

Enrico Nobile, Mitja Morgut, Paola Ranut
DIA - Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Trieste

Esercitazioni di Termofluidodinamica Computazionale

**Calcolo del flusso turbolento in un gomito a 90° con
ANSYS CFX**



Febbraio 2013

1 Premessa

In questo documento verranno descritti nel dettaglio tutti i passi necessari per risolvere un problema fluidodinamico, la cui geometria è particolarmente semplice, con *ANSYS CFX 14* (nel seguito CFX per brevità). A tal fine, faremo uso di *ANSYS Workbench* (WB nel seguito), le cui caratteristiche lo rendono particolarmente conveniente ed agevole per comprendere la sequenza di passi che si utilizzano per qualsiasi analisi CFD. In altre esercitazioni non si farà uso, per comodità, di WB, sebbene il suo utilizzo sia sempre possibile.

Il problema scelto, come detto, è particolarmente semplice dal punto di vista geometrico, è ciò ci consentirà di definire la geometria direttamente all'interno di WB tramite *ANSYS Design Modeler* (DM nel seguito), anziché importare la geometria generata attraverso un CAD esterno. Tuttavia, si tratta di un problema con interessanti caratteristiche:

- Flusso con peculiarità non banali (moti secondari);
- Ampia disponibilità di dati sperimentali, globali e locali;
- Accuratezza, qualitativa e quantitativa, delle previsioni fortemente influenzata dalle modalità di analisi.

È forse superfluo segnalare che esistono numerosi casi analoghi, in letteratura, caratterizzati da geometria semplice e caratteristiche del moto non banali o complesse, che quindi ben si prestano come argomento per lo *student project*.

2 Descrizione del problema

Si desidera studiare il flusso turbolento, per un fluido incomprimibile (acqua a 20 °C) ed in assenza di scambio termico, attraverso una curva (gomito) a 90° di una tubazione a sezione circolare, come rappresentata in figura 1.

I dati del problema sono riassunti in tabella 1.

Dati caratteristici del problema.	
D	= 50 mm
L_1	= 200 mm
L_2	= 300 mm
r_i	= 100 mm
r_e	= 150 mm
U_m	= 0.2 m/s
μ	= 8.899×10^{-4} kg/(m s)
ρ	= 997 kg/m ³
Re	= $\frac{\rho U_m D}{\mu} = 9980$

Tabella 1: Dati per il gomito a 90 °.

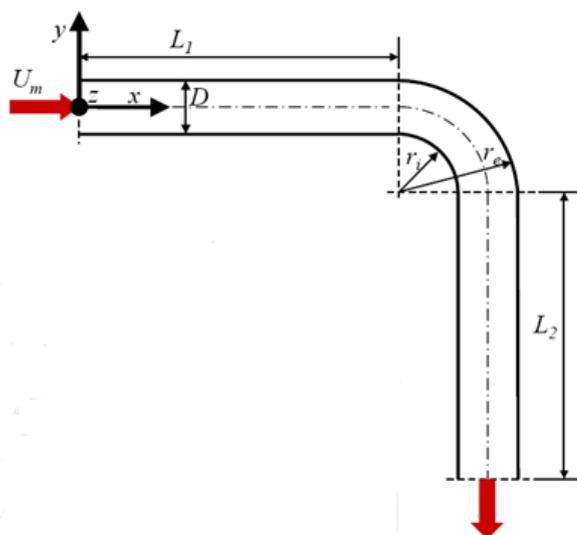


Figura 1: Dimensioni caratteristiche del gomito a 90° .

Dai rilievi sperimentali (H. Nippert, 1929¹) per questo problema, si è osservato:

1. Eventuale presenza di fenomeni di separazione, sia all'estradosso che all'intradosso, in quest'ultimo caso a valle del punto di maggior curvatura;
2. Sovrapposizione, al moto principale, di una corrente secondaria, che tende a spostare i valori massimi della velocità verso il lato esterno, e la cui origine può spiegarsi come segue. Se il moto fosse irrotazionale il profilo di velocità, uniforme nel tratto rettilineo, nel tratto in curva presenterebbe valori maggiori verso l'interno (convessità) e minori verso l'esterno (concavità). Secondo il principio di conservazione dell'energia meccanica (teorema di Bernoulli), pertanto, vi sarebbe una progressiva trasformazione di energia cinetica in energia di pressione lungo la parete esterna, e una trasformazione contraria per la parete interna. A seguito degli attriti, però, il fluido in prossimità delle pareti è più lento di quello del modello irrotazionale, e quindi tanto il recupero di pressione sul lato esterno, quanto l'abbassamento di pressione sul lato interno, saranno inferiori ai valori teorici. Rispetto alla situazione prevista dal modello irrotazionale, ci sarà uno squilibrio delle pressioni il quale determina un certo trasferimento di fluido dall'interno verso l'esterno della curva.
3. La corrente secondaria che in tal modo si determina, tende a spostare i valori massimi della velocità verso il lato esterno, come illustrato nei rilievi sperimentali di figura 2, ed a creare un doppio moto spiraliforme che ha importanti conseguenze: oltre a produrre un'ulteriore dissipazione di energia, questi moti secondari si estendono per un tratto molto lungo dopo la fine della curva - anche 40 - 60 diametri - e possono falsare notevolmente le misure, eseguite con venturimetri, contatori etc., posti ad insufficiente distanza dalla curva stessa.

¹Nippert, H. 1929, Über den Strömungswiderstand in gekrümmten Kanälen. Forschungsheft Arbeit Ingenieur-Wesen, no. 320.

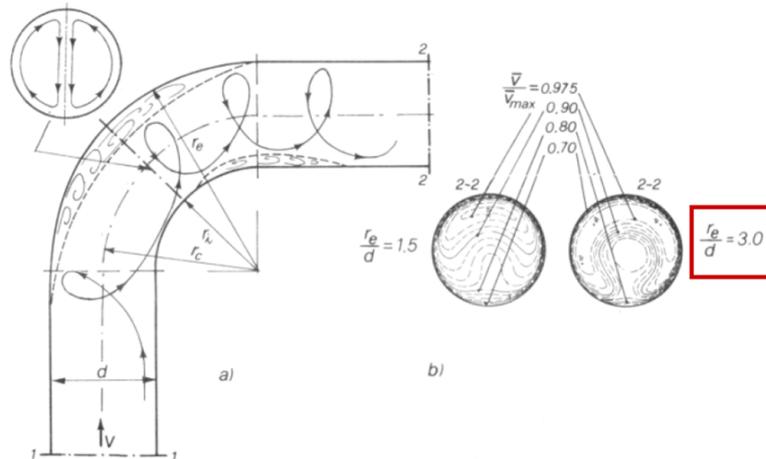


Figura 2: Caratteristiche del moto in un gomito a 90° rilevate sperimentalmente.

3 Analisi del problema con ANSYS Workbench e CFX

Avviare ANSYS WB tramite l'icona  presente sul desktop, oppure tramite

Tutti i programmi → *ANSYS 14.0* → *Workbench 14.0*

L'interfaccia di WB si presenterà come in figura 3.

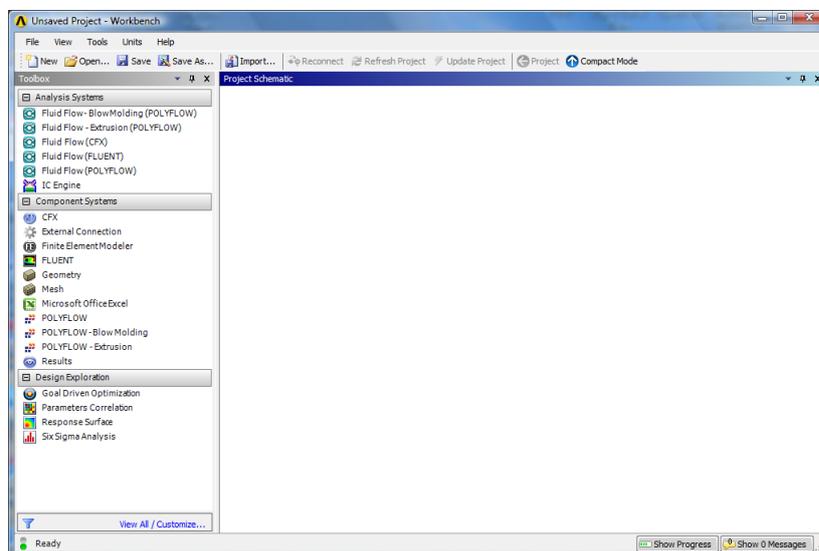


Figura 3: Avvio di ANSYS WB.

Selezionare le unità di misura SI o metriche dal menù *Units* come in figura 4. È opportuno notare che sarà sempre possibile modificare tale scelta in seguito, anche personalizzando i valori delle unità di misura per ciascuna grandezza, dal menù *Units* di WB. Selezionare, dall'elenco di sinistra, nel gruppo *Analysis Systems*, *Fluid Flow (CFX)* e trascinarlo nella finestra principale, come in figura 5.

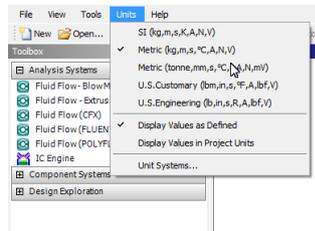


Figura 4: Selezione delle unità di misura in ANSYS WB.

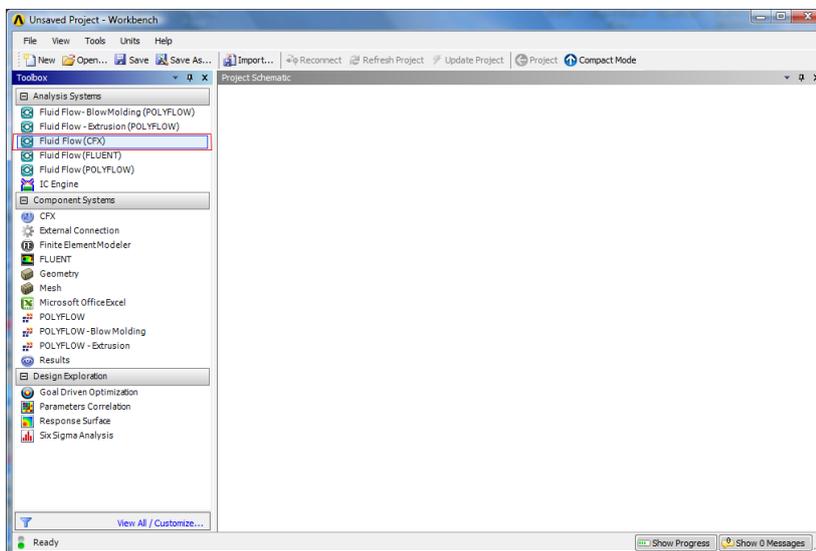


Figura 5: Selezione di CFX in ANSYS WB.

La finestra principale si presenterà ora come in figura 6, nella quale si potrà notare che le varie voci, dette celle (*cells*) in WB, che compongono lo schema del progetto - *Geometry*, *Mesh*, *Setup*, *Solution* e *Results* - sono distinte da un punto interrogativo, a significare l'assenza di dati o la presenza di errori.

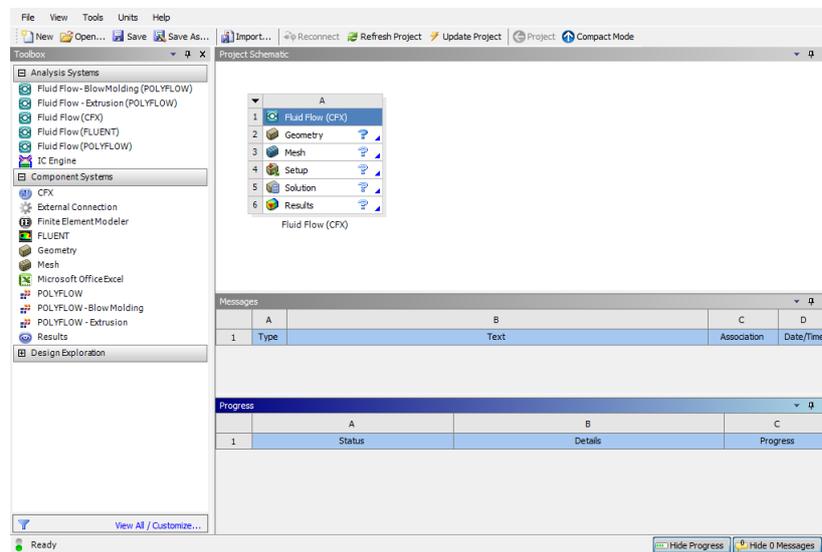


Figura 6: Inizio dell'attività in ANSYS WB.

Sarà ora necessario procedere, dall'alto verso il basso, iniziando da *Geometry* e, una volta completata tale fase, passare a *Mesh* e così via. Ogni qualvolta una fase (cella) verrà completata correttamente, essa si presenterà, anziché con un punto di domanda, con un simbolo di *checkmark* (✓) di colore verde.

A questo punto è opportuno elencare i diversi *stati* possibili delle *celle*, rimandando all'*Help* disponibile per maggiori informazioni:

Typical Cell States (Stati comuni)

Unfulfilled (Insoddisfatto)

I dati a monte (upstream) della cella non esistono. Il caso tipico è l'assenza della geometria: tutte le celle a valle si troveranno in questo stato.

