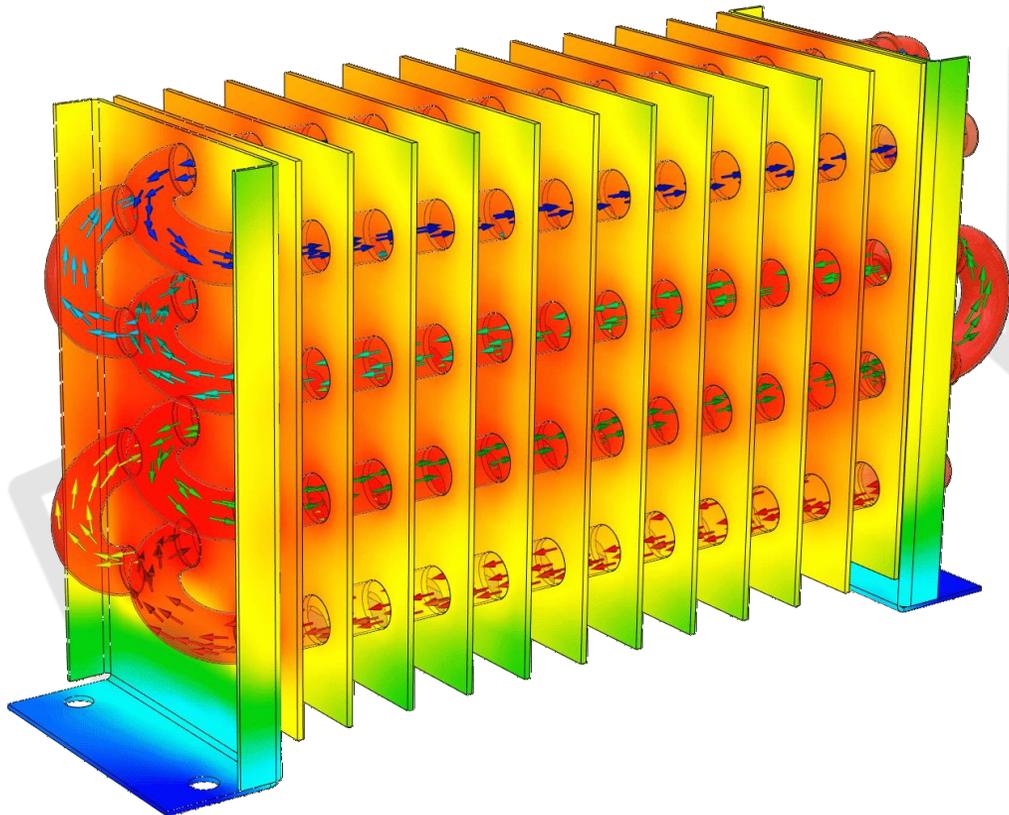


FORMAME



Flow Simulation

I fondamentali

Umberto Fioretti



LEZIONI

1

Principi di
fluidodinamica



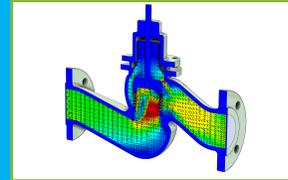
2

Workflow di
analisi



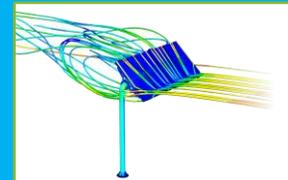
3

Mesh globale
e locale



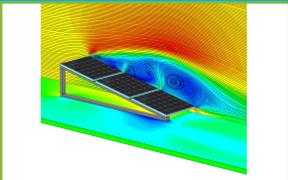
7

Interazione
fluido-struttura
"FSI"



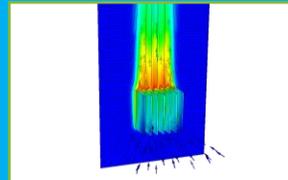
4

Analisi di flusso
esterno



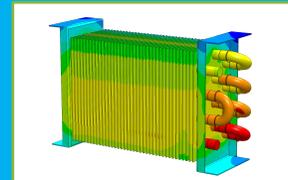
5

Analisi termica
stazionaria



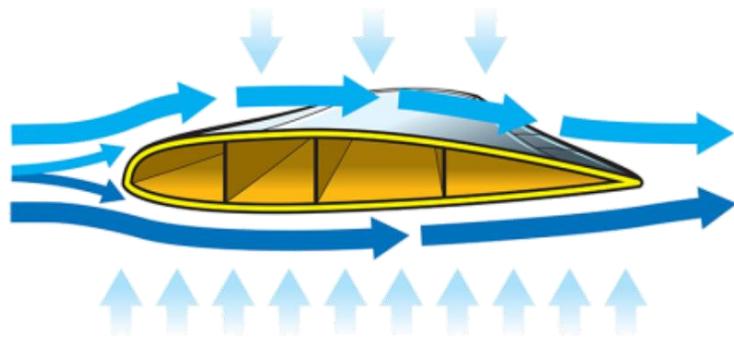
6

Analisi termica
nel transitorio



Trasferire le nozioni fondamentali sul metodo ai volumi finiti (FVM), il workflow per impostare correttamente analisi CFD, anche con contributo termico, valutando criticamente i risultati ottenuti.





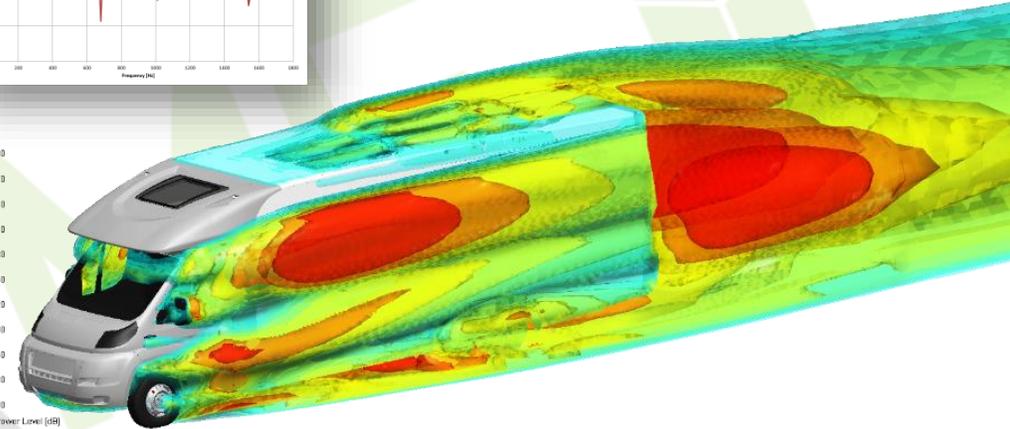
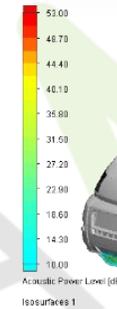
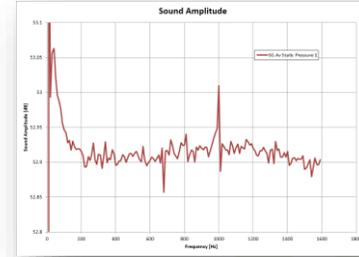
$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Principi di fluidodinamica

Lezione 1



- Elementi di un'analisi fluidodinamica
- Fluidi e loro proprietà
- Tipologie di fluidi
- Flusso laminare e turbolento
- Equazioni che governano il fluido
- Approcci al calcolo delle turbolenze
- Metodo e workflow di analisi CFD
- Introduzione e risorse su Flow Simulation



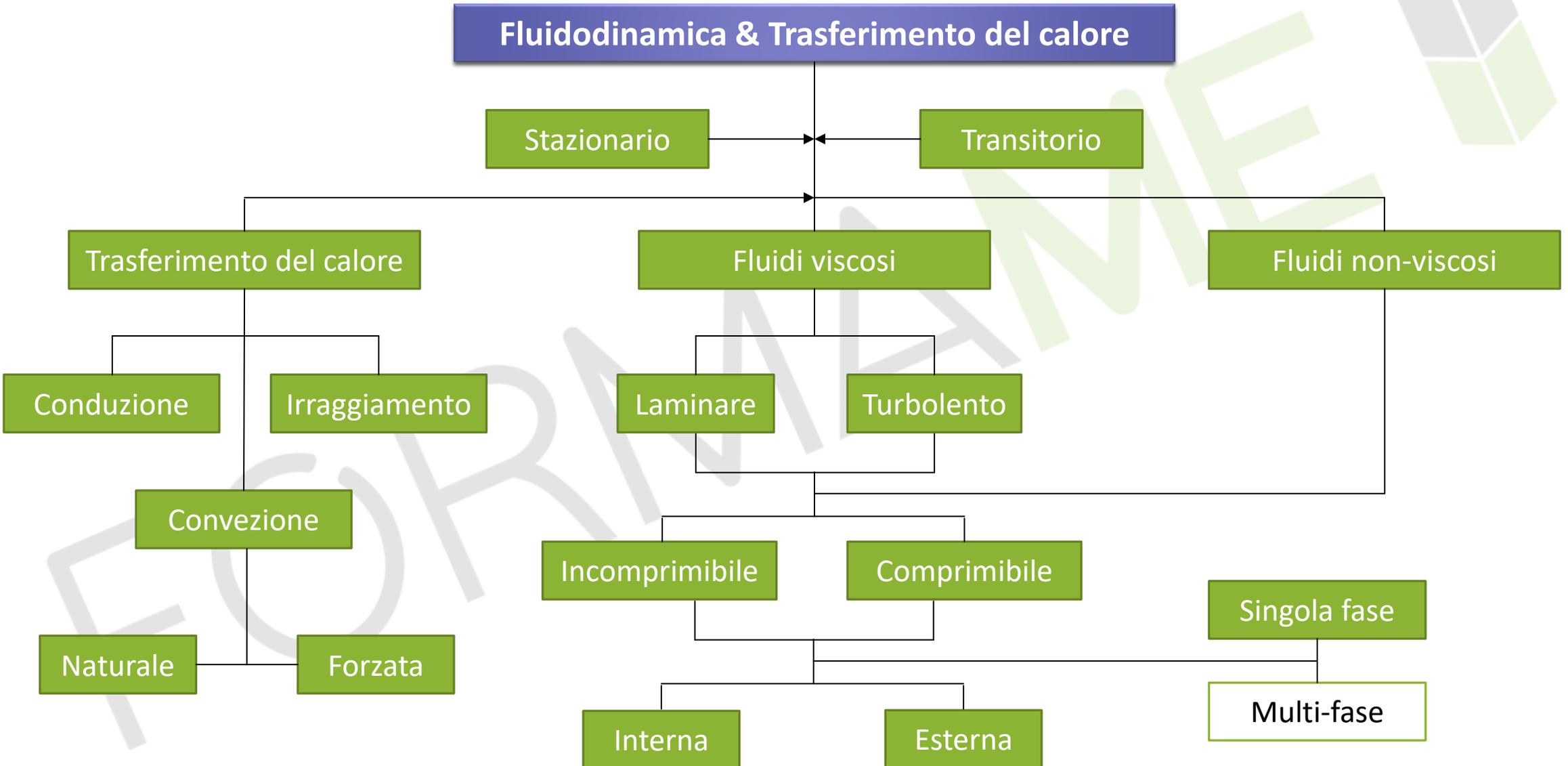
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_i P_B,$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \epsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_i P_B \right) - f_2 C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k}$$

$$\tau_{ij} = \mu s_{ij}, \quad \tau_{ij}^R = \mu_i s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k},$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$



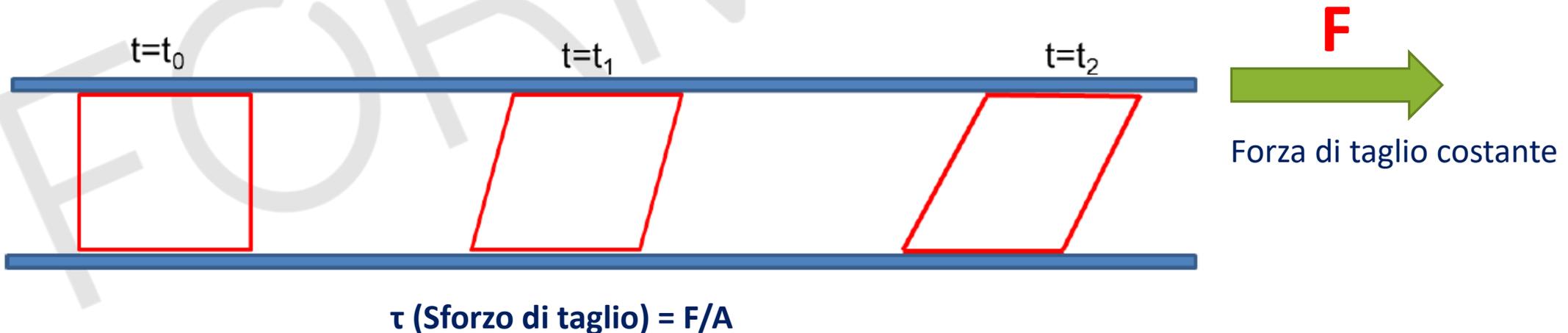


Gas e Liquidi sono considerati FLUIDI

- **Liquidi:** caratterizzati da una struttura molecolare molto compatta con notevole forza di coesione, conservano il volume e assumono la forma del contenitore
- **Gas:** caratterizzati da una struttura molecolare molto rada e con bassa forza di coesione, prendono il volume e la forma del contenitore

I fluidi sono sostanze che si deformano continuamente sotto l'azione di sforzi di taglio

- I fluidi scorrono sotto l'azione di una forza
- Sono caratterizzati da una bassa resistenza agli sforzi di taglio
- La loro deformazione continua nel tempo





Le principali proprietà che descrivono lo stato di un fluido/sistema sono:

m
Vol
T
P
V
 ρ

Massa

Volume

Temperatura

Pressione

Velocità

Densità

Proprietà ESTENSIVE

(dipendenti dalle dimensioni o la massa)

Proprietà INTENSIVE

(indipendenti dalla massa)



La densità (ρ) ha un ruolo importante nella meccanica dei fluidi, perché mediante essa possiamo distinguere:

- **Flussi incomprimibili:** la densità ha un valore costante al variare della temperatura
 - Liquidi
 - Gas a basse velocità ($\text{Mach} < 0,3$)
- **Flussi comprimibili:** la densità varia con P & T
 - Gas ideali: $P = \rho RT$ (R è la costante del gas)
 - Gas reali: risolti con differenti equazioni (es. legge di Van der Waals)
- Nella maggior parte dei casi viene utilizzata la formulazione di gas ideale (aria, azoto, ossigeno, argon, elio)
- Solo nei casi in cui i gas attraversano un cambiamento di fase o lavorano ad alte pressioni, devono essere trattati come gas reali (vapore, condensazione,...)

VISCOSITÀ



La viscosità rappresenta la resistenza allo scorrimento di un fluido

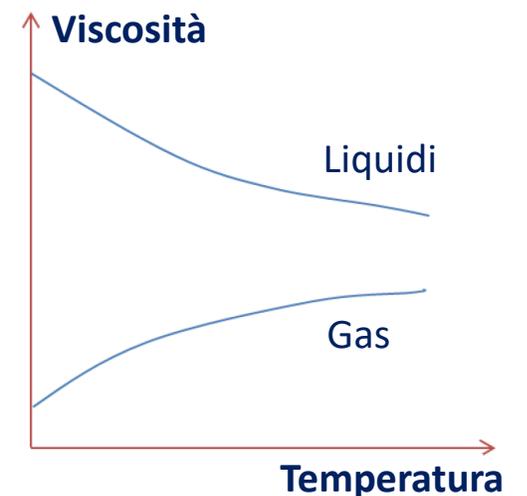
η viscosità dinamica (resistenza a fluire sotto l'azione di forze esterne) espressa in $\rightarrow \text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

ν (η/ρ) viscosità cinematica (la resistenza a fluire sotto l'azione della forza di gravità) espressa in $\rightarrow \text{m}^2/\text{s}$



La viscosità nei liquidi decrescende con l'aumentare della temperatura (le molecole hanno maggiore energia per opporsi alle forze coesive)

La viscosità nei gas crescie con l'aumentare della temperatura (un maggiore movimento molecolare e di conseguenza collisioni)



PRESSIONE



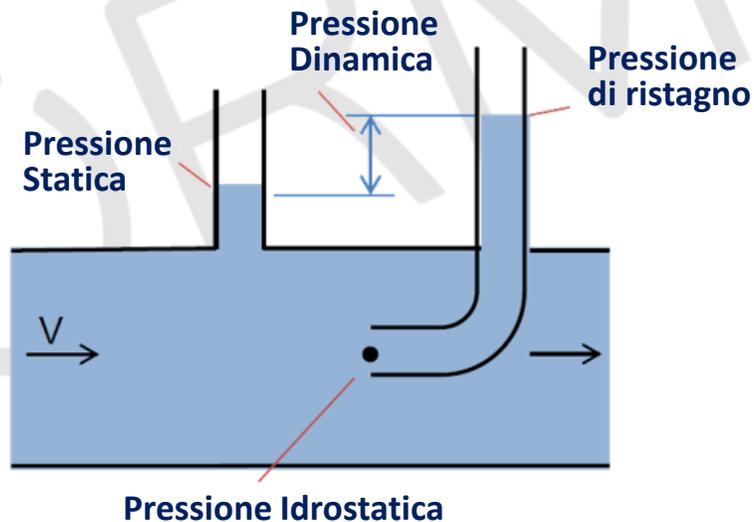
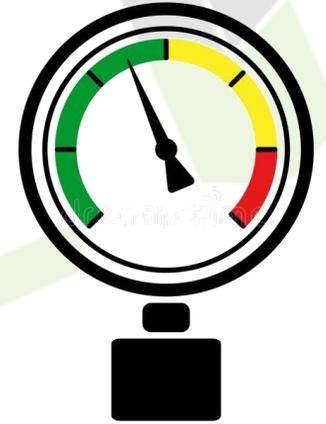
Pressione statica (P): l'attuale pressione termodinamica del fluido

Pressione dinamica ($\rho V^2/2$): incremento di pressione dovuto all'energia cinetica del fluido

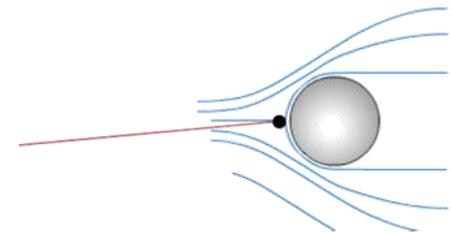
Pressione idrostatica ($\rho g z$): data dal peso del fluido e la profondità di affondamento del corpo

Pressione totale = Pressione statica + Pressione dinamica + Pressione idrostatica

Pressione di ristagno (P_{stag}) = Pressione statica + Pressione dinamica



Punto di ristagno del fluido
(velocità istantanea = 0)

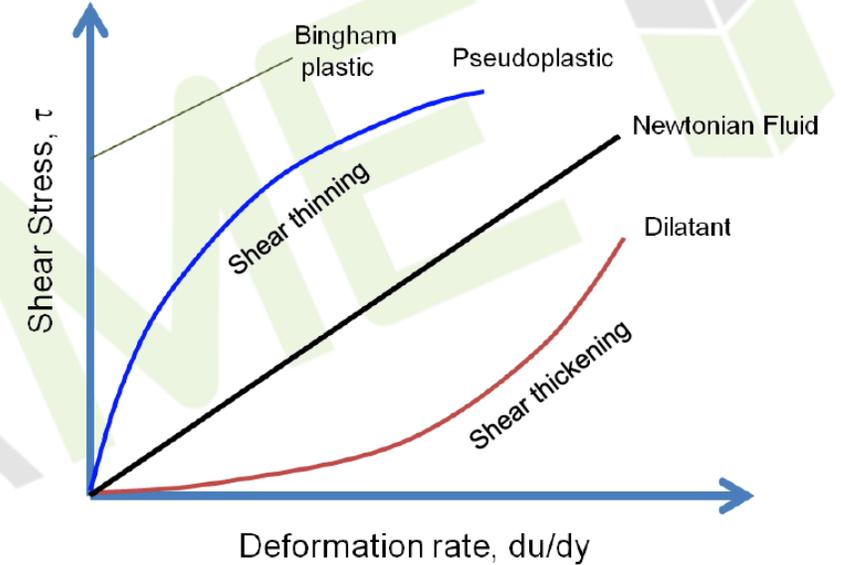


TIPOLOGIE DI FLUIDI

Fluidi Newtoniani: lo sforzo è direttamente proporzionale alla velocità di deformazione, quindi, caratterizzati da una viscosità costante

Fluidi Non-Newtoniani: lo sforzo non è direttamente proporzionale alla velocità di deformazione

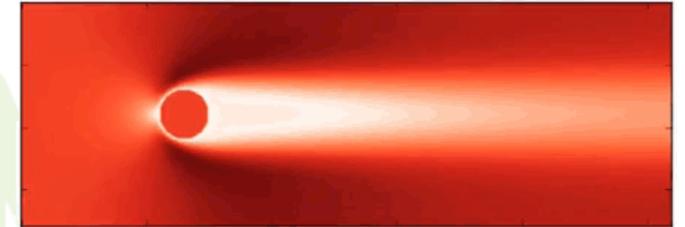
- Dilatanti: la viscosità aumenta non-linearmente all'aumentare della velocità di deformazione
- Pseudoplastici: la viscosità diminuisce non-linearmente all'aumentare della velocità di deformazione
- Tissotropici: la viscosità diminuisce se vengono agitati o messi in movimento



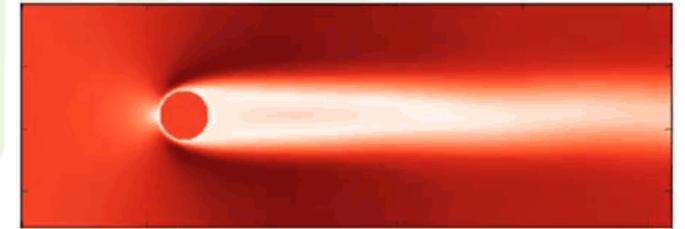
FLUSSO STABILE E INSTABILE

- Stabile quando non cambia nel tempo
- Instabile quando continua a fluttuare e modificarsi nel tempo
- **Flusso stabile:** è un flusso che si mantiene nelle stesse condizioni per un lungo periodo
- **Flusso periodico:** è un flusso che si è sviluppato e mantiene delle fluttuazioni regolari nel tempo
- **Flusso instabile:** è un flusso che si sta sviluppando (transitorio), oppure, dovuto alle condizioni geometriche e al contorno

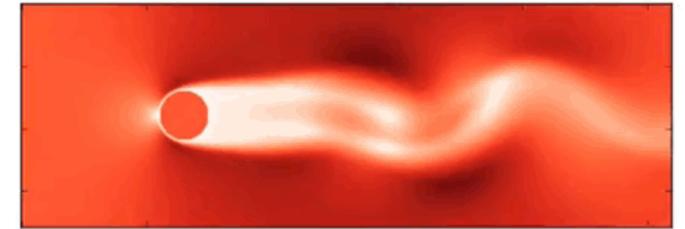
Re = 25



Re = 50



Re = 100



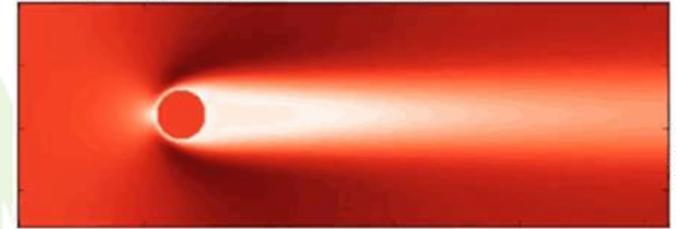
Re = 220



FLUSSO STABILE E INSTABILE

- Flusso stabile → Analisi stazionarie:
 - Fluttuazioni e instabilità vengono dissipate nel tempo
 - Si ha interesse a conoscere i valori a regime
- Flusso instabile o periodico → Analisi nel transitorio:
 - Occorre catturare le fluttuazioni per verificare la risposta meccanica e di vibrazione
 - Vi è interesse nella fase di avvio o arresto
 - Cambiano le condizioni di flusso o geometriche

Re = 25



Re = 220

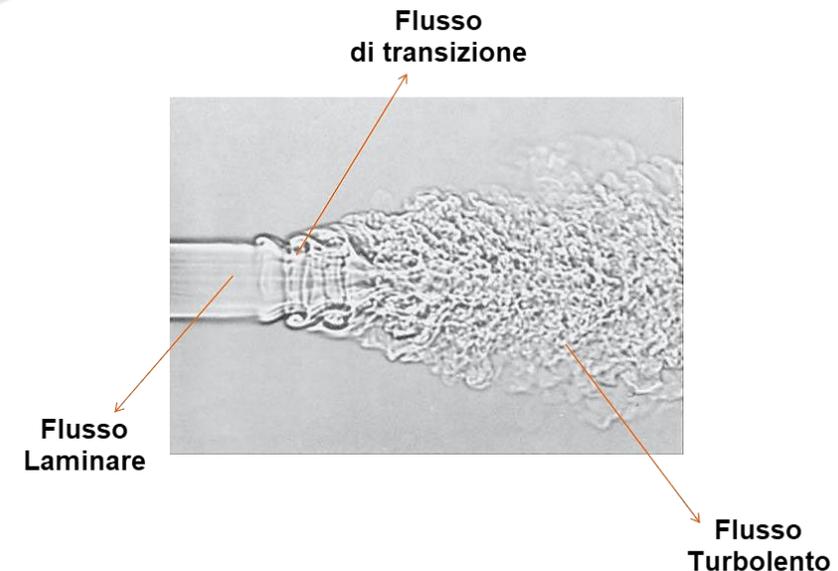
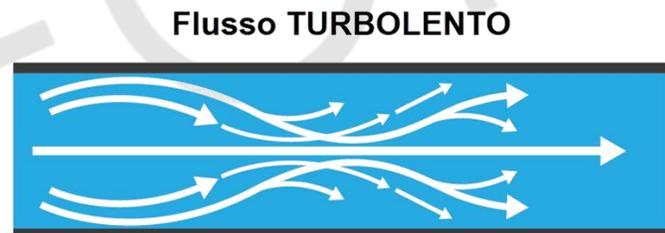


Le analisi stazionarie richiedono poche risorse e sono veloci nel calcolo!



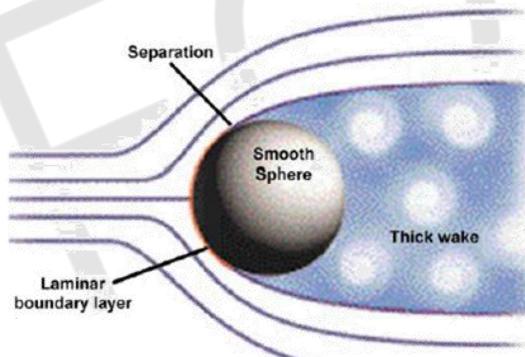
LAMINARE Vs TURBOLENTO

- Un **flusso laminare** è ordinato e uniforme (forze di coesione > forze di inerzia)
- Un **flusso turbolento** è randomico e caotico, con formazione di vortici estesi ad alti valori di Reynolds (forze di inerzia \gg forze di coesione)
- La maggior parte dei flussi laminari si trasformano in turbolenti a causa di variazioni geometriche, trasferimento del calore, gradienti di pressione e rugosità delle superfici

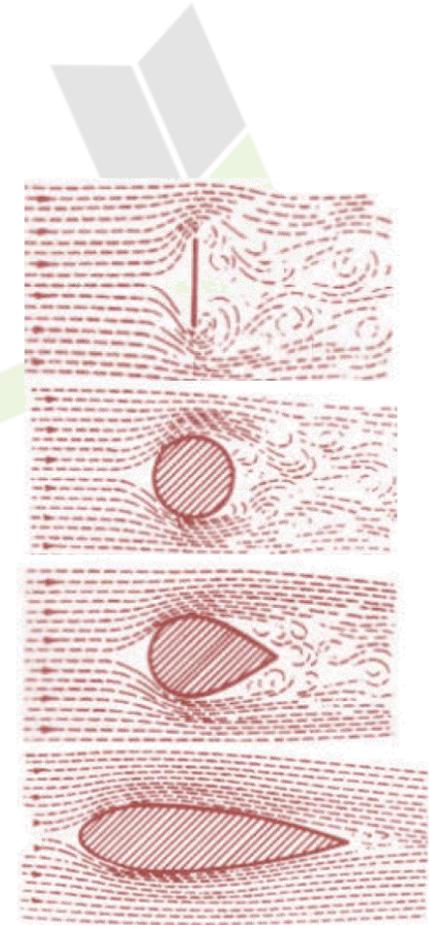
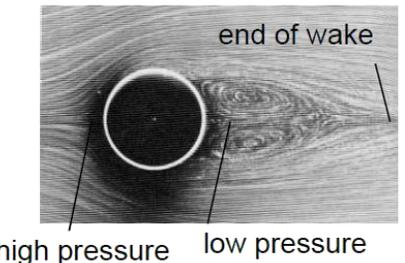
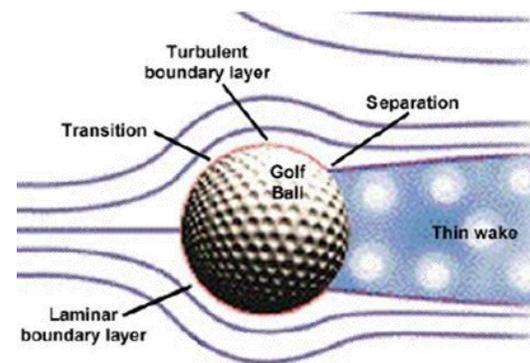


EFFETTO SCIA DEI FLUSSI

- Un flusso esterno che attraversa un corpo, lascia dietro di esso una scia di intensità ed estensione in funzione della geometria del corpo e dalla velocità del flusso, con innesco di fenomeni di trasporto
- La scia è caratterizzata dalla separazione del flusso e l'innesco di vorticosità
- Le zone di scia sono generalmente a bassa pressione
- L'effetto della viscosità (forze di coesione) sono dominanti nelle zone scia
- Forme affusolate e con continuità di curvatura riducono l'estensione e l'intensità della scia



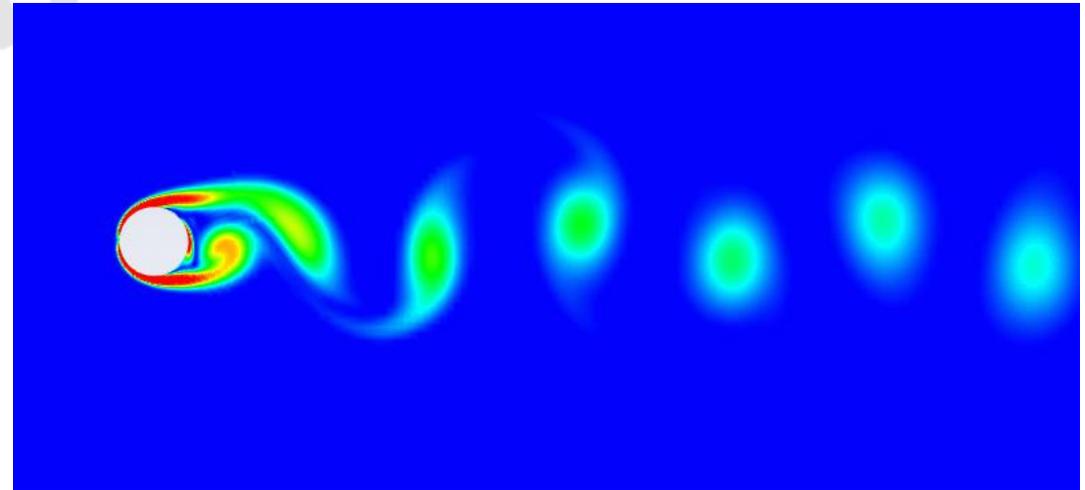
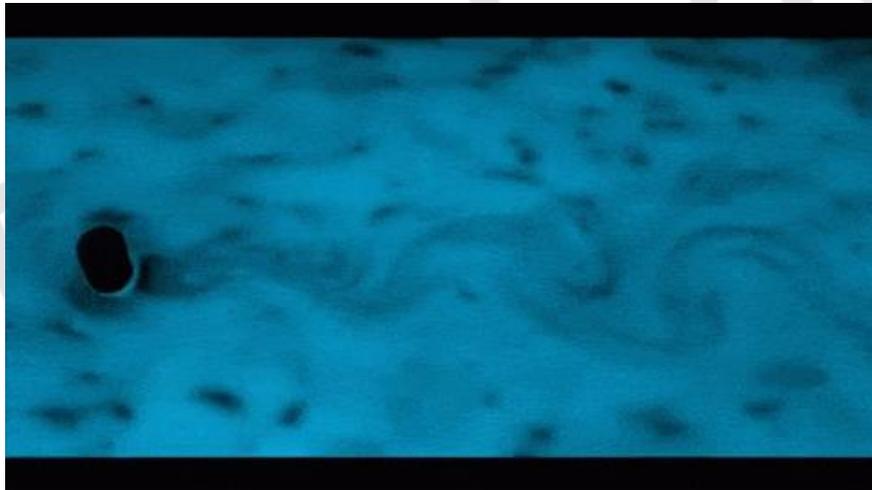
Le cunette presenti nella palla da golf ritardano la formazione di turbolenze e la separazione del fluido, migliorando così la traiettoria!



