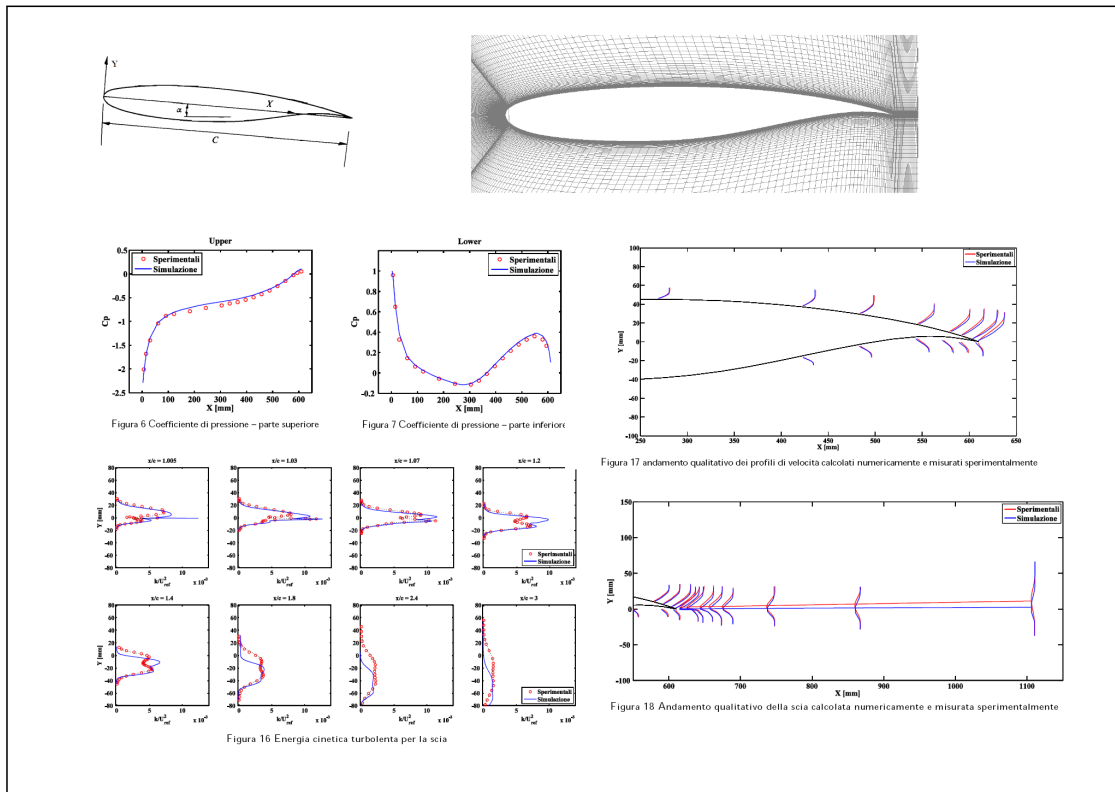
Lid driven cavity

E. Orlandini, R. Zamolo – AA. 2010-11



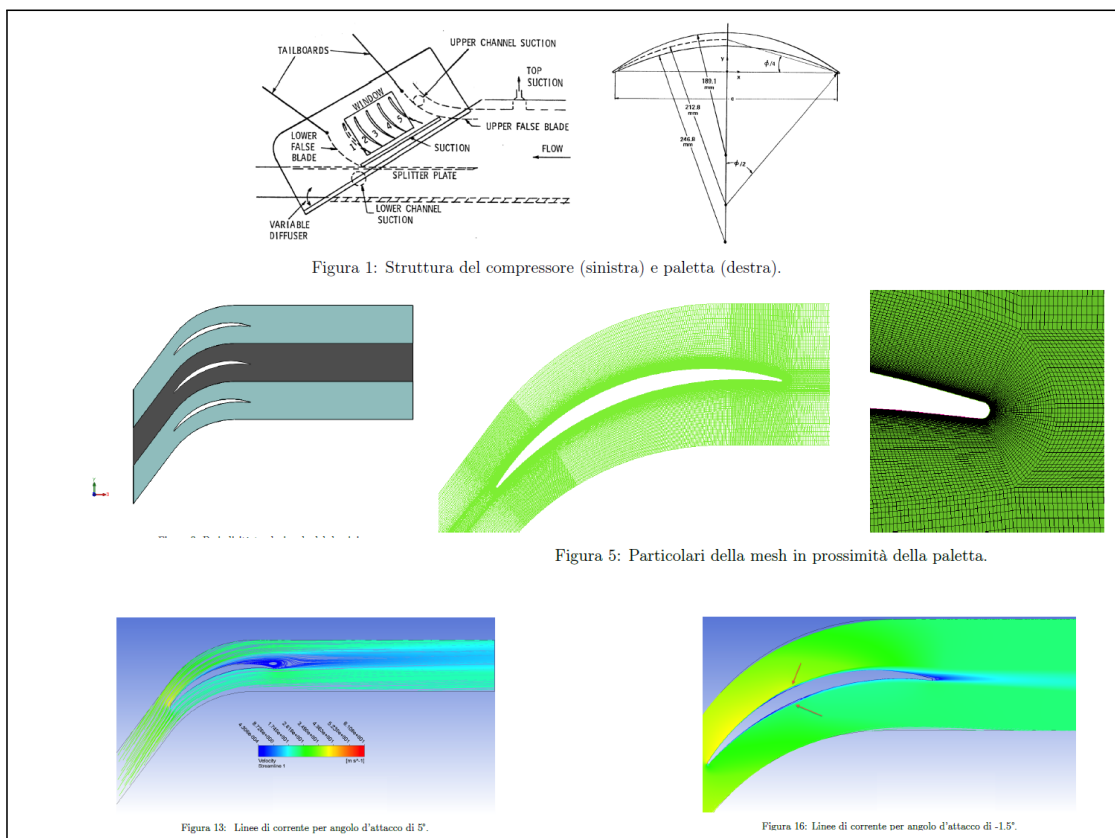
Flusso attorno ad un profilo alare non simmetrico

A. Paruta, M. Seriani, M. Turchetto – AA. 2011-12



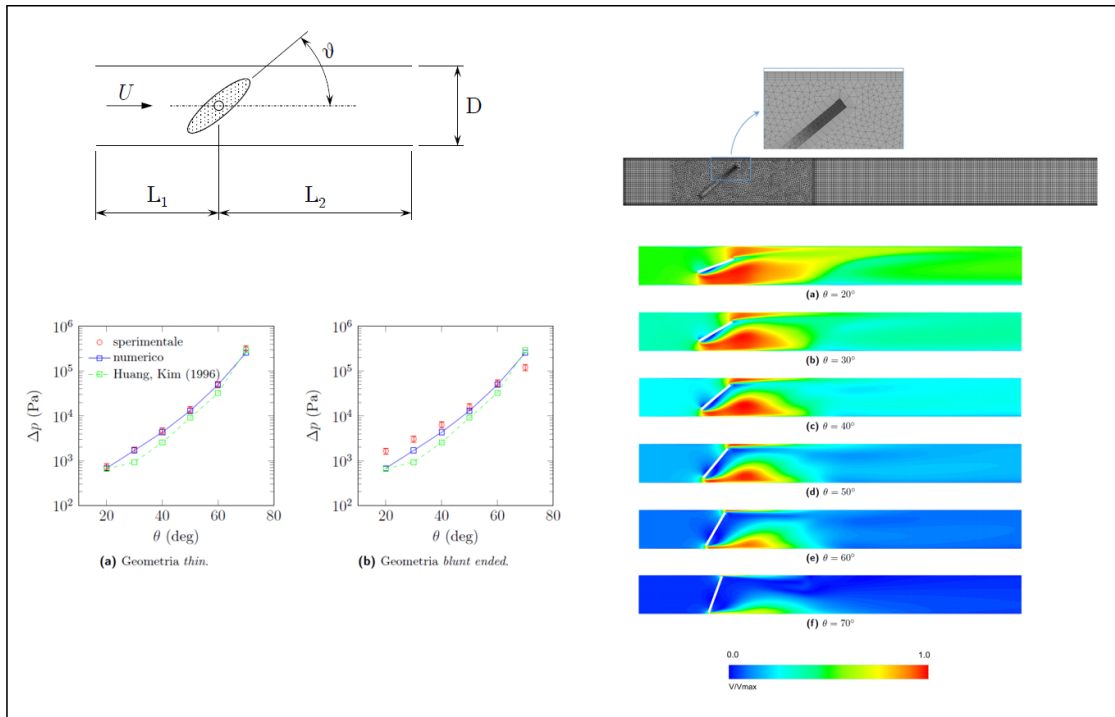
Flusso in regime transizionale in un compressore assiale