Refresh Required (Refresh richiesto)

I dati upstream sono stati modificati dall'ultimo *Refresh* o *Update* e può essere necessario o meno rigenerare i dati di output. Quando una cella è in tale stato vi sono in generale più opzioni:

- Editare e rivedere i dati *unrefreshed*.
- Fare un *Refresh* dei dati, ma senza incorrere in operazioni che possono richiedere molto tempo, quale ad esempio la generazione di una nuova mesh in caso di modifica della geometria.
- Fare un *Update* della cella, che darà luogo ad un *Refresh* e *rigenerazione dei dati*, quale ad esempio generazione di una nuova mesh nel caso la geometria sia stata modificata.

Il vantaggio di poter eseguire un *Refresh*, invece che un *Update*, riguarda la possibilità di ottenere informazioni diagnostiche sulle celle a valle senza eseguire un vero e proprio *Update*, potenzialmente molto più costoso in termini di tempo e risorse di calcolo.

 **Attention Required** (Attenzione richiesta)

Tutti gli input della cella sono aggiornati, ma è necessaria un'azione correttiva da parte dell'utente, su questa o sulla cella a monte (si noti che, a differenza del caso *Unfulfilled*, il simbolo è *pieno*).

 **Update Required** (Update necessario)

I dati locali della cella sono stati modificati e perciò l'output della cella stessa dev'essere rigenerato. Nell'aggiornamento di una cella che richiede il *Refresh*, verrà prima eseguita l'operazione di *Refresh*, seguita dall'*Update*.

 **Up to Date** (Aggiornato)

La cella è stata aggiornata senza inconvenienti. È possibile editare la cella, ed essa è in grado di fornire dati aggiornati alle altre celle.

 **Input Changes Pending** (Modifiche dell'input in attesa)

La cella è aggiornata, ma il suo stato potrebbe cambiare a seguito dell'aggiornamento di celle a monte.

Solution-Specific States (Stati specifici per le celle di soluzione/analisi)

 **Interrupted** (Interrotto)

La soluzione è stata interrotta in modo *corretto*: il solver ha completato la sua iterazione ed ha prodotto un *solution file* (file dei risultati). Tale file può essere utilizzato per il post-processing - ad esempio per verificare che la soluzione proceda in modo fisicamente corretto - o per ripartire con la soluzione, usando la funzione *Resume* o *Update*.

 **Pending** (In attesa)

Il processo di soluzione è in corso, in modalità asincrona o batch.

Failure States (Stati d'insuccesso)

 **Refresh Failed, Refresh Required** (Refresh fallito, Refresh richiesto)

L'ultimo tentativo di *Refresh* della cella è fallito: essa rimane in stato di *Refresh*.

 **Update Failed, Update Required** (Update fallito, Update necessario)

L'ultimo tentativo di *Update* della cella, e conseguente aggiornamento dell'output, è fallito: essa rimane in uno stato di *Update* necessario.

 **Update Failed, Attention Required** (Update fallito, Attenzione richiesta)

L'ultimo tentativo di *Update* della cella, e conseguente aggiornamento dell'output, è fallito: in questo caso essa rimane in uno stato di *Attention Required*.

Provvediamo intanto a salvare il progetto WB, nella cartella di lavoro scelta (è consigliabile utilizzare una cartella di lavoro distinta per ogni progetto), selezionando l'icona *Save as* dalla barra dei menù oppure da *File* → *Save as*, e nominarlo *gomito* (l'estensione *.wbpj*, da *WorkBench ProJect*, verrà assegnata automaticamente), come in figura 7.

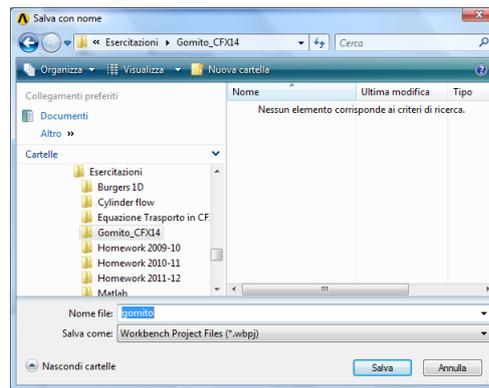


Figura 7: Denominazione e salvataggio del progetto.

3.1 Generazione della geometria

Cliccare, posizionandosi su *Geometry*, con il tasto destro del mouse oppure doppio click e, dal menù, selezionare *New Geometry*, come indicato in figura 8.

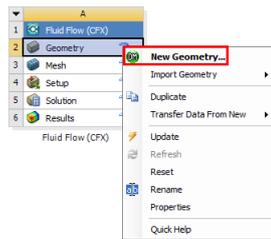


Figura 8: Avvio di ANSYS Design Modeler.

Verrà avviato DM e sarà necessario selezionare l'unità di misura delle lunghezze, come illustrato in figura 9. Scegliere *mm* (selezionando, nel checkbox, *Always use project units*, si utilizzerà sempre l'unità di misura di lunghezza precedentemente scelta in WB).

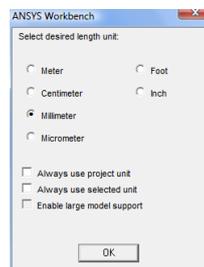


Figura 9: Scelta dell'unità di misura delle lunghezze in ANSYS DM.

Nella generazione della geometria, vi sono sempre più modalità per giungere al medesimo risultato: la scelta, oltre, oltre che dettata dall'esperienza, dipende da numerosi fattori, quali:

- Facilità della successiva generazione della griglia, e qualità di quest'ultima;

- Parametrizzazione della geometria, per successive analisi parametriche, ottimizzazioni etc.;
- Esportazione dei risultati verso altri prodotti e/o altre fisiche (es. interazioni fluido-struttura).

La figura 10 riporta l'ordine di generazione degli elementi adottato.

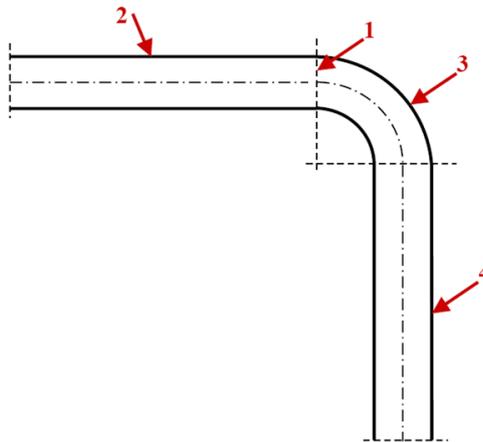


Figura 10: Ordine di generazione degli elementi geometrici del gomito.

Selezionare, nell'albero di sinistra, il piano YZ e, con il tasto destro del mouse, selezionare l'opzione *Look at* per spostare la vista sul piano stesso. Cliccare quindi sull'icona *New Sketch* () , presente in alto, e rinominare lo sketch (tasto destro del mouse) in *Diametro*. La finestra di DM apparirà come in figura 11.

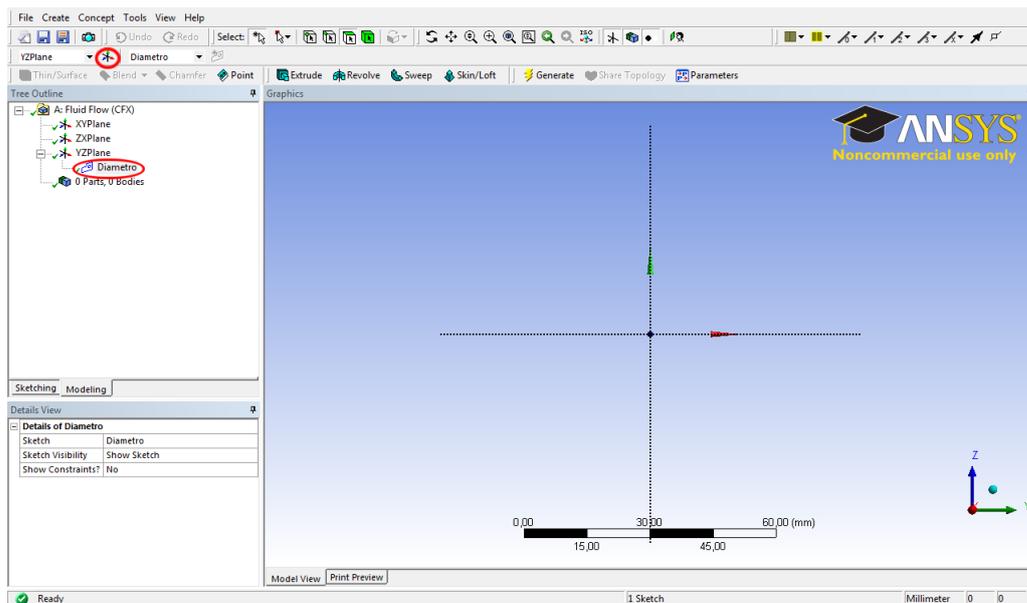


Figura 11: Generazione dello sketch *Diametro*.

Spostarsi sul menu *Sketching*, a sinistra, e selezionare *Circle* nel sottomenu *Draw*, come in figura 12. A questo punto:

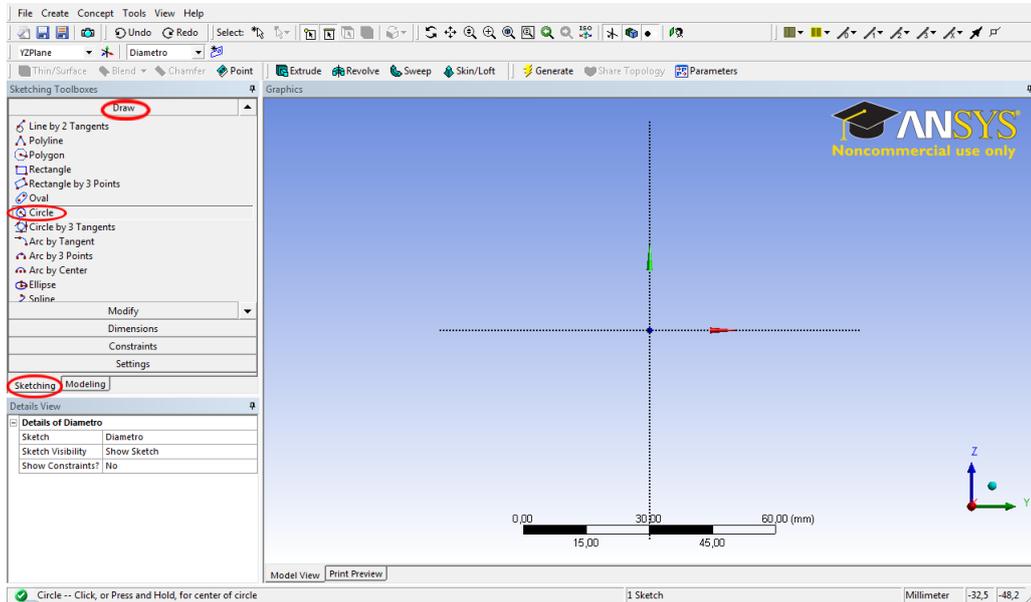


Figura 12: Selezione dell'elemento *Circle* nel sottomenu *Draw* in *Sketching*.

- Posizionare il puntatore del mouse all'origine degli assi fino alla comparsa della lettera 'P', indicante l'opzione di *snap* al punto;
- Premere il tasto sinistro del mouse, trascinarlo in senso radiale ed infine rilasciarlo per definire il raggio;
- Selezionare il sottomenu *Dimensions* per definire in modo parametrico il valore del diametro;
- Selezionare l'opzione *Diametro*;
- Spostare il mouse sulla circonferenza;
- Cliccare con il mouse per associare la quota *D1* all'entità geometrica;
- Nel menu *Details* di sinistra digitare il valore del diametro, 50 mm, nell'apposita casella.

Il risultato finale è riportato in figura 13.

Nell'albero di *Modeling* selezionare lo schizzo da estrarre (*Diametro*), e:

- Cliccare sull'icona *Extrude* (📐) in alto;
- Rinominare l'estrusione in *TuboMonte*, in analogia a quanto già fatto con lo schizzo;
- Impostare la direzione di estrusione in *Reversed*;
- Definire la profondità di estrusione (*Depth*) a 200 mm;

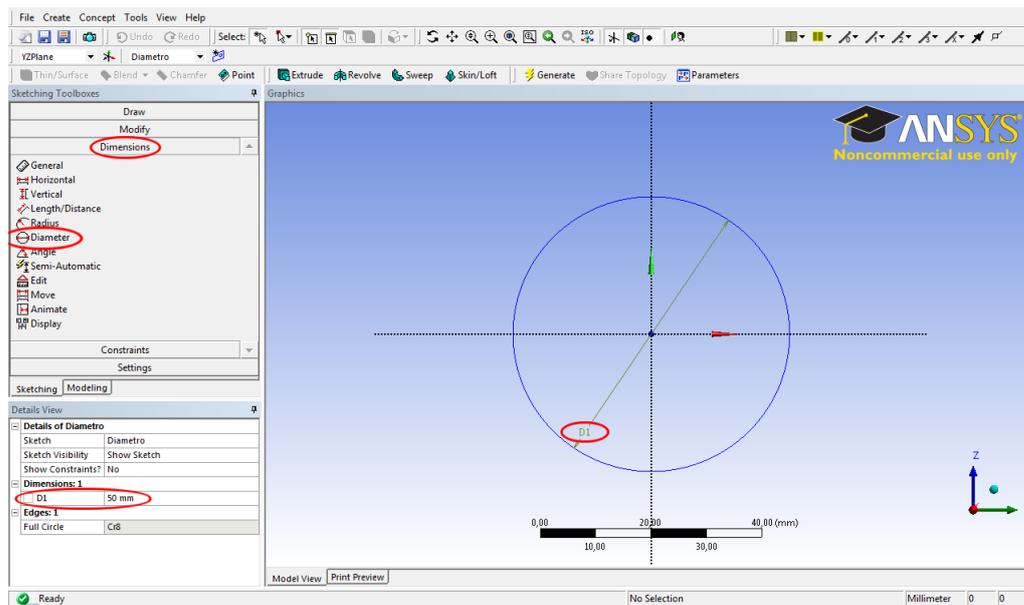


Figura 13: Scelta del diametro.