VORTICITÀ



- I vortici generalmente si formano nelle regioni di scia come conseguenza della separazione del fluido
- Spesso i vortici, superata la fase transitoria, si presentano con formazione periodica (vortici di Von Karman)
- I vortici possono generare vibrazioni che potrebbero mandare in risonanza i corpi, con effetti disastrosi (ali di aerei, ponti,...)



REYNOLDS

- Il numero di Reynolds (Re) viene usato per caratterizzare/classificare i flussi, ovvero se laminari o turbolenti
- Re è il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosse
 - **Flusso laminare**: le forze viscosse sono dominanti
 - **Flusso turbolento**: le forze di inerzia sono dominanti
- Per i flussi interni, si ha turbolenza con valori **Re > 2300**
- Per i flussi esterni, si ha turbolenza con valori **Re > 300.000**

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

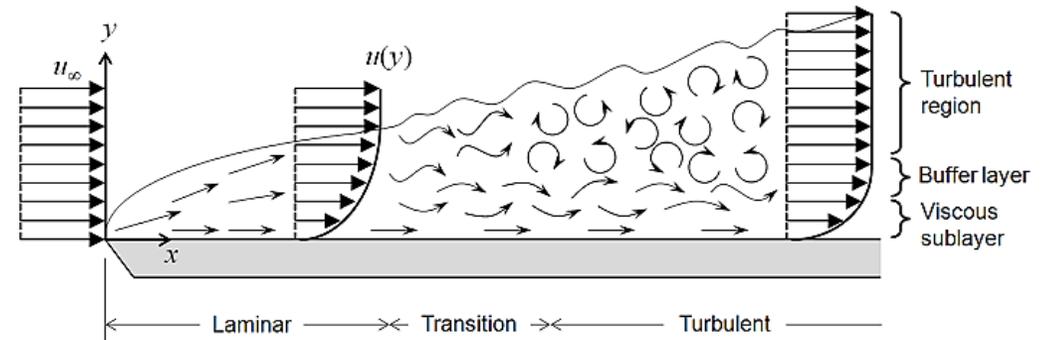
dove:

ρ è la massa volumica (kg/m³);

u è la velocità macroscopica (m/s);

L è una lunghezza caratteristica del fenomeno considerato (ad esempio nel caso del moto di un fluido in una tubazione corrisponde al diametro del tubo, mentre nel caso di un profilo alare corrisponde alla lunghezza della corda) (m);

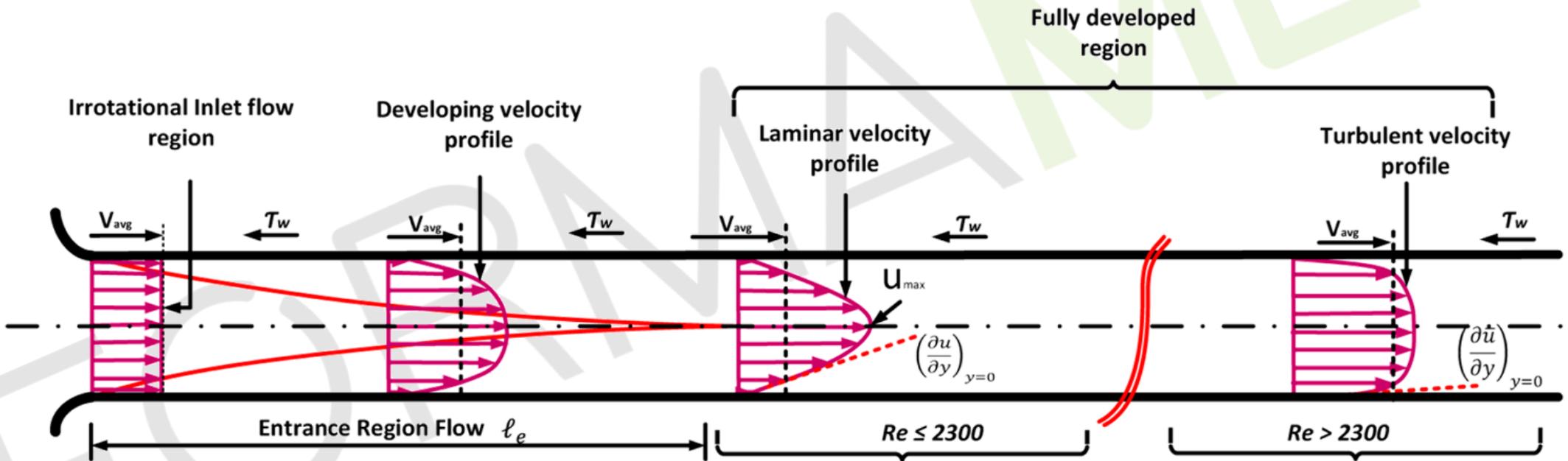
μ è la viscosità dinamica (Pa·s o N·s/m² o kg/(m·s));



SVILUPPO DEL FLUSSO



Un flusso si dice completamente sviluppato quando il suo profilo di velocità non cambia nel tempo

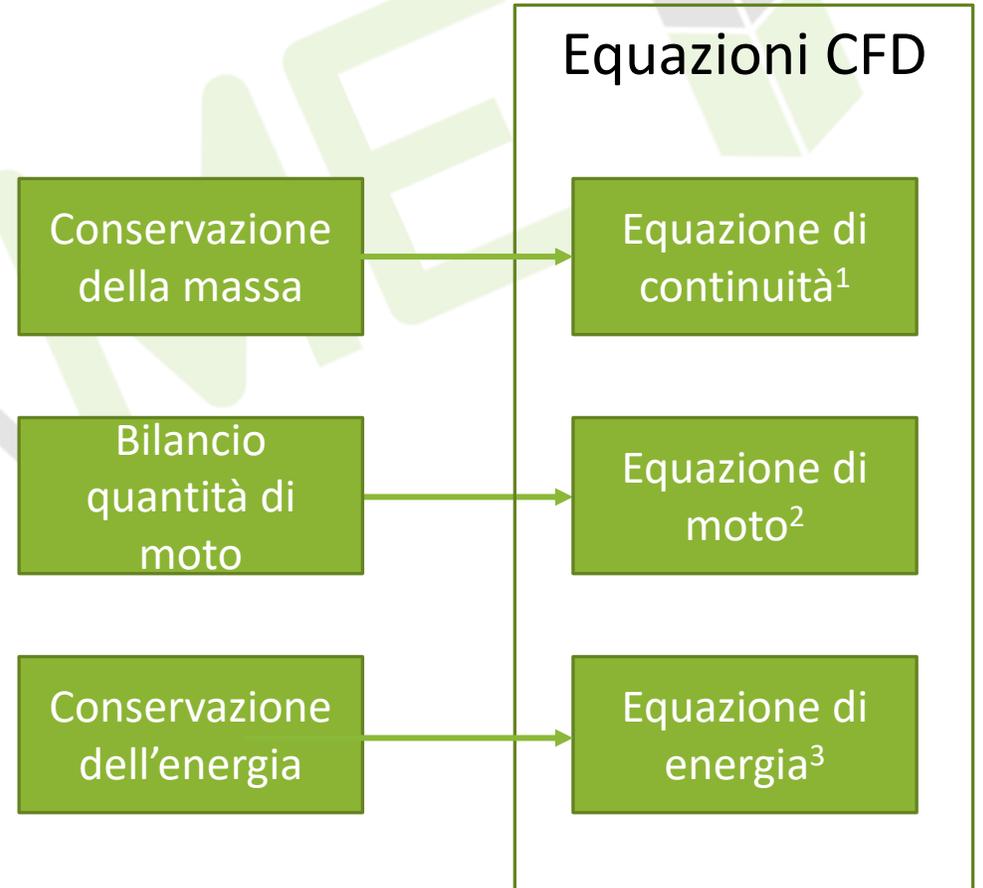


LEGGI CHE GOVERNANO IL MOTO

Le leggi che governano il moto del fluido sono derivate da:

- Conservazione di massa – Equazione di continuità
- Bilancio quantità di moto – 2° legge di newton
- Conservazione di energia – 1° legge della termodinamica

↓
Equazioni di bilancio



1 = al variare della sezione la portata resta costante

2 = la quantità di moto totale di un sistema isolato è costante nel tempo

3 = sebbene l'energia possa essere trasformata e convertita, la quantità totale non varia nel tempo



EQUAZIONI DI MOTO DEL FLUIDO



Le leggi di moto del fluido vengono risolte mediante le **equazioni di Navier-Stokes**:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + b_x \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + b_y \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + b_z \\ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \end{array} \right.$$

FORMAME© | Informazioni riservate | 22.04.2025

APPROCCI DI CALCOLO (TURBOLENZE)



Direct Numerical Simulation (DNS): calcola la formazione e dissipazione delle turbolenze di ogni grandezza

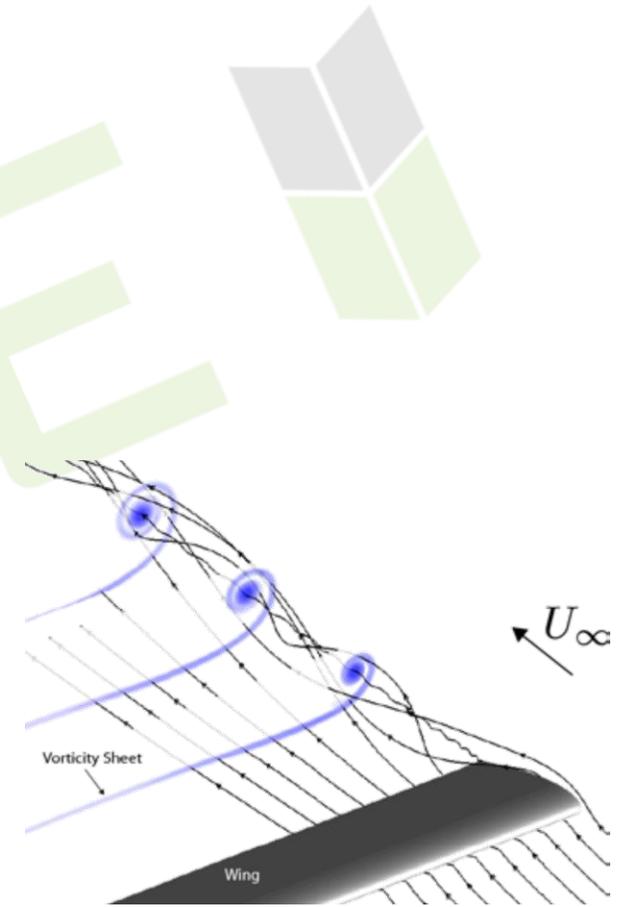
100 GB

Large Eddy Simulation (LES): calcola le turbolenze significative, mentre modella quelle di piccole dimensioni

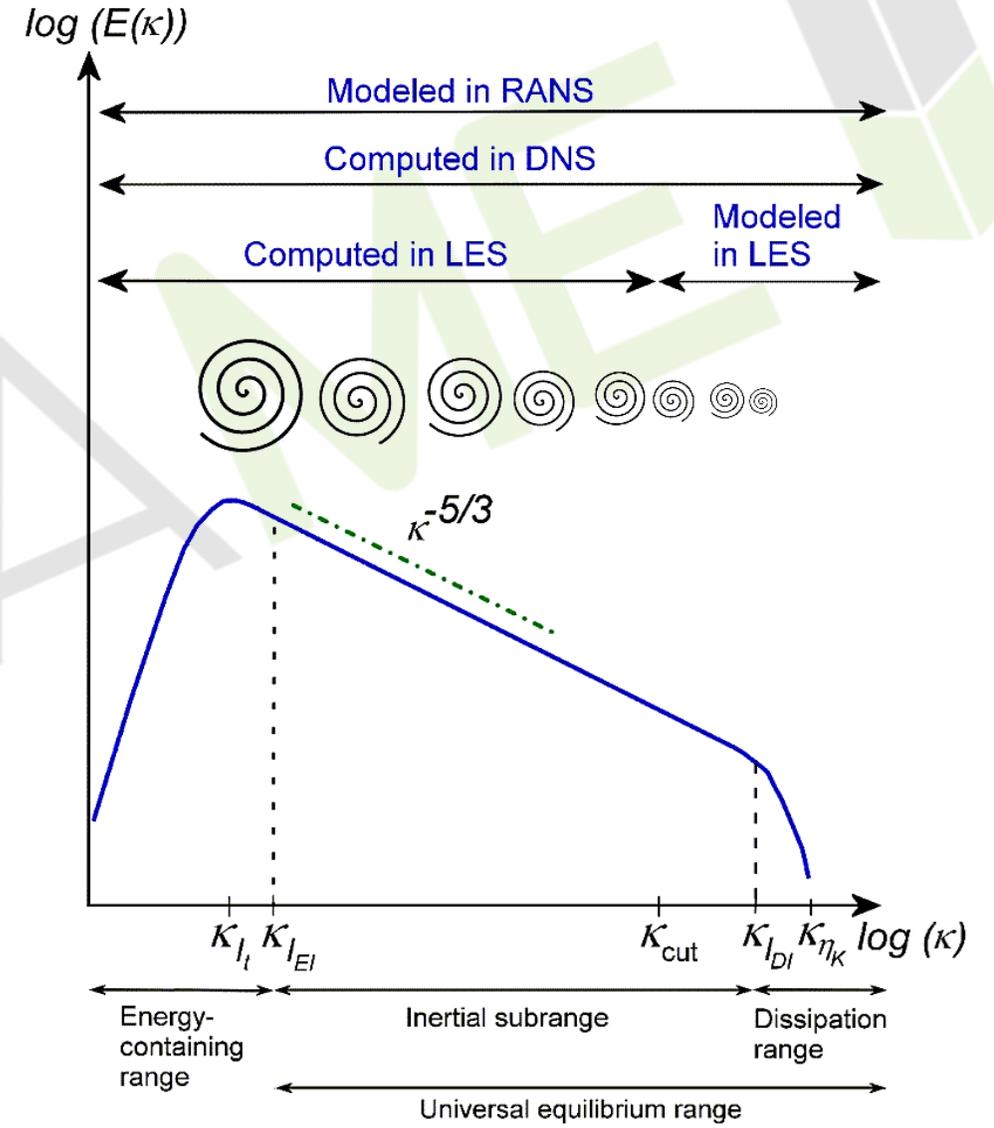
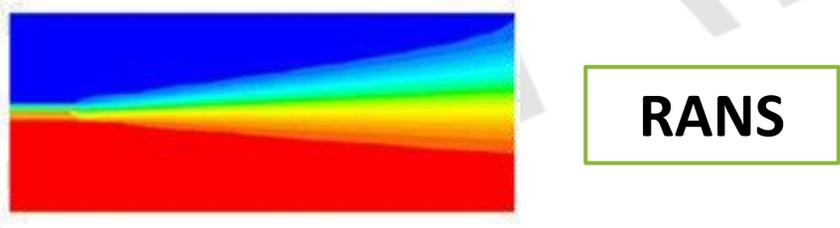
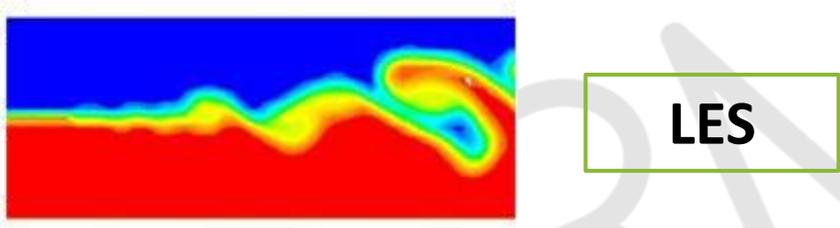
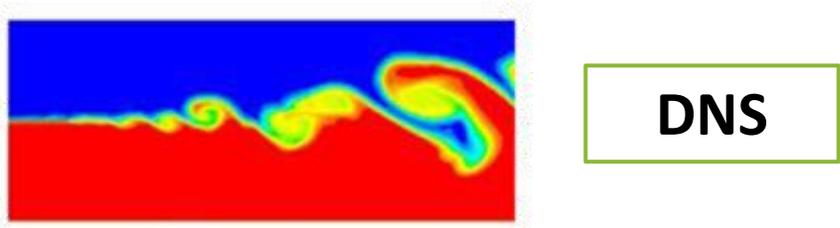
10 GB

Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS): modella tutte le turbolenze sulla base di dati di tipo sperimentale e numerico

1 GB

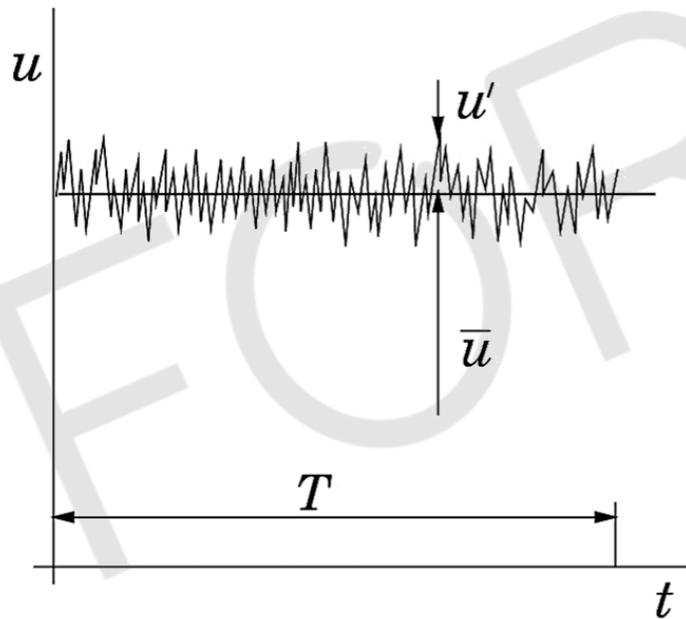


APPROCCI DI CALCOLO (TURBOLENZE)



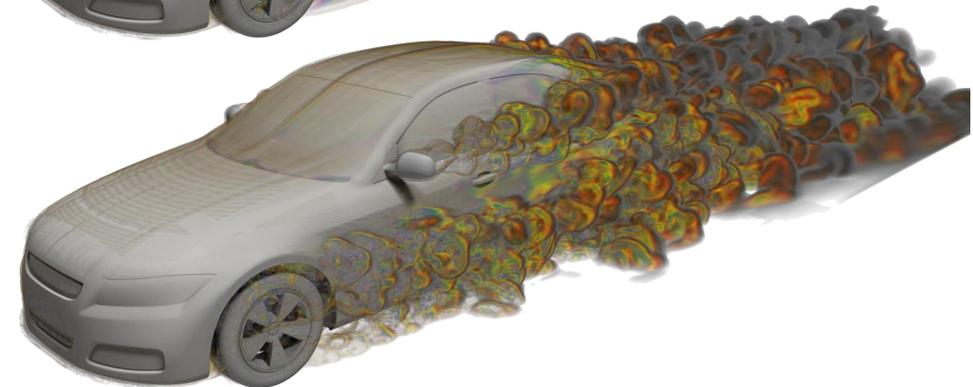
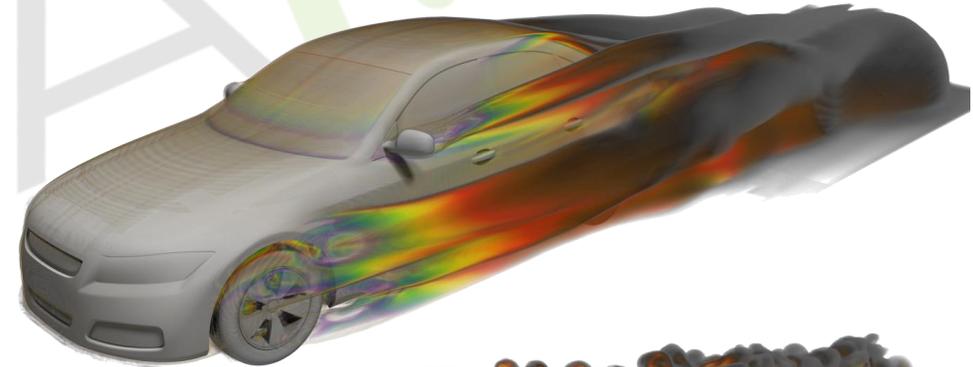
APPROCCIO "RANS"

- RANS si basa sulla modellazione delle turbolenze e di fatto è l'approccio più pratico per tener conto delle turbolenze nella maggior parte dei campi di applicazione della CFD.
- Questo approccio fornisce un **risultato medio nel tempo** dati gli effetti generali della turbolenza sul flusso, ma non lo sviluppo e ogni singolo effetto dato dalle vorticosità che si sviluppano.



RANS

DNS



Simcenter STAR-CCM+



MODELLO DI TURBOLENZA K-ε

Il metodo RANS, ci consente di modellare numericamente le turbolenze, ottenendo valori medi delle grandezze di interesse, a beneficio dei tempi di calcolo.

Le equazioni del metodo RANS necessitano di opportuni modelli di turbolenza per poter essere risolvibili.

Per tener conto delle turbolenze nel calcolo della soluzione e come queste definiscono il campo di flusso, il modello più diffuso (utilizzato da Flow) è quello a 2 costanti:

Modello di turbolenza K-ε

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

K = Energia cinetica della turbolenza (J/Kg)

ε = Dissipazione dell'energia della turbolenza (W/Kg)

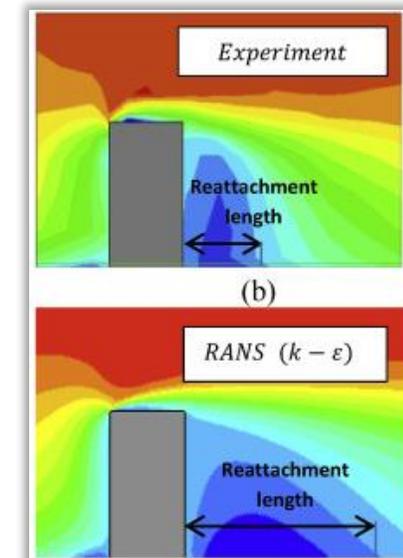
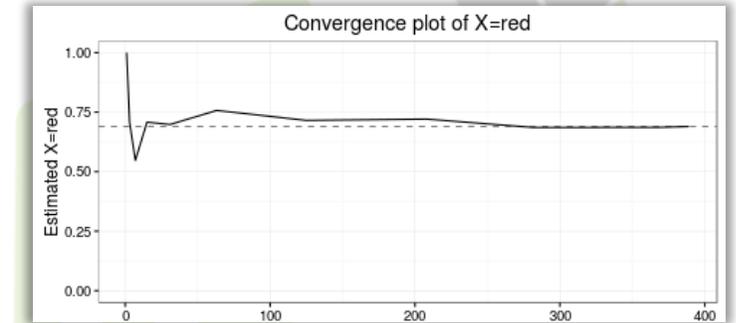


Punti di forza:

- Robusto e rapidamente va a convergenza
- Abbastanza accurato sia per flussi interni che esterni

Punti di debolezza:

- Assume che la viscosità di turbolenza è uguale in tutte le direzioni (isotropa)...assolutamente non vero in presenza di flussi fortemente vorticosi o in presenza di separazione del flusso
- Scarsa accuratezza con flussi complessi che presentano alti gradienti di pressione, separazione e ricongiungimento del flusso, così come brusche variazioni di curvatura del flusso

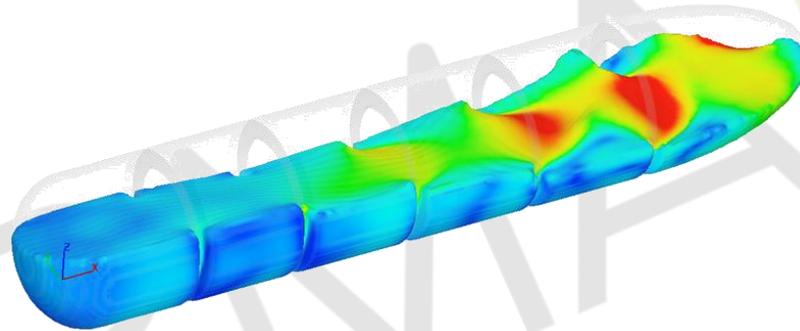
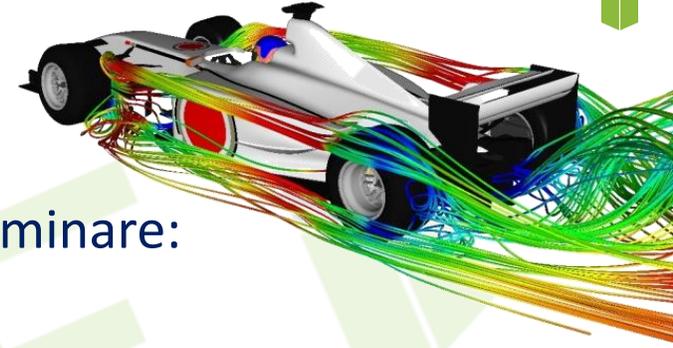


METODO CFD & FLOW SIMULATION



La fluidodinamica computazionale (CFD) è la scienza che ci consente di determinare:

- Flussi di fluido (esterni e interni)
- Trasferimento di massa e calore
- Cambiamenti di fase
- Reazioni chimiche
- Combustione



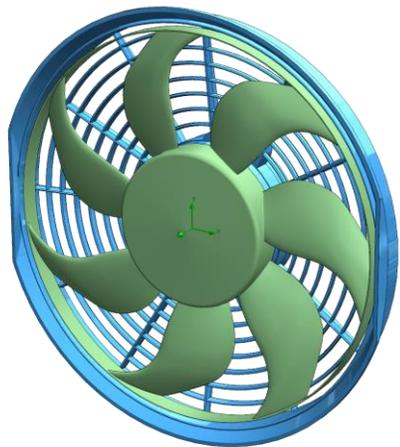
...Risolvendo set di equazioni differenziali alle derivate parziali



Così come per il metodo FEM, anche la CFD fornisce una soluzione **approssimata!**



WORKFLOW DI ANALISI



**Preparazione del
modello CAD
(Pre-calcolo)**



**Mesh
(Pre-calcolo)**



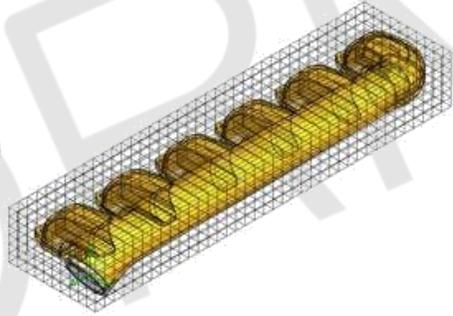
FORMAME

FLOW esegue il calcolo basandosi sul metodo di discretizzazione del dominio di tipo **FVM (Finite Volume Method)**, producendo una **mesh cartesiana di tipo non-strutturata mediante dei cuboidi**.

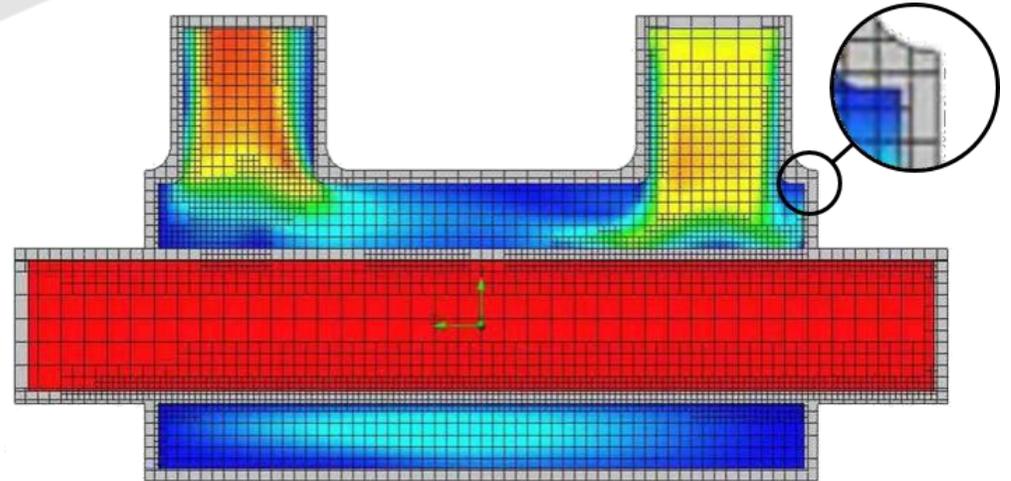
La mesh è di tipo **immersed-body** (nello stesso cuboide può esserci fluido e solido).