D. Battaia, A. Desenibus, P. Marocco – AA. 2011-12



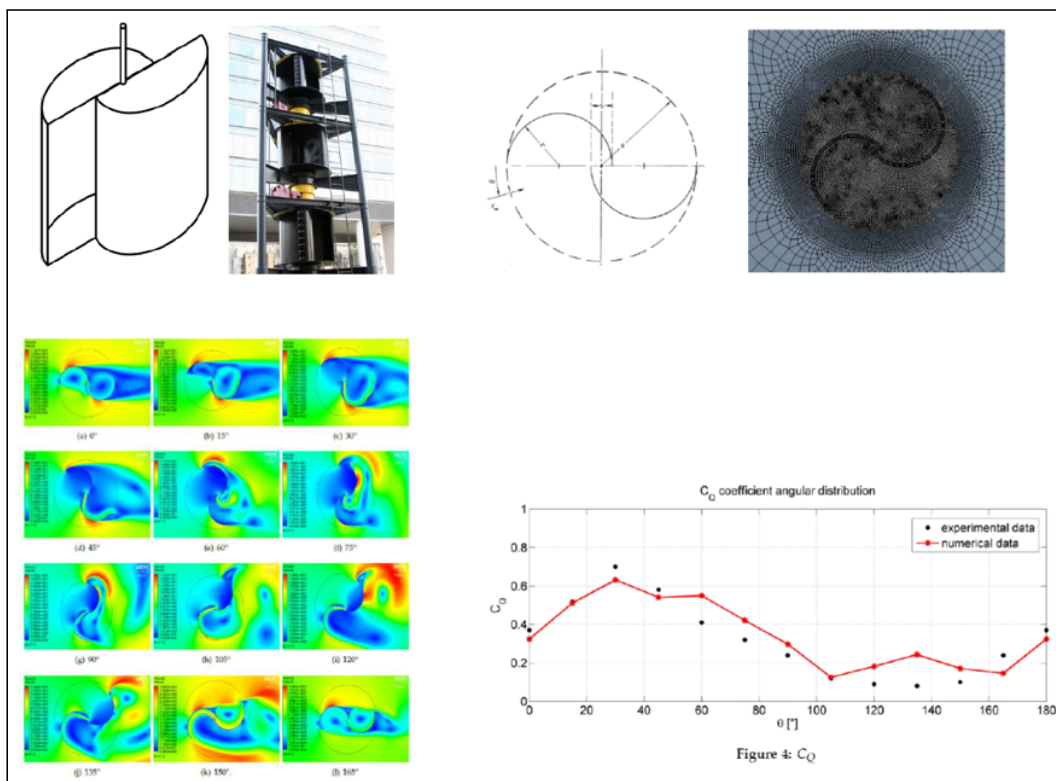
Flusso attraverso una valvola a farfalla

D. Buttignol, M. Macchi, J. Sossi – AA. 2014-15



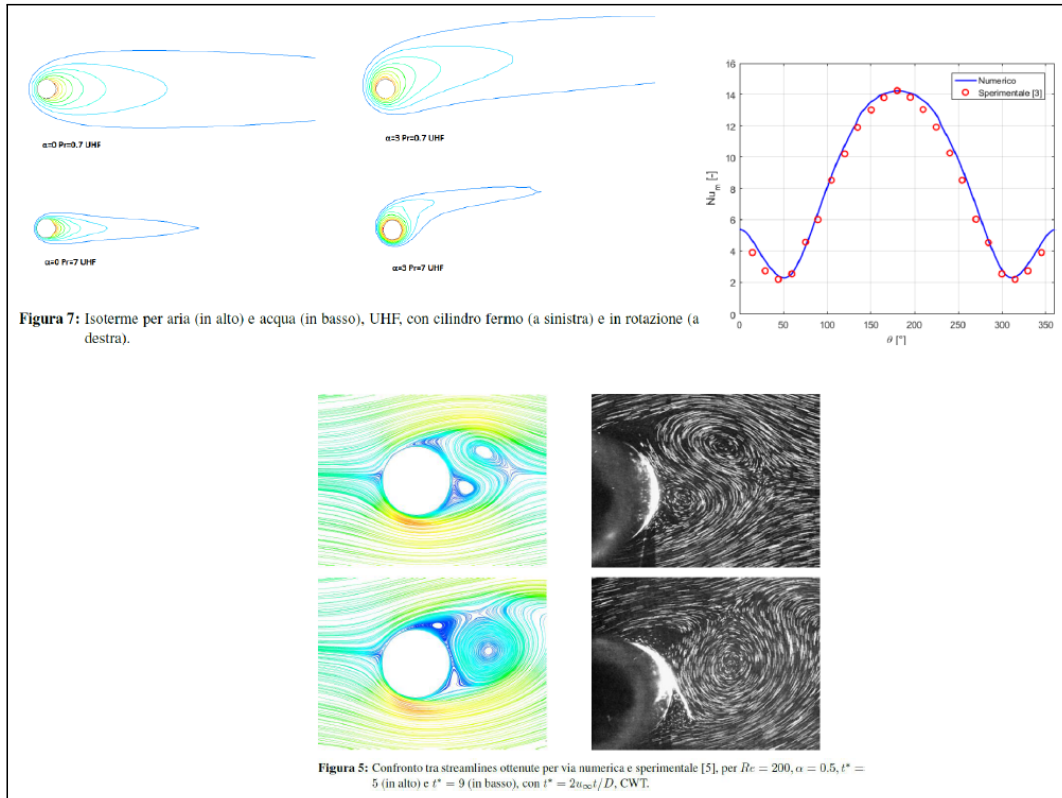
Savonius S wind turbine

L. Battaglia, A. Borzacchiello, G. Scrimali – AA. 2015-16



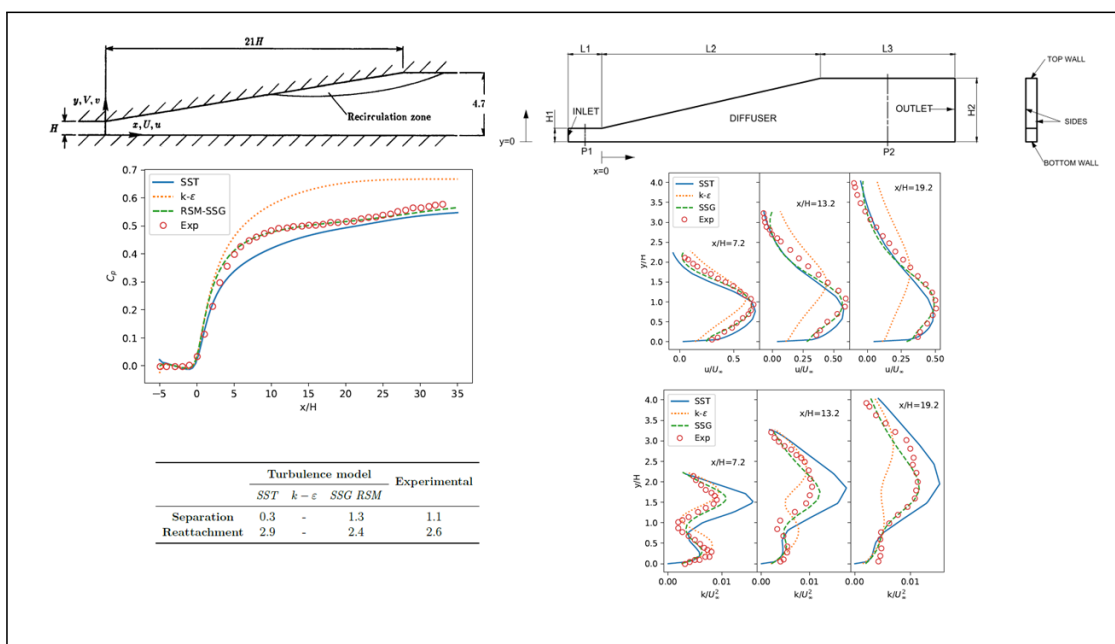
Scambio termico attorno a un cilindro rotante in regime laminare 2D

V. Daneluzzi, F. Furlan, G. Maggiore – AA. 2016-17



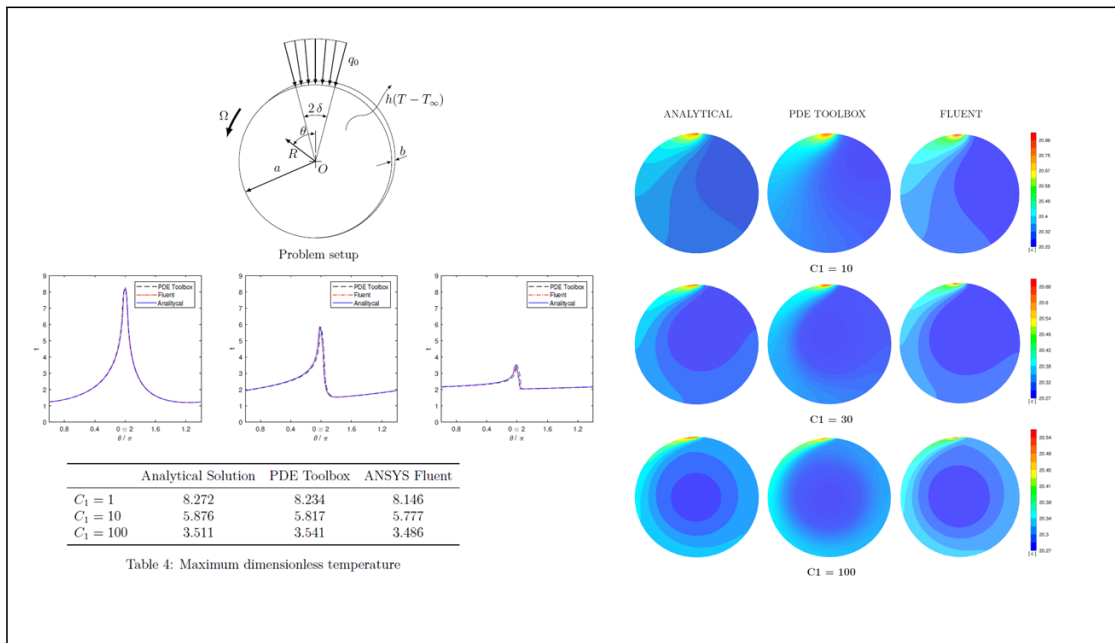
Flow in an asymmetric plane diffuser with different turbulence models