- Cliccare sull'icona *Generate* ⚡, presente nel menu in alto.

Il risultato è illustrato in figura 14, nella quale sono evidenziate le scelte indicate.

Riportarsi nuovamente sul piano YZ e:

- Generare un nuovo schizzo, da rinominare in *Asse*, come in figura 15;
- Selezionare gli strumenti di *Sketching* e dal menu *Draw* cliccare su *Line*;
- Tracciare al di sotto della circonferenza, mantenendo premuto il tasto sinistro del mouse, una linea orizzontale. A tal fine, fare attenzione che ci sia una lettera 'H' vicino alla linea, ad indicare che la linea è disposta orizzontalmente: il risultato sarà come in figura 16;
- Passare al menu *Dimensions* e selezionare una quota *verticale*;
- Cliccare sulla linea da quotare, appena tracciata, e sull'asse orizzontale della circonferenza - l'asse delle Y - per definire la quota;
- Definire, come in precedenza, il corretto valore della quota, pari a 125 mm, come illustrato in figura 17.

Selezionare l'opzione di modellazione *Revolve*, indicata dal simbolo .

- Rinominare la feature in *Gomito*;
- Nella finestra di dettaglio, in basso a sinistra, associare a *Geometry* lo schizzo *Diametro*, e alla voce *Axis* lo schizzo *Asse* (è sufficiente, una volta selezionato con il mouse lo schizzo *Asse*, premere *Apply* per associarlo all'asse di rotazione);

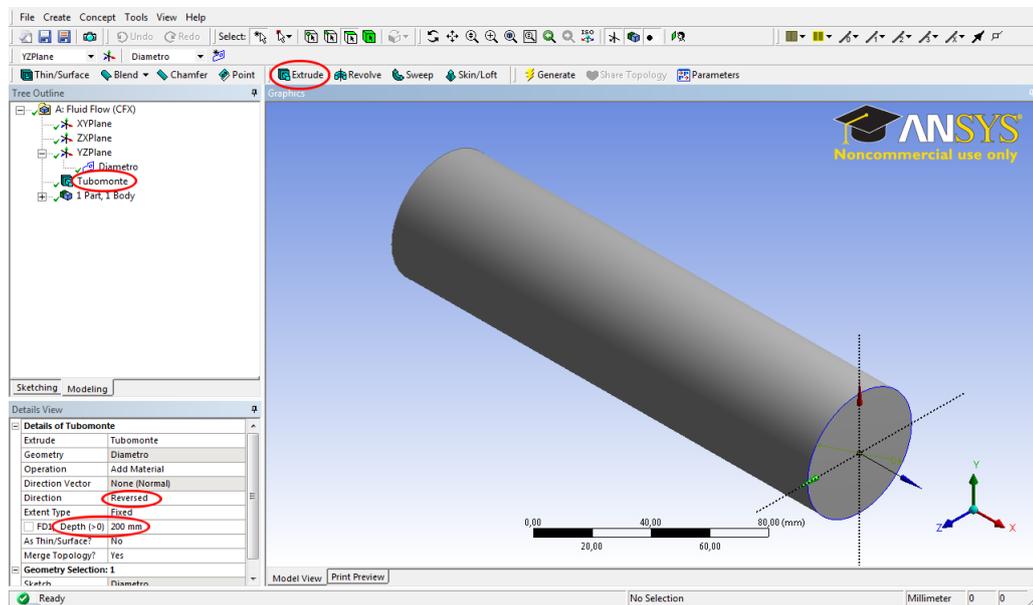


Figura 14: Generazione del tratto di tubo a monte del gomito.

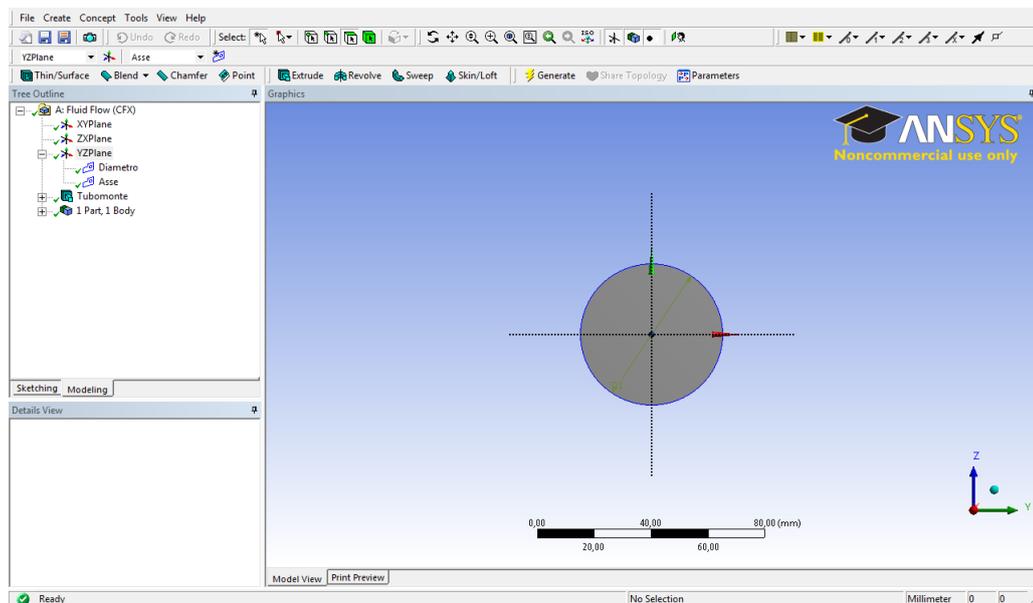


Figura 15: Generazione dello sketch Asse.

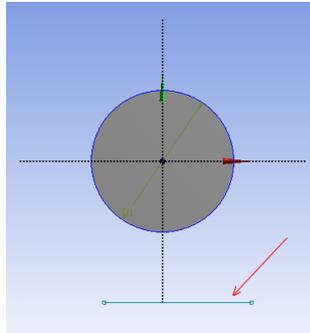


Figura 16: Asse orizzontale.

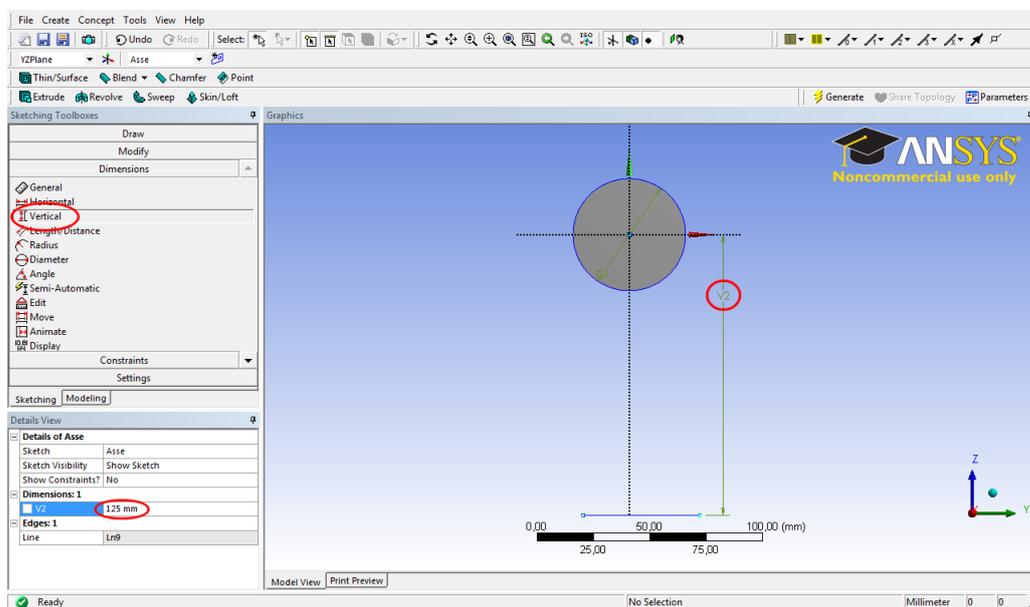


Figura 17: Quotatura asse orizzontale.

- Impostare, sempre nella finestra di dettaglio, l'angolo di rivoluzione a 90° ;
- Cliccare su  *Generate*: il risultato sarà come in figura 18.

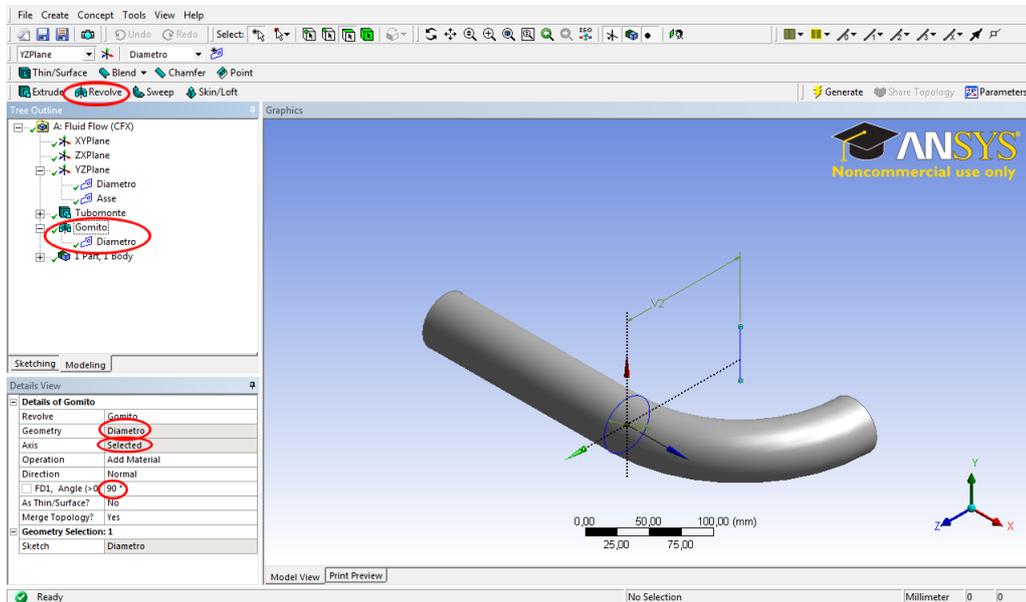


Figura 18: Generazione del gomito.

Ruotare il tubo in modo da portare in primo piano la superficie a valle del gomito, come in figura 19:

- Cliccare sull'icona  *New plane*;
- Rinominare il piano in *PianoValle*;
- Nella finestra di dettaglio selezionare, tra i possibili tipi, *From Face*;
- Spostarsi su *Base face*, e selezionare la faccia nel viewpoint (superficie a valle del gomito) e poi premere *Apply*;
- Infine cliccare su  *Generate* per creare il piano.

Una volta ottenuto il piano, è necessario:

- Generare una nuova feature *Extrude*, rinominandola *TuboValle*, in analogia con quanto già fatto in precedenza con *Tubomonte*;
- Nella finestra di dettaglio associare a *Geometry* il piano appena creato: in questo modo vengono estruse tutte le superfici presenti nel piano;
- Definire una profondità di estrusione pari a 300 mm;
- Cliccare su  *Generate* per generare la feature.