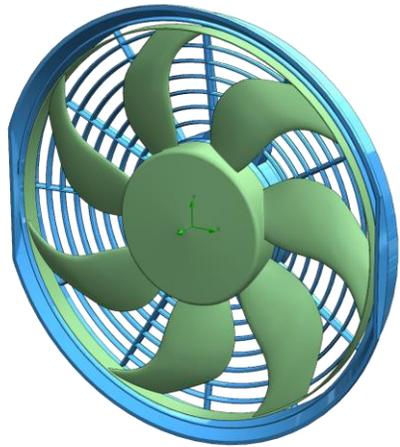
FEM



FVM



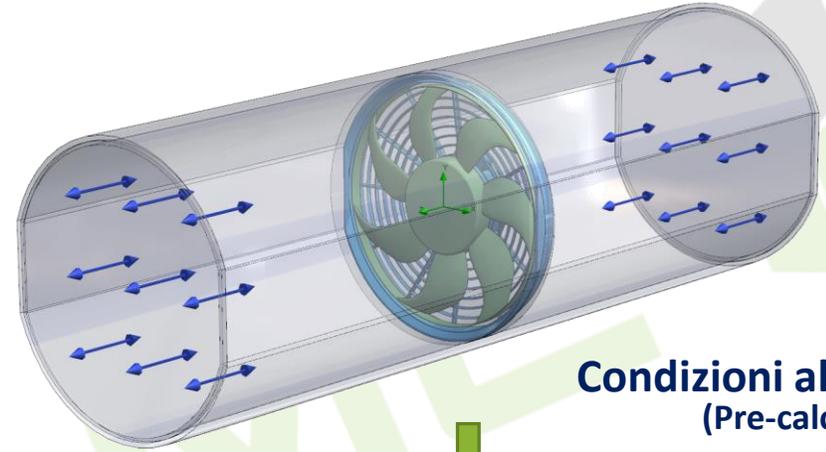
WORKFLOW DI ANALISI



Preparazione del modello CAD (Pre-calcolo)



Mesh (Pre-calcolo)



Condizioni al contorno (Pre-calcolo)



$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{Q(x,t)}{c\rho}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

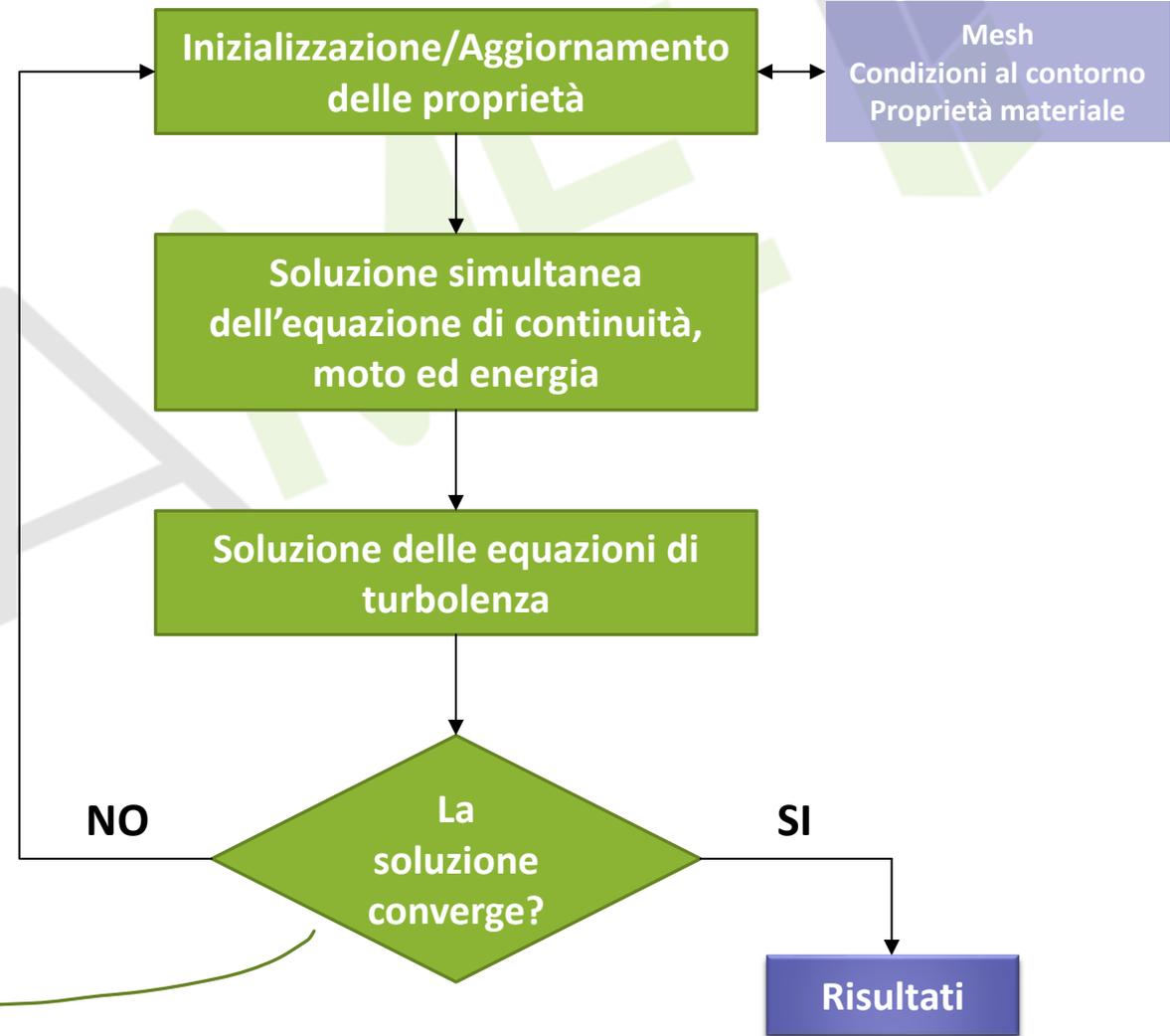
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \nabla^2 u = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - 4 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + 8u - g(x,t)$$

Risoluzione del problema (Calcolo)

SOLUZIONE

L'approccio di calcolo che porta alla soluzione è **di tipo iterativo** e si basa su delle condizioni di partenza note (velocità, pressione, temperatura,...), rispetto le quali il solutore inizia il processo di calcolo per raggiungere la **convergenza**.

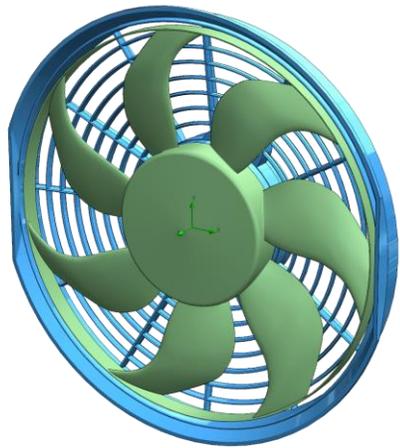


Il calcolo può terminare in due condizioni specifiche:

- 1) La soluzione presenta un errore inferiore a quello di soglia, quindi si può ritenere a convergenza
- 2) Si è raggiunto il massimo numero di iterazioni o tempo di calcolo a disposizione



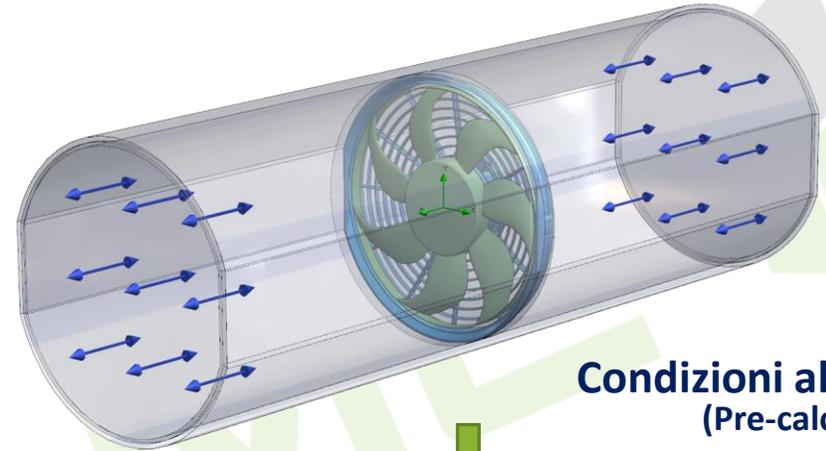
WORKFLOW DI ANALISI



Preparazione del modello CAD (Pre-calcolo)



Mesh (Pre-calcolo)



Condizioni al contorno (Pre-calcolo)



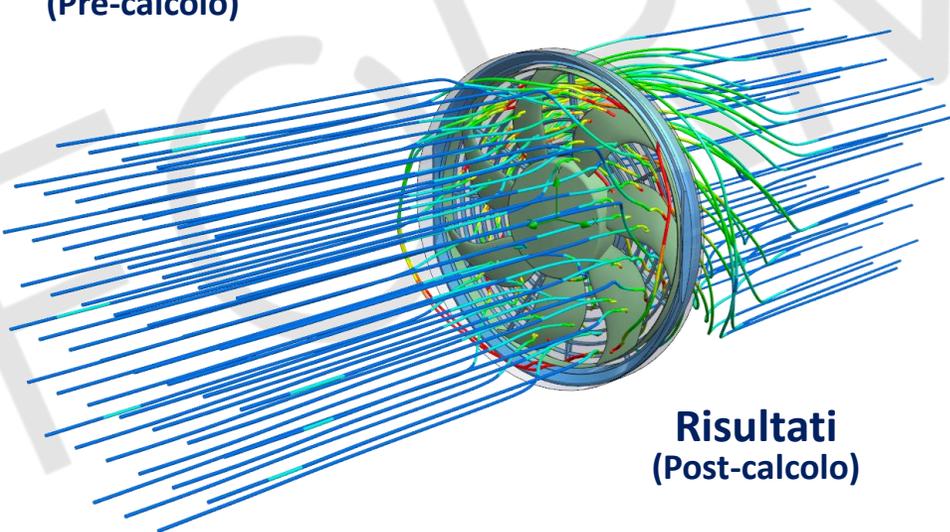
$$\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{Q(x,t)}{c\rho}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

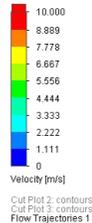
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \nabla^2 u = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} - 4 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + 8u - g(x,t)$$

Risoluzione del problema (Calcolo)



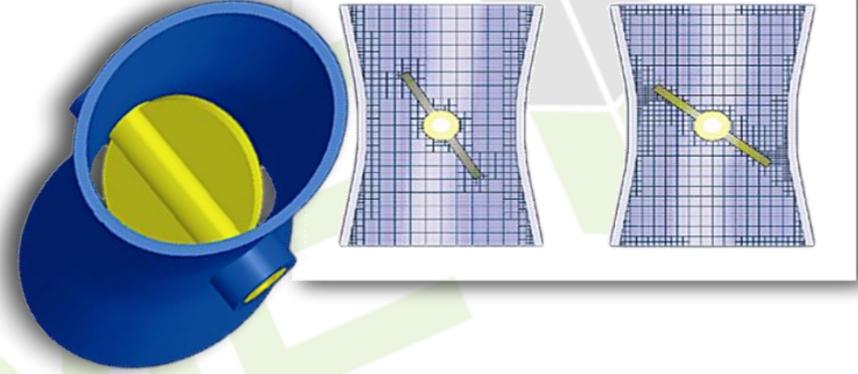
Risultati (Post-calcolo)



Velocity [m/s]
Cut Plot 2: contours
Cut Plot 3: contours
Flow Trajectories 1

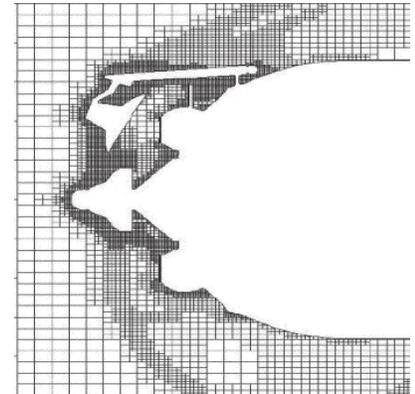
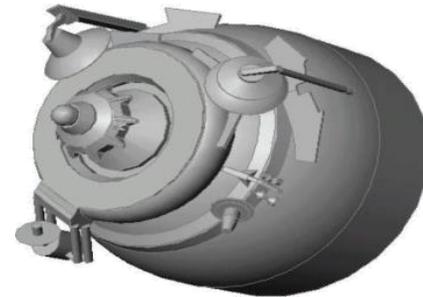
Creazione mesh della parte solida e fluida

- Creazione automatica della mesh per le aree fluide e solide
- Rilevamento automatico di vuoti e fori nel volume
- Variazione automatica della dimensione della mesh



Vantaggi

- Nessuna operazione di creazione manuale della mesh
- Nessuna necessità di conoscere gli algoritmi CFD
- Riduzione dei tempi di esecuzione



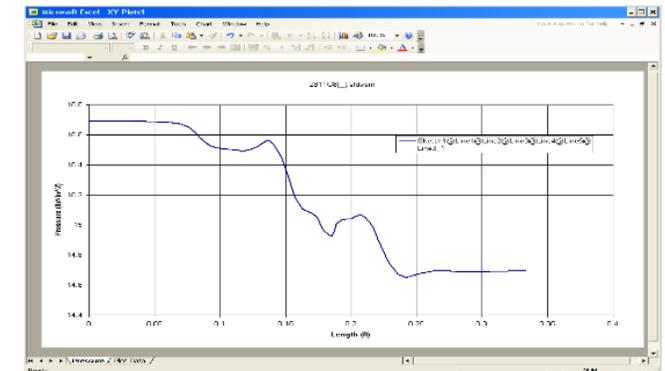
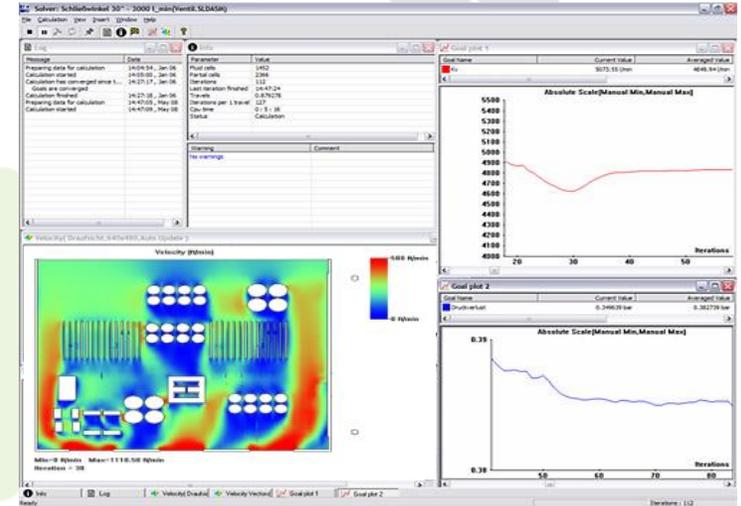
CONTROLLO DI CONVERGENZA

Controllo automatico della convergenza

- Elevata efficienza nel giungere a convergenza e semplici controlli
- Convergenza alla prima esecuzione

Vantaggi

- Riduzione del numero delle ri-esecuzioni dovute alla mancanza di convergenza
- I tempi di esecuzione ridotti consentono di analizzare scenari con più varianti
- Eliminazione delle modifiche al modello per la convergenza

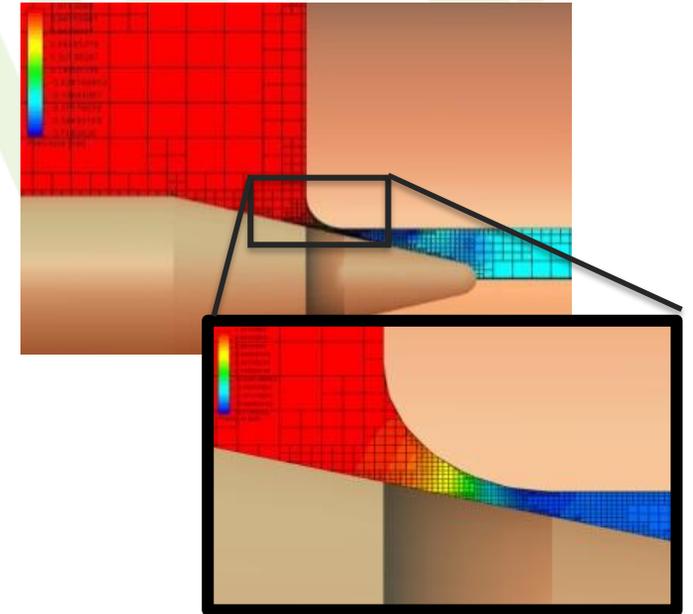


Funzione di parete e strati limite

- Modellazione delle pareti indipendente dalla mesh di base, mediante l'approccio nuovo ed esclusivo denominato 2SWF (Two-Scale Wall Function)

Vantaggi

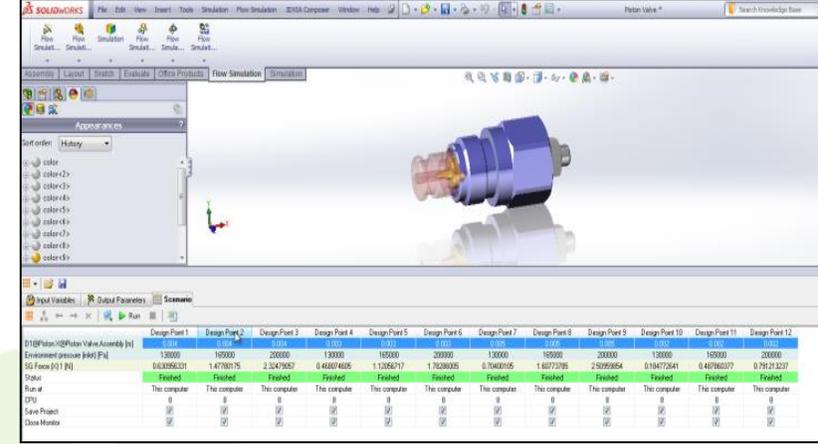
- Simulazioni precise, inclusi gli effetti del flusso sulle pareti
- Nessuna necessità di impostare le funzioni specifiche per il trattamento di parete (Y^+)



VARIANTI DI PROGETTO

Analisi delle varianti di progetto

- Potente studio parametrico e di ottimizzazione (anche DOE)
- Analisi di tipo condizionale e parametrica
- Funzione di "clonazione"
- Modifica del progetto → esecuzione automatica della mesh → calcolo → Risultati!

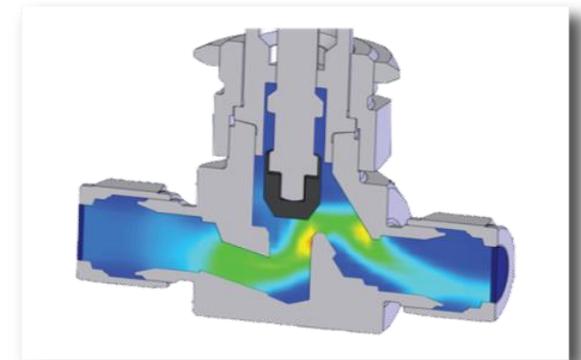
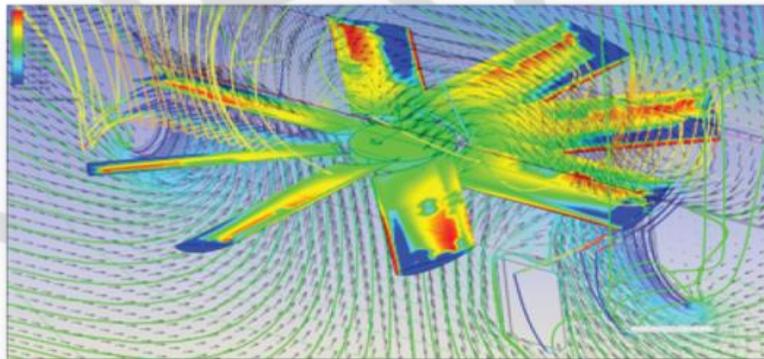
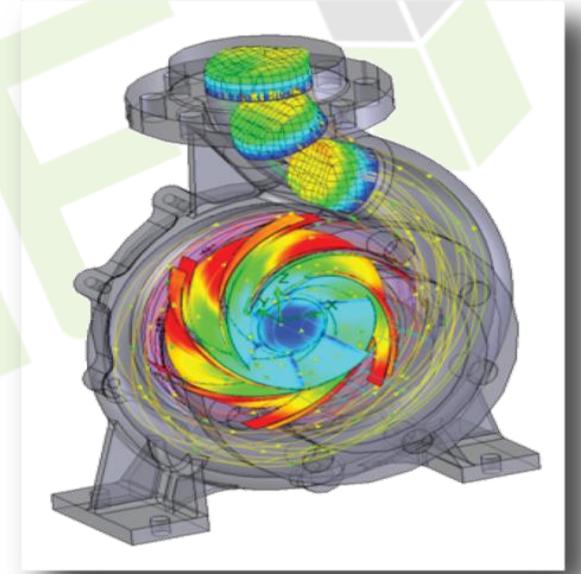


Vantaggi

- Le simulazioni di tipo condizionale consentono di realizzare un progetto ottimale
- La CFD fornisce informazioni tecniche dettagliate e supporta l'innovazione

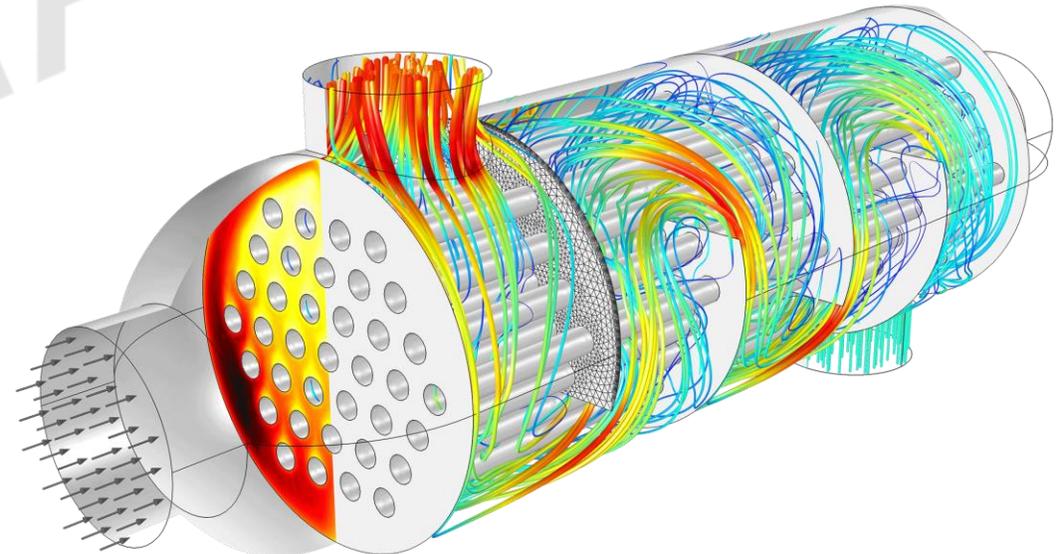
APPLICAZIONI: PERDITE DI CARICO

- Determinazione del coefficiente di flusso dei dispositivi (C_v/K_v)
- Ottimizzazione del processo di estrusione
- Efficienza dei filtri
- Efficienza delle pompe
- Determinazione delle curve (portata-prevalenza) dei ventilatori



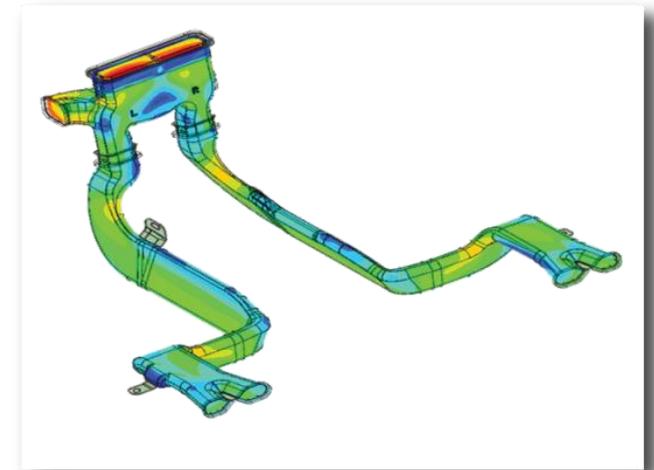
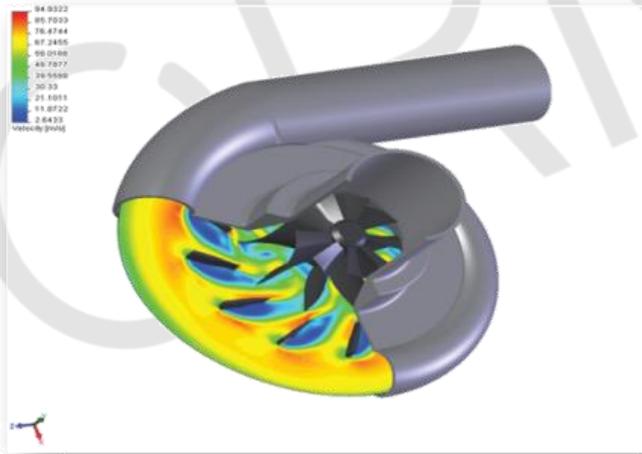
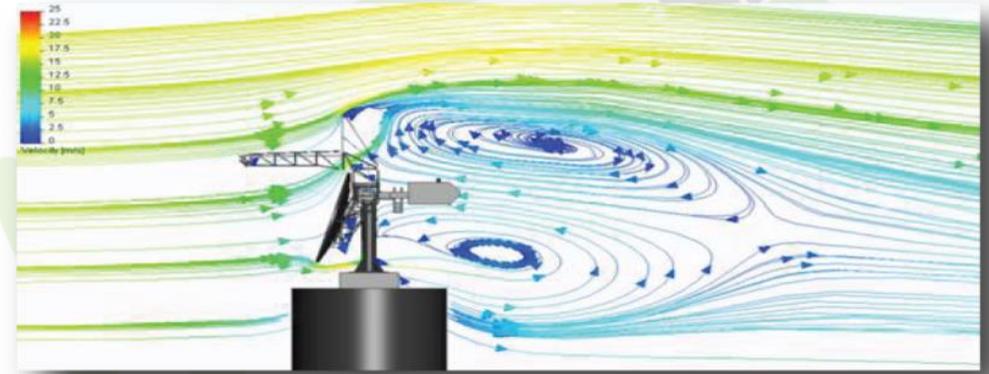
APPLICAZIONI: TRASFERIMENTO TERMICO

- Efficienza degli scambiatori di calore
- Raffreddamento di dispositivi elettronici
- Raffreddamento attrezzature per stampaggio a iniezione
- Irraggiamento solare
- Scambio termico coniugato (fluido-solido)



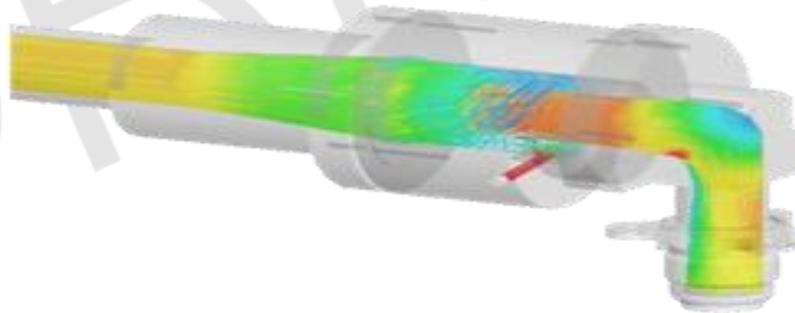
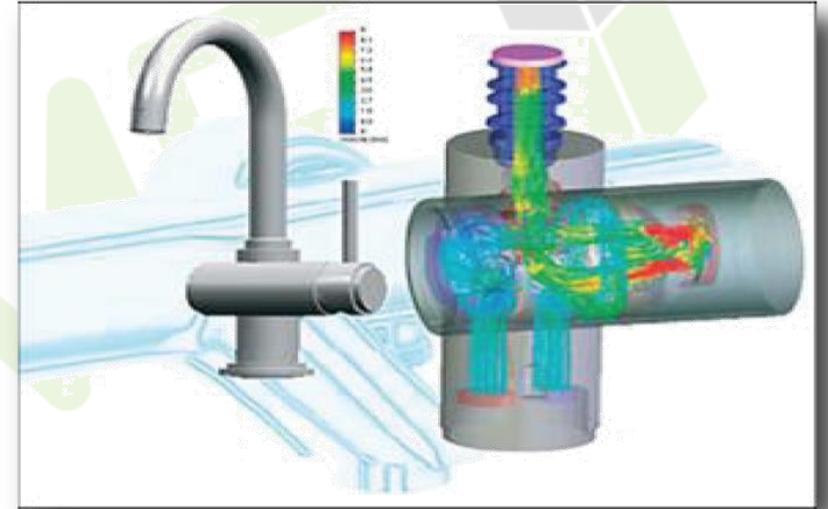
APPLICAZIONI: CAMPI DI FLUSSO

- Test aerodinamici
- Previsione della cavitazione
- Previsione e ottimizzazione del livello di rumore
- Verifica della distribuzione del flusso nei collettori
- Flussi non assial-simmetrici su corpi girante



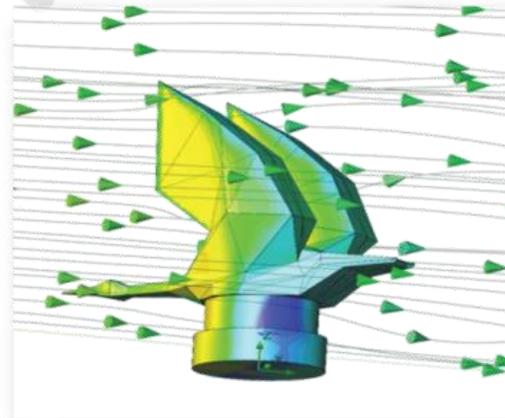
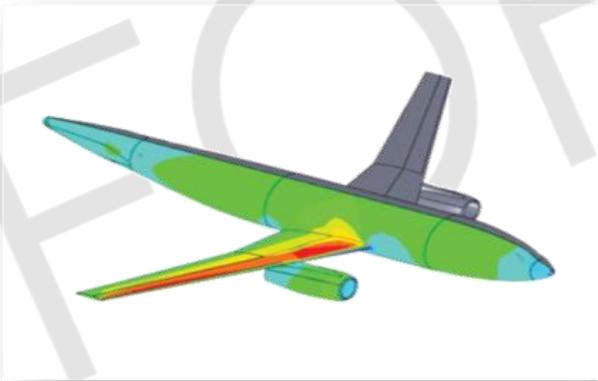
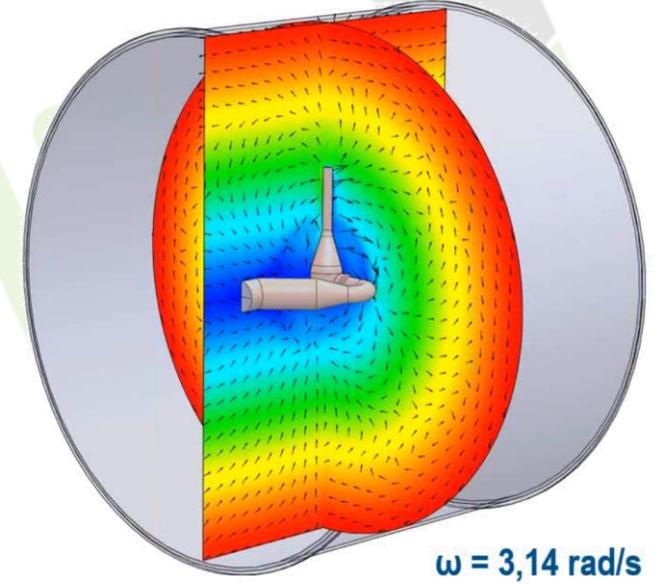
APPLICAZIONI: MISCELAZIONE

- Progettazione dei condotti di condizionamento dell'aria
- Co-estrusione della gomma
- Simulazione dei processi di colata (Free-Surface)
- Miscelatori acqua