F. De Fazio, M. Ferrari – AA. 2017-18



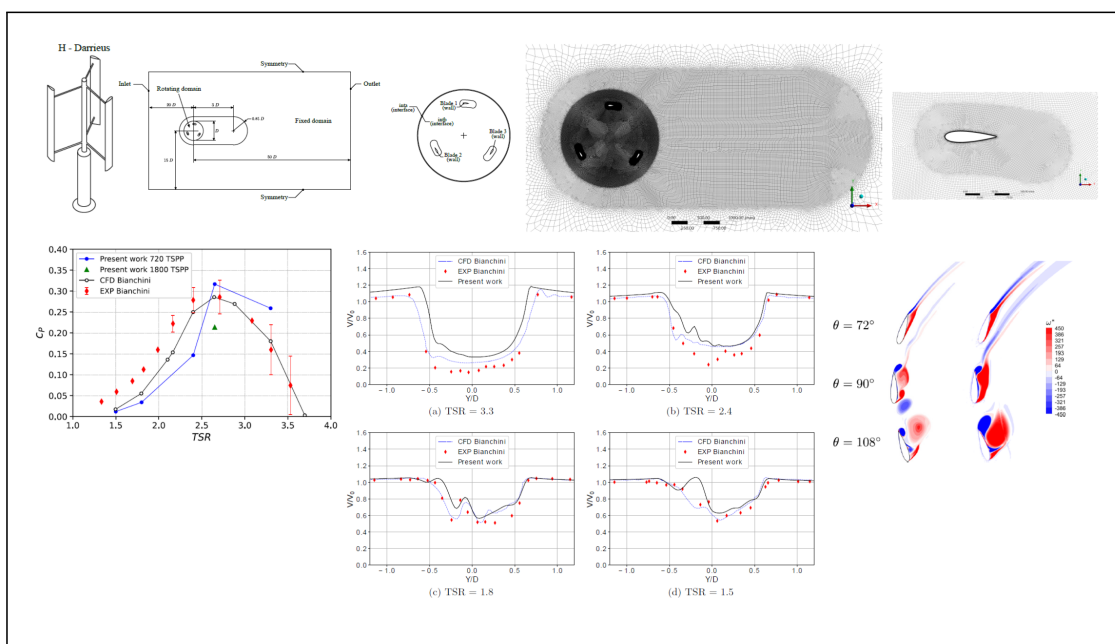
Temperature distribution in a thin rotating disk

L. Pizzol, F. Carlini – AA. 2018-19



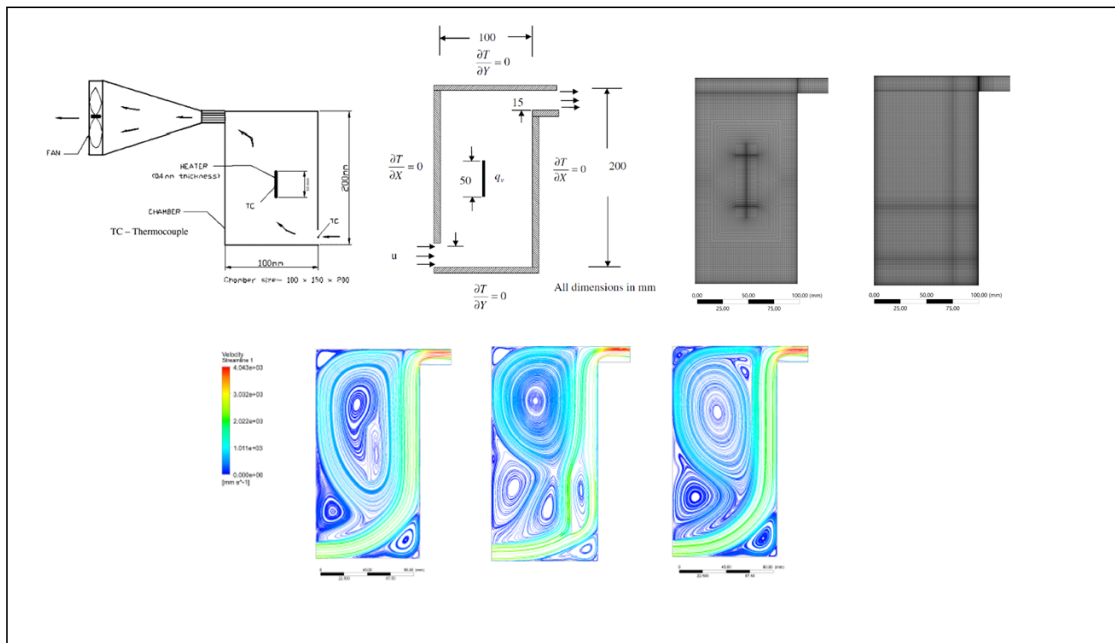
Analysis of a Vertical Axis Wind Turbine

D. Armenante, G. Canever, Riccardo Pavan – AA. 2018-19



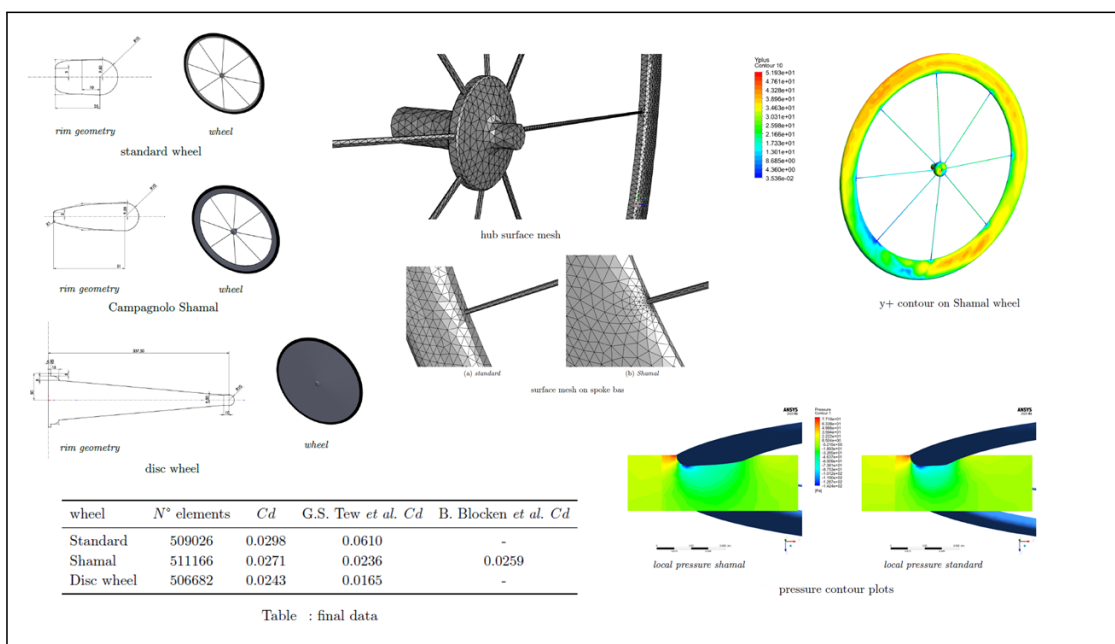
CFD analysis of a ventilated cavity with a heater

J. Pellizon, P. Reggente – AA. 2019-20



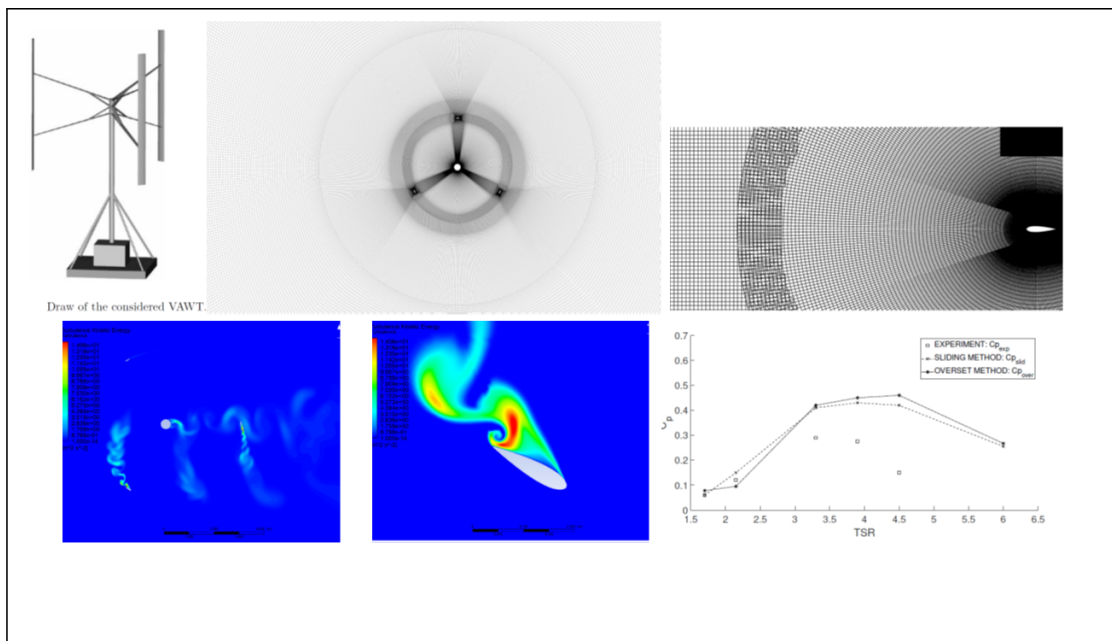
CFD Aerodynamic analysis of different racing cycle wheels