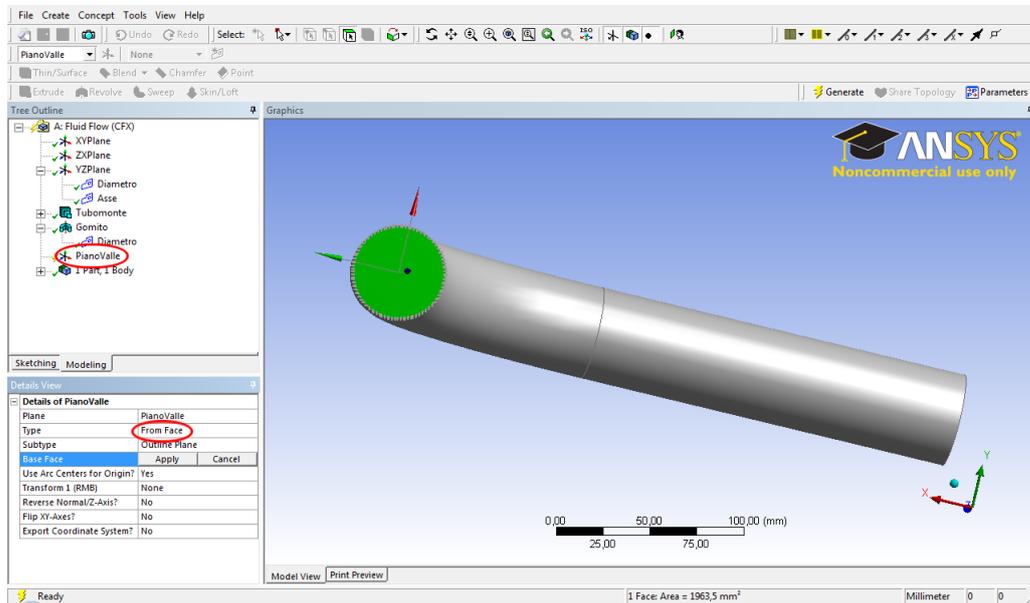


Figura 19: Generazione del piano a valle del gomito.

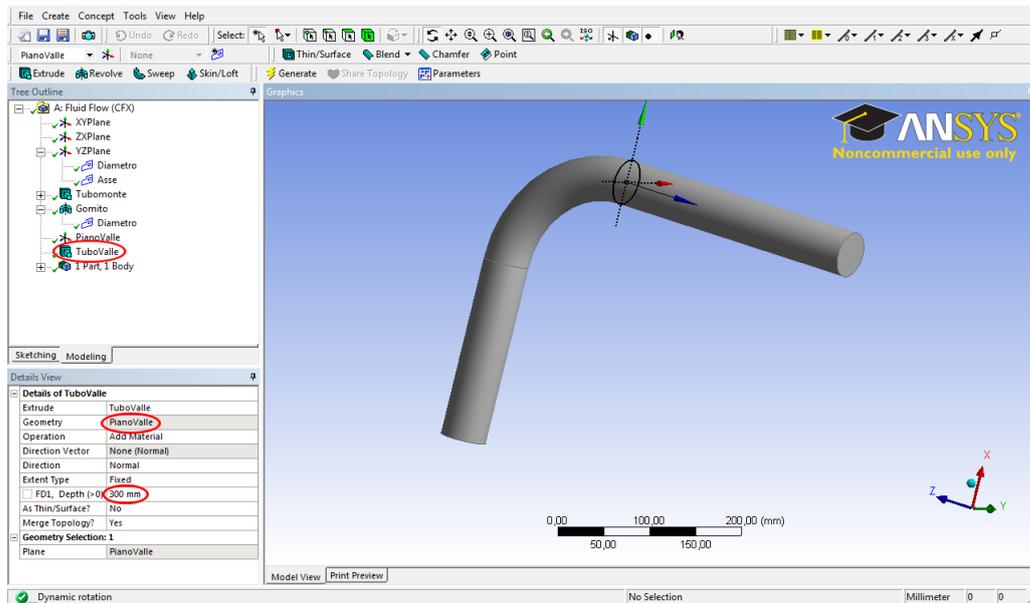


Figura 20: Generazione del tubo a valle del gomito.

Il risultato è illustrato in figura 20.

Salvare quindi la geometria appena completata col nome di *Gomito*: l'estensione *.agdb*, Design Modeler DataBase files, verrà assegnata automaticamente, come riportato in figura 21. Chiudere *Design Modeler*.

Nella finestra principale del progetto (Workbench) salvare, aggiornandolo, l'intero progetto.

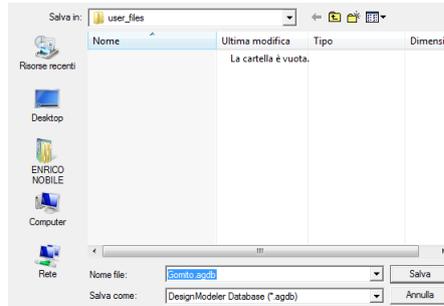


Figura 21: Salvataggio della geometria.

3.2 Generazione della griglia di calcolo

Nella finestra principale posizionarsi con il mouse, nello schema del progetto, su *Mesh* cliccando con il tasto destro e selezionare *Edit*, come in figura 22, oppure doppio click col tasto sinistro.

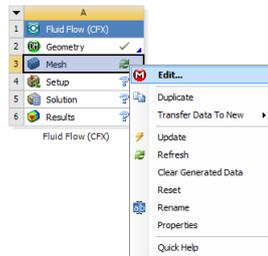


Figura 22: Avvio di ANSYS meshing.

Una volta completato l'avvio di ANSYS Meshing, il risultato sarà come in figura 23.

Cliccando su *Mesh*, nell'albero a sinistra del progetto, verranno visualizzate le informazioni riportate nella finestra di dettaglio a sinistra, riprodotta in figura 24. In particolare, si potrà notare che, come *Physics Preference* è indicato *CFD*, mentre come *Solver Preference* è selezionato, di default, *CFX*, senza necessità di ulteriore intervento da parte dell'utente.

È ora opportuno, prima di procedere alla generazione vera e propria della griglia di calcolo, denominare opportunamente tutte le superfici di contorno del dominio - *patches* - agevolando in tal modo la successiva imposizione delle condizioni al contorno. Come rappresentato in figura 25, cliccare con il tasto destro del mouse, nell'albero in alto a sinistra, su *Model* → *Insert* → *Named Selection*.

Successivamente:

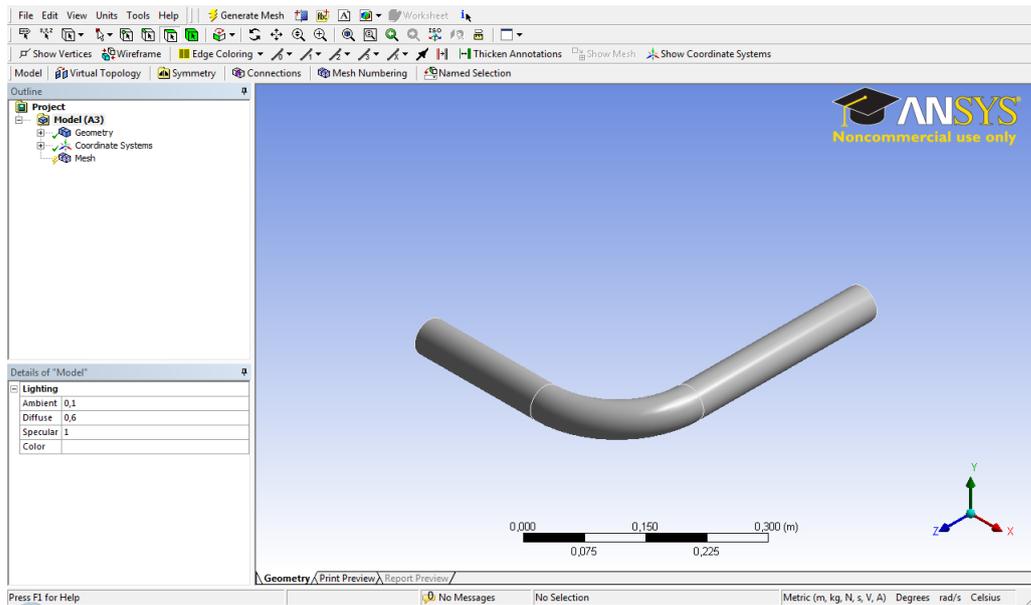


Figura 23: Schermata iniziale di ANSYS Meshing.

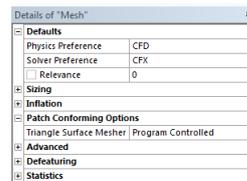


Figura 24: Dettagli sulle *Preferences* in ANSYS Meshing.

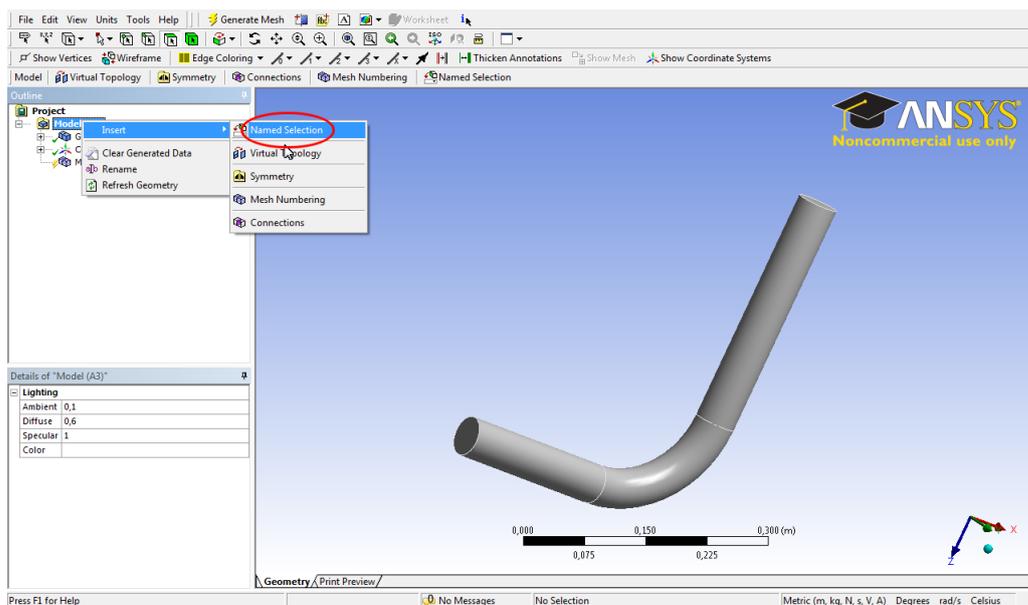


Figura 25: Inserimento di *Named Selection* in ANSYS Meshing.

- Rinominare in *INGRESSO*;
- Selezionare la faccia d'ingresso al tubo a monte della curva, riconoscibile dalla posizione rispetto agli assi coordinati (per comodità: il ramo più corto);
- Premere su *Apply*, come illustrato in figura 26.

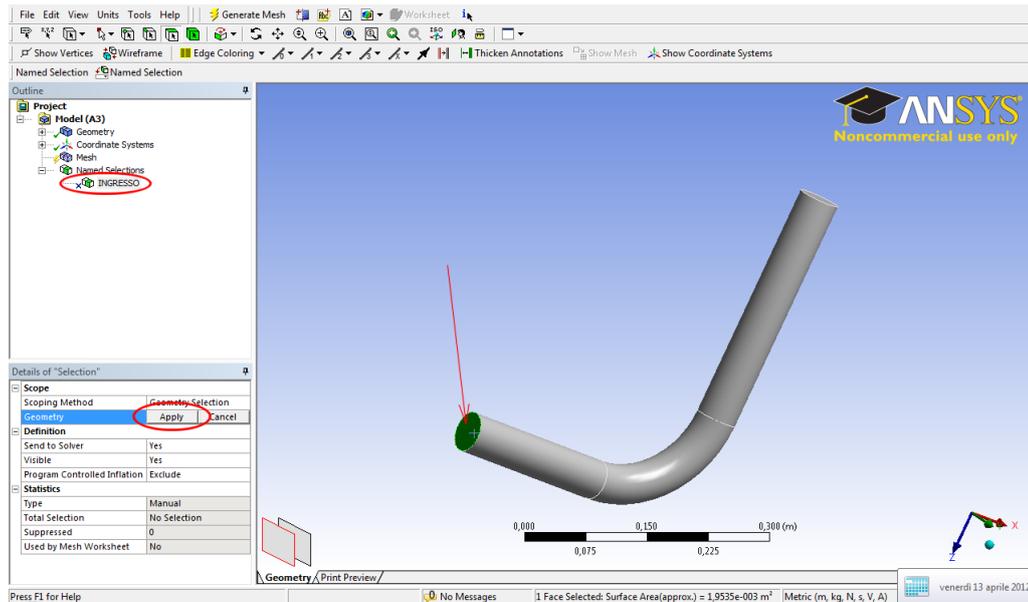


Figura 26: Definizione della faccia *INGRESSO* in ANSYS Meshing.

Procedere in maniera analoga per la sezione (faccia) di uscita, denominandola *USCITA*, come in figura 27.

È infine necessario definire la parete laterale, rinominando la regione in *PARETE*, come illustrato in figura 28, ponendo attenzione al fatto che la parete è in realtà costituita da 3 superfici: per eseguire la scelta di più superfici è necessario tenere premuto il tasto *Ctrl* durante la selezione.

Una volta completata la definizione delle regioni, possiamo procedere alla generazione delle mesh adottando i settaggi di *default* per ciò che riguarda le informazioni sulle dimensioni minime e massime degli elementi, l'algoritmo di generazione della griglia etc. Queste informazioni sono reperibili cliccando, nell'albero a sinistra, su *Mesh* → *Sizing* e *Patch Conforming Options*, come illustrato in figura 29.