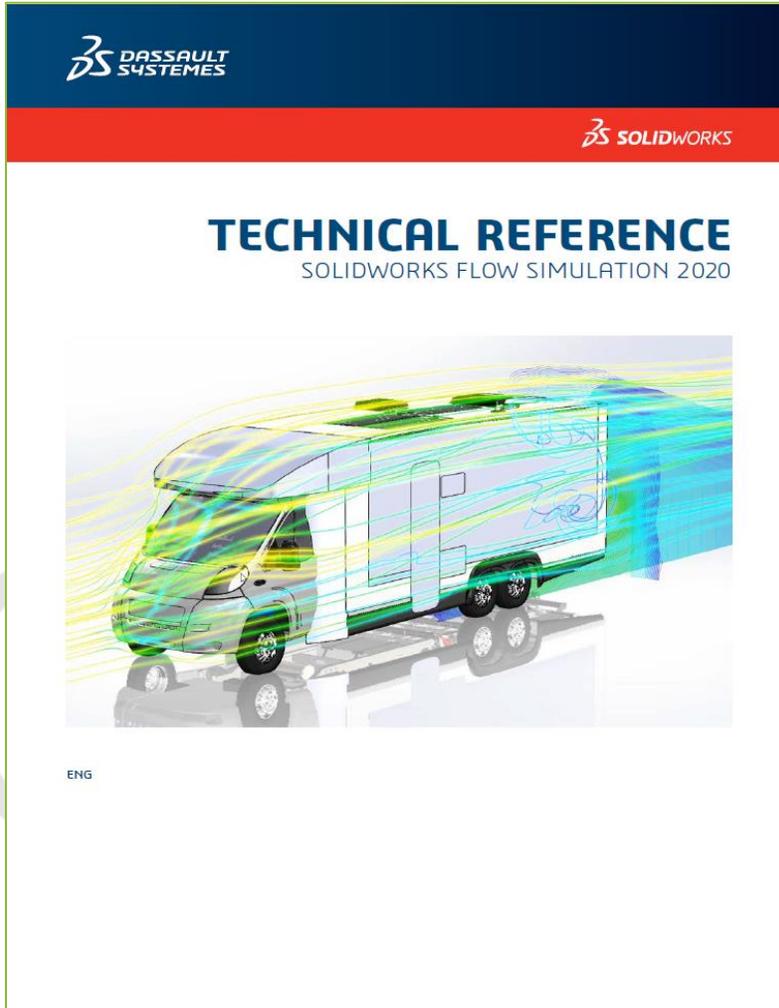
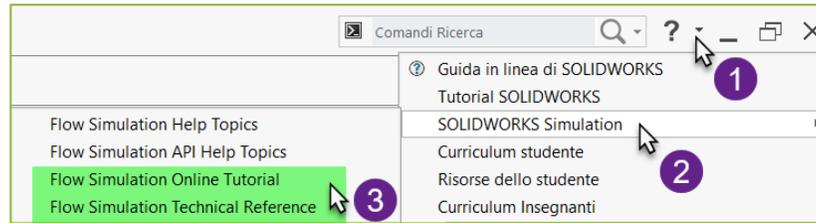


APPLICAZIONI: STIMA DELLE FORZE

- Coefficienti aerodinamici
- Forze operative per le valvole
- Carichi del vento su edifici e strutture
- Pressioni indotte dai flussi per l'analisi della sollecitazione
- Distribuzione della temperatura per l'analisi di stress termico
- Previsione della coppia richiesta

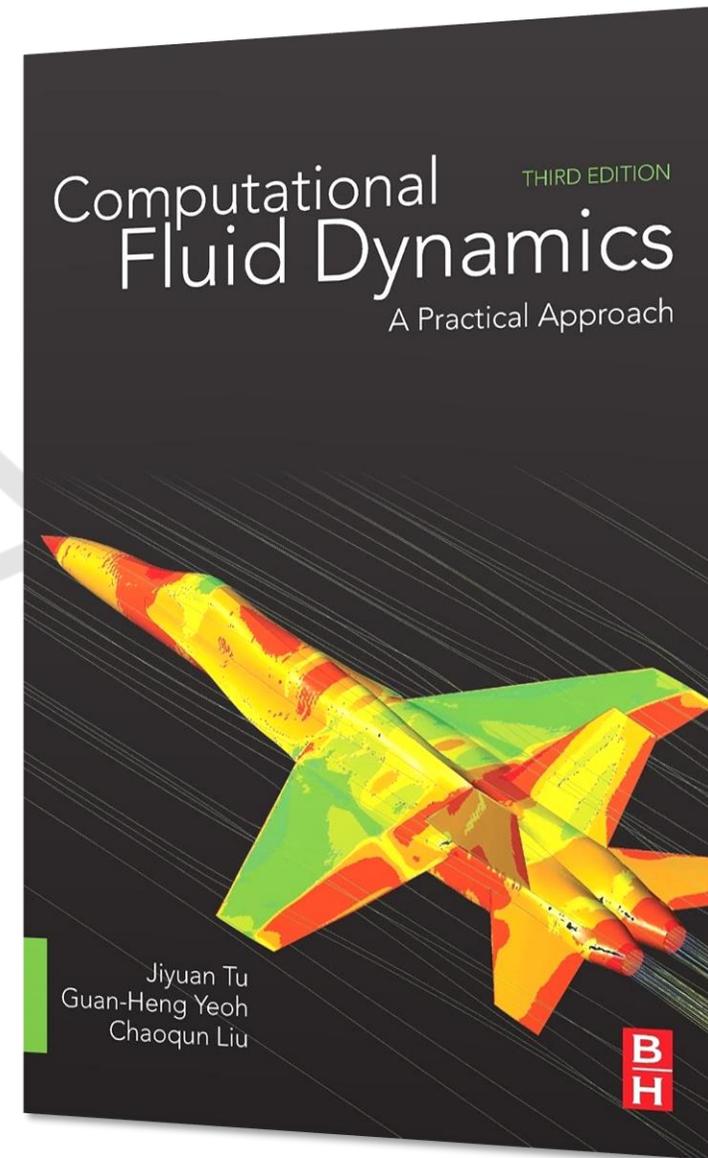


RISORSE FLOW SIMULATION



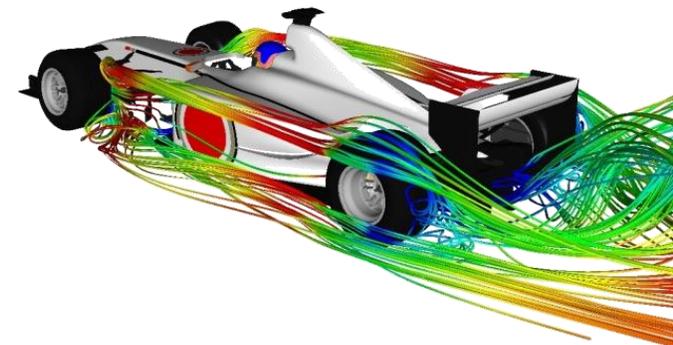
LIBRO CONSIGLIATO

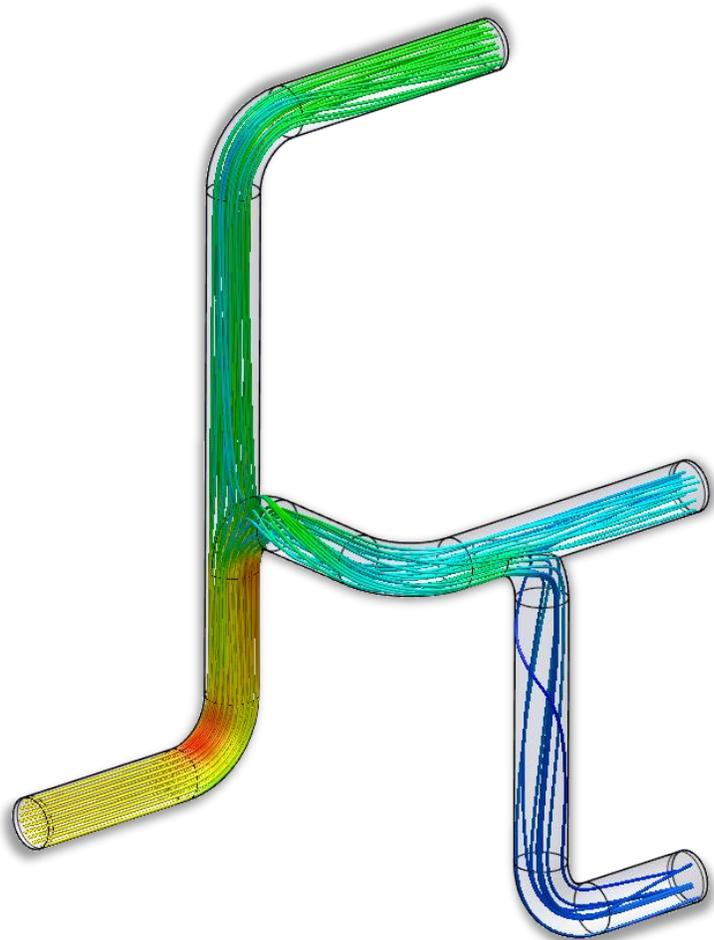
- Equazioni che governano il calcolo CFD
- Tipologie di mesh nel calcolo CFD
- Tecniche di calcolo e soluzione
- Approcci DNS - LES - RANS
- Modelli di turbolenza
- Convergenza & Accuratezza



RIASSUMENDO...

- Flow Simulation utilizza l'approccio di calcolo delle turbolenze di tipo **RANS**, fornendo in output i valori medi delle grandezze di interesse (no fluttuazioni).
- Per tener conto delle turbolenze nel calcolo della soluzione e come queste definiscono il campo di flusso, implementa il **modello di turbolenza K-ε**.
- Flow Simulation discretizza il dominio di calcolo con metodo **FVM** (Finite Volume Method), producendo una **mesh cartesiana di tipo non-strutturata mediante dei cuboidi**.
- In Flow Simulation **non possiamo tener conto** della combustione, delle reazioni chimiche, dei fluidi multi-fase (in parte dei cambiamenti di fase), così come del movimento dei corpi (ad eccezione della rotazione).

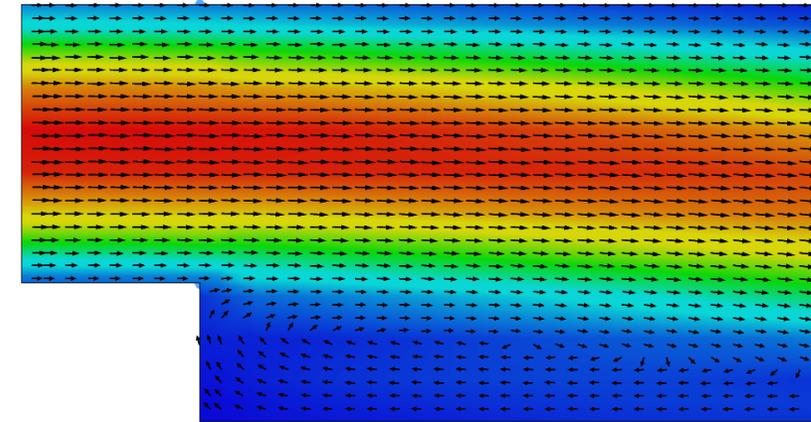
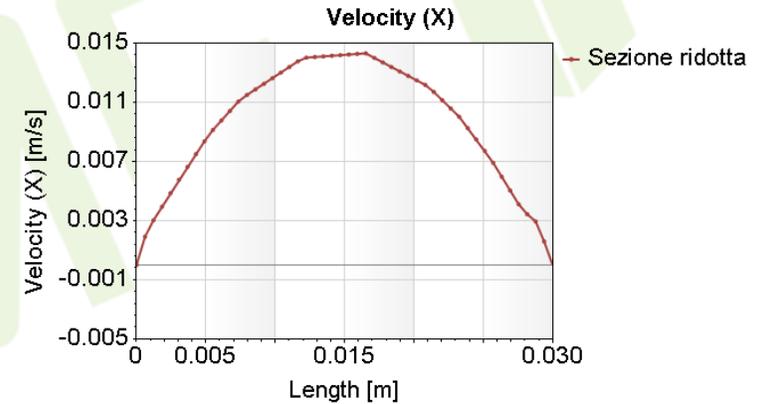




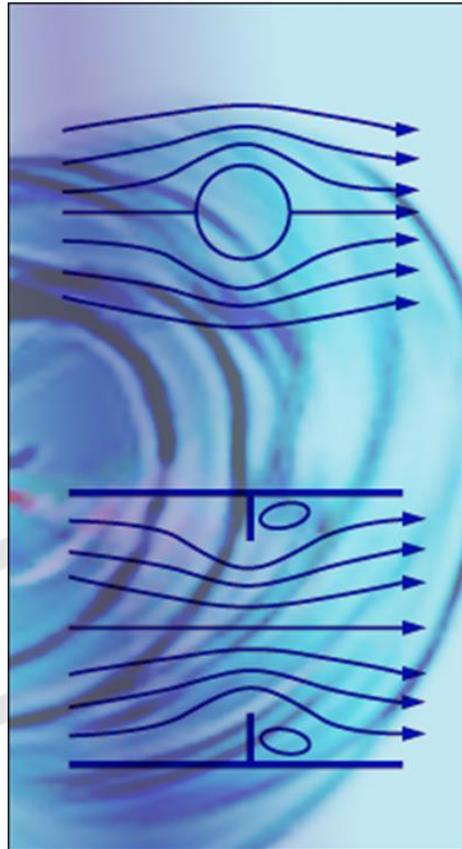
Workflow per eseguire uno studio

Lezione 2

- Preparare il modello CAD all'analisi
- Definizione e applicazione di LIDs
- Impostare l'analisi CFD con il wizard
- Applicare le condizioni al contorno
- Definire gli obiettivi di calcolo
- Avviare l'analisi e vedere l'anteprima dei risultati
- Visualizzare i risultati di interesse.



In Flow Simulation possiamo impostare 2 tipologie di analisi:



Esterna: quando siamo interessati a studiare il flusso che impatta sulle superfici esterne del nostro prodotto (edificio, automobile, antenna) e ottenere i risultati di interesse.

Interna: quando siamo interessati a studiare il flusso che scorre all'interno del nostro prodotto (valvola, tubazione, pompa) e ottenere i risultati di interesse.

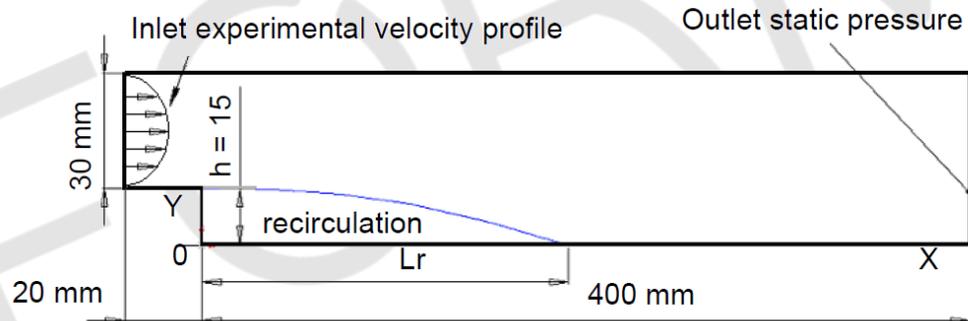
CASO STUDIO: CONDOTTA CON ESPANSIONE UNILATERALE



In questo caso studio si vuole riprodurre il fenomeno fisico di **ricircolazione del fluido** a seguito dell'espansione unilaterale della condotta.

Inoltre, si vuole verificare che il flusso in condotta sia effettivamente **laminare o turbolento** in funzione del numero di Reynolds:

- 500 Re
- 5000 Re



3 volte la sezione



5 volte la sezione



10 volte la sezione



SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION



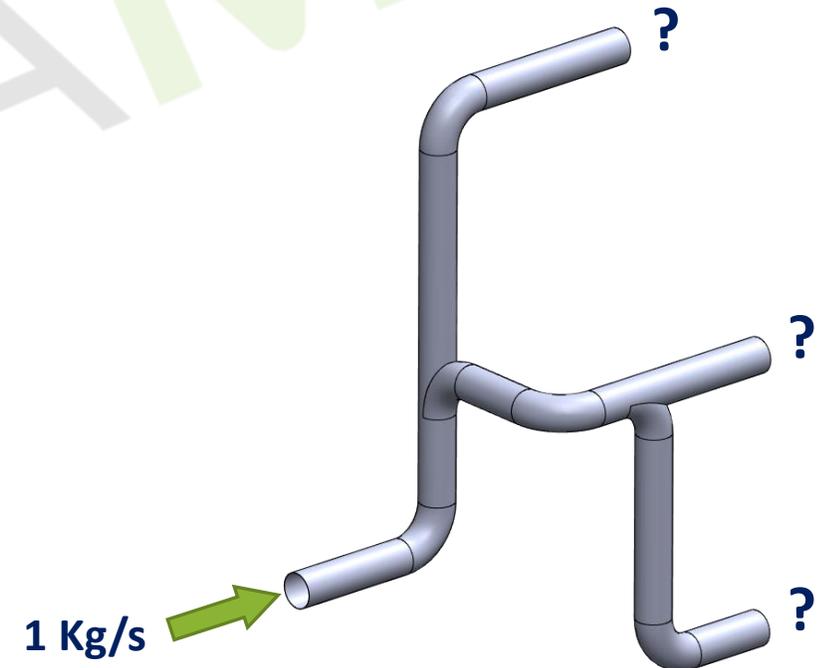
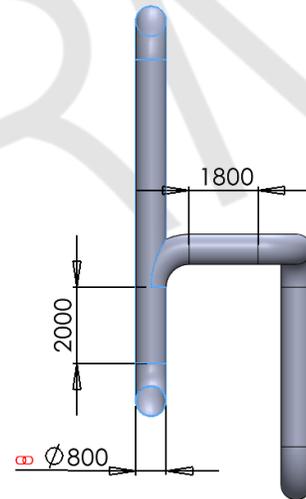
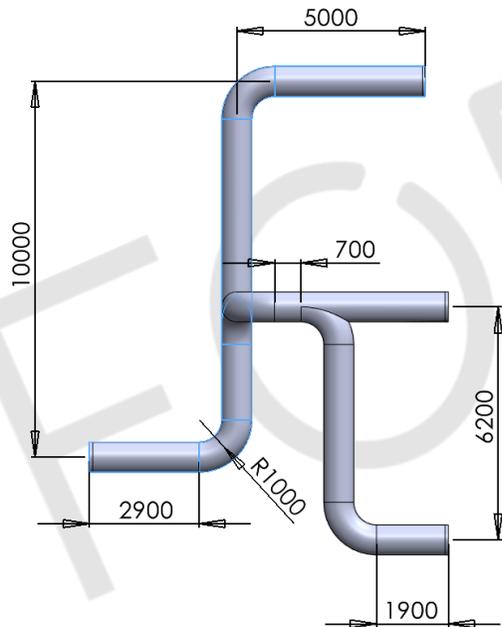
FORUMS

CASO STUDIO: TUBAZIONE CON DIRAMAZIONI



Data una portata massica di **1 Kg/s** in ingresso, si vuole conoscere la **distribuzione di portata** sulle 3 uscite della tubazione.

In considerazione della legge di conservazione di massa, ci si aspetta che la somma delle portate in uscita sia pari al valore in ingresso.





SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION

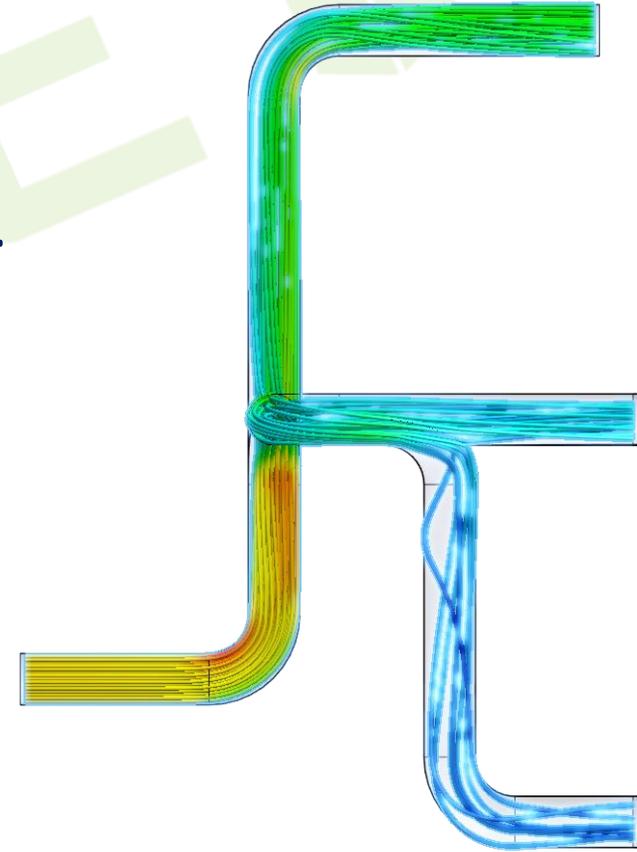


FORUMS

RIASSUMENDO...



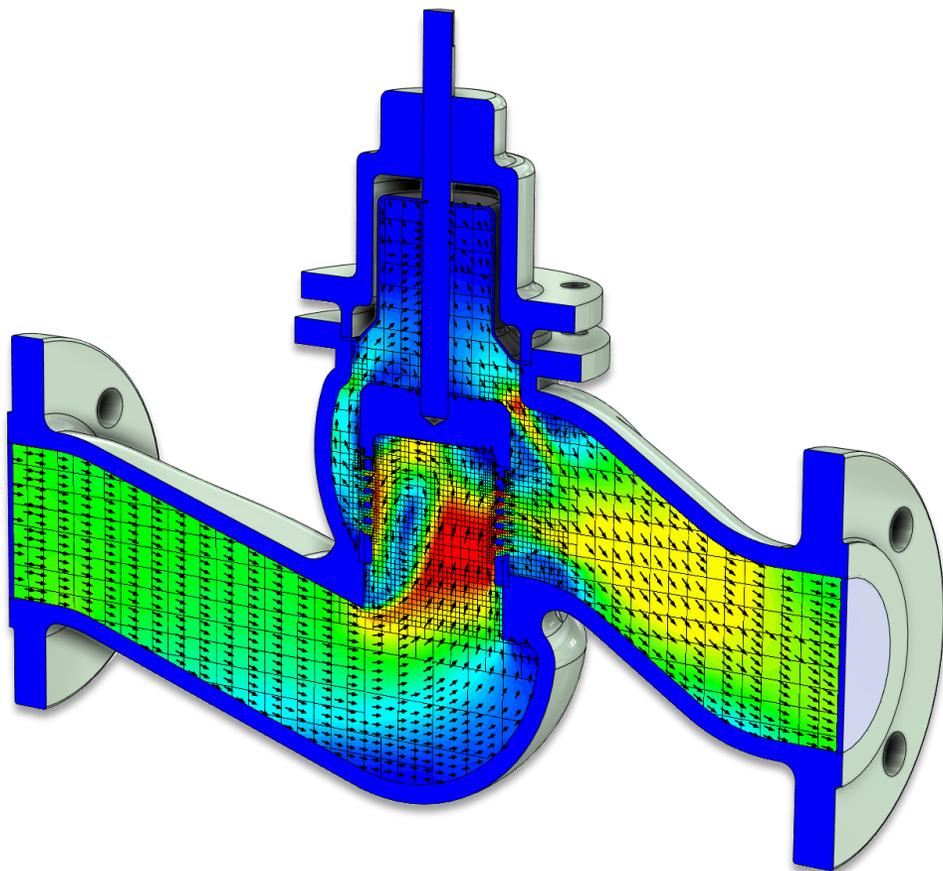
- Possono essere eseguite analisi **interne ed esterne**.
- Il **Lid** (chiusura) deve sempre essere **estruso verso l'interno**.
- Le **condizioni al contorno** vanno applicate alla **faccia interna** del Lid.
- Per incrementare l'accuratezza dei risultati di interesse, conviene specificarli come **Goal**.
- I risultati di Plot forniscono la mappatura del valore sull'**intero dominio di calcolo** o su **specifiche entità (XY-Plot)**.
- I risultati di **Flow Trajectories** consentono di visualizzare i filetti fluidi che scorrono all'interno del dominio, plottando la quantità di interesse.





Esercizio:
Tubazione conica

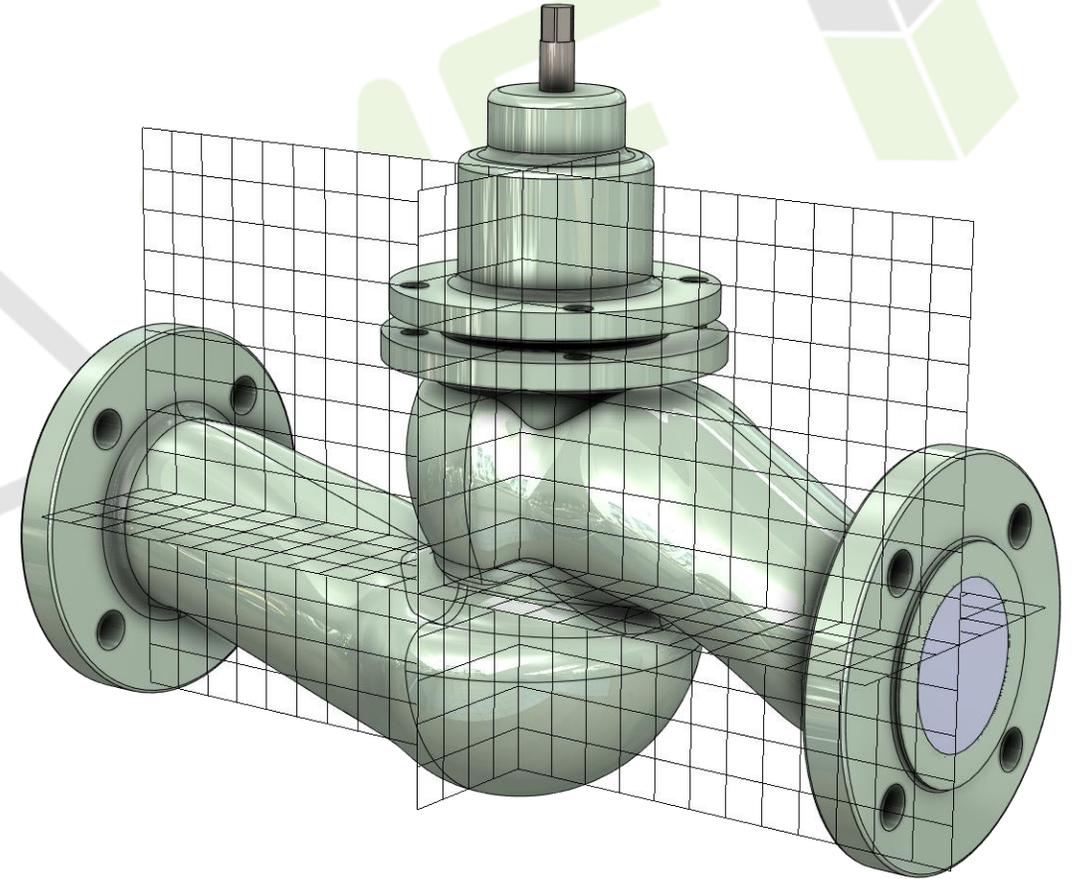
FORMAME



Mesh e tecniche di rifinitura

Lezione 3

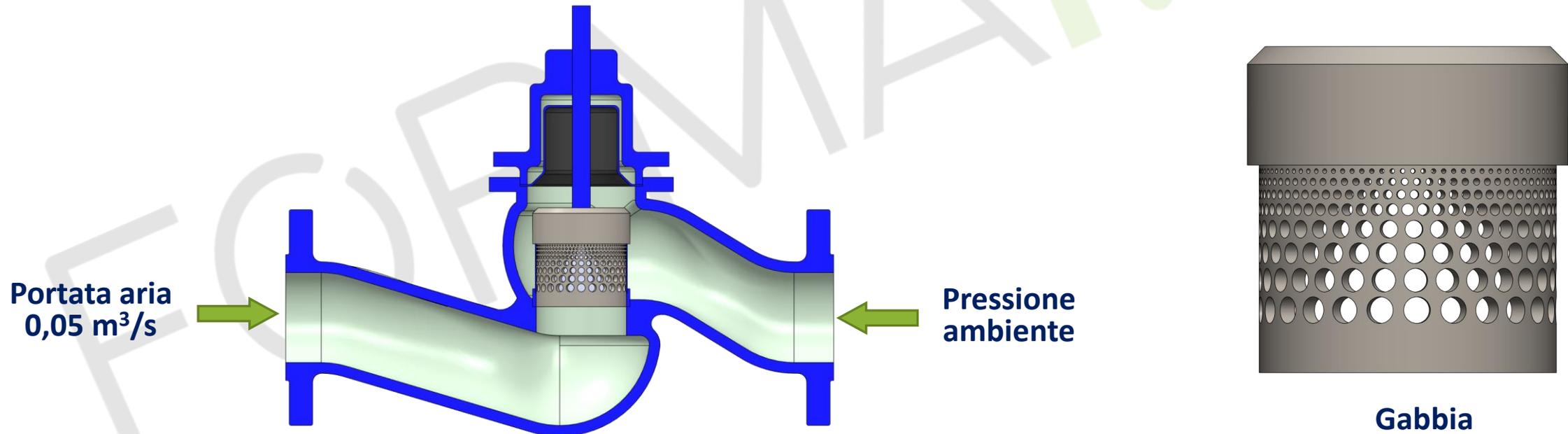
- Mesh e definizioni specifiche
- Strumenti per modificare la mesh
- Mesh globale e sue opzioni
- Rifinitura mesh globale
- Controllo locale di mesh
- Mesh adattativa
- Confronto risultati



CASO STUDIO: VALVOLA DI REGOLAZIONE

Si vogliono calcolare le **perdite di carico della valvola**, nella condizione di completa apertura, considerando una portata di $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'obiettivo è quello di definire una mesh opportuna per catturare il flusso di gas che attraversa la gabbia, ottimizzando i tempi di calcolo.





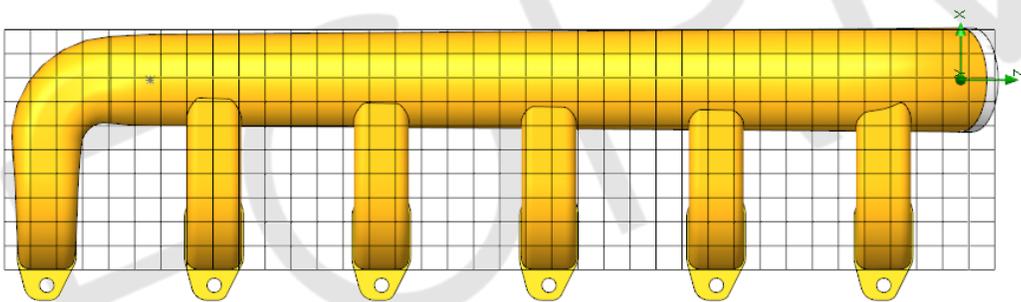
SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION



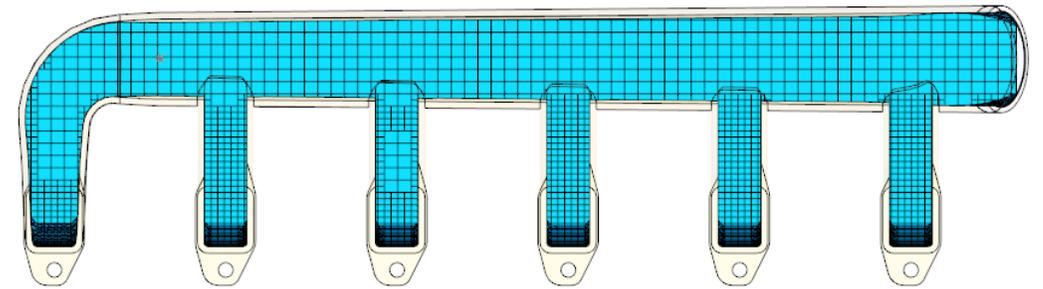
FORUMS

MESH IN FLOW SIMULATION

- La **Mesh di base** è ottenuta dividendo il dominio di calcolo, ottenendo dei cuboidi.
- La **Mesh di base** è sempre ortogonale al sistema di coordinate globale.
- Flow Simulation genera automaticamente la **Mesh iniziale** a partire dalla Mesh di base.
- La **Mesh è denominata iniziale** (Initial mesh) poiché può essere successivamente affinata durante il calcolo (Solution-Adaptive Meshing).