C. Barro Savonuzzi, C. Sanapo – AA 2019-20



SB-VAWT: Comparison between Sliding and Overset Meshing

F. Carletti, A. Carroni, D. Valente, G. Valentincic – AA 2021-22

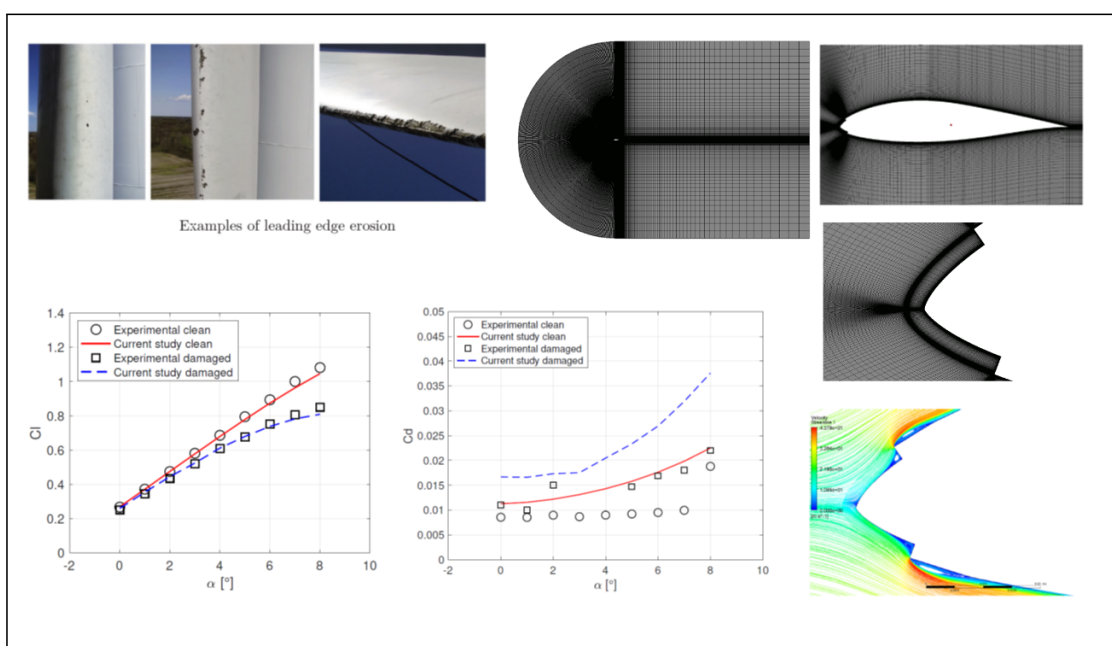


Ansys Fluent: Setting-Up an overset mesh method for a 2D VOWT



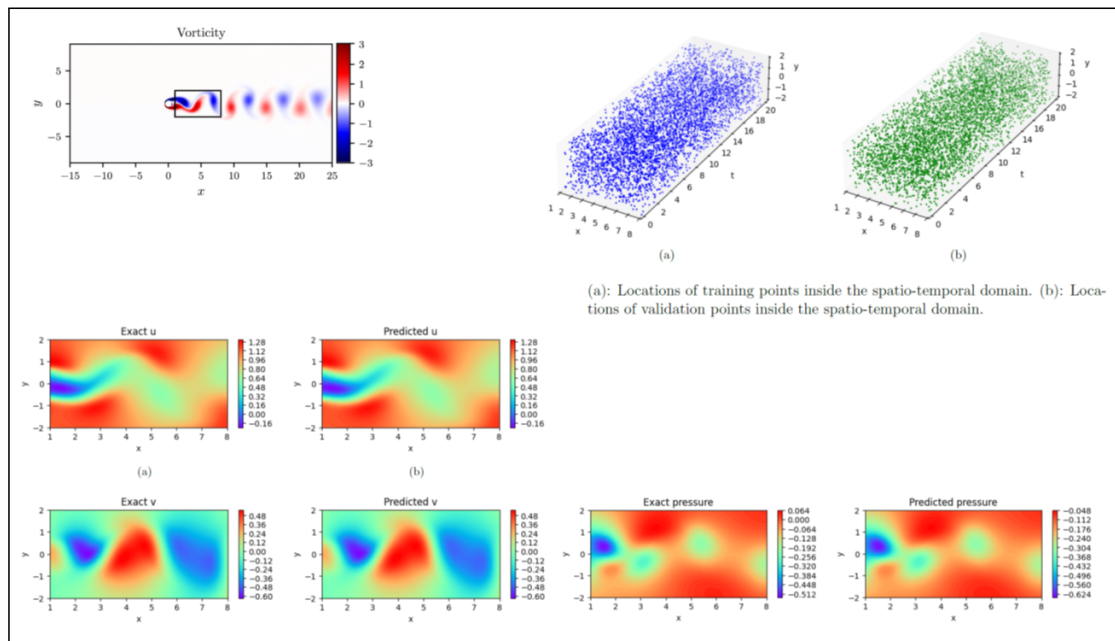
Analysis of Leading Edge Delamination of a DU 96-W-180 Airfoil

M. Accatino, J. Boschian, S. Cettolo – AA 2022-23



Physics-informed neural networks for solving Navier-Stokes equations: incompressible flow past a circular cylinder

C. Cicala, S. Sancin, A. E. Amodio – AA 2022-23



Esercizi (Homework): modalità

- Gli esercizi – **Homework** – verranno assegnati, di quando in quando, in forma scritta a lezione;
- Essi richiedono di utilizzare, per la soluzione dei problemi proposti, alcune delle metodologie viste a lezione;
- Lo studente dovrà sviluppare, autonomamente, alcuni semplici programmi (scripts) di calcolo, utilizzando un linguaggio a scelta:
 - ▶ Sugerito MATLAB (licenza Campus disponibile);
 - ▶ In alternativa Python o Julia;
 - ▶ Sconsigliati: FORTRAN, C/C++ ed in generale linguaggi compilati.
- A differenza dello Student project, **gli esercizi vanno svolti individualmente**;
- Una breve (max 8-10 pagine) relazione in forma scritta, riportante *solo i risultati in forma grafica e/o tabellare* ed eventuali osservazioni significative, va inviata (in PDF) al docente titolare **almeno una settimana prima della prova orale**:
 - ▶ Dall'AA 2011/12 non è più necessario portare la copia cartacea alla prova orale;
 - ▶ È facoltà del docente richiedere, prima e/o durante la prova orale, di esaminare i programmi sviluppati.



- Verificare la capacità di *applicare* le nozioni viste a lezione attraverso l'implementazione di singoli algoritmi;
- Aumentare le capacità di utilizzo non banale di software CFD commerciale e Open Source (user subroutines, scripting):
 - ▶ Implementazione di modelli ad-hoc, verticalizzazione, automazione.
- Acquisire dimestichezza con un linguaggio di programmazione (scripting):
 - ▶ Conoscere e saper applicare i fondamenti della programmazione (coding);
 - ▶ Problemi multifisici e/o di co-simulazione, per i quali sia necessario sviluppare procedure, tramite un linguaggio di scripting, per interfacciare i diversi programmi;
 - ▶ Problemi di analisi parametriche e/o ottimizzazione;
 - ▶ Post-processing e/o visualizzazioni specifiche.



Qualche esempio dagli esercizi AA 2009/10

Figura 1.4. CDS, Eulero implicito del secondo ordine

In cui i coefficienti sono i seguenti:

$$\begin{aligned} A_W &= -\rho C \\ A_T &= \frac{3}{2} \frac{\Delta x}{\Delta t} A_W \\ S_T &= \rho \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(2\phi^n - \frac{1}{2}\phi^{n+1} \right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

La presenza di diffusione numerica e diminuzione di ampiezza sono rilevanti (praticamente al pari dell'upwind del primo ordine).

1.6 SOUDS, Eulero implicito del secondo ordine

Utilizzando lo schema upwind del secondo ordine per la discretizzazione spaziale ed il metodo di Eulero implicito del secondo ordine si ottiene la seguente equazione algebrica per il volume di controllo:

$$\rho \left[\frac{3}{2\Delta x} \left(\phi^{n+1} - \frac{4}{3}\phi^n + \frac{1}{3}\phi^{n-1} \right) \Delta x \Delta y + \rho U \phi_x - \rho U \phi_w = 0 \right]$$

In cui

$$\begin{aligned} \phi_w &= \phi_T + \lambda_{L,T} w_T (\phi_T - \phi_T) \\ \phi_w &= \phi_T + \lambda_{L,T} w - w_T (\phi_T - \phi_T) \end{aligned}$$

dove $\lambda [W/(m \cdot K)]$ è la conduttività termica del materiale, $\theta [W/(m^2 \cdot K)]$ è il coefficiente di scambio termico, e T_w è la temperatura del fluido indisturbato. I risultati sono stati confrontati con la soluzione analitica approssimata, fornita.

Si è scelto lo schema alle differenze centrate del primo ordine (CDS) per la discretizzazione del termine diffusivo, mentre per la discretizzazione temporale sono stati implementati gli schemi di Eulero implicito del I e del II ordine. Per lo schema Eulero implicito del II ordine, nella fase di avvio si effettua una prima iterazione con Eulero implicito del I ordine.

La condizione al contorno viene imposta per mezzo di un nodo posizionato sul bordo stesso, e non attraverso la cosiddetta cella fantasma.

La figura 2 mostra il risultato adimensionale della simulazione con Eulero implicito del I ordine, ad un tempo finale di $\theta_{fin} = 0.6 s$, con una mesh uniforme di passo $\Delta x = L_x/N = 0.2 m$ (N è il numero di celle), passo di tempo $\Delta t = 0.001 s$. Si è giocato con i parametri fisici in modo da ottenere un numero di Biot pari a $Bi = hL/\lambda = 1$, e si è fissato, semplicemente, $\theta = 20 [W/(m^2 \cdot K)]$ e $\lambda = 10 [W/(m \cdot K)]$. I risultati mostrano visivamente un ottimo accordo con la soluzione analitica approssimata.