Per poter generare la mesh, è necessario cliccare sull'icona *Generate Mesh* ( *Generate Mesh*), ed attendere il tempo necessario a completare l'operazione. Il progresso della generazione della griglia verrà indicato dalle due *waitbar* in figura 30. In questo caso, trattandosi come si vedrà di una mesh piuttosto rada, il tempo necessario è trascurabile, mentre nel caso di geometrie complesse e risoluzione spinta, il tempo necessario può essere dell'ordine delle ore.

Le griglia risultante, che verrà mostrata nella finestra principale alla fine della generazione, è riportata in figura 31.

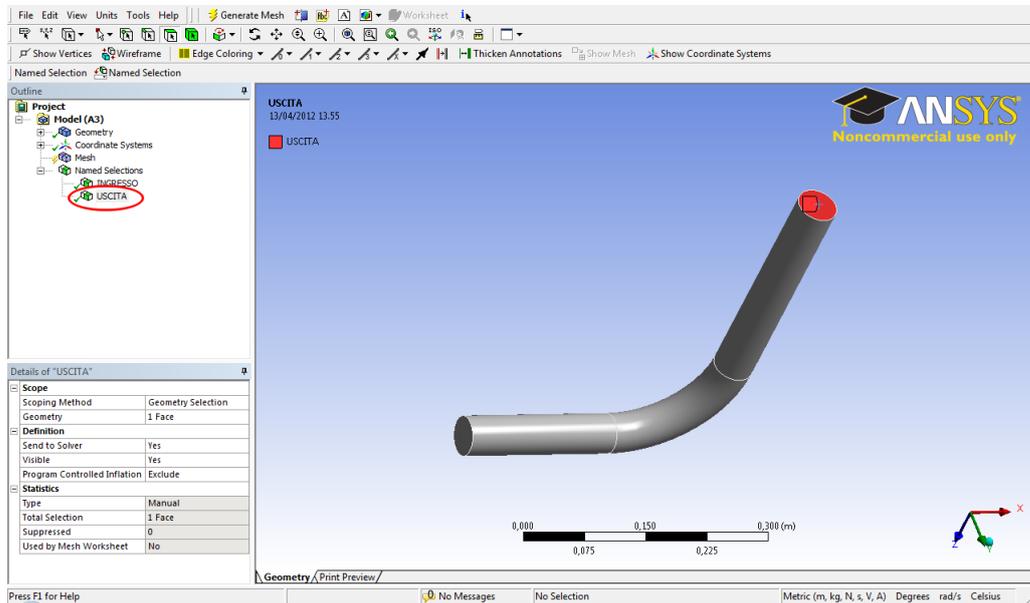


Figura 27: Definizione della faccia *USCITA* in ANSYS Meshing.

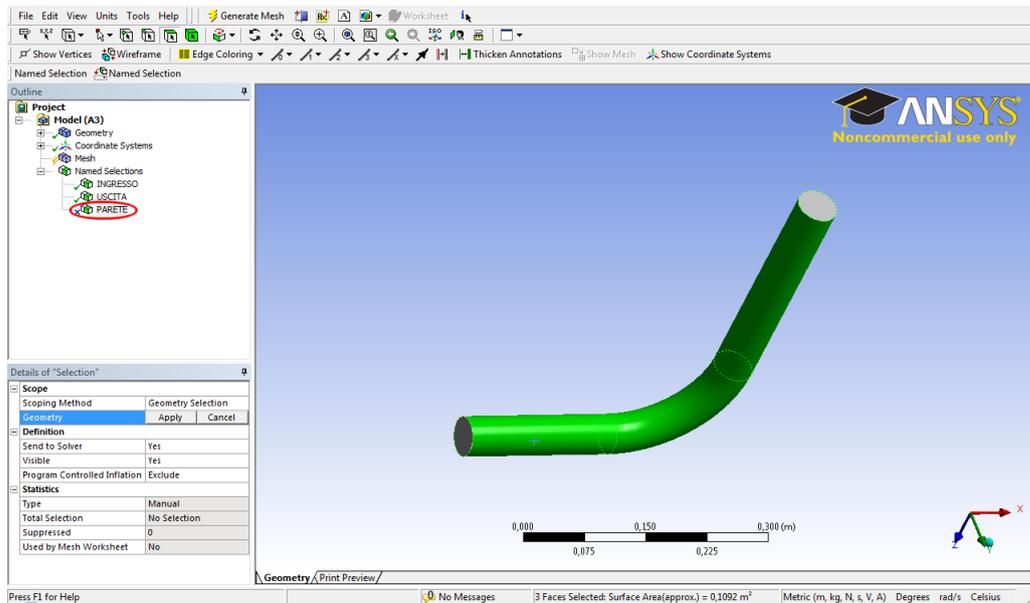


Figura 28: Definizione della *PARETE* in ANSYS Meshing.

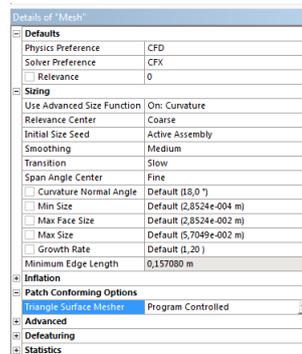
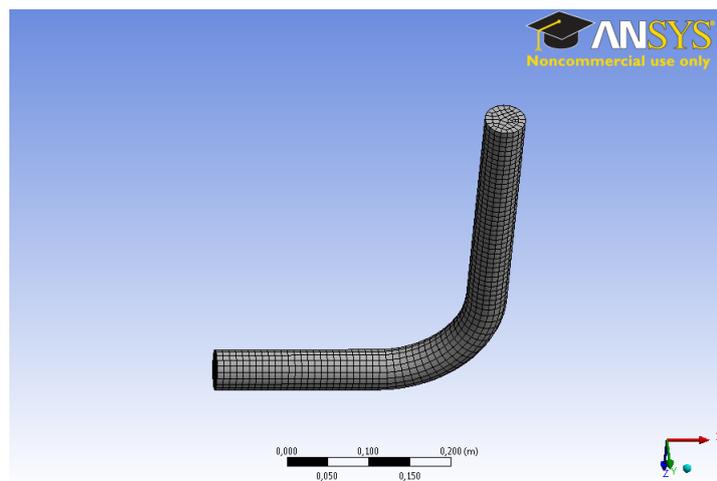
Figura 29: Valori di default per il *sizing* in ANSYS Meshing.

Figura 30: Finestra di stato della generazione della griglia in ANSYS meshing.

Figura 31: Griglia ottenuta, in ANSYS meshing, usando i valori di *default* per il *Sizing*.

La griglia così ottenuta, com'è ovvio, è troppo rada per descrivere adeguatamente il fenomeno: basta osservare, cliccando su *Statistics* nel menu in basso a sinistra, che il numero totale di nodi è pari a 4565, ed il numero totale di elementi (si ricordi che ANSYS CFX è un codice di tipo CVFEM - *Control Volume Finite Element Method*), è uguale a 3608. Pertanto è necessario modificare (ridurre) i valori di default per il *Sizing*, riducendo opportunamente le dimensioni delle celle. Portando, ad esempio, ambedue i valori di *Max Face Size* e *Max Size* a 5 mm (5×10^{-3} m), come illustrato in figura 32, si ottiene la mesh di figura 33.

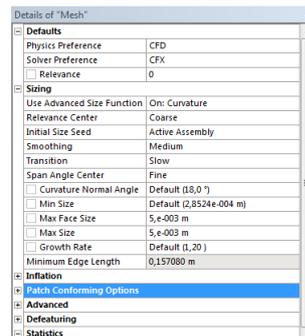


Figura 32: Valori ridotti per il *sizing* in ANSYS Meshing.

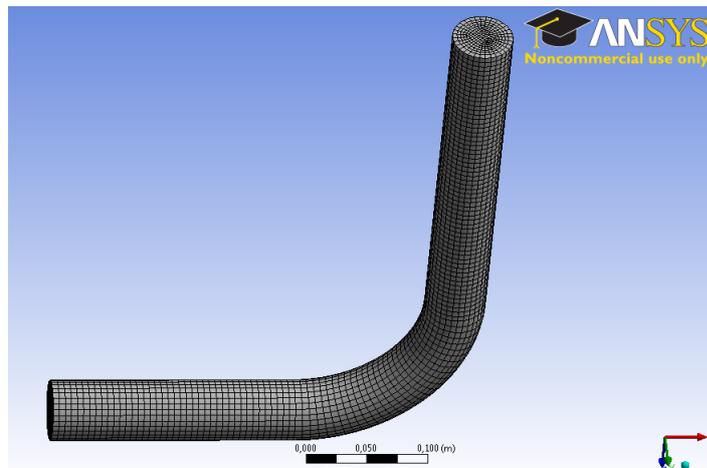


Figura 33: Griglia ottenuta, in ANSYS meshing, usando i valori ridotti per il *Sizing*.

È tuttavia possibile notare che anche questa griglia è probabilmente inadeguata, soprattutto per ciò che riguarda la risoluzione a parete. Ritourneremo su tale aspetto nel seguito. Vale la pena ricordare che, ogniqualvolta vengono eseguite modifiche, è necessario *aggiornare* (*Update*) la mesh, oltre ad aggiornare gli eventuali riferimenti alla mesh da parte di altre celle, nel nostro caso la cella di *Setup*. Ciò si esegue o cliccando *Update* (⚡ *Update*), al posto di *Generate Mesh* (⚡ *Generate Mesh*) in DM, oppure cliccando con il tasto destro del mouse sulla cella *Mesh* in WB e selezionando *Update*, come illustrato in figura 34

Completata la generazione della mesh, è ora possibile chiudere *ANSYS meshing* (da *File* → *Close meshing*) e procedere con il *Setup* del problema, non prima di aver salvato l'intero progetto in WB (*File* → *Save*).

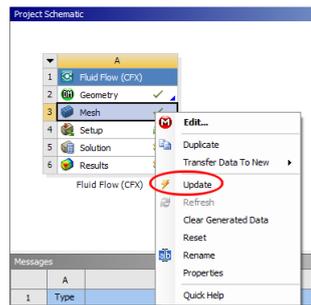


Figura 34: Aggiornamento (*Update*) della cella *Mesh* in WB.

3.3 Setup del problema

Nella finestra principale posizionarsi con il mouse, nello schema del progetto in WB, sulla cella *Setup* cliccando con il tasto destro e selezionare *Edit*, come in figura 35.

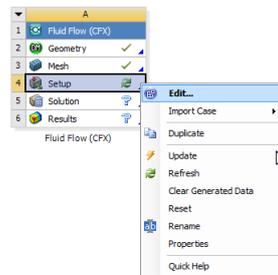


Figura 35: Avvio di ANSYS Setup.

Una volta completato l'avvio di ANSYS Setup, il risultato sarà come in figura 36.

È ora necessario procedere al settaggio di tutti i parametri e le modalità riguardanti la simulazione, ed in particolare:

- Tipo di analisi (stazionario o non-stazionario);
- Presenza di moti di corpo rigido;
- Caratteristiche del dominio di calcolo;
- Condizioni al contorno;
- Presenza di sotto-domini;
- Sorgenti puntiformi;
- Interfacce;
- Inizializzazione;
- Parametri e schemi del solutore;
- Modalità di output;

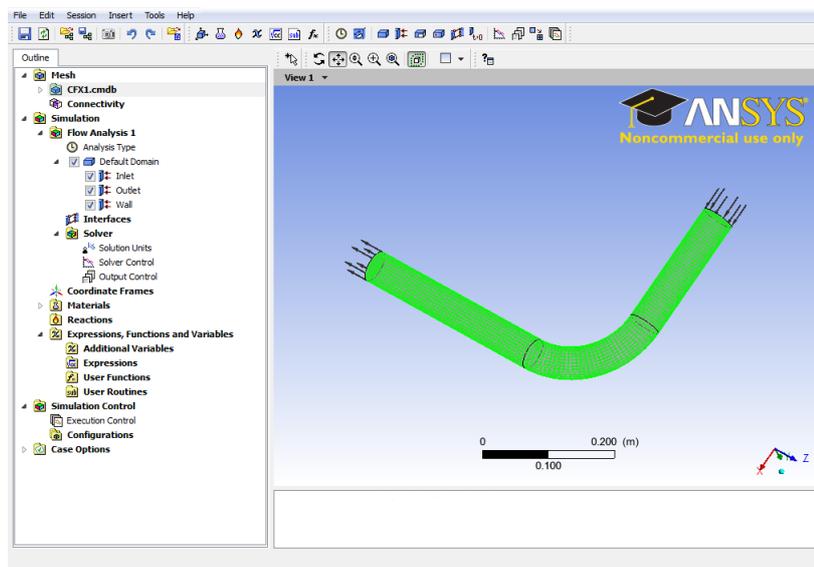


Figura 36: Schermata iniziale di ANSYS Setup.

- Adattività della griglia;
- Parametri di esecuzione.

Le icone di tutte queste voci sono riportate, nell'ordine visto, nella *Toolbar* di *CFX-Pre*, come illustrato in figura 37. Sarà quindi utile e conveniente seguire tale ordine per preparare il lancio della simulazione, con l'avvertenza che non è necessario settare le voci non pertinenti, che vanno quindi lasciate ai loro valori di default (ad es. nel caso in esame non vi sono moti di corpo rigido, né sotto-domini o sorgenti puntiformi, e nemmeno interfacce, ed inoltre non attiviamo l'adattività della griglia).