Mesh di base



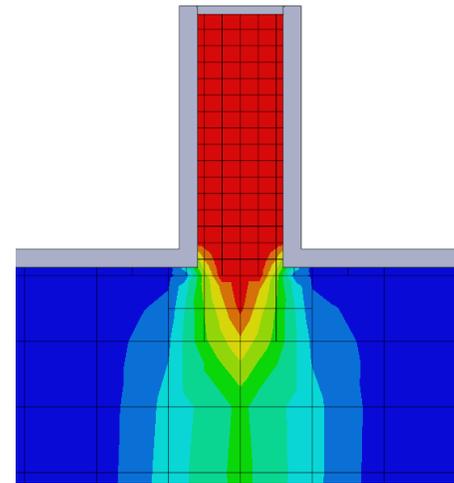
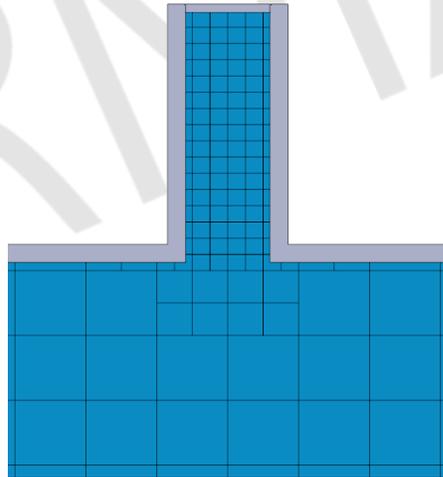
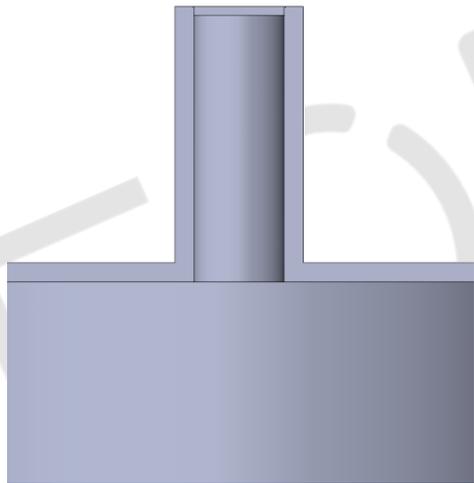
Mesh iniziale



COSA RAPPRESENTA LA MESH

Il moto del fluido viene rappresentato mediante l'insieme delle celle conosciute come **Mesh**

- Celle = Elementi
- Il flusso del fluido viene calcolato attraverso le celle
- Processo iterativo dove le celle comunicano l'una con l'altra per lo sviluppo del flusso

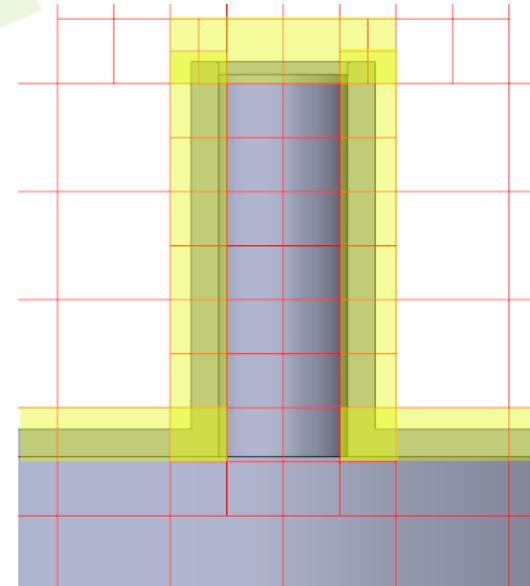
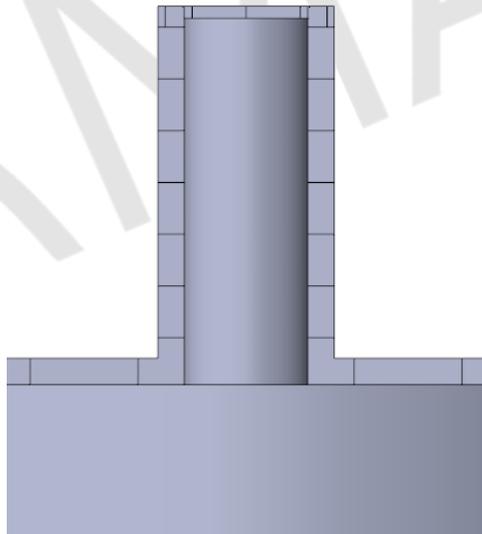
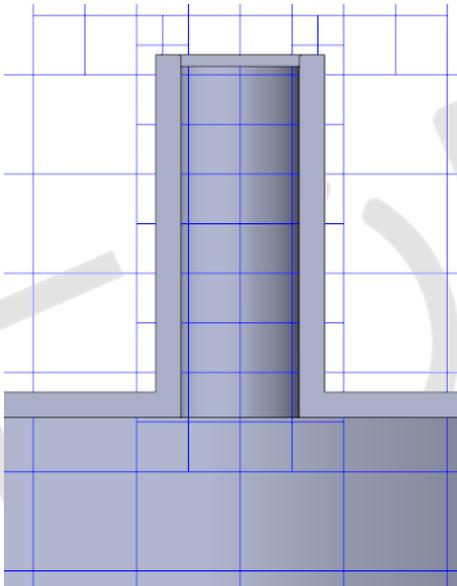


TIPOLOGIE DI CELLE

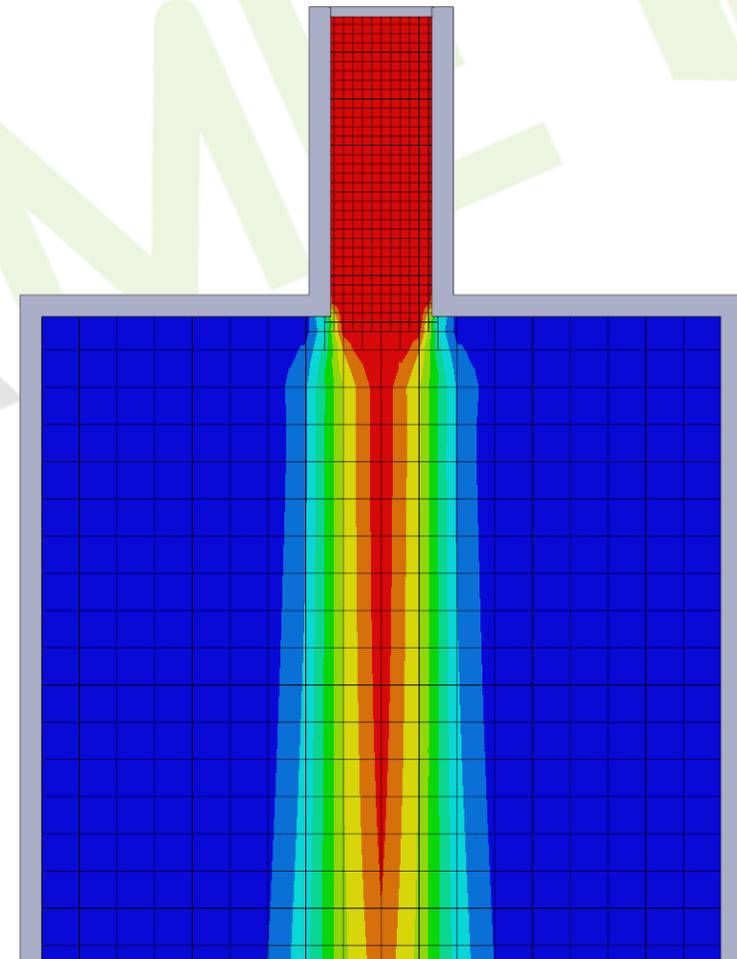
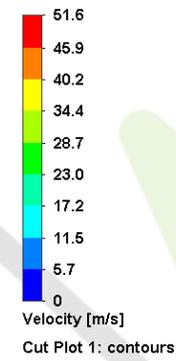
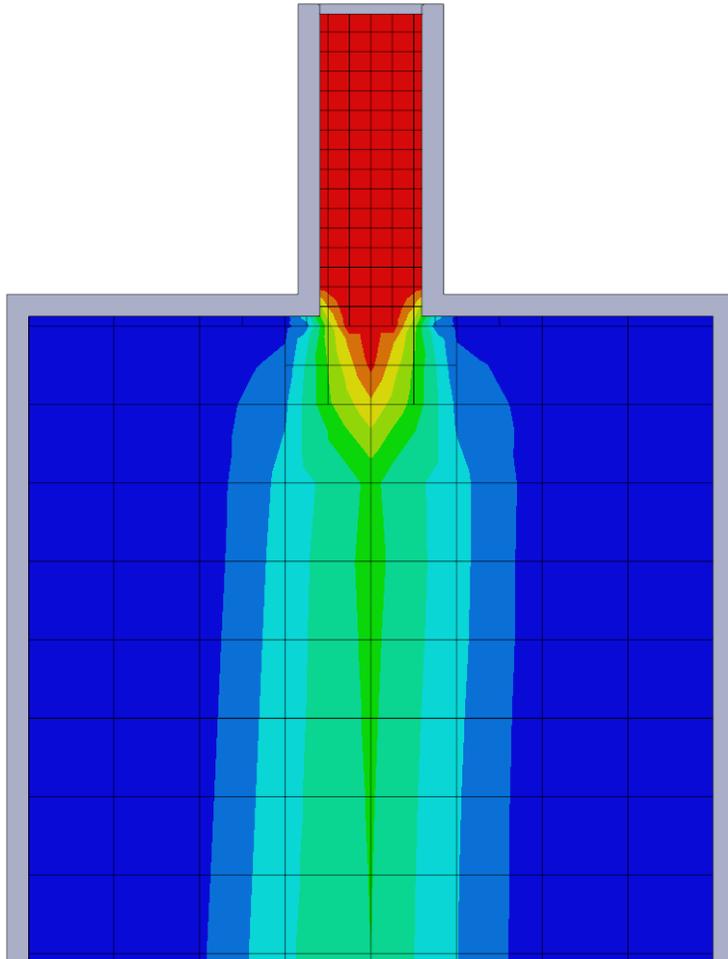
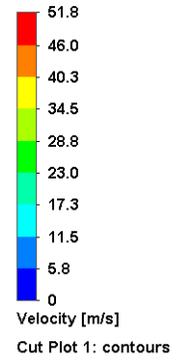


Il Flow Simulation classifica le celle presenti nel dominio in 3 differenti modi:

- **Celle fluide:** rappresentano il volume in cui il fluido può scorrere liberamente
- **Celle solide:** rappresentano il volume solido in cui non può esserci il fluido
- **Celle parziali:** con volume sia fluido che solido



RIFINITURA DELLA MESH



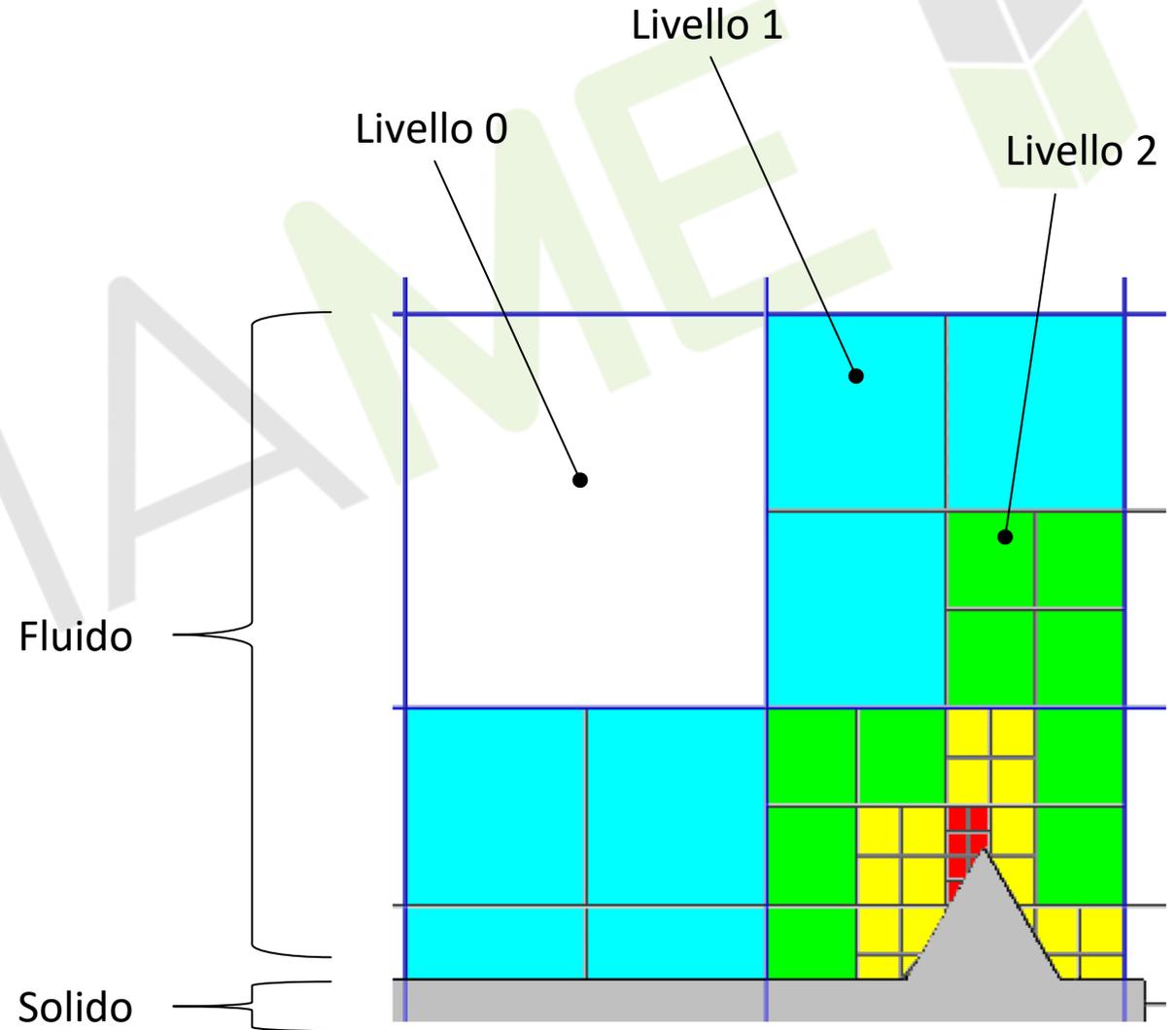
RIFINITURA DELLA MESH

Il processo di rifinitura della mesh consiste nella divisione di una cella (cuboide) in **8 celle**, mediante tre piani ortogonali che dividono a metà i bordi della cella.

Le celle iniziali non divise che compongono la mesh di base sono dette **celle di livello zero**.

La cella ottenuta dalla divisione della cella di base è chiamata **cella di primo livello**, la successiva divisione produce **celle di secondo livello** e così via.

Il massimo livello di suddivisione è **nove**.

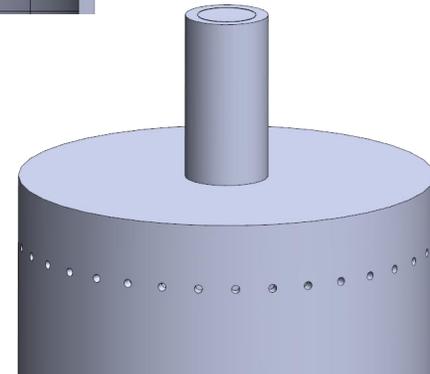
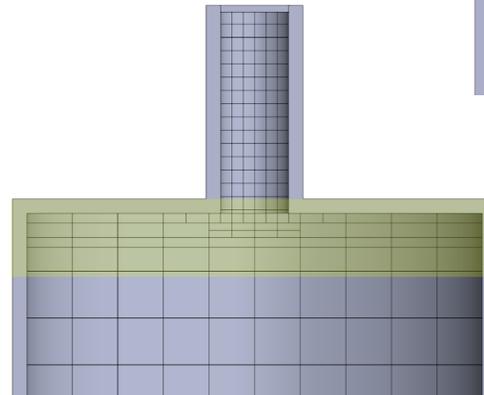
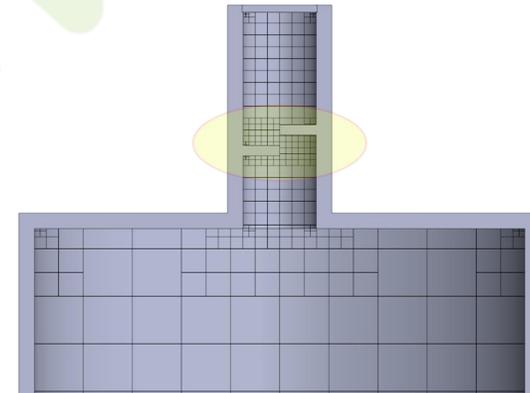
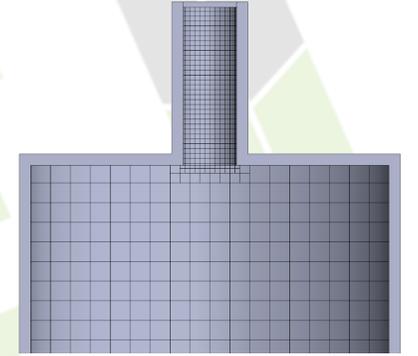
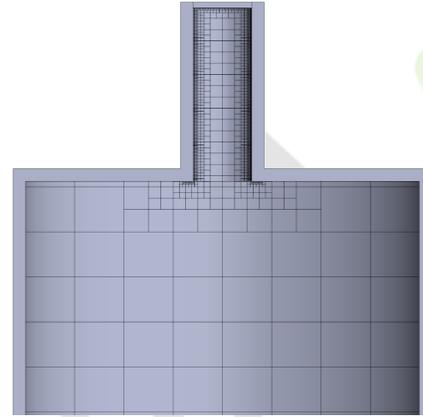
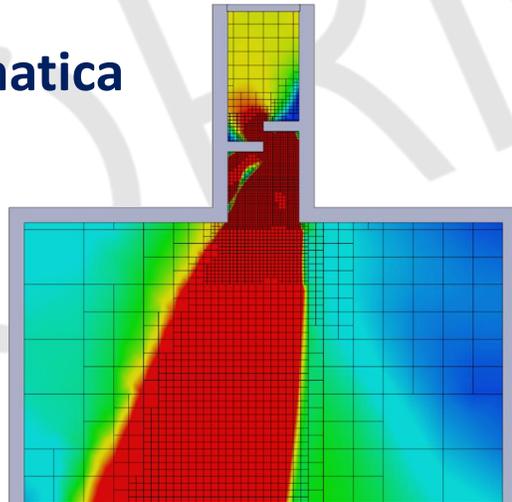


TECNICHE DI RIFINITURA

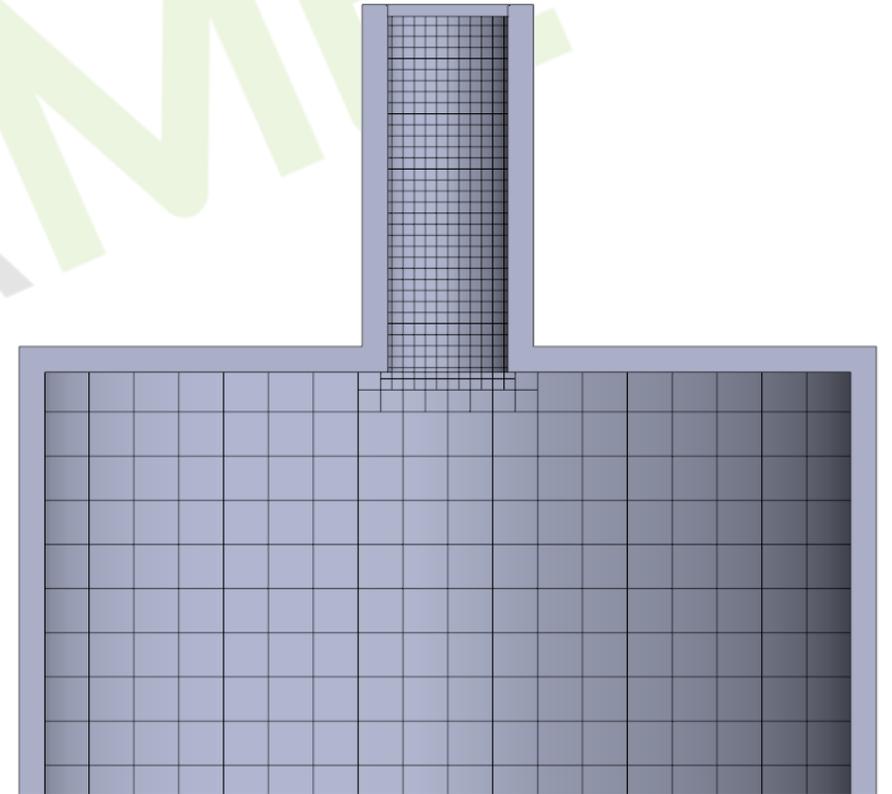
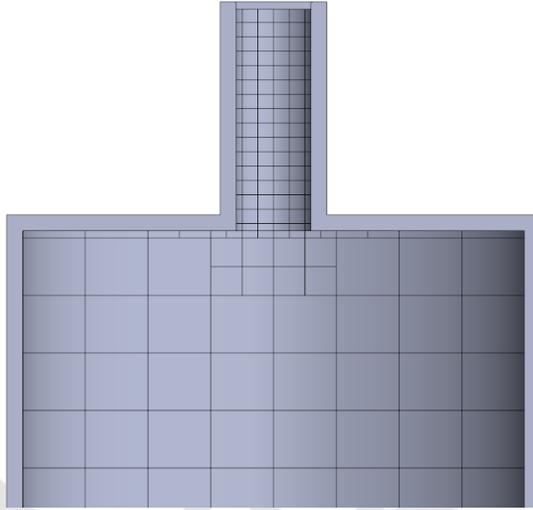


In Flow Simulation abbiamo ben 6 modi per mettere appunto la mesh:

- **Mesh Globale**
- **Mesh Locale**
- **Canali stretti (Narrow channel)**
- **Riempimento fori (Close thin slot)**
- **Mesh basata su piani**
- **Rifinitura automatica**

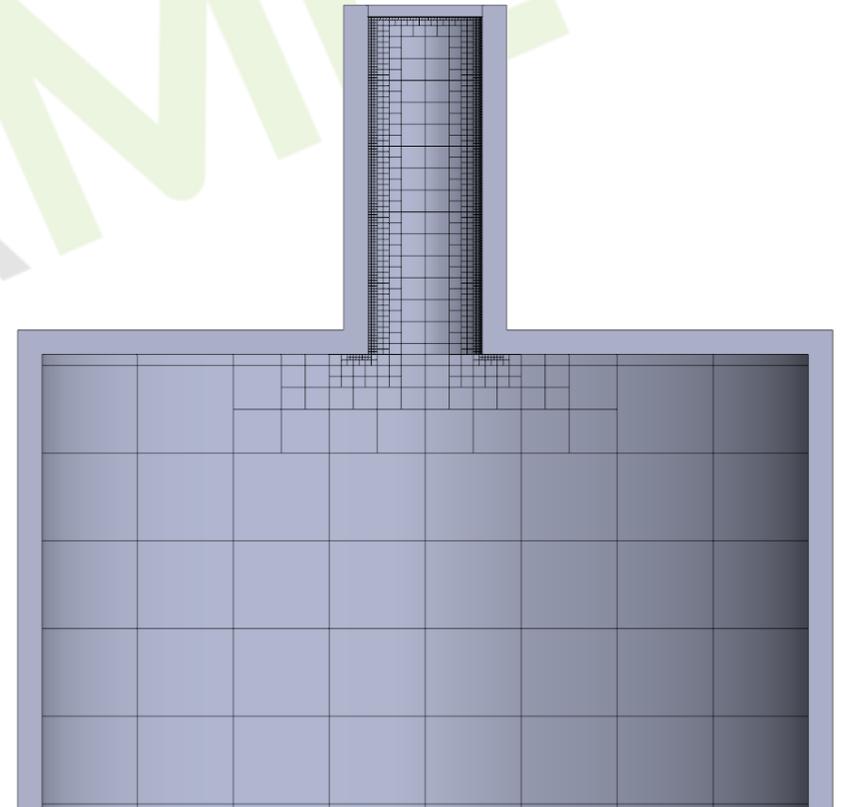
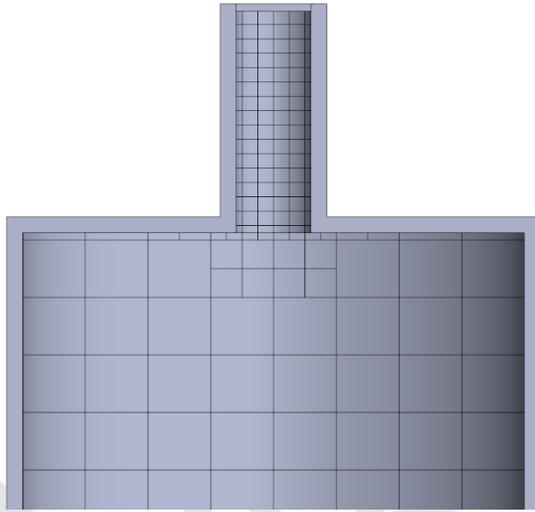


MESH GLOBALE



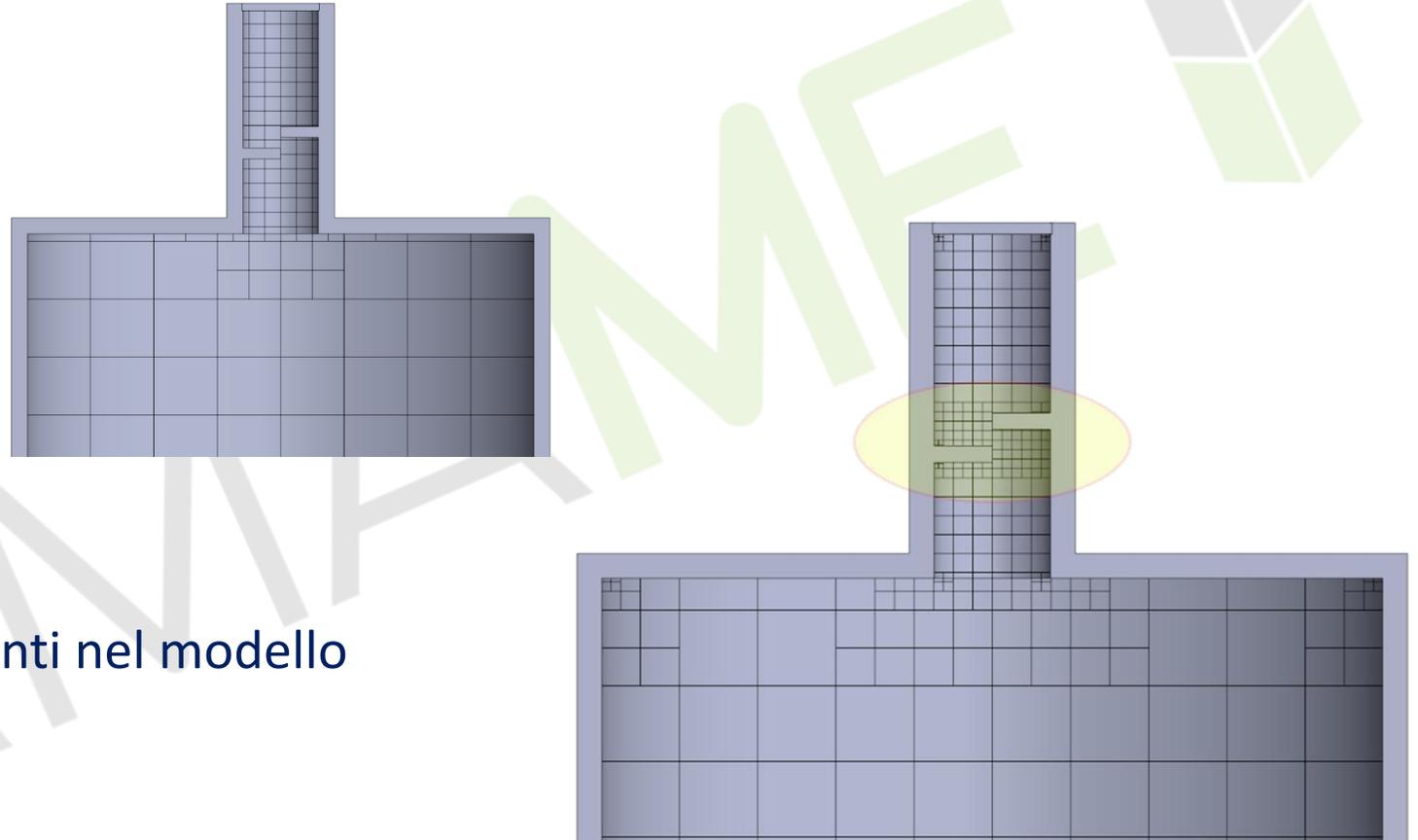
- Interviene sulle dimensioni di **tutte le celle**
- La dimensione di default **dipende dal modello**
- Il valore di default può essere **variato (1-7)**

MESH LOCALE



- Interviene sulle **dimensioni** delle celle in una zona specifica
- È utilizzata per rifinire **zone specifiche del modello**