L'integrazione temporale di ordine superiore in questo caso non presenta particolari vantaggi, almeno visivamente, in quanto l'accordo con la soluzione analitica risulta paragonabile a quello ottenuto con il I ordine (vedi figura 3).

Figure 2. Para diffusione: soluzione numerica confrontata con la soluzione analitica approssimata, usando lo schema di Eulero implicito del I ordine.

Esercizi AA 2009/10: trasporto puramente advettivo di un'onda Gaussiana 1D e conduzione non-stazionaria 1D in una lastra piana.



Qualche esempio dagli esercizi AA 2010/11

Procedura di calcolo

Come accennato nell'introduzione, per determinare la soluzione si è proceduto a realizzare un codice ai volumi finiti, in ambiente Matlab, utilizzando una griglia cartesiana ortogonale in 2D a passo costante. Si è quindi proceduto, tramite interpolazione bilineare, a determinare i valori di temperatura nei punti della griglia di calcolo a partire dai dati ottenuti.

Risultati e osservazioni

Una volta realizzati le script ci si è concentrati sulla ricerca di quale fosse la griglia con il minor numero di celle che garantisce dei risultati soddisfacenti i requisiti imposti dalla norma. Questa è risultata essere una griglia composta da 7 colonne e 14 righe, per un totale di 98 celle, ottenendo i risultati riportati di seguito.

Temperature (°C)			
9.66	13.4	14.7	15.0
5.25	8.63	10.3	10.7
3.22	5.65	7.01	7.44
2.03	3.68	4.67	5.00
1.27	2.33	2.99	3.22
0.74	1.37	1.77	1.90
0.344	0.636	0.824	0.889

Tabella 2: Temperature ottenuti con reticolo 7x14.

Scostamenti (°C)			
-0.040	0.000	0.000	-0.100
-0.050	0.030	0.000	-0.100
0.020	0.050	0.0100	-0.060
0.030	0.080	-0.0300	0
-0.030	0.030	-0.0100	0.020
0.040	-0.030	-0.0300	0.000
0.044	0.036	0.024	-0.0111

Tabella 3: Scostamenti tra temperature determinate per via numerica e per via analitica.

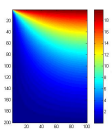


Figura 2: Esempio del campo di temperatura ottenuto.

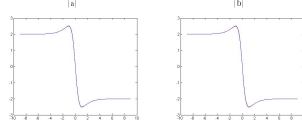


Figura 3: Andamento della curva numerica con 400 celle a $\theta = 0.5$ con integrazione temporale del (a) 1° e del (b) 2° ordine e 5 sub-iterazioni.

Eserci rispetto la curva analitica ai tempi indicati con 1 sub-iterazioni

$\Delta\theta$	N	1° order		2° order	
		$\theta = 0.1$	$\theta = 0.5$	$\theta = 0.1$	$\theta = 0.5$
0.01	200	0.1953	0.0875	0.0016	0.1539
0.01	200	0.1416	0.0122	0.0034	0.0879
0.01	200	0.1592	0.0136	0.0041	0.0745
0.01	200	0.0786	0.0074	0.0017	0.0773
0.001	200	0.1136	0.0124	0.0049	0.1166
0.001	200	0.1219	0.0138	0.0046	0.1039

Eserci rispetto la curva analitica ai tempi indicati con 10 sub-iterazioni

$\Delta\theta$	N	1° order		2° order	
		$\theta = 0.1$	$\theta = 0.5$	$\theta = 0.1$	$\theta = 0.5$
0.01	200	0.1953	0.0875	0.0016	0.1539
0.01	200	0.1416	0.0122	0.0034	0.0879
0.01	200	0.1592	0.0136	0.0041	0.0745
0.01	200	0.0786	0.0074	0.0017	0.0773
0.001	200	0.1136	0.0124	0.0049	0.1166
0.001	200	0.1219	0.0138	0.0046	0.1039

3.1 Osservazioni

Contrariamente alle aspettative l'errore accumulato utilizzando un ordine temporale maggiore ed aumentando il numero di celle, significativi è invece l'utilizzo di un passo temporale più piccolo; con $\theta = 0.001$ invece che $\theta = 0.01$ l'errore praticamente dimezza. Infine la curva numerica è molto più prossima a quella analitica con 15-variante del tempo; l'errore si riduce mediamente più di 20 volte fra l'istante $\theta = 0.1$ e l'istante $\theta = 1$. Utilizzo di 10 sub-iterazioni mostra un comportamento singolare; con il metodo di Eulero del 1° ordine l'errore viene significativamente ridotto con 5 sub-iterazioni mentre con il metodo di Eulero del 2° ordine l'errore risulta più imprevedibile ed oscilla nel tempo. In ogni caso l'utilizzo di 10 sub-iterazioni non apporta alcun miglioramento del risultato rispetto alle 5 sub-iterazioni.

Esercizi AA 2010/11: il case 1 della Norma UNI EN ISO 10211 e equazione di Burgers 1D.



Qualche esempio dagli esercizi AA 2011/12

Homework AA 2011-2012 - Mauro Turchetti

Homework 4: griglia non strutturata

È stata sviluppata in MATLAB una procedura di calcolo che legge entrambi i file tramite il comando `importdata`, calcola l'area dei singoli elementi e l'area totale. L'area dei singoli elementi è calcolata tramite la regola di Sarrus inserendo in una matrice le coordinate dei vertici dell'elemento triangolare (da completo). In Tabella 3 sono riportate, solamente per i primi dieci elementi per motivi di spazio, le aree calcolate. L'area totale, ottenuta come somma delle singole aree, è di 0.5 m^2 (nel caso si interpretino le coordinate riportate nei file in metri).

Le coordinate dei centroidi sono calcolate come media aritmetica delle coordinate dei vertici; nella Tabella 3 sono riportate le coordinate dei centroidi dei primi dieci elementi.

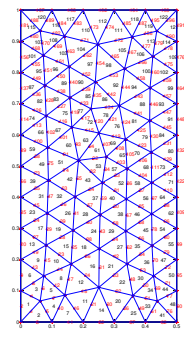
Tabella 3: Area e coordinate dei centroidi per i primi dieci elementi.											
Area	X	Y	N. elemento	Area	X	Y	N. elemento	Area	X	Y	N. elemento
0.003160	0.02107	0.05550	1	0.003727	0.02485	0.14912	6				
0.003525	0.05440	0.02217	2	0.004262	0.14719	0.02841	7				
0.002745	0.04591	0.10463	3	0.004005	0.12578	0.13971	8				
0.002950	0.10159	0.05058	4	0.003862	0.05199	0.19784	9				
0.003062	0.09310	0.09971	5	0.004147	0.10574	0.19334	10				

Gli edge della griglia vengono individuati da due nodi di un singolo elemento; dopo aver ordinato (con `find`) le coordinate degli edge si utilizza la funzione `unique` (`'rows','stable'`) per eliminare gli edge considerati più di una volta. Nella tabella seguente sono riportate le coordinate dei centroidi dei primi dieci edge con la relativa numerazione:

Tabella 4: Centroidi dei primi dieci elementi e relativa numerazione				
X primo punto	Y primo punto	X secondo punto	Y secondo punto	Numero edge
0.00000	0.00000	0.06321	0.06651	1
0.00000	0.00000	0.00000	0.10000	2
0.00000	0.00000	0.10000	0.10000	3
0.06321	0.06651	0.00000	0.10000	4
0.06321	0.06651	0.10000	0.00000	5
0.06321	0.06651	0.07454	0.14738	6
0.06321	0.06651	0.14156	0.08524	7
0.00000	0.10000	0.07454	0.14738	8
0.00000	0.10000	0.00000	0.20000	9
0.10000	0.00000	0.14156	0.08524	10

Nell'immagine sottostante sono riportati il numero dell'elemento, i nodi e gli edge:

Homework AA 2011-2012 - Mauro Turchetti



Il file prodotto dal codice tramite il comando `dimwrite` si presenta come il seguente (sono state omesse le righe centrali per risparmiare spazio):

198	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
110	70	70	114	121
101	70	77	121	-1
102	71	72	112	-1
103	71	75	127	-1
104	72	76	118	122
105	72	79	128	122
106	73	80	119	122
107	74	75	120	-1
108	74	78	122	-1

Figura 4: Rappresentazione grafica della griglia.

Esercizi AA 2011/12: gestione griglie non strutturate.



Qualche esempio dagli esercizi AA 2012/13

9

Problema 4

Sviluppare, in MATLAB o altro linguaggio a scelta, una procedura di calcolo - script o function - in grado di:

- Leggere una griglia generica 3D secondo il formato di *OpenFOAM*.
- Rappresentare graficamente la griglia di superficie, composta da tutte le *patches* che ne costituiscono le superfici di contorno.

A tal fine, sulla pagina Moodle del corso, sono fornite, in formato *zip* le griglie per due geometrie arbitrarie: *geom1.zip* e *geom2.zip*. Rimandando alla *Programmer's Guide* di *OpenFOAM* per ulteriori informazioni [4], la griglia, in *OpenFOAM*, è descritta dai seguenti files:

points Contiene la lista, la cui numerazione implicita parte da 0, delle coordinate x, y, z di tutti i nodi (vertici) della griglia. Il formato è il seguente:

```

0 .....
1 .....
2 .....
3 .....
4 .....
5 .....
6 .....
7 .....
8 .....
9 .....
10 .....
11 .....
12 .....
13 .....
14 .....
15 .....
16 .....
17 .....
18 .....
19 .....
20 .....
21 .....
22 .....
23 .....
24 .....
25 .....
26 .....
27 .....
28 .....
29 .....
30 .....
31 .....
32 .....
33 .....
34 .....
35 .....
36 .....
37 .....
38 .....
39 .....
40 .....
41 .....
42 .....
43 .....
44 .....
45 .....
46 .....
47 .....
48 .....
49 .....
50 .....
51 .....
52 .....
53 .....
54 .....
55 .....
56 .....
57 .....
58 .....
59 .....
60 .....
61 .....
62 .....
63 .....
64 .....
65 .....
66 .....
67 .....
68 .....
69 .....
70 .....
71 .....
72 .....
73 .....
74 .....
75 .....
76 .....
77 .....
78 .....
79 .....
80 .....
81 .....
82 .....
83 .....
84 .....
85 .....
86 .....
87 .....
88 .....
89 .....
90 .....
91 .....
92 .....
93 .....
94 .....
95 .....
96 .....
97 .....
98 .....
99 .....