Figura 37: Voci della Toolbar di ANSYS Setup.

Trattandosi di un problema stazionario in assenza di moti di corpo rigido (default), è possibile procedere direttamente alla definizione del *Dominio*, cliccando sull'icona ().

Nominare il dominio *Gomito*, e verificare quindi che, come illustrato in figura 38, cliccando su *Gomito* nell'albero di sinistra (Outline), in *Basic Settings* il fluido di lavoro è acqua.

Cliccando infine sul Tab *Fluid Models*, si potrà verificare, come in figura 39, che il flusso è assunto turbolento, e viene utilizzato il modello RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) $k - \epsilon$.

È ora possibile procedere all'imposizione delle condizioni al contorno. Iniziando dalla condizione all'ingresso, cliccare sull'icona *Boundary* () e nominarla *Ingresso*. Successivamente, come illustrato in figura 40, indicare che si tratta di *Boundary Type* di tipo *Inlet*, ed associarla alla patch *INGRESSO*. Prima di completare la definizione della condizione al contorno, è necessario impostare alcuni parametri legati al tipo di condizione al contorno. Cliccare sul Tab *Boundary Details*, settare il valore della velocità a 0.2 [m/s] lasciando gli altri parametri invariati, come riportato in figura 41, e cliccare su *OK*.

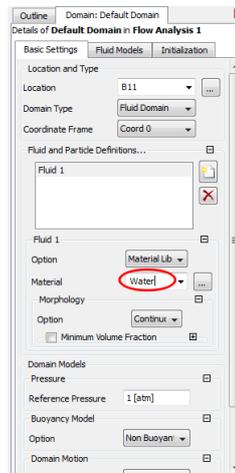


Figura 38: Verifica del fluido di lavoro - *Material* - del dominio di calcolo.

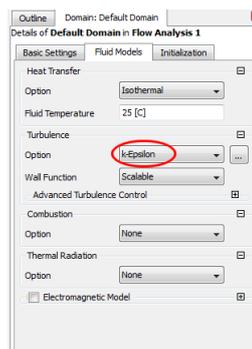


Figura 39: Verifica del modello di turbolenza utilizzato.

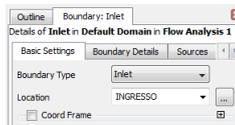


Figura 40: Condizione di *Inlet* all'Ingresso.

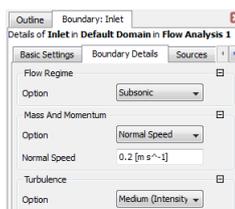


Figura 41: Dati della condizione di Ingresso.

Si procede quindi analogamente per la condizione al contorno all'uscita: in tal caso, dopo aver nominato la condizione *Uscita* ed aver indicato che si tratta di una condizione di tipo *Outlet*, associarla alla patch *USCITA*, come visibile in figura 42. Oltre alla condizione al contorno di tipo *Outlet*, che prevede che il flusso sia tutto in uscita, esiste anche la condizione di *Opening*, da utilizzarsi quando è prevista la possibilità che, su una parte della sezione, il flusso possa essere in Ingresso.

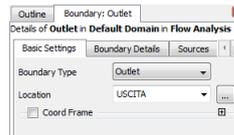


Figura 42: Condizione di *Outlet* all'Uscita.

Cliccare poi sul Tab *Boundary Details*, ed impostare a 0 [Pa] il valore della pressione relativa, come in figura 43.

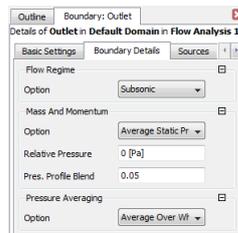


Figura 43: Dati della condizione all'Uscita.

L'ultima condizione da imporre è quella relativa alla parete del gomito. Procedendo nel modo già visto, si nomina tale condizione *Parete* e, dopo aver indicato che si tratta di una condizione al contorno di tipo *Wall*, associarla alla patch *PARETE*, come in figura 44.

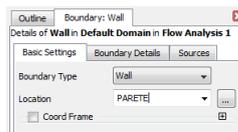
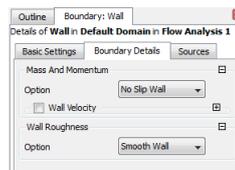


Figura 44: Condizione di *Wall* sulla Parete.

Infine, cliccare su *Boundary Details* ed accertarsi che, come indicato in figura 45, la parete sia di tipo *No Slip* e *Smooth*.

Prima di passare alla fase di soluzione vera e propria, indichiamo lo schema convettivo (advettivo) da utilizzare in questa prima prova. Cliccando sull'icona *Solver Control* (🔧), in alto sulla Toolbar o a sinistra sull'Outline, impostare *Upwind* come *Advection Scheme*, e lasciare inalterati tutti gli altri parametri, come indicato in figura 46. È ben noto che lo schema *Upwind*, del primo ordine, produce risultati in generale inaccettabili, poiché introduce una *diffusività numerica*, non fisica, dello stesso ordine di grandezza, o addirittura superiore, di quella fisica. Tuttavia, in questo caso l'obiettivo è quello di verificare le conseguenze dovute all'uso dello schema *Upwind* assieme ad un criterio di convergenza inadeguato ed un griglia

Figura 45: Dettagli della condizione *wall*.

eccessivamente rada. Vedremo nel seguito come variano i risultati adottando uno schema advettivo di ordine elevato, un criterio di convergenza più restrittivo ed una griglia più fine.

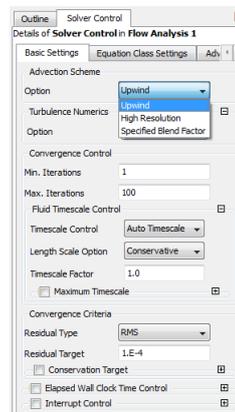


Figura 46: Impostazione dello schema advettivo.

Cliccare quindi su *OK* e chiudere CFX-Pre.

3.4 Soluzione del problema

Nella finestra principale posizionarsi con il mouse, nello schema del progetto in WB, sulla cella *Solution* cliccando con il tasto destro e selezionare *Edit*, come in figura 47.

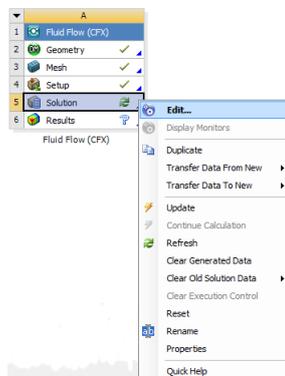


Figura 47: Avvio di ANSYS Solver Manager.

Apparirà quindi una finestra, di nome *Define Run*, come in figura 48.

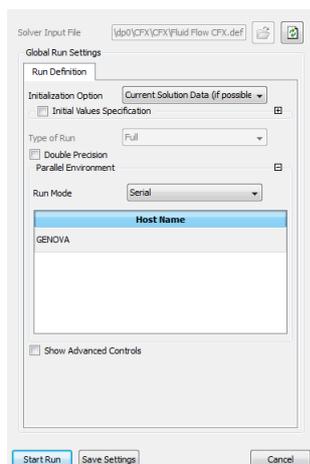


Figura 48: Finestra di definizione del *Run*.

Lasciare tutti i parametri invariati e cliccare *Start Run*. A questo punto si aprirà la finestra del *Solver Manager*, caratterizzata dall'andamento grafico dei residui al variare del numero di iterazioni a sinistra, e da una finestra testuale a destra che riporta i dati salienti ad ogni iterazione/time-step. Alla fine del calcolo - in questo caso molto breve, trattandosi di una griglia rada con un criterio di convergenza poco restrittivo - apparirà un avviso di conclusione normale del calcolo, con indicazione del nome e localizzazione del file dei risultati (estensione *.res*), come illustrato in figura 49.

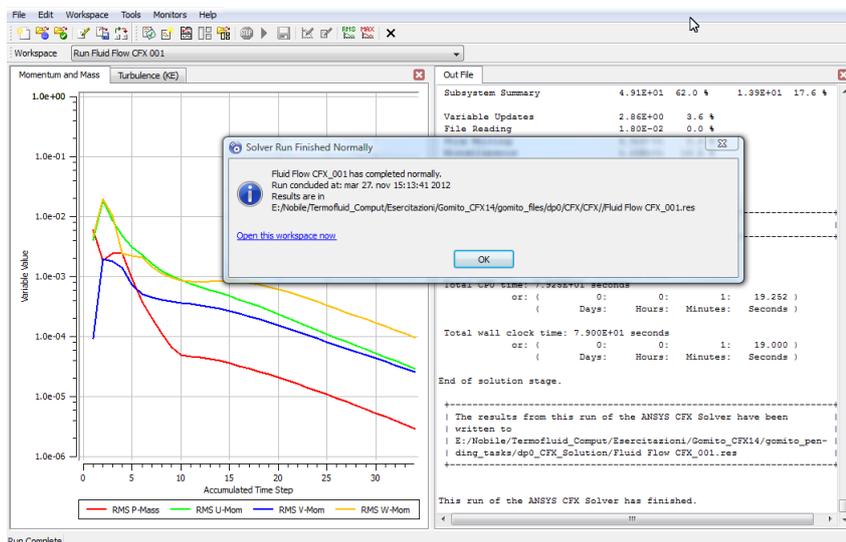


Figura 49: Conclusione del calcolo.

Cliccare *OK* sulla finestra *Solver Run Finished Normally*, e poi chiudere la finestra del *Solver Manager*.

3.5 Visualizzazione ed elaborazione dei risultati

Nella finestra principale posizionarsi con il mouse, nello schema del progetto in WB, sulla cella *Results* cliccando con il tasto destro e selezionare *Edit*, come in figura 50.

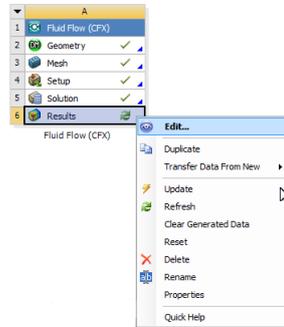


Figura 50: Avvio di ANSYS CFD-Post.

All'apertura di CFD-Post sarà visibile solo il *wireframe* del tubo, che consiste nelle due sezioni di ingresso e uscita. Per evidenziare la geometria sarà sufficiente spuntare la casella, nell'*Outline*, a fianco alla voce *Parete*, come evidenziato in figura 51.

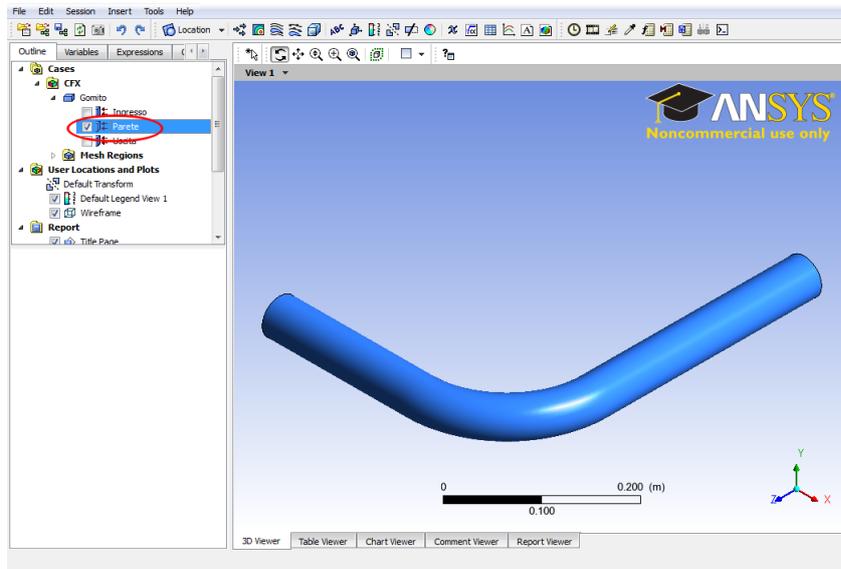


Figura 51: Visualizzazione della geometria del gomito in CFD-Post.

Proviamo ad evidenziare la presenza di moti secondari per mezzo di linee di corrente (Streamlines). Cliccare, in alto sulla Toolbar, sul simbolo *Streamline* (🌀), e nominarlo *Streamlines*. All'opzione *Start from*, come indicato in figura 52, indicare *Ingresso*.

Una volta cliccato su *Apply*, e ricordandosi di rimuovere (spunta) la visualizzazione del gomito, otterremo delle linee di corrente come in figura 53

Con tale vista è difficile riconoscere la presenza o meno dei moti secondari. Per ovviare a ciò, cliccare con il tasto destro del mouse all'interno della finestra grafica (graphic window), e selezionare *Predefined Camera* → *View From -Z*, come riportato in figura 54.