CANALI STRETTI

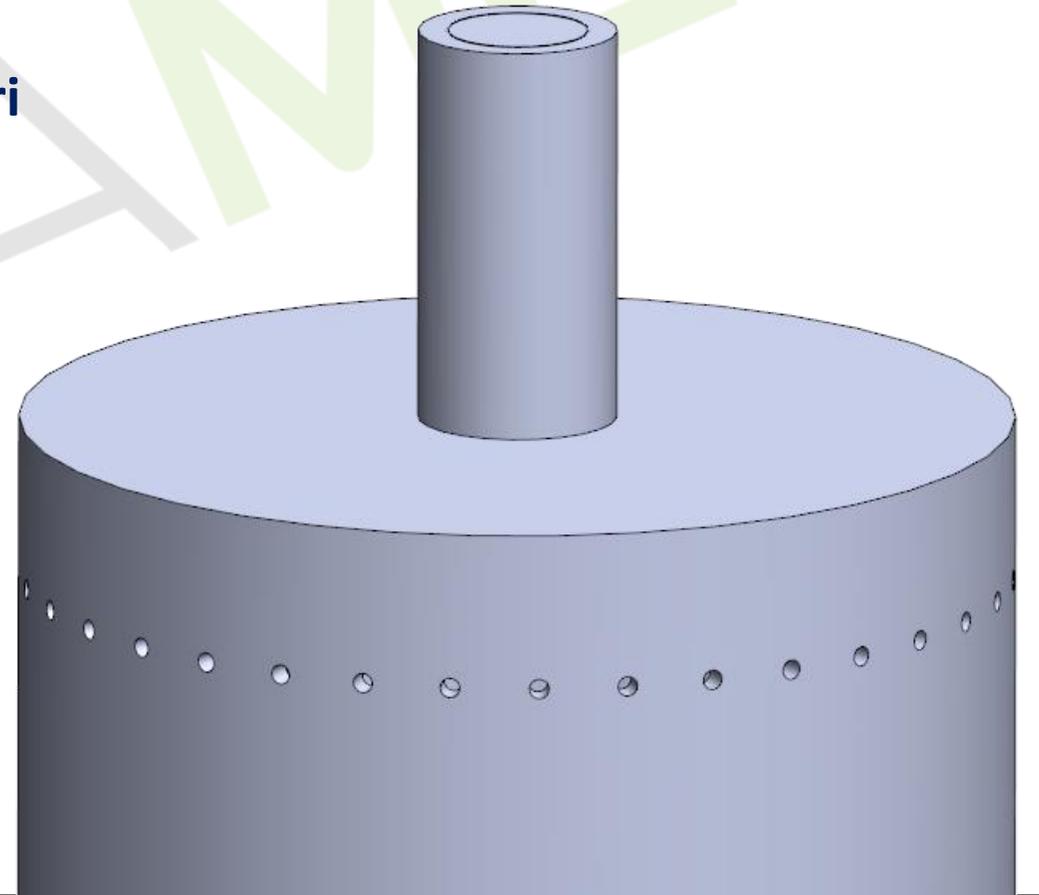


- Interviene su **passaggi stretti** presenti nel modello
- Cattura accuratamente il gradiente

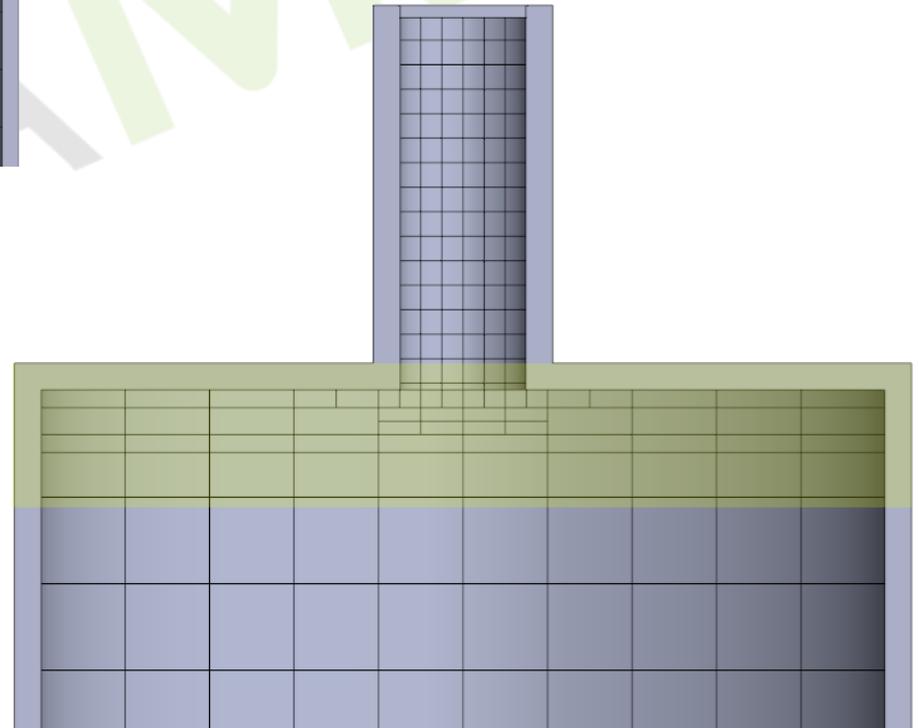
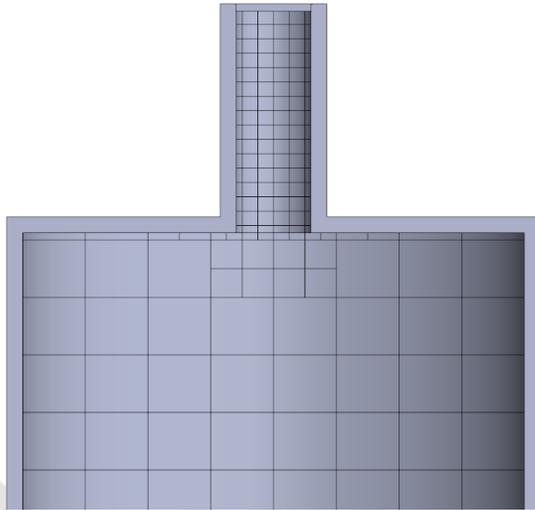
RIEMPIMENTO FORI



- Non considera canali e piccole aperture
- Viene utilizzato per **rimuovere dettagli non necessari**

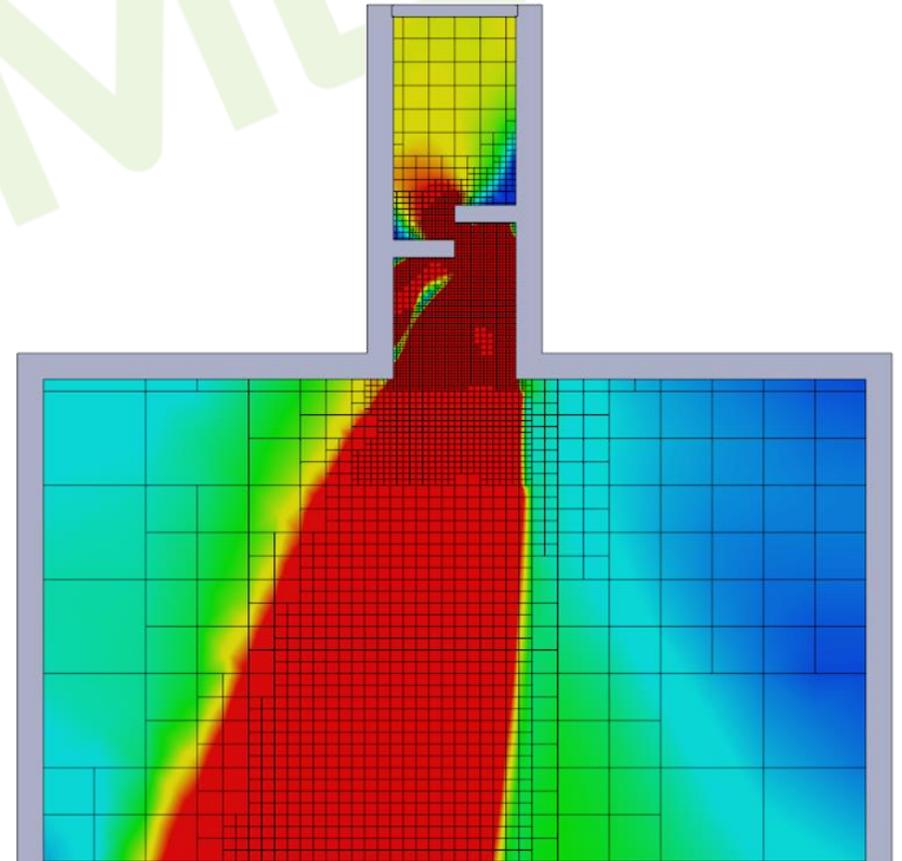
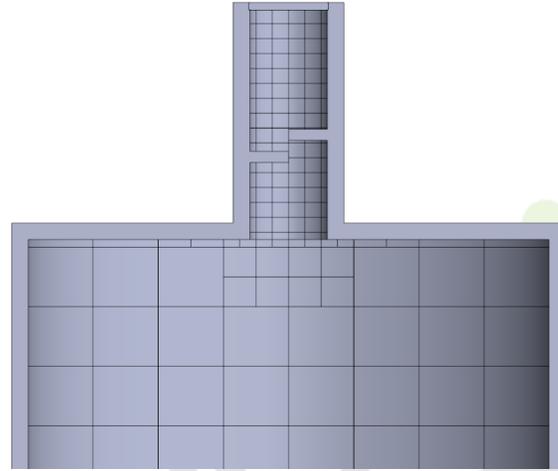


MESH BASATA SU PIANI



- **Allinea la mesh** a piani definiti nello spazio
- Consente di catturare un **flusso simmetrico**
- Controlla la transizione di mesh

RIFINITURA AUTOMATICA



- Interviene lì dove ce n'è bisogno per catturare accuratamente il gradiente del flusso
- **Si attiva automaticamente durante il processo di calcolo,** andando a modificare la mesh in maniera iterativa

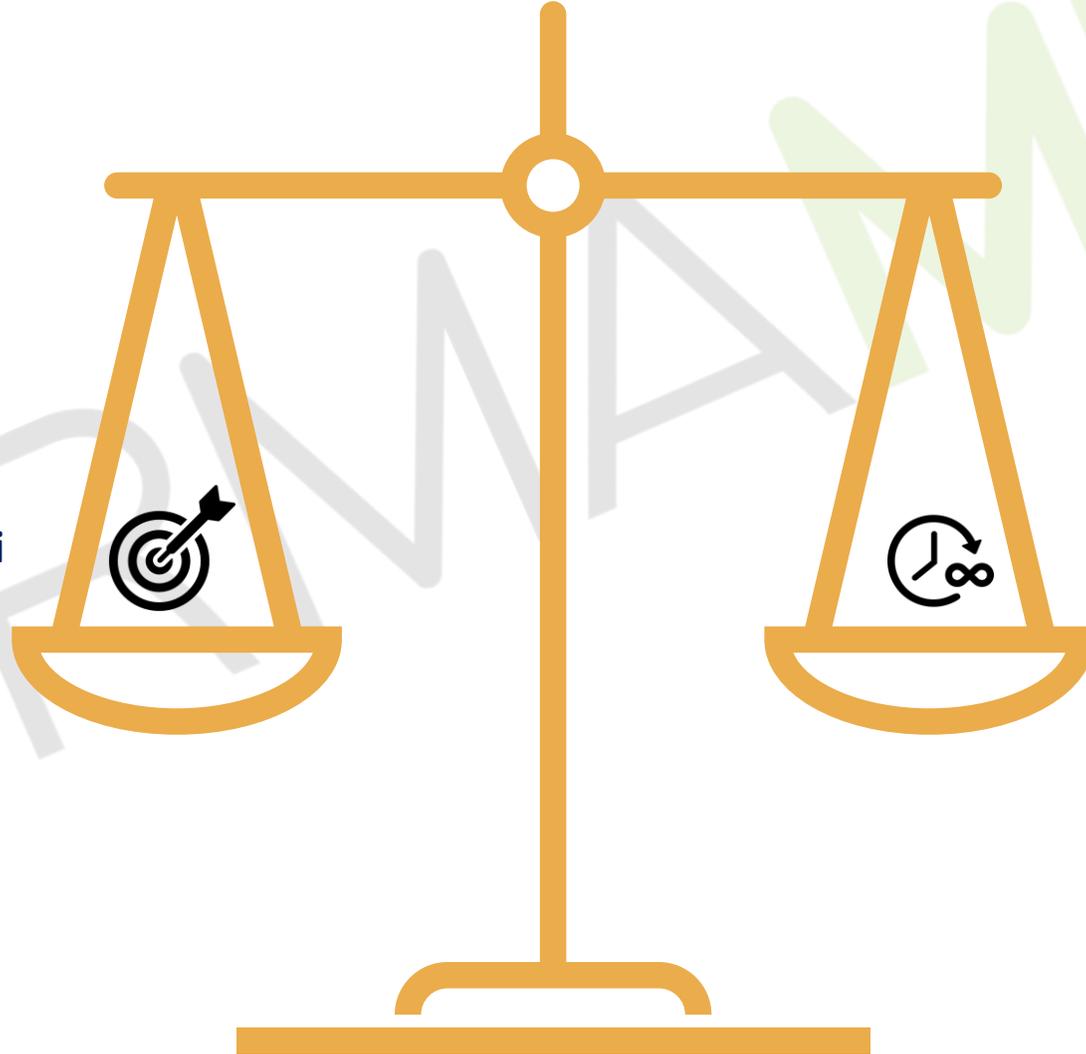
IMPATTO DELLA MESH?



Accuratezza dei risultati



Tempi di calcolo



FORMAME





SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION



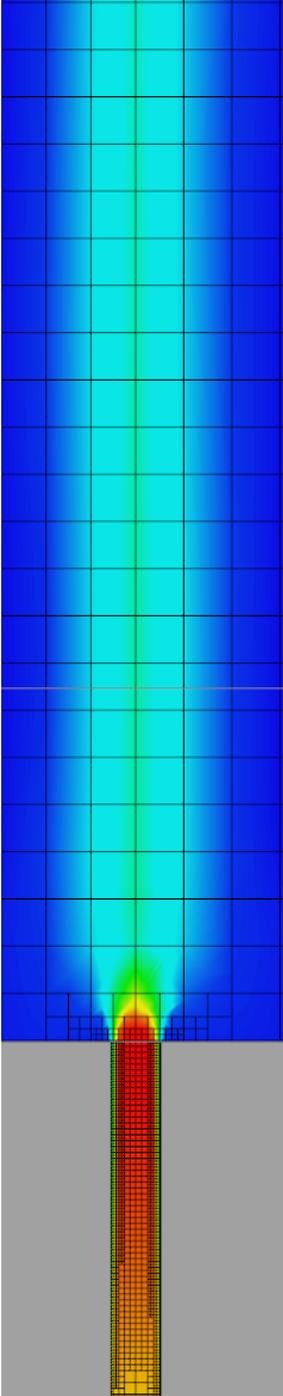
FORUMS

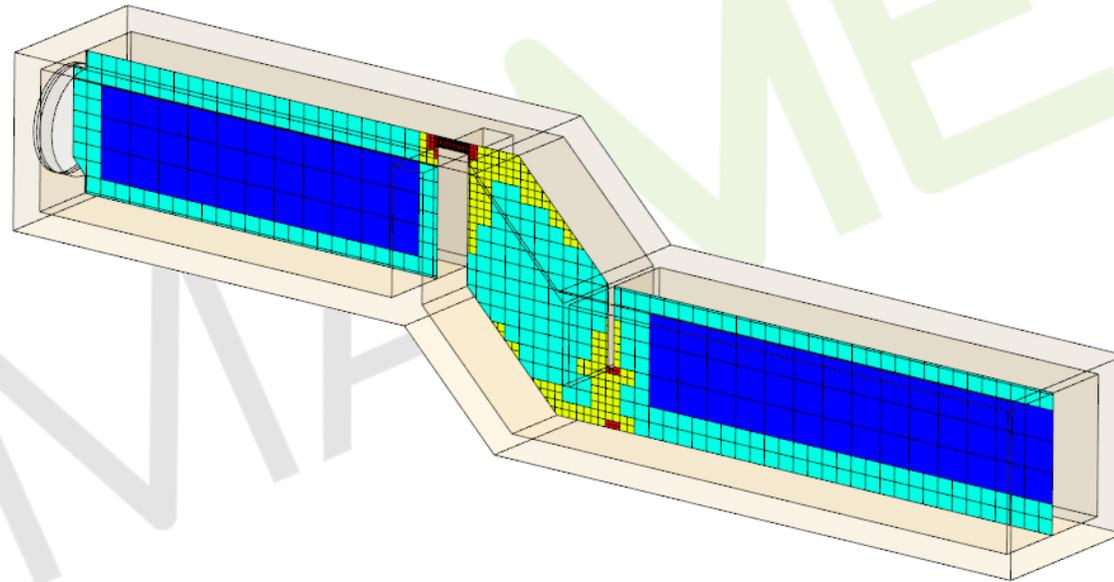
CONSIGLI PER LA MESH

1. **Rileva e misura** la presenza dei passaggi stretti e pareti sottili, verifica che siano in linea con i valori rilevati dal Flow.
2. Nella maggior parte dei casi, è idonea la mesh automatica di livello 3 con attivazione dei **passaggi stretti avanzati**.
3. Per problemi complessi e quando è richiesto un **certo grado di accuratezza**, si consiglia una risoluzione della mesh globale pari a **4° o 5° livello**.
4. Se la **discretizzazione generale** con l'opzione automatica non è soddisfacente, passare alla mesh manuale.
5. Se le impostazioni per il trattamento dei **passaggi stretti** non producono una mesh soddisfacente, passare alla mesh locale.
6. Per catturare accuratamente **fenomeni di flusso e gradienti** in prossimità di variazioni geometriche, è consigliabile l'utilizzo della mesh locale e adattativa.
7. Se vi è **incertezza nella convergenza** o **difficoltà a catturare il gradiente**, la mesh adattativa è l'impostazione da preferire.

RIASSUMENDO...

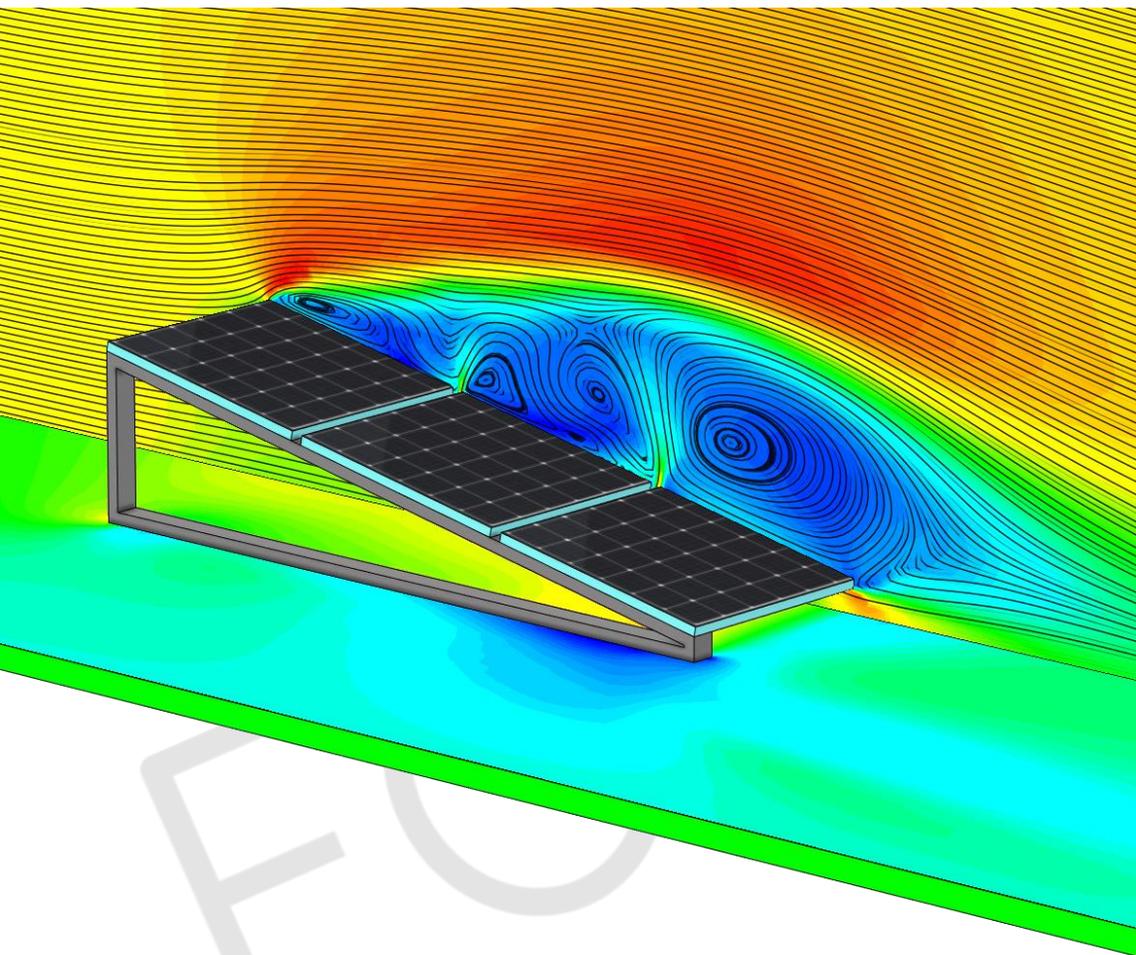
- In presenza di **dettagli geometrici** di cui tener conto nel modello e qualora il **rapporto dimensionale con l'intero modello sia ≥ 1000** , la mesh automatica potrebbe fornire una soluzione poco accurata o sovrabbondante di celle con lunghi tempi di calcolo.
- L'utilizzo dei **piani** consente di definire localmente la mesh generale e **catturare la simmetria**.
- La **mesh locale**, basata sulla **selezione volumetrica**, consente di rifinire la geometria e fluido che ricade nel volume.
- La **mesh adattativa si attiva automaticamente a livello globale con il livello 6-7**, soluzione che consente di infittire la mesh lì dove ce bisogno in fase di calcolo.





Esercizio:
Condotto

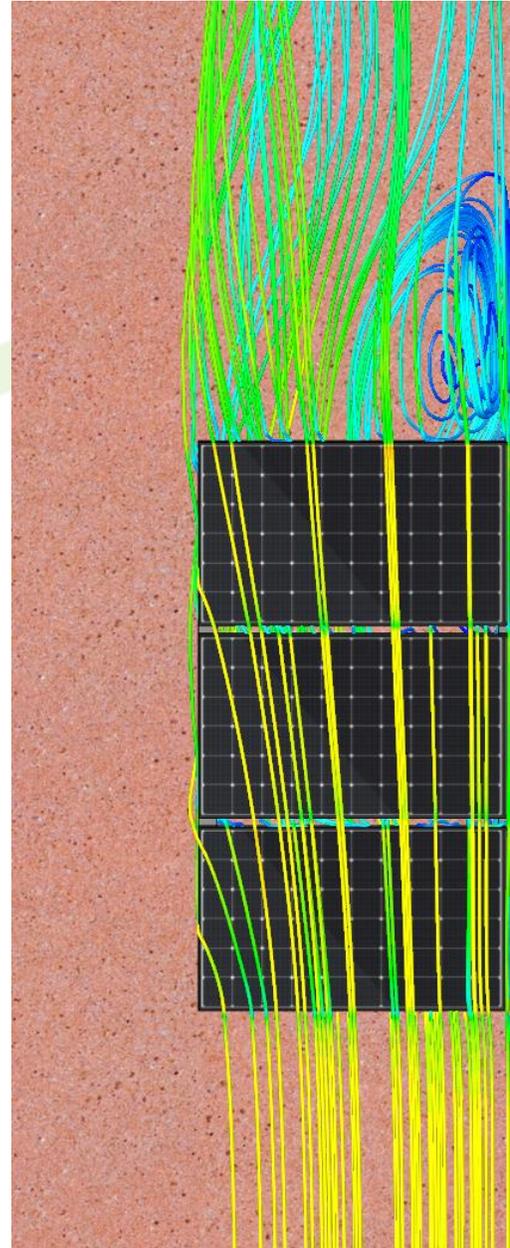
FORMAME



Analisi di flusso esterno

Lezione 4

- Raffica di vento a 180 Km/h
- Simmetria del dominio
- Mesh equidistante dalle superfici
- Plottare le linee di flusso = Streamlines
- Calcolo delle forze agenti sul sistema

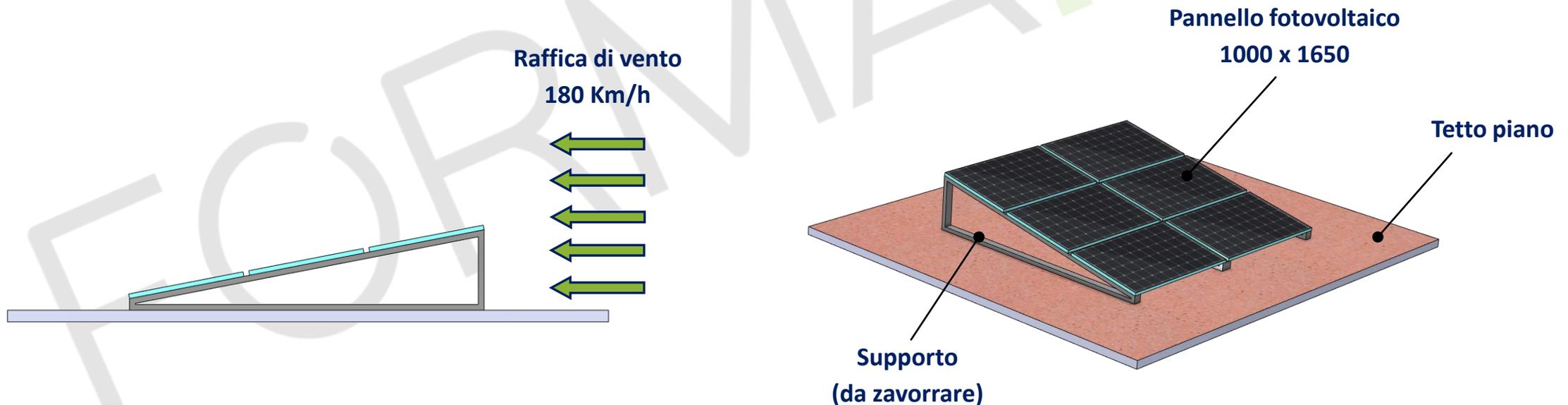


CASO STUDIO: FOTOVOLTAICO DA TETTO



Verrà simulato un sistema fotovoltaico da tetto, composto da 6 pannelli e 3 supporti, soggetto a una **raffica di vento pari a 180 Km/h**.

L'obiettivo consiste nel valutare le forze di spinta a cui è sottoposto il sistema, al fine di dimensionare le zavorre.





SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION

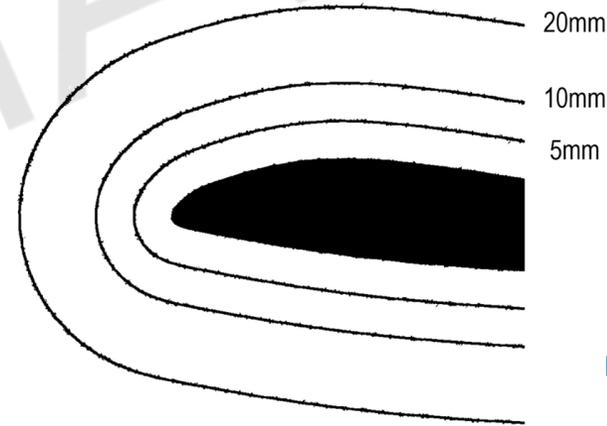
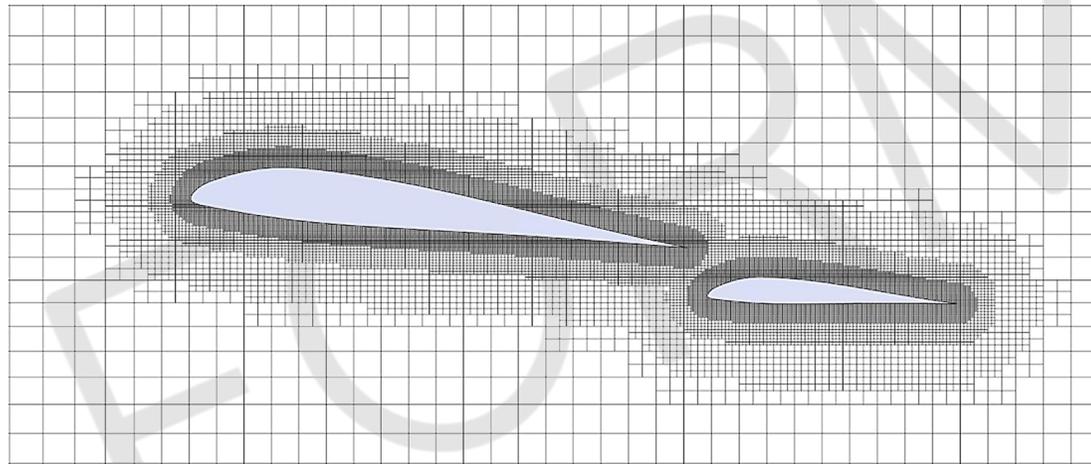


FORUMS.ME

MESH EQUIDISTANTE

La rifinitura equidistante garantisce una **mesh uniforme intorno a un corpo** con il minimo sforzo, garantendo la convergenza e l'accuratezza dei risultati.

In questo modo possiamo catturare accuratamente gli effetti dello **strato limite**!



Numero di offset dal corpo/superficie

Distanza di offset

Numero di ivelli di transizione delle celle

A screenshot of the 'Equidistant Refinement' software interface. It shows a dropdown menu with the value '3', a slider set to '4', and three input fields for offset distances: '0.005 m', '0.01 m', and '0.02 m'. The interface is annotated with blue arrows and text labels.



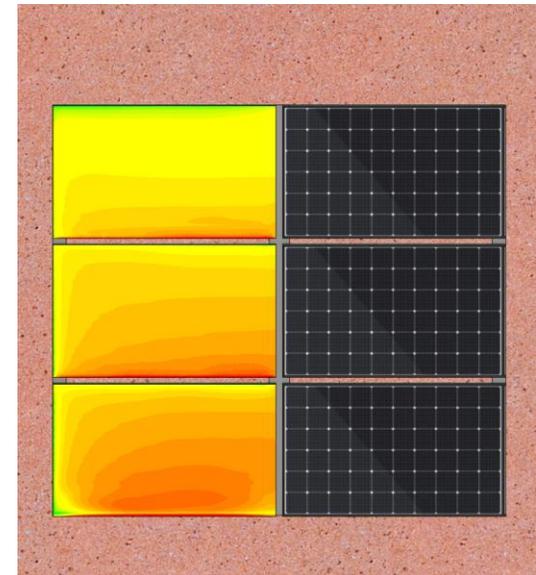
SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION



FORUMS

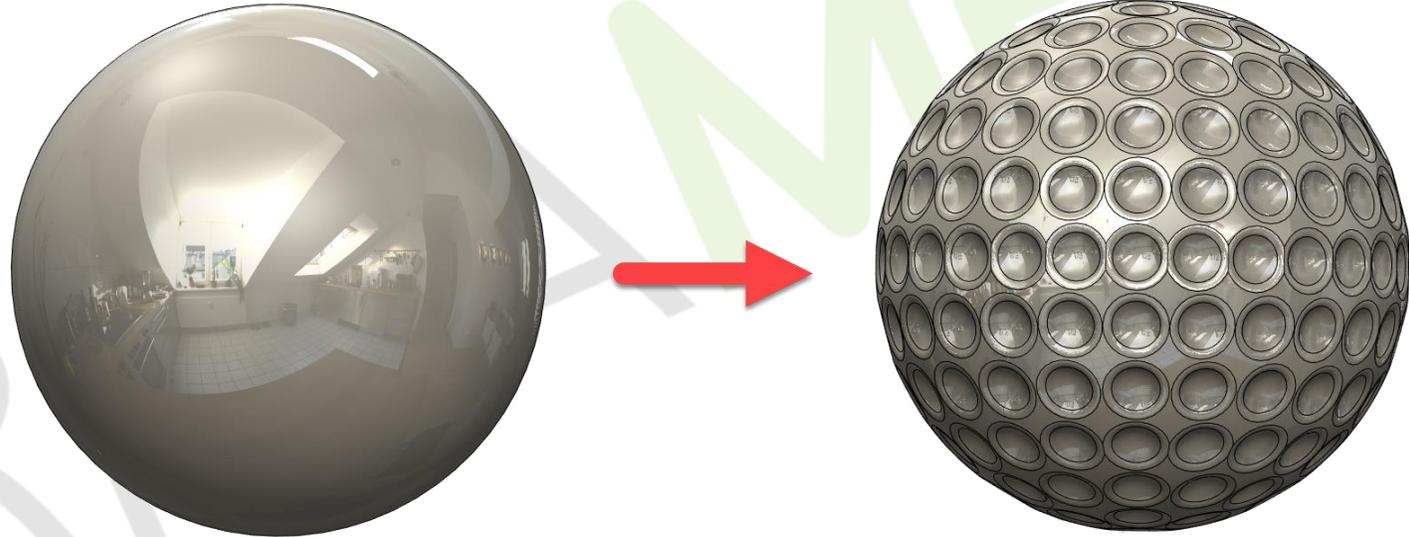
RIASSUMENDO...