```

faces Contiene la lista, anche qua con numerazione implicita che parte da 0, di tutte le facce costituenti la griglia. Poiché in *OpenFOAM* le celle sono costituite da poliedri arbitrari, le cui facce sono anch'esse poligoni con un numero arbitrario di vertici/tipi, per ogni faccia vengono indicati il numero di nodi ed i nodi (vertici) descritti nel file **points**. Il formato è il seguente:

```

0 .....
1 .....
2 .....
3 .....
4 .....
5 .....
6 .....
7 .....
8 .....
9 .....
10 .....
11 .....
12 .....
13 .....
14 .....
15 .....
16 .....
17 .....
18 .....
19 .....
20 .....
21 .....
22 .....
23 .....
24 .....
25 .....
26 .....
27 .....
28 .....
29 .....
30 .....
31 .....
32 .....
33 .....
34 .....
35 .....
36 .....
37 .....
38 .....
39 .....
40 .....
41 .....
42 .....
43 .....
44 .....
45 .....
46 .....
47 .....
48 .....
49 .....
50 .....
51 .....
52 .....
53 .....
54 .....
55 .....
56 .....
57 .....
58 .....
59 .....
60 .....
61 .....
62 .....
63 .....
64 .....
65 .....
66 .....
67 .....
68 .....
69 .....
70 .....
71 .....
72 .....
73 .....
74 .....
75 .....
76 .....
77 .....
78 .....
79 .....
80 .....
81 .....
82 .....
83 .....
84 .....
85 .....
86 .....
87 .....
88 .....
89 .....
90 .....
91 .....
92 .....
93 .....
94 .....
95 .....
96 .....
97 .....
98 .....
99 .....

```

E. Nobili, M. Morgut, P. Ranzi - Maggio 2013

Andrea Tello

non da 0.

Tutte sono state rappresentate graficamente le facce del contorno tramite la funzione *patch*, tenendo conto che le facce esterne sono quelle riportate per ultime nei file faces. Le due griglie *geom1.zip* e *geom2.zip* sono riportate in figura 13.

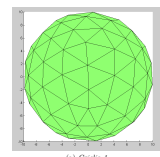
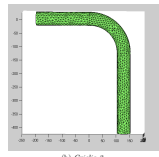



Figura 13: Rappresentazione della griglia

Università degli Studi di Trieste 11 A.A. 2012/2013

Esercizi AA 2012/13: lettura e visualizzazione griglie OpenFOAM®.



Qualche esempio dagli esercizi AA 2013/14

Problema 1

Questo problema richiede la determinazione della distribuzione della temperatura all'interno di un'aletta piana a sezione rettangolare (Figura 1). Le caratteristiche dell'aletta sono le seguenti: conducibilità termica $k = 50 \text{ W/(m K)}$, spessore $t = 20 \text{ mm}$, lunghezza $L = 200 \text{ mm}$.

Il coefficiente di scambio termico convettivo vale $h = 500 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ con una temperatura dell'ambiente $T_\infty = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. La base dell'aletta è mantenuta ad una temperatura $T_b = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, mentre anche l'estremità dell'aletta scambia calore per convezione.

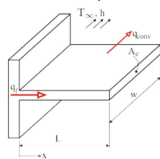


Figura 1: Aletta piana a sezione uniforme.

Il problema è 1D e stazionario, l'intento è quello di valutare il flusso termico unitario scambiato dall'aletta $q' \text{ (W/m)}$ al variare del numero di suddivisioni N della stessa, rispettivamente $N = 5, 10, 20, 40$ e 80 . Verrà poi riportato l'andamento dell'errore percentuale del flusso ottenuto tramite soluzione numerica e soluzione analitica, al variare del numero di nodi, Figura 2. L'equazione a cui si fa riferimento per valutare il flusso analiticamente è la seguente:

$$q' = A \frac{\sinh(mL) + (h/mk) \cosh(mL)}{\cosh(mL) + (h/mk) \sinh(mL)}$$

La discretizzazione spaziale è stata eseguita utilizzando lo schema alle Differenze Centrali (CDS) del secondo ordine. Si è quindi scritta per ogni volume di controllo un'equazione di questo tipo:

$$A_w T_w + A_e T_e + A_c T_c = S_p$$

dove i termini A_w, A_e, A_c sono dati.

La matrice dei coefficienti è così tridiagonale.

I coefficienti della matrice A e i termini del vettore S_p risultano uguali per tutti i nodi della griglia tranne che per il primo e per l' N -esimo, questo per la corretta imposizione delle condizioni al contorno.

Per questi due nodi alle due estremità è stato imposto un nodo sul contorno, piuttosto che una cella fantasma, siccome erano note le rispettive temperature a *west* per la prima e ad *est* per l'ultima.

I termini così trovati sono risultati:

- $A_w(1) = 2A_w$
- $A(1,2) = -(A_w + A_e) - P \cdot dx \cdot h$
- $A(2,3) = A_e$
- $s(1) = S_p - A_w T_b$

per la prima cella, mentre per l' N -esima:

- $A_e(N) = 2A_e$
- $A_p = -(A_e + A_w + P \cdot dx \cdot h) + (2 \cdot k \cdot A_c) / (h \cdot dx + 2k)$
- $A(N-1, N) = A_w$
- $A(N, 2) = A_p$
- $s(N) = S_p - (h \cdot dx \cdot A_e \cdot T_\infty) / (h \cdot dx + 2k)$

Viene ora riportato il grafico dell'andamento dell'errore percentuale, Figura 2.

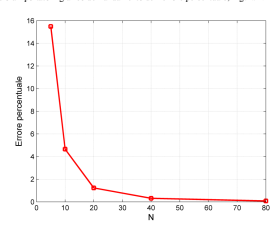


Figura 2: Andamento errore per diversa N.

In linea con le aspettative l'errore decresce con l'aumentare del numero di suddivisioni dell'aletta, sinonimo dunque di una maggiore accuratezza.

Esercizi AA 2013/14: calcolo del flusso termico scambiato da un'aletta.



Some example from AA 2016/17

12

Problem 4

Problem description

Consider the simple 2D grid illustrated in figure 8, taken directly from Chapt. 9 in [6]. The coordinates of the mesh nodes (vertices) are shown in the figure and are also given, for convenience, in table 2.

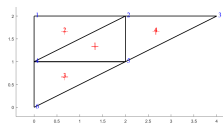


Figura 8. Grid for problem 4.

Node	x	y
1	0.0	2.0
2	2.0	2.0
3	4.0	2.0
4	0.0	1.0
5	2.0	1.0
6	0.0	0.0

Tabella 2. Coordinates of the nodes (vertices) of the grid of figure 8.

The cell definitions are stored in the cell connectivity matrix. This is a matrix of node (vertex) numbers where each row of the matrix contains the connectivity - the nodes - of the corresponding cell. It is given, for this simple case, in table 3.

Cell	Nodes
1	4 2 5
2	4 1 2
3	6 4 5
4	5 2 3

Tabella 3. Cell connectivity for the grid of figure 8.

The temperatures at the cell centroids are given by

E. Nobile - Aprile 2017

13

$$T(x, y) = 70(x^2 + y^2 + xy + 5)$$

Question

Compute the gradient at the centroid of cell i using the following two approaches:

- Cell-based Gauss-Green method (for this problem, since the selected cell faces are midway between the centroids of the two attached cells, using weighted interpolation has no effect).
- Node-based Gauss-Green method.

Compare the results with the exact (analytical) gradient given by

$$\nabla T(x, y) = 70(3x^2 + y) \mathbf{i} + 70(2y + x) \mathbf{j}$$

For the calculations it is possible to use either a manual procedure or a computer program. For the latter case, it is useful to develop a code/script (MATLAB, OCTAVE, SciLab or Python recommended) accordingly to the requirements described in problem 4 of Homework 2015-16.

E. Nobile - Aprile 2017

Homework AA 2016/17: gradient calculation for a simple unstructured grid.



Some example from AA 2017/18

1

Problem 3

Problem description

Consider the simple 2D grid constituted by triangular equilateral cells illustrated in figure 1, taken directly from Chapt. 9 in [1]. The coordinates of the mesh nodes (vertices) are provided in the associated file `grid_1.nod` and are also given, for convenience, in table 1.

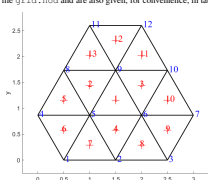


Figure 1: Grid for problem 3.

Node	x	y
1	0.5	0.0
2	1.5	0.0
3	2.5	0.0
4	0.0	0.8660254
5	1.0	0.8660254
6	2.0	0.8660254
7	3.0	0.8660254
8	0.5	1.7320508
9	1.5	1.7320508
10	2.5	1.7320508
11	1.0	2.5980762
12	2.0	2.5980762

Table 1: Coordinates of the nodes (vertices) of the grid of figure 1.