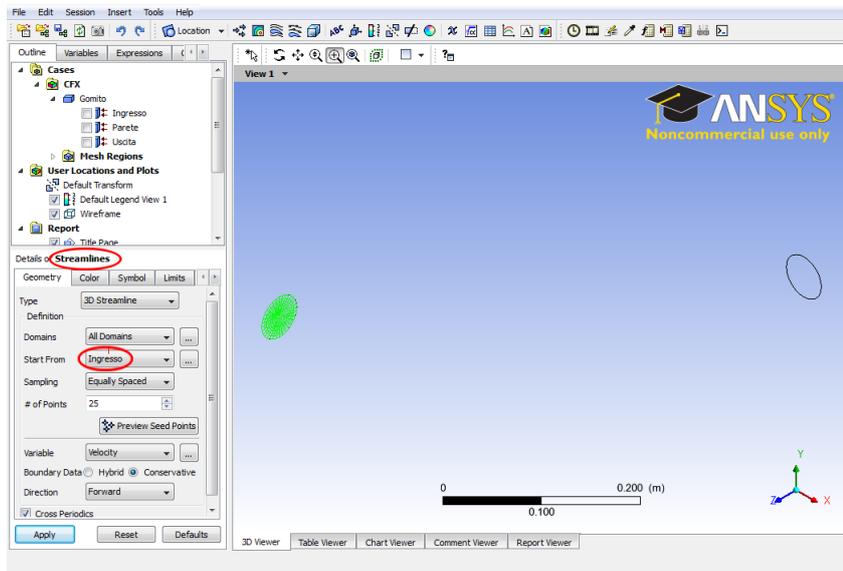


Figura 52: Selezione dell'origine delle Streamlines in CFD-Post.

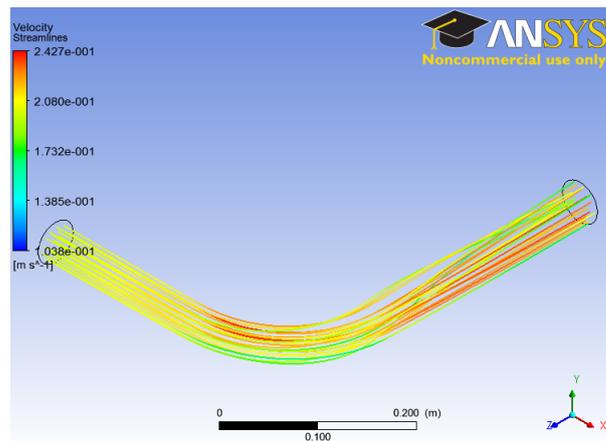


Figura 53: Visualizzazione delle Streamlines in CFD-Post.

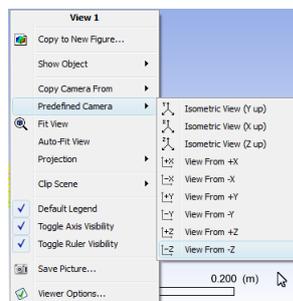


Figura 54: Modifica del punto di vista delle Streamlines in CFD-Post.

Otterremo una vista normale alla sezione a valle del gomito che, ricorrendo anche allo spostamento (Pan) (\oplus) ed allo Zoom (Zoom Box) (\otimes), consentirà una visualizzazione come in figura 55.

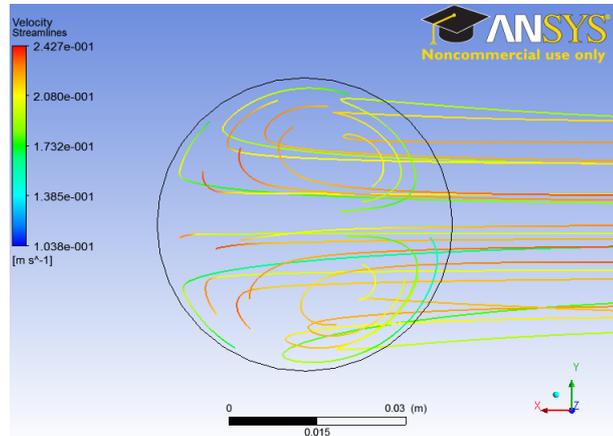


Figura 55: Visualizzazione dei moti secondari tramite le Streamlines in CFD-Post.

Come si può notare, le linee di corrente indicano la presenza di moti secondari, sebbene di intensità inferiore a quanto rilevato sperimentalmente.

È possibile visualizzare i moti secondari anche attraverso la visualizzazione dei vettori di velocità. Per far ciò, definiamo prima un piano immediatamente a valle della curva: come indicato in figura 56, cliccare su *Location* → *Plane*.



Figura 56: Creazione di un piano.

Nominiamo questo piano *Piano valle*, e nella sezione *Details* a sinistra, selezionare come *Method XY Plane*, e impostare *Z* a -125 [mm] (porre attenzione all'unità di misura), come indicato in figura 57. Abbiamo quindi creato un piano in corrispondenza dell'uscita del gomito, su cui rappresentare il campo vettoriale dei moti secondari e, come si vedrà in seguito, un *contour plot* del modulo della velocità, da confrontare con i rilievi sperimentali riportati in figura 2.

Disattivare, per maggior chiarezza, la visualizzazione del piano appena definito e delle linee di corrente spuntandoli dall'albero a sinistra, e procedere alla visualizzazione dei vettori di velocità sul *Piano valle*, cliccando sul simbolo *Vector* (\Rightarrow). Nominare questo come *Vettori valle*, e nella finestra *Details* a sinistra, impostare *Piano valle* come *locations*, e *Tangential*

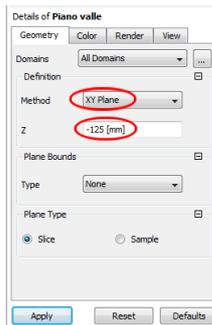


Figura 57: Impostazione dei dati del *Piano valle*.

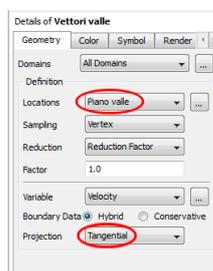


Figura 58: Impostazione dei dati di *Vettori valle*.

come *Projection*, come evidenziato in figura 58. La proiezione tangenziale dei vettori di velocità, consente una migliore visualizzazione dei moti secondari.

Una volta cliccato su *Apply*, il risultato sarà analogo a quello di figura 59.

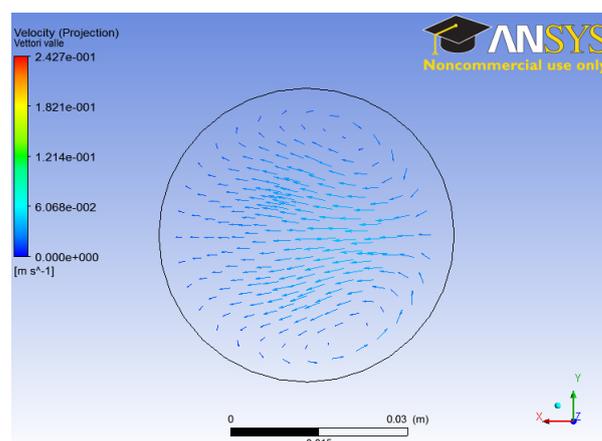


Figura 59: Visualizzazione dei moti secondari tramite i vettori di velocità sul *Piano valle*.

I vettori di velocità indicano la presenza di moti secondari, ma nuovamente non è agevole confrontare tale risultato con i rilievi sperimentali visti in figura 2. È preferibile visualizzare le curve isolivello - *contours* - della velocità sul *Piano valle*, in analogia ai rilievi sperimentali di figura 2. Per far ciò, dopo aver disattivato la visualizzazione dei vettori velocità sul *Piano valle*, cliccare sul simbolo *Contour* (📐), e nominarlo *Contour valle*. Nella finestra *Details* a

sinistra, impostare *Piano valle* come *locations*, *Velocity* come *Variable*, e lasciare tutto il resto ai valori di default, come illustrato in figura 60.

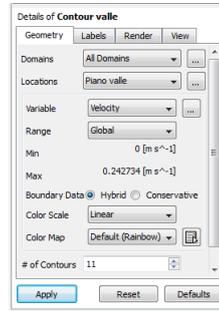


Figura 60: Settaggio dei dati per *Contour valle*.

Cliccando come al solito su *Apply*, il risultato sarà analogo a quello di figura 61 dove, per convenienza, è stato riportato nuovamente anche l'andamento sperimentale della velocità, al fine di agevolare il confronto (notare che le due figure sono ruotate, una rispetto all'altra, di 90°).

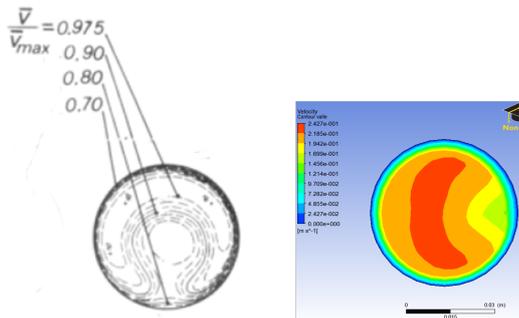


Figura 61: Visualizzazione delle curve di isovelocità sul *Piano valle*, a sinistra sperimentali, a destra numeriche.

Il campo di velocità ottenuto numericamente presenta una certa rassomiglianza con quello sperimentale ma, come già osservato precedentemente, vi sono senz'altro delle differenze.

Un'analisi più quantitativa - e che potrebbe costituire una delle ragioni del calcolo - riguarda la valutazione delle perdite di carico. Si tratta, in questo caso, di una perdita di carico localizzata, che solitamente viene espressa mediante una relazione del tipo:

$$\Delta p = K \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1)$$

dove il coefficiente empirico K varia in funzione di:

- rapporto r_c/D , con r_c raggio di curvatura dell'asse della curva (v. figura 2);
- tipo di superficie, liscia o scabra;
- numero di Reynolds.

Per la valutazione della perdita di carico possiamo calcolare la pressione sui due piani immediatamente a monte ($X = 0$ mm) ed a valle ($Z = -125$ mm) della curva. Avendo già definito in precedenza il *Piano valle*, definiamo, con analoga procedura, un piano a $X = 0$ mm che chiameremo *Piano monte*.

Successivamente, cliccando sull'icona *Function Calculator* (🧮), è possibile valutare il valore medio della pressione su ambedue i piani. Per far ciò, come illustrato in figura 62, selezionare la funzione *areaAve*, indicare come location *Piano monte*, come Variable *Pressure*, e quindi cliccare *Calculate*.

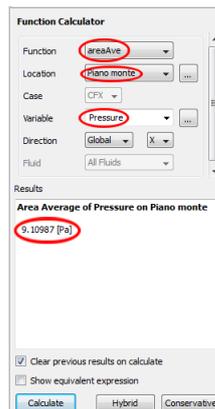


Figura 62: Valutazione del valore medio della pressione sul *Piano monte*.

Come si può notare in figura 62, il valore della pressione media sul *Piano monte* è pari a $p_{mon} = 9.11$ Pa. Procedendo analogamente sul *Piano valle*, si ottiene $p_{val} = 4.54$ Pa, ottenendo quindi un salto di pressione pari a $\Delta p = p_{mon} - p_{val} = 4.57$ Pa.

È utile notare che, come indicato nell'*help* di CFD-Post, la funzione *areaAve* valuta il valore medio di una variabile tenendo conto della non-uniformità della griglia. Viceversa, la funzione *ave* calcola una semplice media aritmetica per tutti i nodi (interpolati) che giacciono sulla location indicata, e non tiene quindi conto delle diverse dimensioni delle celle. Per tale ragione nel nostro caso va utilizzata la funzione *areaAve*, poiché più accurata.

La tabella 2 riporta il confronto fra il valore della perdita di carico ottenuta dal calcolo, e quella - ottenuta da rilievi sperimentali - riportata da alcune fonti bibliografiche.

Caduta di pressione [Pa]	
CFD	4.57
A. Ghetti (1977)	3.50
Idel'cik (1960)	2.64
ASHRAE (1986)	2.40

Tabella 2: Confronto fra il valore della perdita di carico calcolata e quella riportata in letteratura.

Come si può notare, il risultato ottenuto per via numerica è sensibilmente maggiore dei valori di letteratura. Come anticipato in precedenza, tali differenze vanno imputate all'uso

dello schema *Upwind* del prim'ordine e, in minor misura, all'uso di un criterio di convergenza inadeguato e una griglia troppo rada.

4 Miglioramento dell'accuratezza

4.1 Schema advettivo e criterio di convergenza

Un primo miglioramento sensibile può essere ottenuto agevolmente adottando lo schema advettivo *HR* (High Resolution), meno diffusivo, ed un criterio di convergenza più restrittivo, con un valore del residuo RMS pari a 1×10^{-5} , mantenendo inalterata la griglia e tutti gli altri parametri. Per far ciò, aprire nuovamente, in *Workbench*, la cella *Setup*, e modificare lo schema advettivo ed il criterio di convergenza come riportato in figura 63.

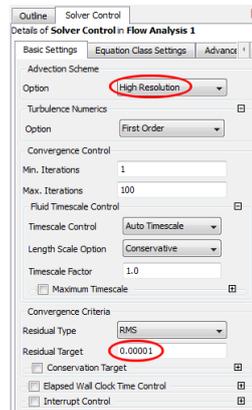


Figura 63: Impostazione dello schema advettivo HR e del criterio di convergenza.

Si osservi tuttavia che, come visibile in figura 63, è stato mantenuto lo schema UDS per le equazioni del modello di turbolenza: in tal caso, infatti, l'errore dovuto alla diffusività numerica è, in generale, di minore entità - l'effetto si manifesta solo indirettamente attraverso il valore della viscosità turbolenta - e nel contempo è garantita una maggior robustezza del calcolo.