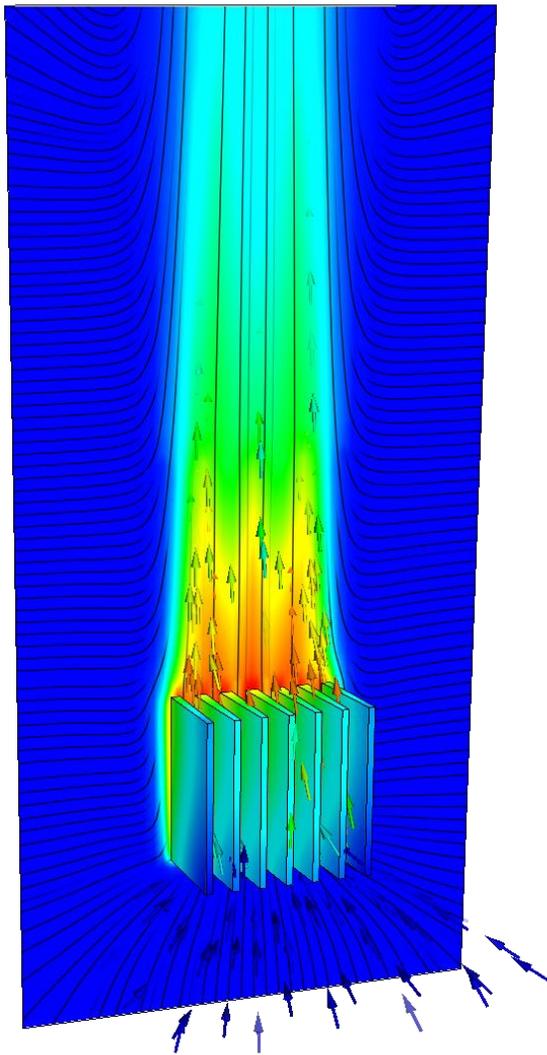
- Se in un'analisi esterna non voglio considerare le cavità interne dei corpi, allora posso automaticamente escluderle mediante l'opzione presente nel wizard.
- Il **dominio di calcolo** di un'analisi esterna deve essere ragionevolmente esteso oltre i confini del modello, così da consentire lo sviluppo del flusso.
- La **mesh equidistante** ci consente di catturare in maniera accurata lo strato limite.
- Attenzione, anche se una **superficie piana richiede poche celle** in fase di discretizzazione, questo non significa che otterremo risultati accurati!
- Le **linee di flusso (Streamlines)** non sono altro che una rappresentazione dei filetti fluidi proiettati su un piano (Cut Plot), oppure su una superficie (Surface Plot).





Esercizio:
Palla da golf

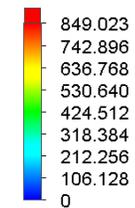
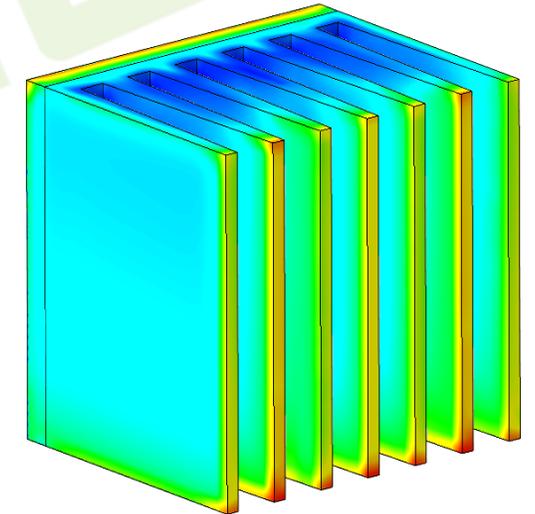




Analisi termica stazionaria

Lezione 5

- Scambio termico per conduzione e convezione
- Materiali ed Engineering database
- Condizioni specifiche su parete solida
- Mesh di solidi
- Valore Min/Max su grafici di plot
- Bilancio termico (Flux Plot)
- Risultati termici



Surface Heat Flux (Convective) [W/m²]

Convezione: contours

QUANDO ESEGUIRE L'ANALISI TERMICA?



Quando siamo interessati a rispondere alle seguenti domande:

- **Che temperatura raggiunge la componente in esercizio e qual è la sua distribuzione?**
- **Che potenza occorre per riscaldare il componente e portarlo a temperatura?**
- **Quanto tempo impiega la componente a raggiungere la temperatura di esercizio?**
- **Quali sono le sollecitazioni indotte dal carico termico?**



TRASFERIMENTO DEL CALORE



Conduzione

All'interno di un corpo o tra due o più corpi a contatto



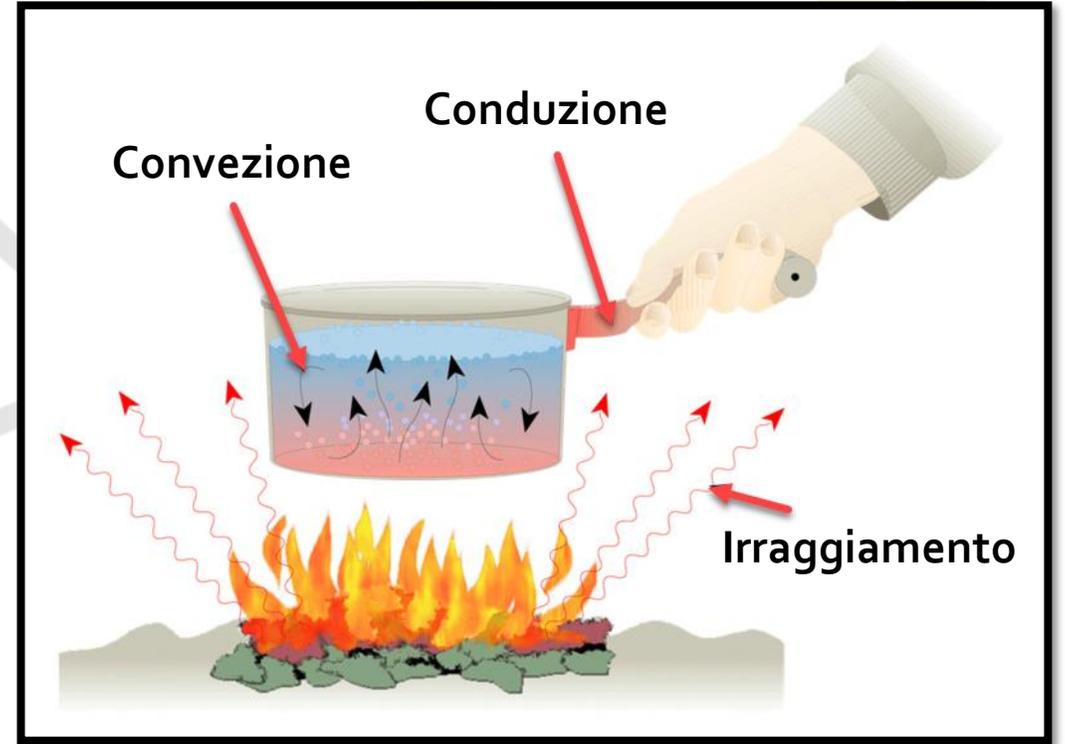
Convezione

Attraverso un fluido e il suo moto (liquidi o gas)



Irraggiamento

Onde elettromagnetiche nel vuoto



QUALI ANALISI POSSIAMO ESEGUIRE?



Termica in regime STAZIONARIO

Viene calcolato lo stato termico del modello al raggiungimento dell'equilibrio, ovvero, tra energia immessa nel sistema ed energia dissipata. **A prescindere dal tempo che occorre per raggiungerlo.**



Termica in regime TRANSITORIO

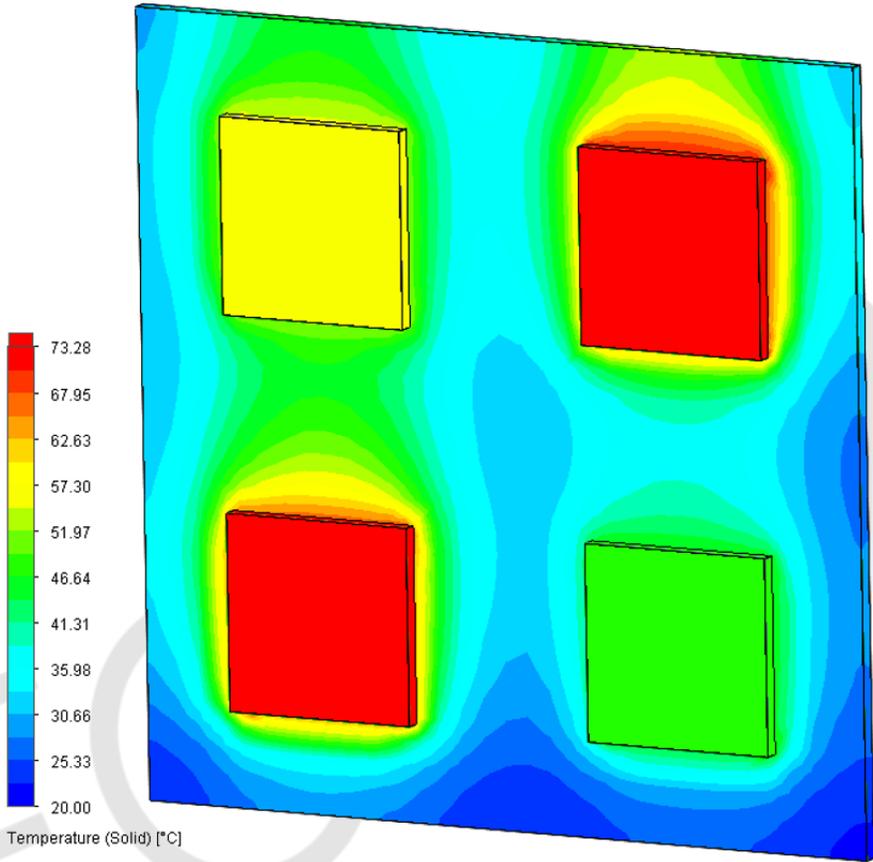
Viene calcolato lo stato termico nel range temporale definito, che è possibile indagare istante per istante. Questo significa che **possiamo conoscere il tempo necessario per raggiungere una data temperatura.**

APPROCCIO FEM O CFD?

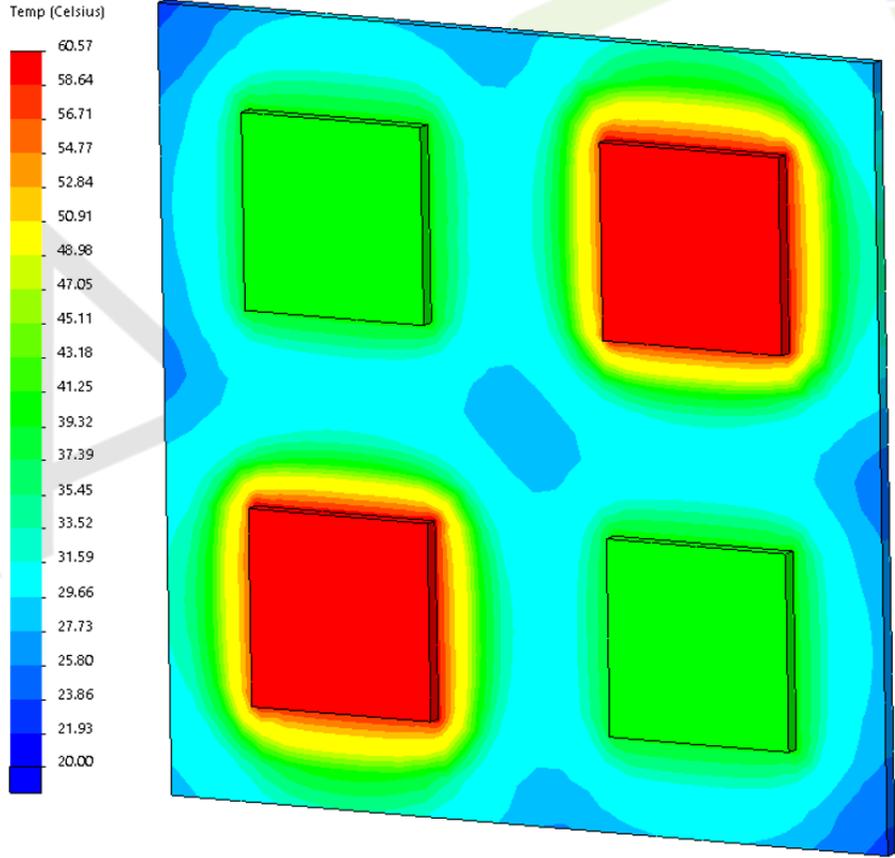


Trasferimento del calore			Note
Solo conduzione	✓		Il FEM in questo caso è accurato quanto il CFD, ma converge più velocemente.
Conduzione + Convezione (conosciuta)	✓	✓	Sono equivalenti, anche se in Simulation non si sviluppano correttamente i moti convettivi.
Conduzione + Convezione (sconosciuta)		✓	Impossibile per Simulation determinare il coefficiente di convezione.
Irraggiamento		✓	In Simulation occorrono lunghi tempi di calcolo e il risultato si può ritenere qualitativo.
Conduzione + Convezione + Irraggiamento		✓	Quando si ha lo scambio termico coniugato, la soluzione accurata la fornisce soltanto Flow Simulation.

APPROCCIO FEM O CFD?



FLOW SIMULATION



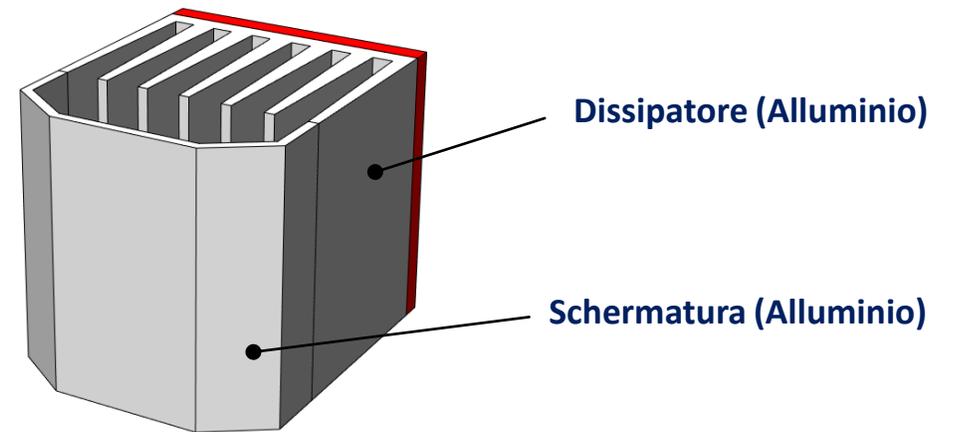
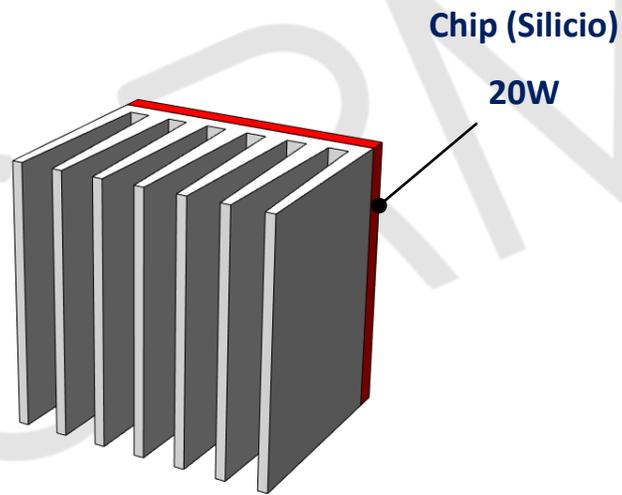
SIMULATION

CASO STUDIO: DISSIPATORE



Verranno simulate 2 differenti configurazioni geometriche di dissipatore, tenendo conto che il chip è **montato in verticale** ed eroga una **potenza termica di 20W**.

L'obiettivo consiste nell'indagare la **massima temperatura che raggiunge il chip**, con e senza schermatura, tenendo conto che quest'ultimo dovrebbe lavorare a una temperatura ottimale $\leq 50^{\circ}\text{C}$.



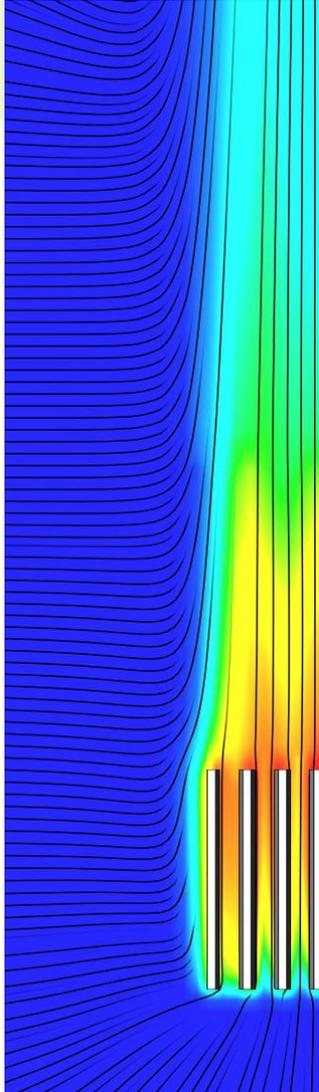
3D SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION



FORUMS

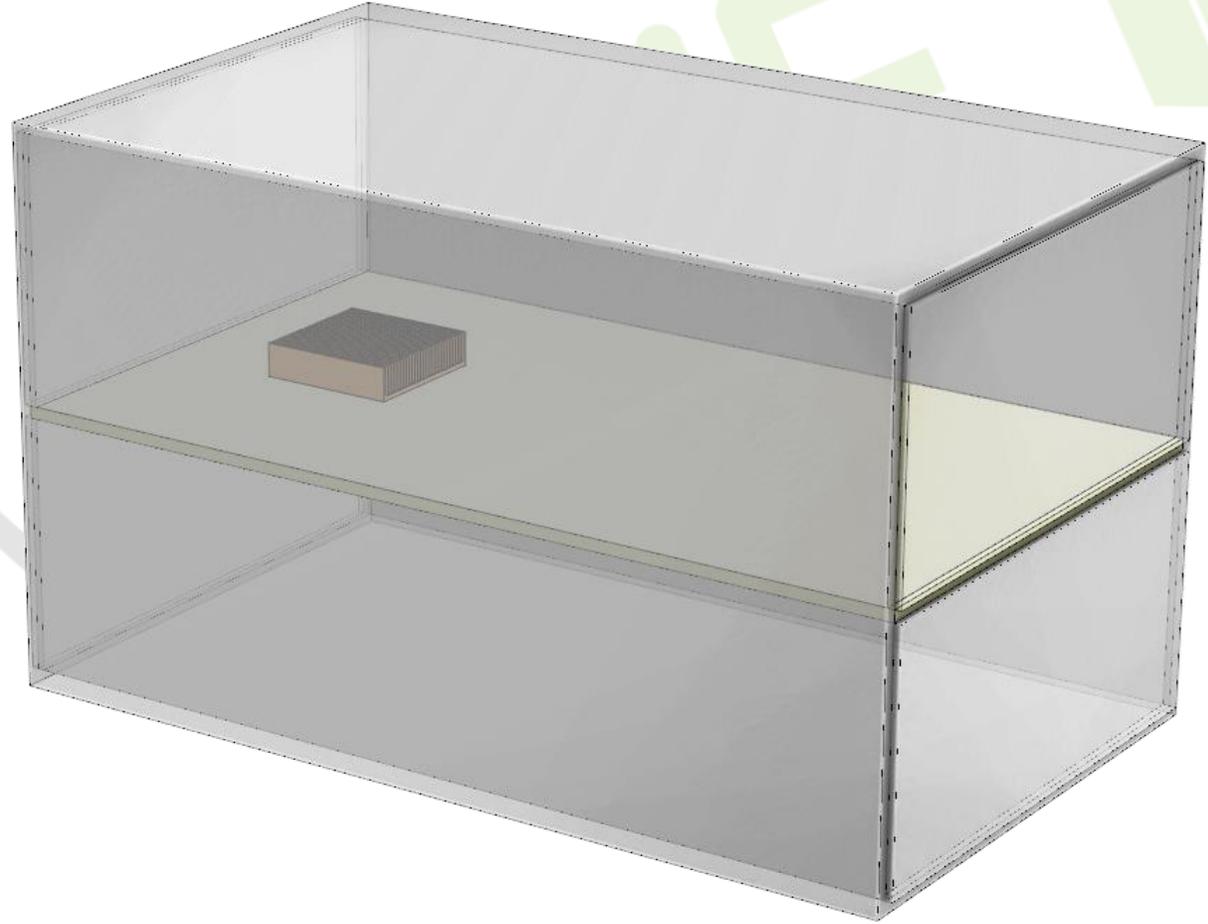
RIASSUMENDO...

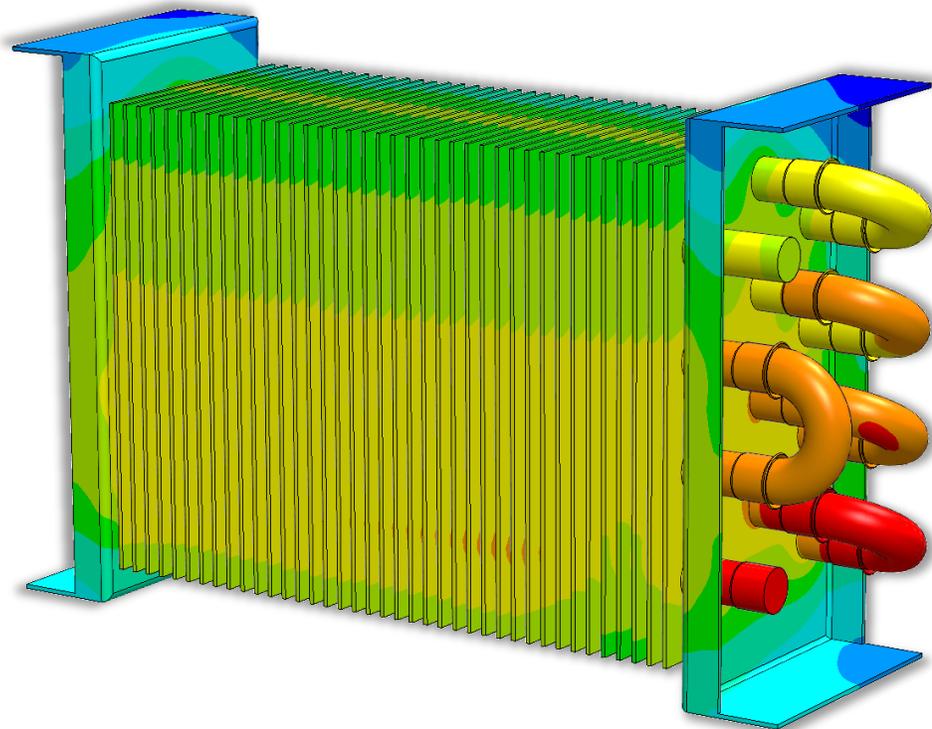
- Flow Simulation di default tiene sempre conto dello **scambio termico per convezione**, ma all'occorrenza possiamo applicare conduzione e irraggiamento.
- Tutti i componenti ai quali **non viene assegnato localmente un materiale**, assumono quello applicato durante il wizard.
- Possiamo applicare delle **condizioni locali di parete**, attraverso la boundary condition «Real wall».
- **L'albero di Flow Simulation può essere personalizzato**, aggiungendo e rimuovendo delle voci.
- Quando si esegue **l'analisi termica** è possibile plottare come risultato la temperatura del fluido e quella dei solidi, **in maniera distinta**.





Esercizio:
Scheda elettronica



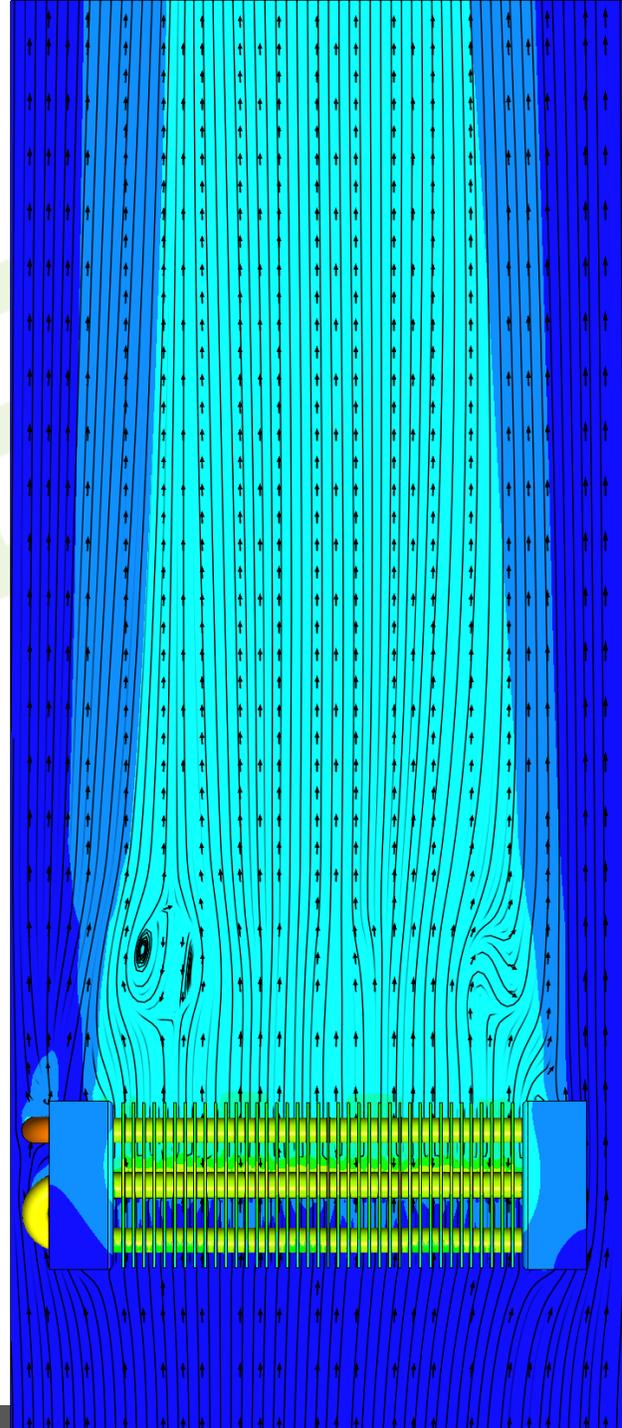


Analisi termica nel transitorio

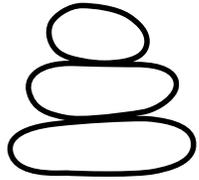
Lezione 6

ARGOMENTI

- Analisi con doppio fluido
- Sub-dominio
- Calcolo nel transitorio
- Animazione dei risultati nel tempo
- Timestep e intervento manuale
- Confronto tra stazionario e transitorio



QUANDO ESEGUIRE L'ANALISI NEL TRANSITORIO?



Analisi STAZIONARIA

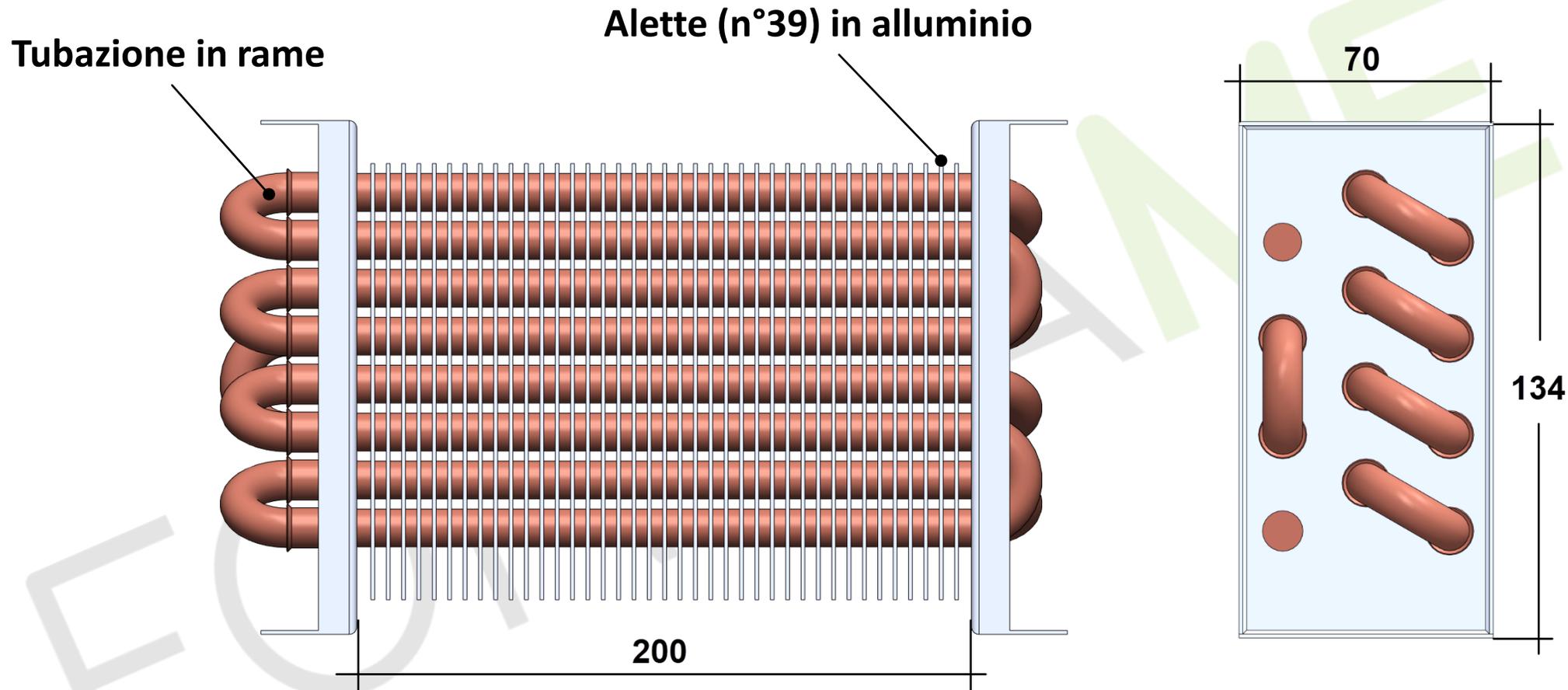
- Fluttuazioni e instabilità vengono dissipate nel tempo
- Si ha interesse a conoscere i valori a regime



Analisi nel TRANSITORIO

- Siamo interessati a conoscere i valori di interesse nel tempo
- Vogliamo conoscere il tempo necessario a raggiungere l'equilibrio
- La soluzione per sua natura è instabile (periodica o random)

CASO STUDIO: SCAMBIATORE A BATTERIA



Scambiatore a batteria (aria-acqua) per camera climatica

CASO STUDIO: SCAMBIATORE A BATTERIA

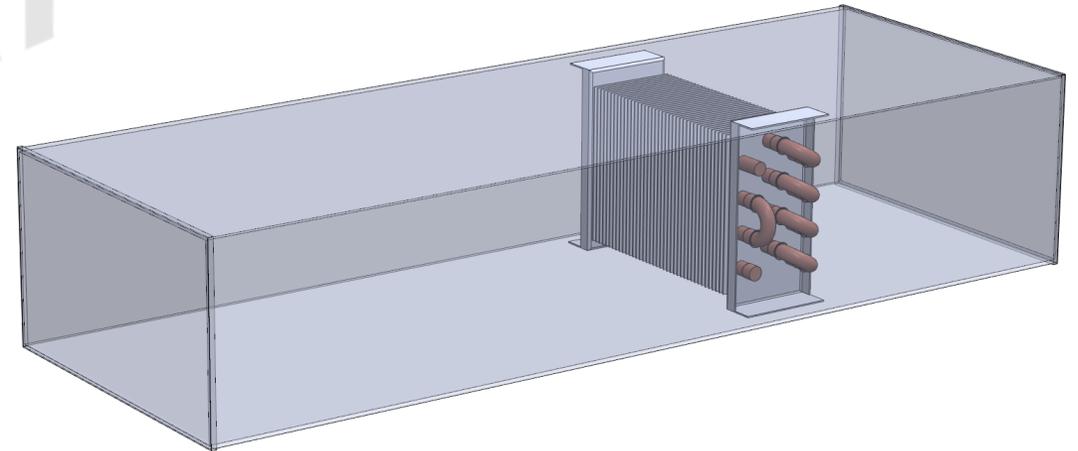


Verrà simulato il funzionamento sia in **regime stazionario che nel transitorio**, per poi confrontare i risultati.