The cell definitions are stored in the cell connectivity matrix. This is a matrix of node (vertex) numbers where each row of the matrix contains the connectivity - the nodes - of the corresponding cell. It is given in the file `grid_1.cel` and also in table 2.

E. Nobile - Aprile 2018

2

Cell	Nodes
1	5 6 9
2	5 9 8
3	6 10 9
4	2 6 5
5	4 5 8
6	1 5 4
7	1 2 5
8	2 3 6
9	3 7 6
10	6 7 10
11	9 10 12
12	9 12 11
13	8 9 11

Table 2: Cell connectivity for the grid of figure 1.

Question

Consider the three following cases of temperature distribution, and corresponding (exact) analytical expression of the gradient:

Linear

$$T(x, y) = 100x + 30y + 5$$

$$\nabla T(x, y) = 100 \mathbf{i} + 30 \mathbf{j}$$

Quadratic

$$T(x, y) = 100(x^2 + y^2 + 1)$$

$$\nabla T(x, y) = 200x \mathbf{i} + 200y \mathbf{j}$$

Cubic

$$T(x, y) = 100(x^3 + y^3 + xy + 5)$$

$$\nabla T(x, y) = 100(3x^2 + y) \mathbf{i} + 100(2y + x) \mathbf{j}$$

Compute numerically, for the three temperature distributions, the temperature gradient at the centroid of cell i using the cell-based Gauss-Green method* and compare the results with the exact gradient.

For the calculations develop a code/script (MATLAB, OCTAVE, SciLab or Python recommended) accordingly to the requirements described in problem 4 of Homework 2015-16.

*For this problem, since the cell faces are midway between the centroids of the two attached cells, using weighted interpolation has no effect.

E. Nobile - Aprile 2018

Homework AA 2017/18: unstructured grid gradient reconstruction for different temperature distributions.



Some example from AA 2018/19

1

Problem 3

Problem description

Consider the two simple 2D grids constituted by triangular cells illustrated in figures 1 and 2. The first, *regular* one constituted by equilateral triangles, has been taken directly from Chapt. 9 in [1]. The second, *irregular* one, is a *deformed* version of the former. The coordinates of the mesh nodes (vertices) are provided in the associated files `grid1.nod` and `grid2.nod`, and are also given, for convenience, in tables 1 and 2, respectively.

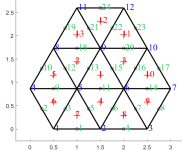


Figure 1: Grid 1 for problem 3.

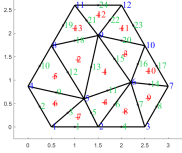


Figure 2: Grid 2 for problem 3.

E. Nobile – Aprile 2019

2

Node	x	y
1	0.5	0.0
2	1.5	0.0
3	2.5	0.0
4	0.0	0.8660254
5	1.0	0.8660254
6	2.0	0.8660254
7	3.0	0.8660254
8	0.5	1.7320508
9	1.5	1.7320508
10	2.5	1.7320508
11	1.0	2.5980762
12	2.0	2.5980762

Table 1: Coordinates of the nodes (vertices) of the grid of figure 1.

Node	x	y
1	0.5	0.0
2	1.5	0.0
3	2.5	0.0
4	0.0	0.8660254
5	1.2	0.6000000
6	2.2	0.8900000
7	3.0	0.8660254
8	0.5	1.7320508
9	1.5	1.9000000
10	2.5	1.7320508
11	1.0	2.980762
12	2.0	2.980762

Table 2: Coordinates of the nodes (vertices) of the grid of figure 2.

The cell definitions are stored in the cell connectivity matrix which, in this problem, is the same for both grids. This is a matrix of node (vertex) numbers where each row of the matrix contains the connectivity - the nodes - of the corresponding cell. It is given in the file `grid.o1o` and also in table 3.

Question

Consider the three following cases of temperature distribution, and corresponding (exact) analytical expression of the gradient.

Linear

$$T(x, y) = 100x + 30y + 5$$

$$\nabla T(x, y) = 100\mathbf{i} + 30\mathbf{j}$$

E. Nobile – Aprile 2019

Homework AA 2018/19: gradient reconstruction for orthogonal and non-orthogonal unstructured grid.



Some example from AA 2019/20

1

Proposed problem

A plane fin of uniform cross-section, as shown in figure 1, is made with a uniform, isotropic material with a thermal conductivity $k = 50 \text{ W/(m K)}$; it has a thickness t , a length L , and its width w is large in comparison with its thickness. In this case the fin is cooled by both convection and radiation:

- The convective heat transfer coefficient is $h = 50 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ and the surrounding fluid temperature is T_∞ .
- The radiation heat transfer can be accounted for assuming that the fin surface is gray-diffuse, with a global emissivity $\epsilon = 0.7$, that the fluid is not participating nor emitting, and that the temperature of the surroundings is T_r .

The base of the fin is maintained at a temperature $T_b = 400 \text{ }^\circ\text{C}$, while the tip of the fin can be assumed perfectly insulated.

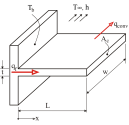


Figure 1: Straight fin with uniform cross-section.

Assuming a 1D temperature distribution, i.e. $T = T(x)$, compute, with the Finite Volume method (FV), the heat flux per unit width of the fin q'_{out} [W/m], using a number N of FVs equal to $N = 10, 20, 40$, and 80 . Consider the three following cases:

- In this first case the fin has a length $L = 20 \text{ mm}$ and a thickness $t = 1 \text{ mm}$, the fluid temperature and the surroundings temperature are the same, i.e. $T_\infty = T_r = 273.15 \text{ }^\circ\text{C} = 0 \text{ K}$. In this way, it is possible to verify the result by comparison with the simplified analytical expression given in [1], not reported here for brevity, which gives $q'_{\text{out}} = 118.6 \text{ W/m}$.
- For the second case, repeat the calculation but assume $T_\infty = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ and $T_r = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.
- For the third case, consider a fin with a different geometry (lower aspect-ratio): $L = 20 \text{ mm}$ and thickness $t = 10 \text{ mm}$. All other data are the same as in the second case.

E. Nobile – Marzo 2020

2

REFERENCES

TIP # 1

Due to radiation heat transfer the problem is *non-linear*, and therefore it requires an iterative approach with a proper linearization. In this case it can be done by observing that the heat transfer by radiation can be expressed in a form similar to that of convection heat transfer:

$$q'_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A_f (T_f^4 - T_r^4) = A_f h_r (T_f - T_r)$$

where T_f is the (local) temperature of the fin, $\sigma = 5.670367 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$ is the Stefan-Boltzmann constant and

$$h_r = \epsilon \sigma (T_f^3 + T_r^3) (T_f + T_r)$$

is the radiation heat transfer coefficient. Since h_r depends on T_f , an iterative procedure, with a check of convergence, should be applied. In this way, the total heat transfer can be expressed as

$$q'_{\text{tot}} = q'_{\text{conv}} + q'_{\text{rad}} = A_f [h_c (T_f - T_\infty) + h_r (T_f - T_r)]$$

Needless to say, proper attention must be paid, in this case, to the unit of measure of temperature.

TIP # 2

In order to verify, at least partially, the correctness of the script, a possible solution is to switch off the radiation heat transfer contribution, and compare the numerical result with the analytical solution [2] valid for longitudinal fins of uniform cross-section with insulated tip:

$$q'_f = \sqrt{2hk} \tanh(mL) (T_b - T_\infty)$$

with

$$m = \sqrt{2h/k}$$

References

- [1] Y. Huang, X.-F. Li, Exact and approximate solutions of convective-radiative fins with temperature-dependent thermal conductivity using integral equation method, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **150**, 119303, 2020.
- [2] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Ed., Wiley, (2007).

E. Nobile – Marzo 2020

Homework AA 2019/20: heat transfer by convection and radiation from a 1D fin.



Some example from AA 2020/21

1

Proposed problem

An annular fin of rectangular profile, as shown in figure 1, is made with a uniform, isotropic material with a thermal conductivity $k = 40$ [W/(m K)]; it has a thickness $t = 10$ [mm], an inner radius $r_1 = 50$ [mm] and an outer radius $r_2 = 125$ [mm].

The fin is cooled only by convection, with a convective heat transfer coefficient $h = 40$ [W/(m² K)], and the surrounding fluid temperature $T_\infty = 25$ [°C]. The base of the fin is maintained at a temperature $T_b = 110$ [°C], while also the tip of the fin contributes, with the same heat transfer coefficient, to the overall heat flux.

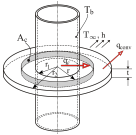


Figure 1: Annular (radial) fin of rectangular profile.

Assuming a 1D temperature distribution, i.e. $T \approx T(r)$, compute, with the Finite Volume method (FV), the heat flux from the fin q_{fin} [W], using a number N of FV's equal to $N = 10, 20, 40$, and 80 .

Compare the numerical results with the analytical (exact) solution given in [1]:

$$q_f = 2\pi k r_1 t m (T_b - T_\infty) \frac{\gamma K_1(m r_2) - I_1(m r_2)}{I_0(m r_2) + \gamma K_0(m r_2)} \quad (1)$$

with

$$\gamma = \frac{(h/mk) I_0(m r_2) + I_1(m r_2)}{K_1(m r_2) - (h/mk) K_0(m r_2)} \quad (2)$$

and

$$m = \sqrt{2h/kt} \quad (3)$$

In (1) and (2) I_0 e I_1 represent, respectively, the modified Bessel function of the first kind of order 0 and of order 1 (in MATLAB: function `bessj0`), while K_0 e K_1 are the modified

E. Nobile – March 2021

2

REFERENCES

Bessel function of the second kind of order 0 and of order 1, respectively (in MATLAB: function `bessy0` e `bessy1`).