Dopo aver salvato le modifiche, è conveniente far ripartire il calcolo utilizzando, come valori iniziali, la precedente soluzione. Ciò è eseguito di *default* in CFX: infatti, come indicato in figura 64, CFX utilizzerà, ove possibile, la *Current Solution Data*. In altri casi, come vedremo più avanti, sarà possibile esplicitare direttamente il file di soluzione (estensione *.res*, *results file*) da utilizzare come condizione iniziale.

Dopo aver fatto partire il calcolo i valori dei residui, come illustrato in figura 65, cresceranno inizialmente, per poi ridursi sino al valore imposto nel criterio di convergenza.

Procedendo poi all'analisi dei risultati, si potrà immediatamente notare che il contour delle velocità, qua non riportato per brevità, è più prossimo alle curve rilevate sperimentalmente, e che la perdita di carico risulta in questo caso pari a $\Delta p = 3.35$ Pa, valore sensibilmente più vicino ai dati sperimentali riportati in tabella 2.

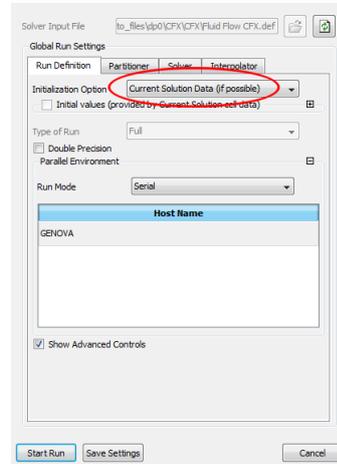


Figura 64: Utilizzo di default della soluzione corrente nel restart.

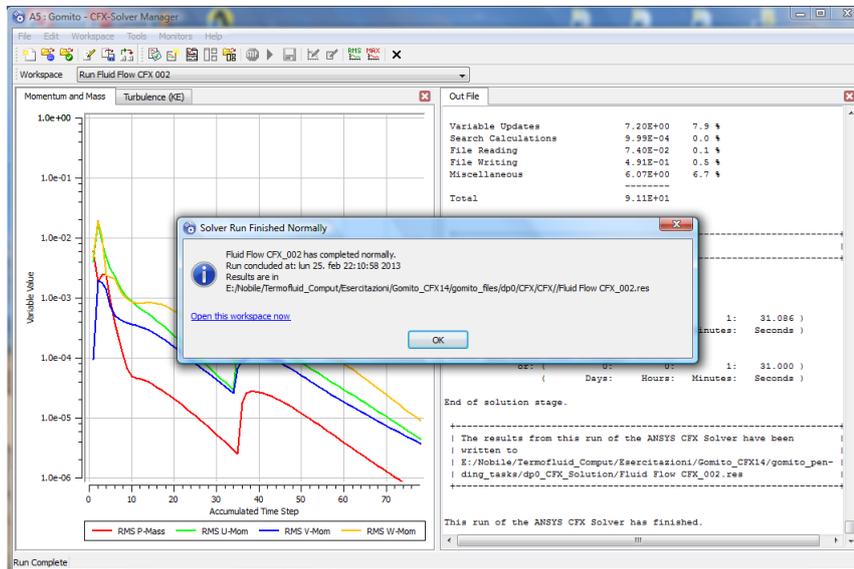


Figura 65: Conclusione del calcolo con schema advettivo HR e criterio di convergenza più restrittivo.

4.2 Raffinamento della griglia

Procediamo ora, a scopo illustrativo, a raffinare la griglia utilizzando uno dei possibili approcci disponibili in ANSYS Meshing. A tal fine è conveniente *duplicare* il progetto all'interno di Workbench: per far ciò cliccare sul simbolo - triangolo rovesciato - in alto a sinistra del progetto (▼) e selezionare *Duplicate*, come indicato in figura 66.

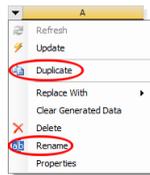


Figura 66: Duplicazione e rinominazione del progetto in Workbench.

Una volta duplicato sarà conveniente, usando la stessa modalità come illustrato in figura 66, rinominare i due progetti rispettivamente *Gomito* e *Gomito refined*. Con riferimento a quest'ultimo, clicchiamo su *Mesh* e procediamo al raffinamento della griglia.

Anziché aumentare semplicemente la risoluzione della griglia attraverso una riduzione del *Sizing*, vale a dire *Max Size* e *Max Face Size*, è preferibile operare in modo selettivo, privilegiando, ad esempio, la risoluzione in prossimità delle pareti solide, per meglio descrivere gli strati limite. A tal fine, nell'albero di sinistra, cliccare col tasto destro del mouse su *Mesh* → *Insert* → *Method*, come illustrato in figura 67.

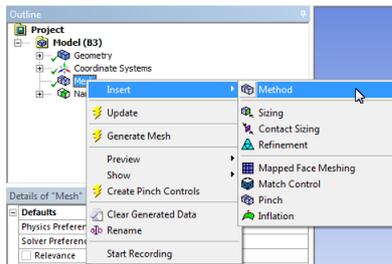


Figura 67: Inserimento di un metodo di generazione della griglia in *Mesh*.

Nel menu *Details* di sinistra, come riportato in figura 68, selezionare l'intero gomito (*Body*) come *Geometry*, *Sweep* come *Method*, e alla voce *Src/Trg Selection* scegliere *Manual Source and Target*. Selezionare poi come *Source* and *Target*, rispettivamente, la sezione di entrata e la sezione di uscita del gomito. Indicare infine 150 come *Sweep Num Divs*.

Una volta eseguiti questi passi, è possibile visualizzare la mesh risultante cliccando su *Generate Mesh*. Poiché la mesh ottenuta in questa fase intermedia non verrà utilizzata, non è necessario cliccare su *Update* che, lo ricordiamo, provvede anche ad aggiornare l'output dalla cella in esame - in questo caso *Mesh* - e le celle collegate, *Setup* in tale problema. Si potrà tuttavia notare che la mesh ottenuta ha una risoluzione solo di poco superiore alla precedente - il numero di nodi è passato da 34322 a 40770 - ma è ancora inadeguata per ciò che riguarda la risoluzione in prossimità delle pareti.

Il passo successivo, quindi, è quello di aumentare/migliorare la risoluzione a parete, e per far ciò andremo a creare uno strato di celle estruse, di altezza opportuna, a parete. Come fatto

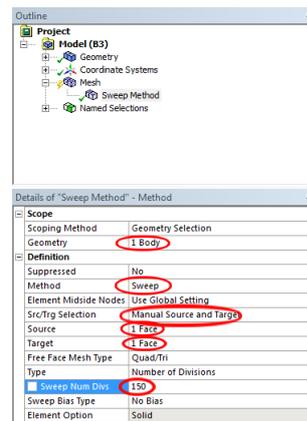


Figura 68: Scelta dettagli del metodo di generazione della griglia in *Mesh*.

in precedenza, nell'albero di sinistra cliccare col tasto destro del mouse su *Mesh* → *Insert* → *Inflation*, come illustrato in figura 69.

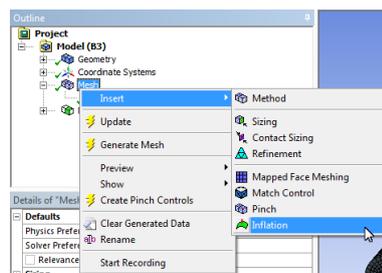


Figura 69: Inserimento di strato di celle estruse a parete in *Mesh*.

Nel menu *Details* di sinistra, come indicato in figura 70, verificare che come *Scoping Method* sia riportato *Geometry Selection*, e come *Geometry* selezionare la faccia corrispondente alla sezione di entrata. Analogamente verificare che come *Boundary Scoping Method* sia riportato *Geometry Selection*, e indicare come *Boundary* il bordo della faccia appena scelta. Infine, come *Inflation Option*, selezionare *First Layer Thickness*, inserendo, ad esempio, 0.4 mm come *First Layer Height*, il valore 8 come *Maximum Layers* e 1.2 come *Growth Rate*. Completati questi passi, visualizzare la mesh cliccando su *Generate Mesh*.

Dalla disamina della griglia così ottenuta, si può notare che, sebbene la risoluzione a parete sembri adeguata, la discretizzazione lungo la circonferenza è certamente grossolana, come visibile in figura 71.

Per ovviare a ciò, una possibile soluzione è quella di ridurre, in *Sizing*, la dimensione massima della faccia, *Max Face Size*, abbassandola da 5 mm a 2.5 mm. Operata questa modifica, la griglia risultante che si ottiene, riportata in figura 72, è caratterizzata da risoluzione adeguata sia in direzione circonferenziale che in direzione normale alla parete.

Un analogo risultato si sarebbe ottenuto lasciando inalterato il valore di *Max Face Size*, e settando a 5° il valore di *Curvature Normal Angle*.

Dopo aver eseguito l'*update* della Mesh e, in *Workbench*, l'*update* della cella *Setup*, aprire la cella *Solution* per procedere al setup della simulazione. In tal caso, non avendo eseguito

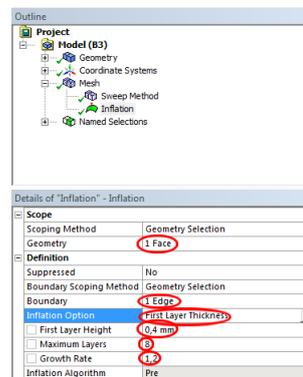


Figura 70: Scelta dettagli per lo strato di celle estruse a parete in *Mesh*.

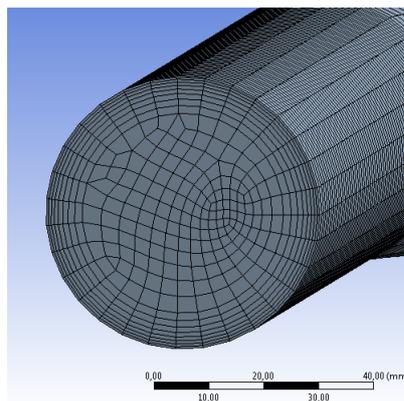


Figura 71: Mesh con inadeguata risoluzione lungo la circonferenza.

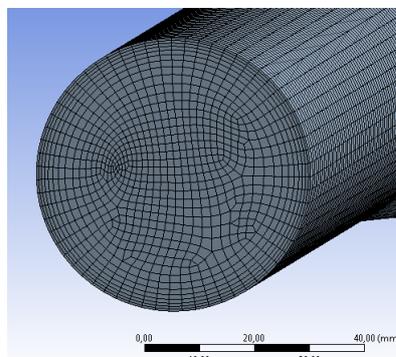


Figura 72: Mesh con idonea risoluzione lungo la circonferenza.

precedenti analisi - le simulazioni precedenti erano relative al progetto *Gomito* mentre ora stiamo operando sul progetto *Gomito refined* - è opportuno utilizzare, come condizioni iniziali, gli ultimi risultati ottenuti sulla griglia rada, che verranno opportunamente interpolati sui nodi della griglia attuale. Per far ciò, una volta aperta la finestra *Define Run* di CFX-Solver Manager, settare *Initial Conditions* come *Inizialization Option*, abilitare *Initial Values Specification* ed indicare il nome del file dei risultati ottenuto sulla griglia più rada, tipicamente `...\dp0\CFX\CFX\Fluid Flow CFX_002.res`, come indicato in figura 73.

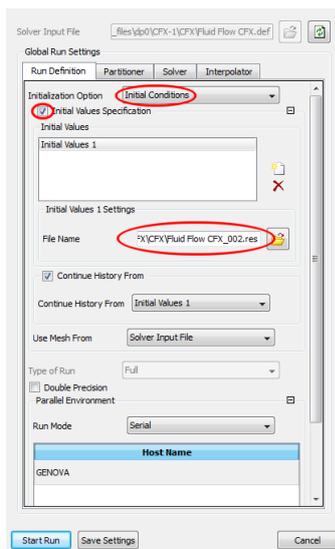


Figura 73: Utilizzo della soluzione ottenuta sulla griglia rada come condizione iniziale.

Una volta concluso il calcolo, che in questo caso richiederà un tempo maggiore visto il numero di nodi sensibilmente superiore, si potrà verificare che la perdita di carico risulta pari a 3.19 Pa, dato ancora più vicino ai valori sperimentali riportati in tabella 2.

5 Considerazioni conclusive ed ulteriori attività

Come si è potuto verificare, l'accuratezza dei risultati numerici dipende molto dagli schemi numerici della simulazione - schema convettivo e criterio di convergenza - e dalla qualità e risoluzione della griglia di calcolo. Vi è inoltre la questione, non affrontata in questo semplice esercizio, dell'errore di modellazione.

Fra le possibili attività lasciate allo studente interessato, si segnala:

- Utilizzo di una sola metà del dominio di calcolo fin qui considerato, sfruttando il piano di simmetria passante per l'asse del gomito.
- Utilizzo di altri modelli di turbolenza, quali l'*SST* (Shear Stress Transport), o *RSM*.
- Imposizione di un profilo di velocità turbolento completamente sviluppato all'ingresso, per ridurre gli errori dovuti al mancato sviluppo dinamico e/o ridurre la lunghezza della tubazione di entrata.