L'obiettivo consiste nel determinare quanto tempo impiega per fornire un flusso di aria a temperatura costante.

Inoltre:

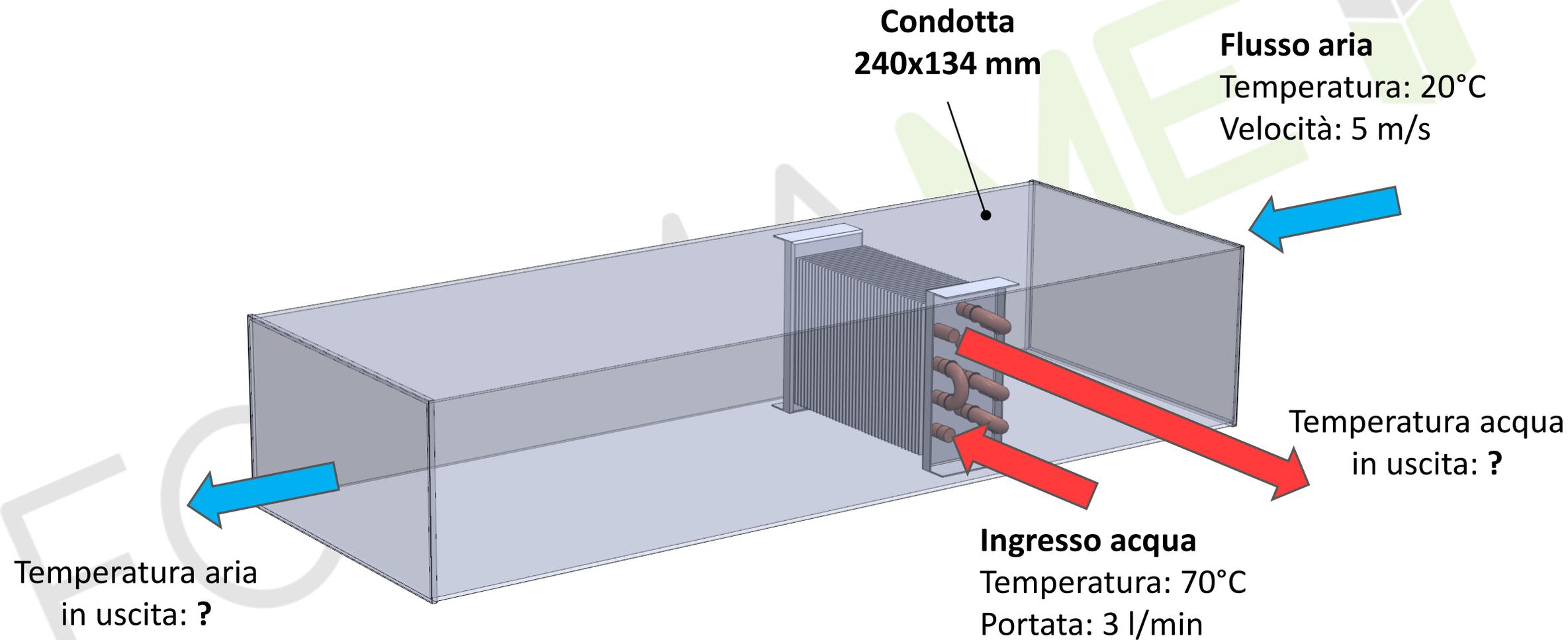
- Qual è la temperatura dell'aria in uscita?
- Qual è la temperatura del fluido in uscita?



CASO STUDIO: SCAMBIATORE A BATTERIA



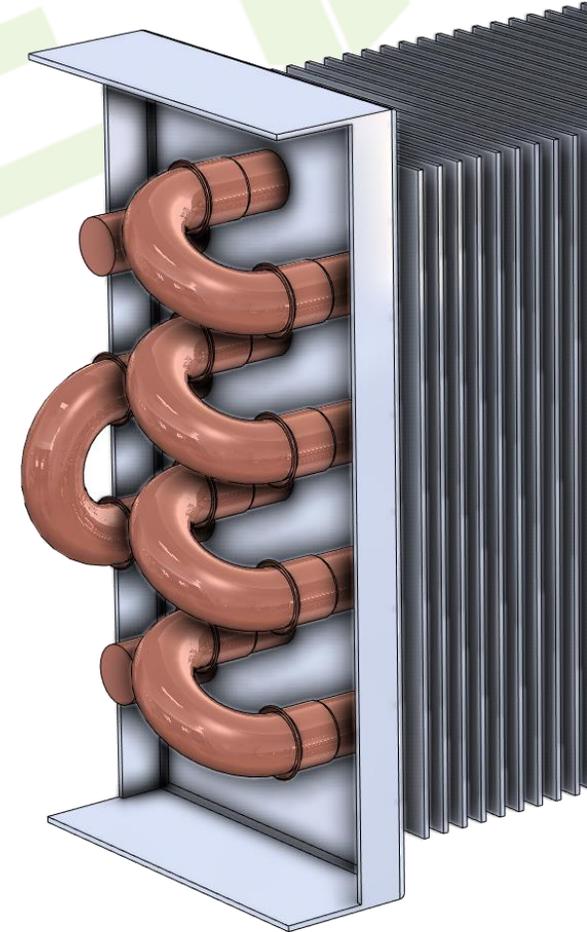
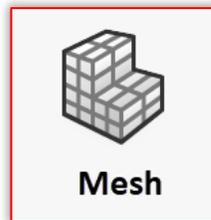
FORMAME© | Informazioni riservate | 22.04.2025

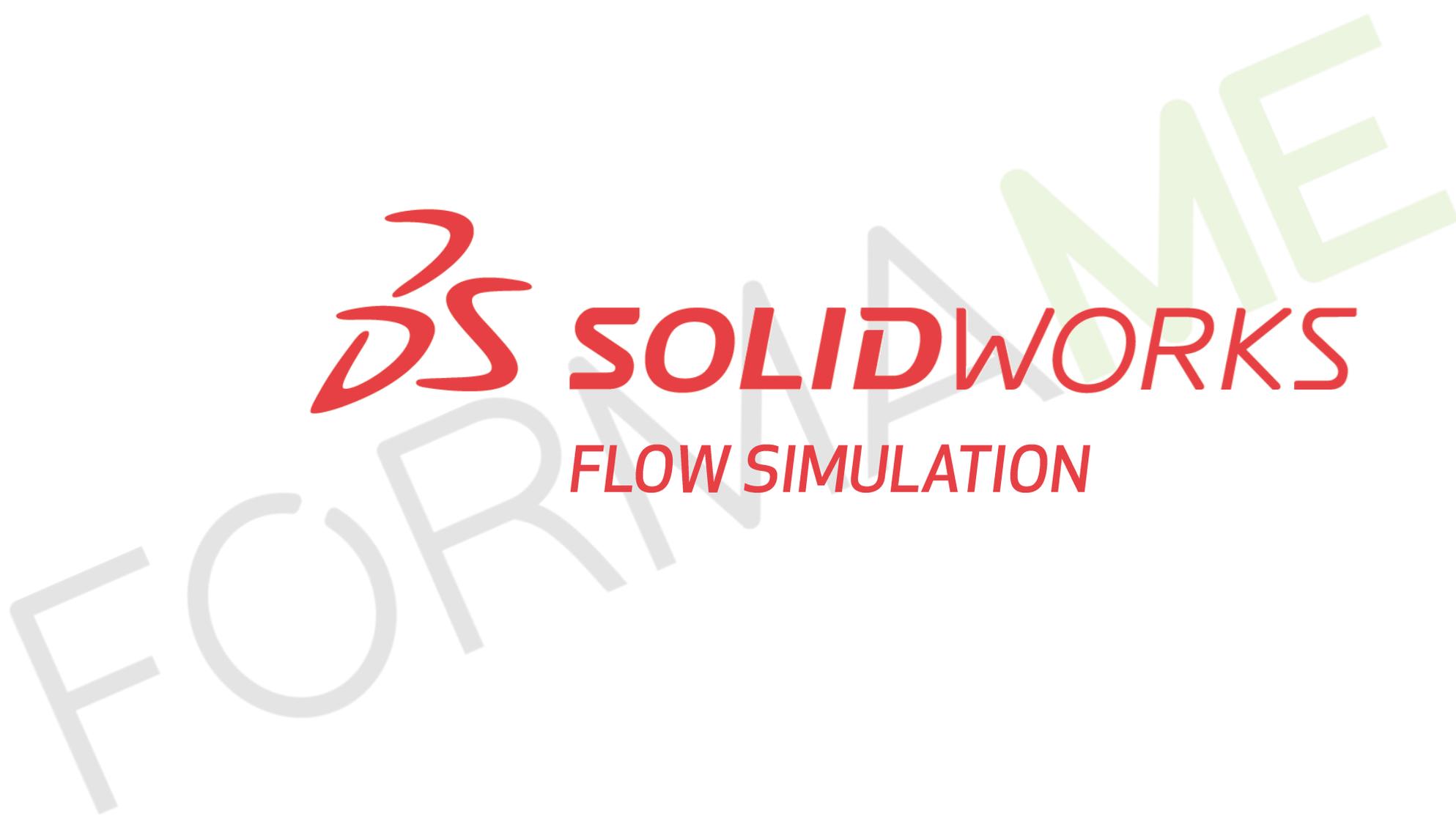


Quali sono gli aspetti fisici di cui dovremo tener conto?



Qual è la sfida principale?

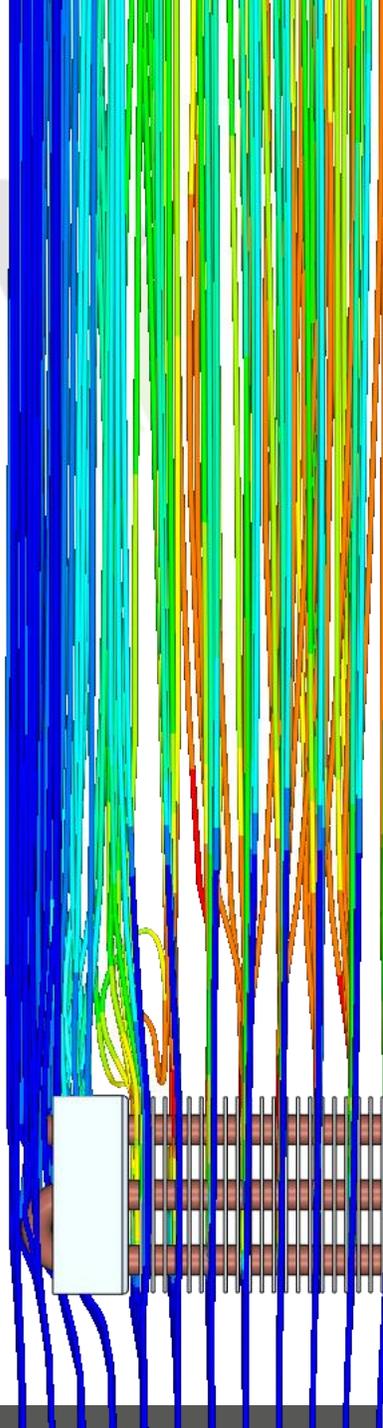


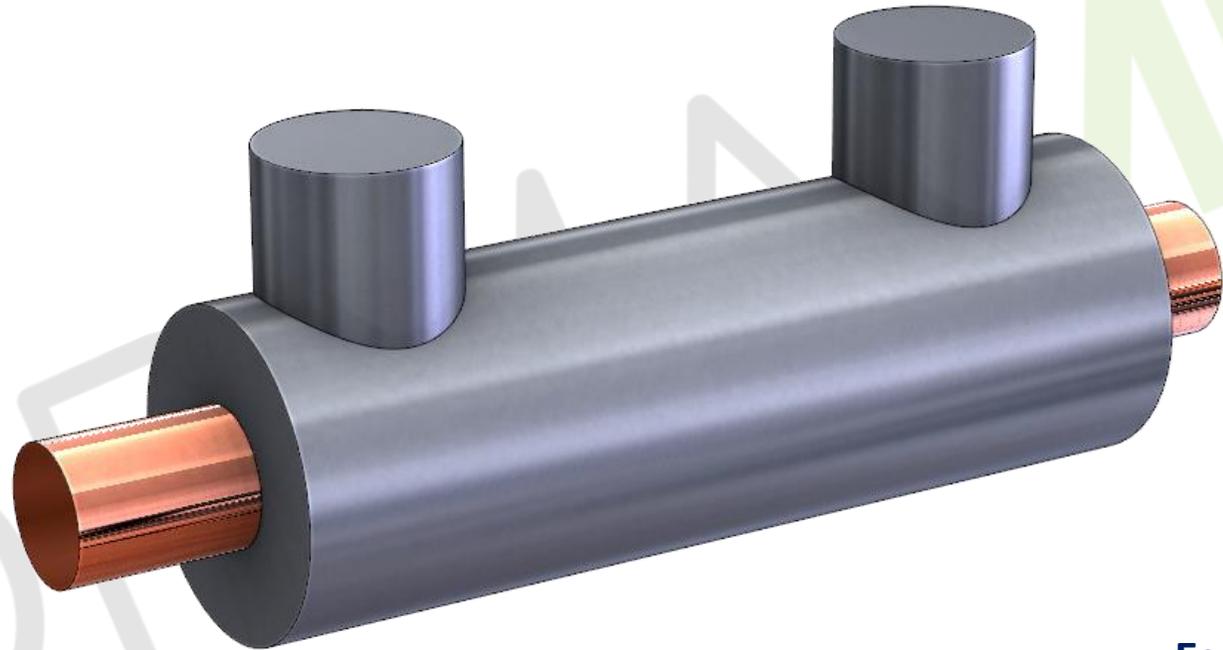


DS ***SOLIDWORKS***
FLOW SIMULATION

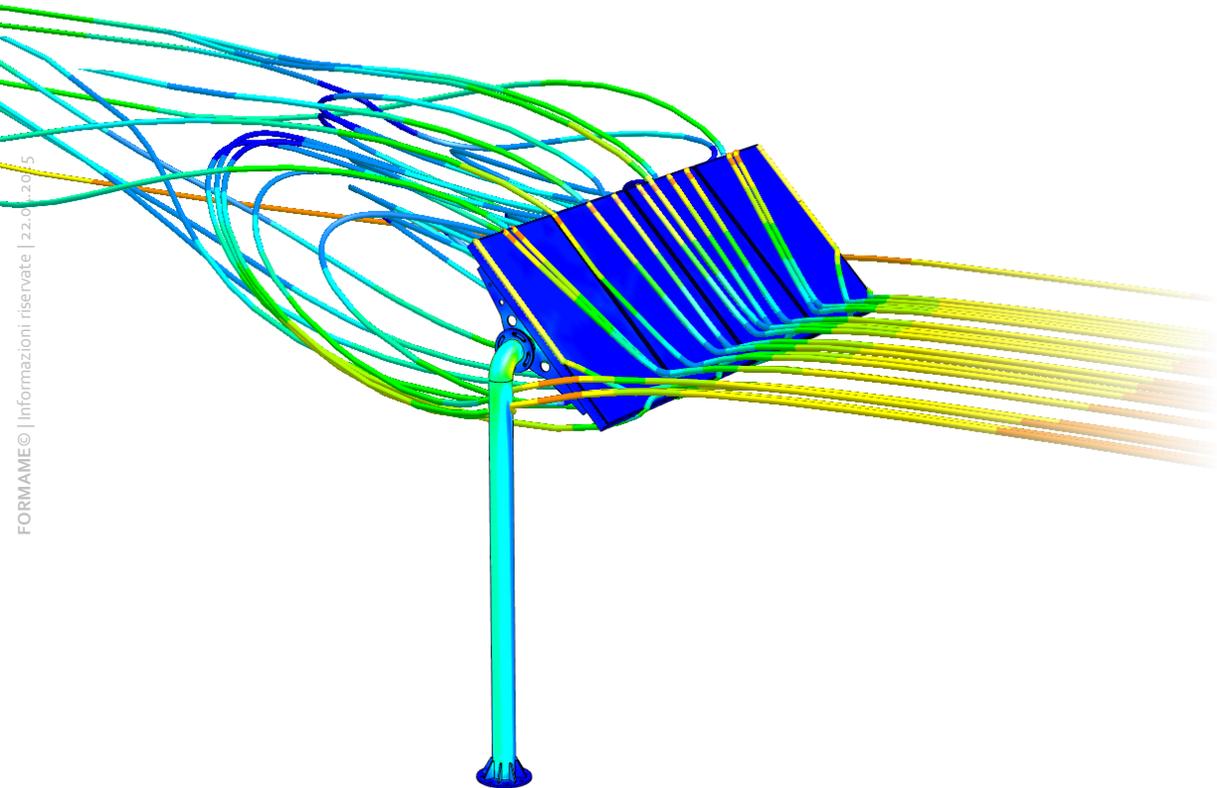
RIASSUMENDO...

- Un analisi può avere **più fluidi**, confinati nello stesso dominio o in domini differenti:
 - Stesso dominio: i fluidi possono essere **simili** (gas o liquidi) e sono considerati **miscibili**
 - Stesso dominio: i fluidi possono essere **dissimili** (gas e liquido) e sono considerati **immiscibili**. Analisi possibile attivando **Free Surfaces**.
 - Domini separati: in virtù del fatto che sono **separati tra loro dalla presenza di un solido**, non vi sono limitazioni.
- In fase di wizard vanno indicati **tutti i fluidi** presenti nello studio.
- Nel caso i fluidi siano confinati, vanno indicati i **sub-domini**, con la selezione di una faccia interna, e impostati i parametri iniziali.





Esercizio:
Scambiatore di calore

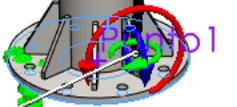


Interazione fluido-struttura

Lezione 7

- Analisi di flusso esterno
- Forze dovute all'azione del vento
- Esportare i risultati di Flow in Simulation
- Richiamare i risultati in Simulation
- Analisi FEM sulla struttura
- Forze e momenti di reazione alla base

FX:	1,55e+03 N
FY:	8,1e+03 N
FZ:	6,09 N
FRes:	8,25e+03 N
MX:	1,51e+04 N.m
MY:	-3,45e+03 N.m
MZ:	-4,22e+03 N.m
MRes:	1,6e+04 N.m



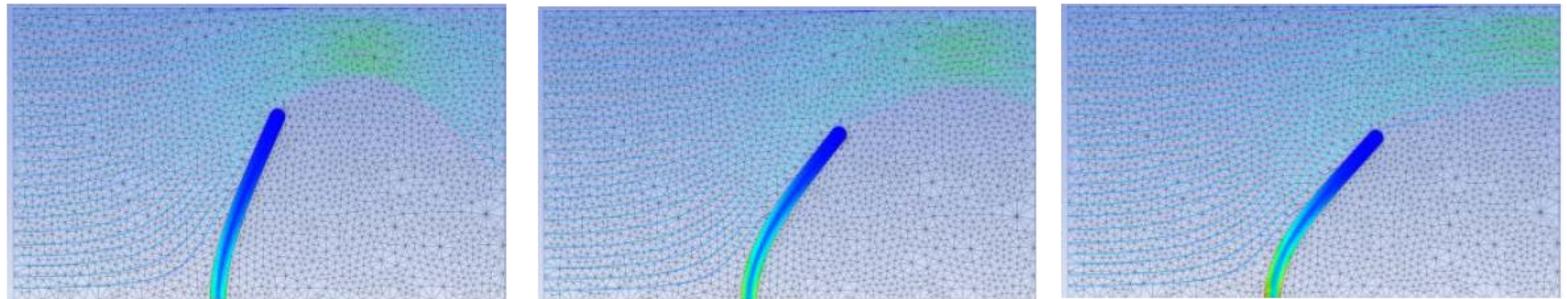
Di fatto si tratta di una co-simulazione tra parte fluidodinamica e strutturale.

Si possono identificare 3 tipi di approcci/interazione tra CFD e FEA:

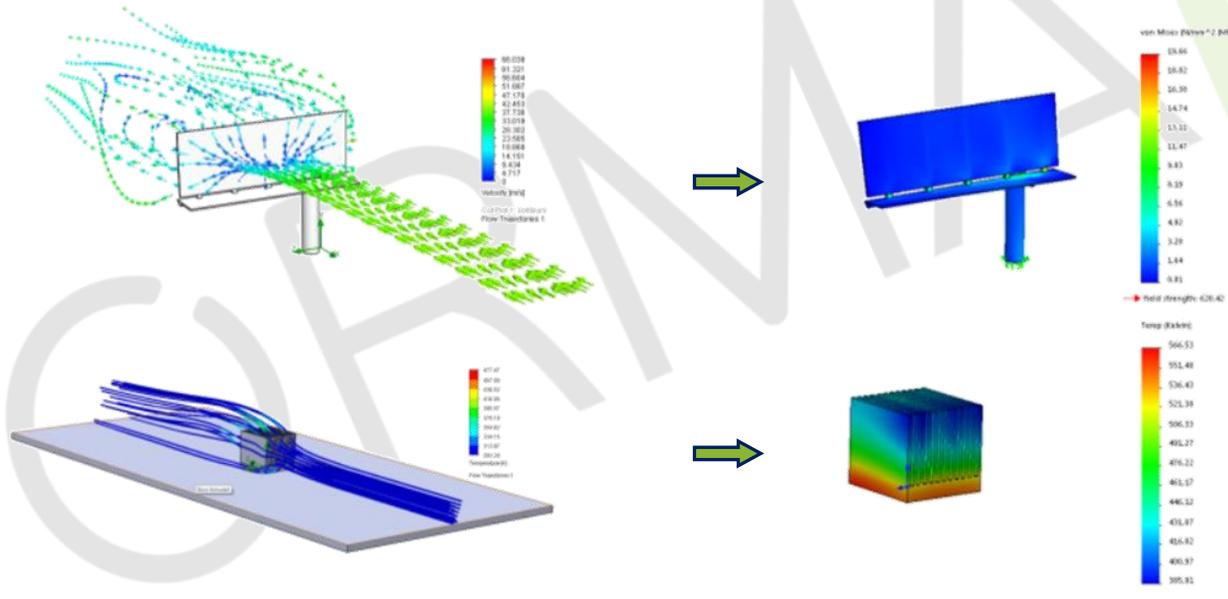
Mono-direzionale: i campi di pressione e temperatura, calcolati sulle pareti del modello CFD, possono essere trasferite come condizioni al contorno per l'analisi FEA.

Bi-direzionale: i due solutori lavorano simultaneamente con uno scambio continuo di informazioni, che avviene ad ogni step di calcolo.

Completamente accoppiate: le equazioni del fluido e del solido vengono risolte in un'unica matrice.



Flow Simulation = Mono-direzionale (one-way)



Strutturale

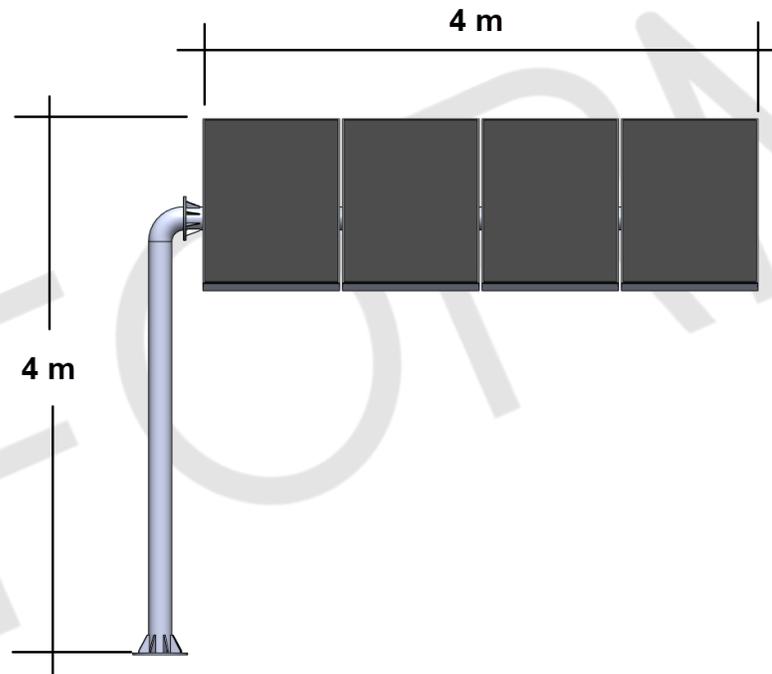
Termo-Strutturale

CASO STUDIO: PENSILINA SOLARE



Verrà simulata l'azione del vento che impatta frontalmente sulle superfici della pensilina, considerando una raffica a **80 Km/h**.

L'obiettivo consiste nell'ottenere i **valori di forza e momento di reazione** sulla piastra di fissaggio, al fine di dimensionare fondamenta e tirafondi.





SOLIDWORKS
FLOW SIMULATION

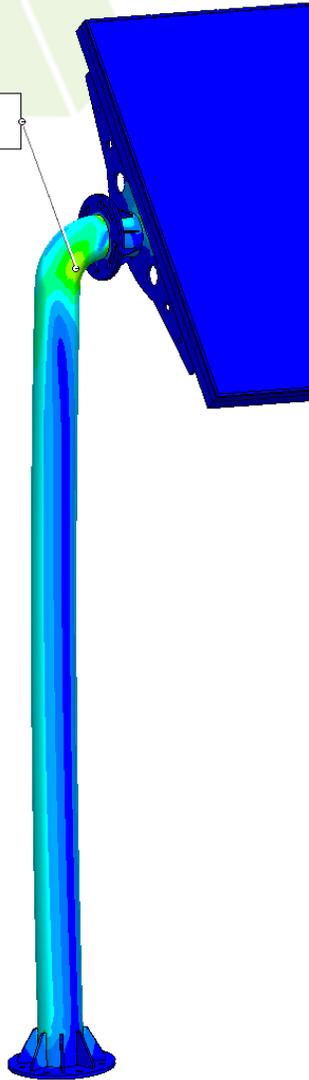


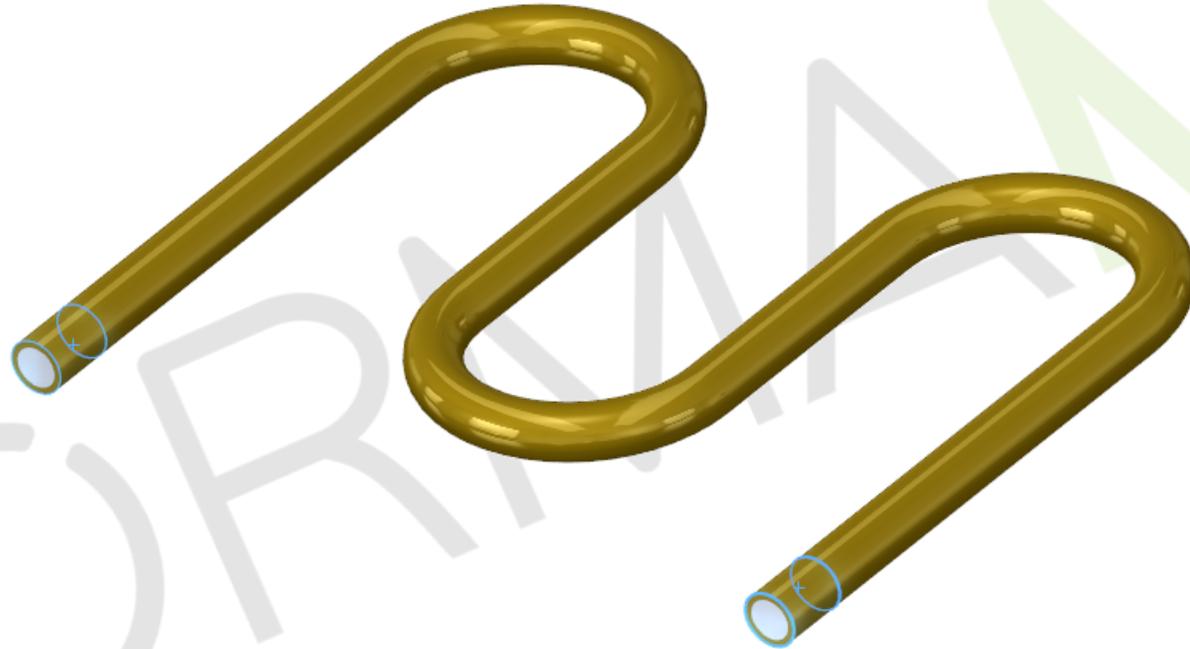
FORUMS

RIASSUMENDO...

- L'interazione FSI in Flow Simulation è di tipo **mono-direzionale**, ovvero i campi di pressione e temperatura, calcolati sulle pareti del modello, possono essere trasferiti come condizioni al contorno per l'analisi FEA.
- In Simulation viene trasferito il valore della **pressione relativa**.
- Possiamo trasferire in Simulation la sola **temperatura o pressione**, oppure **entrambe**.
- La **mesh** gioca un ruolo importante nel **catturare accuratamente il gradiente di pressione sulle superfici del modello**, pertanto è opportuno impiegare mesh locali.

Max: 231





Esercizio:
Serpentina

FORMAME

FORMAME

Umberto Fioretti
SolidWorks Master Trainer

Via Lago di Bolsena, snc
37060 - Buttapietra (VR) – Italy

info@formame.it