TIP

Discretize the fin, assuming $T \approx T(r)$, with circular (ring-shaped) Finite Volumes of thickness t and width Δr , noting that, differently from linear fins, the cross-section and the external surface of each FV varies with r , i.e. $A_c = A_c(r)$ and $\Delta A_s = \Delta A_s(r)$.

References

[1] A. D. Kraus, A. Aziz, J. Welby, *EXTENDED SURFACE HEAT TRANSFER*, J. Wiley & Sons, (2001).

E. Nobile – March 2021

Homework AA 2020/21: heat transfer by convection from an annular fin.



Some example from AA 2021/22

1

Proposed problem

1. Following *Homework 1 - AA 2021/22*, first case, consider a cylindrical (pin) fin, as shown in figure 1, which is made with a uniform, isotropic material with a thermal conductivity value of $k = 40$ W/(m K). The fin has a length $L = 40$ mm and a diameter $d = 4$ mm. The fin is cooled only by convection with a convective heat transfer coefficient $h = 400$ W/(m² K), and the temperature of the surrounding fluid is $T_\infty = 25$ °C. The temperature of the base of the fin is maintained at a temperature $T_b = 200$ °C, while also the tip of the fin contributes, with the same heat transfer coefficient, to the overall heat flux.

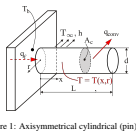


Figure 1: Axisymmetrical cylindrical (pin) fin.

In this case, disregard the usual assumption of 1D temperature distribution (see [1, 2]), i.e.

$$T \approx T(x)$$

and consider a full 2D, axisymmetric temperature distribution [1, 2]:

$$T = T(x, r)$$

Using the MATLAB *PDE Toolbox*, develop a 2D axisymmetric steady numerical model for the fin and, using an adequate number of finite elements, compute the heat flux $q_{\text{fin},2D}$ [W]. Compare the result with that obtained with the 1D model of *Homework 1*. What is the % error using the 1D assumption? Plot a contour map of the temperature field.

The general heat (conduction) equation for an isotropic material in cylindrical coordinates is

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

which, under the assumption of steady, 2D axisymmetric temperature field with no heat generation, reduces to

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0$$

E. Nobile – Marzo 2022

2

REFERENCES

2. Repeat the same analysis for the second case of *Homework 1*, e.g. fin length $L = 40$ mm and diameter $d = 20$ mm, and again compare the result with that from the 1D model. What is the % error using the 1D assumption in this second case? Is it lower or higher? Why? Plot a contour map of the temperature field.

References

[1] G. Comini, G. Cortella, *Fondamenti di trasmissione del calore*, 4a Ed., S.G.E. Editore, (2013).

[2] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th Ed., Wiley, (2007).

E. Nobile – Marzo 2022

Homework AA 2021/22: heat transfer by convection from a 2D (axisymmetrical) cylindrical fin.



- L'esame consiste in un colloquio orale, con discussione dell'elaborato finale, eventuali chiarimenti sugli esercizi svolti e domande su argomenti del corso;
- Le domande sono relative a **TUTTO** il programma svolto (non *saltare* parti svolte a lezione che vengono chieste all'esame con minor frequenza);
- L'obiettivo dell'esame orale è quello di verificare la conoscenza dello studente degli aspetti fondamentali della CFD, ed assieme allo student project ed agli esercizi da svolgere dovrebbe costituire una verifica bilanciata ed omogenea della conoscenza dei vari aspetti - teorici ed applicativi - della disciplina.



Esame - istruzioni

SOMMARIO

- Scadenze:
 - 1 Homeworks: almeno **7** giorni prima dell'esame. Unico documento PDF con tutti gli HW, no allegati (script MATLAB etc.).
 - 2 Student project: almeno **10** giorni prima dell'esame. Solo documento PDF, no allegati (progetto WB etc.).
 - 3 Iscrizione all'esame (ESSE3): almeno **2** giorni prima dell'esame.
- Per lo Student Project:
 - ▶ Includere **sempre** colleghe/collegi del progetto nelle comunicazioni/email relative.
 - ▶ Portare **una sola copia** cartacea la prima volta che uno degli studenti del team si presenta all'esame.
 - ▶ Stampa fronte-retro, semplice pinzatura, no rilegatura.
- Per gli Homework:
 - ▶ Evitare di ricopiare testo e immagini degli HW assegnati nell'elaborato (piuttosto fare uno schizzo a mano libera).



Difficoltà

1 Teoria

- ▶ Preparazione lacunosa e/o mancante sugli alcuni aspetti teorici affrontati in classe (analisi dimensionale, FEM, FD, modellazione della turbolenza, flussi multifase etc.).

2 Student project

- ▶ Poca attenzione rivolta alla qualità dei risultati ed all'affidabilità della fonte di riferimento del problema da risolvere.
- ▶ Scarsa attenzione agli aspetti fondamentali (caratteristiche del problema, fenomeni rilevanti), ed eccessiva enfasi sull'uso dello strumento informatico: **Compute less, think more!**.
- ▶ Attenzione inadeguata agli aspetti fisici, ed insufficiente ricerca bibliografica nel *project* assegnato:
 - ★ Difficoltà nel riconoscere gli aspetti fisici più importanti prima di iniziare le attività di modellazione;
 - ★ Difficoltà nell'individuare possibili semplificazioni.
- ▶ Scarsa attitudine al problem-solving:
 - ★ mancanza di autonomia e *coraggio* nell'affrontare i problemi - di varia natura - che possono insorgere nel corso del progetto.
- ▶ **Mancato utilizzo delle Regole e suggerimenti per la stesura dell'Elaborato Finale (Student Project) e degli Homework, disponibili su Moodle.**

3 Homework

- ▶ Difficoltà e limitata capacità di tradurre in *codice* (es. MATLAB) quanto svolto a lezione.
- ▶ **Mancato utilizzo delle Regole e suggerimenti per la stesura dell'Elaborato Finale (Student Project) e degli Homework, disponibili su Moodle.**



Novità

- Al fine di incoraggiare gli studenti ad affrontare l'esame sin dalla prima sessione disponibile:
 - ▶ Esercizi (*homework*) proposti non appena possibile, per evitare sovraccarichi di lavoro nelle fasi finali del corso.
 - ▶ Scelta e disamina dello *Student project* nel corso delle esercitazioni e, ove possibile, suo (parziale) svolgimento in aula.
 - ▶ **TENTATIVE** Short presentation of the selected student projects at the end of the course.
- **Dall'AA 2017-18:** la redazione dello student project va fatta in lingua Inglese.
- **NEW:** aggiornamento di parte del materiale didattico (Metodo dei Volumi Finiti per griglie non-strutturate, tutorial(s), esercizi, passaggio ad ANSYS Rel. 2024 R1).
- Svolgimento interattivo in classe - *Live Script* - di alcuni semplici esercizi con MATLAB e MATLAB/PDEToolbox.
- **NEW:** Revised V&V (Verification and Validation)
- Esempio unificante di utilizzo di tre tecniche diverse (FD, FEM, FV) per la risoluzione numerica dello stesso (semplicissimo) problema 1D (aggiornato dall'AA 2005/06).



Novità - cont.

Dall'AA 2018/19 **non** vengono più svolte lezioni introduttive su MATLAB ma, eventualmente, solo alcune lezioni specifiche, mirate alla soluzione dei problemi visti a lezione.

Infatti:

- Dall'AA 2018/19 è disponibile una licenza *MATLAB Campus-wide* per l'Università di Trieste, che consente a docenti e studenti di scaricare e utilizzare MATLAB®, e i toolbox associati, sui loro laptop.
- Informazioni sulle modalità di installazione sono disponibili sul sito del Dipartimento di Ingegneria e Architettura (DIA), all'indirizzo:
<https://dia.units.it/it/dipartimento/node/32619>
- Attraverso la registrazione è inoltre possibile accedere ai corsi (gratuiti) on-line di MATLAB, fra i quali si consiglia, per poter risolvere agevolmente gli esercizi assegnati, nell'ordine:
 - 1 *MATLAB Onramp* (molto semplice, solo alcuni fondamenti, ca. 2 ore);
 - 2 *MATLAB Fundamentals* (ca. 20 ore) e, per i più interessati:
 - 3 *MATLAB Programming Techniques*

I primi due andrebbero seguiti *il prima possibile*, durante il corso.

Vi sono poi corsi specifici, come ad esempio *Introduction to Linear Algebra with MATLAB*, *MATLAB for Data Processing and Visualization*, *Machine Learning with MATLAB* etc.

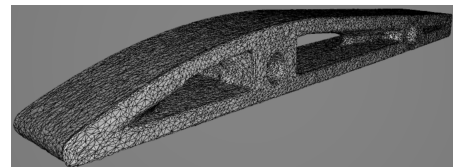
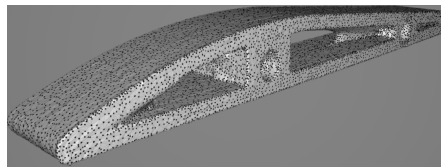
- The actual ANSYS CAMPUS licenses are not node-limited (previously limited to 512 nodes).



Novità - cont.

Possibilità, per uno o due teams di studenti interessati, di effettuare rilievi (scan) 3D di oggetti/sistemi d'interesse da analizzare poi con tecniche CFD:

- Uso dello Scanner 3D professionale *Rangevision Spectrum* (3DLab):



- Utilizzo del *Meshatore ANSYS Fluent*:
 - ▶ Watertight geometry
 - ▶ Fault-tolerant meshing
- Possibilità - nei corsi futuri - di effettuare *reverse engineering* (ANSYS SpaceClaim) con successive parametrizzazioni geometriche e ottimizzazioni di forma.



Q & A

