



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA

**ANALISI NUMERICA DEL DEFLUSSO DI
ARIA IN MEZZI POROSI**

Relatore: Prof.ssa Luisa Rossetto

Correlatore: Ing. Simone Mancin

Laureando: Giacomo Cattelan

Matricola n° 1036400

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Indice

Sommario	5
1. Generalità sulle schiume	7
2. Modelli geometrici in letteratura	11
3. Sviluppo del modello numerico	17
4. Modelli geometrici sviluppati	21
5. Taratura modello	33
6. Analisi dei risultati	47
6.1. Schiume di rame	48
6.1.1. Cu 5-6.5	48
6.1.2. Cu 10-6.6.....	54
6.1.3. Cu 20-6.5.....	56
6.1.4. Cu 40-6.4.....	59
6.1.5. Confronti.....	62
6.2. Schiume di alluminio	65
6.2.1. Al 10-4.4.....	66
6.2.2. Al 10-6.6.....	69
6.2.3. Al 10-9.7.....	71
6.2.4. Confronti.....	74
6.3. Altre geometrie con flusso a velocità costante	78
6.3.1. "Celle t_{ρ} "	79
6.3.2. "Celle t_{GA} "	81
6.3.3. "Celle t_{real} "	83
7. Discussione generale dei risultati	87
8. Conclusioni	93
Bibliografia	95
Indice delle figure	97
Ringraziamenti	99

Sommario

Con questo lavoro si vuole svolgere uno studio sul deflusso monofase di aria all'interno di diverse schiume metalliche in rame o alluminio. Esse presentano una struttura formata da celle aperte disposte ed orientate casualmente, di forma e dimensione per lo più omogenea [1].

Le schiume disponibili in commercio sono a base di alluminio, rame, nickel, leghe metalliche e, ultimamente, sta crescendo l'interesse circa l'utilizzo di materiali porosi stocastici come le schiume di grafite di carbonio, in quanto dotate di caratteristiche termiche superiori ai comuni metalli, perciò potenzialmente sfruttabili con ottimi risultati nel campo del controllo termico [2].

I materiali porosi permettono l'attraversamento, da parte dei fluidi, del loro volume, consentendo un elevato scambio termico tra il fluido ed il solido. Questi vantaggi termici sono dovuti all'elevato rapporto superficie/volume posseduto dal reticolo della schiuma e alla turbolenza indotta dalla struttura stessa sul fluido [3].

Tuttavia il passaggio all'interno di un materiale poroso provoca ingenti perdite di carico al fluido, le quali debbono essere compensate, portando a dei costi energetici talvolta onerosi. È importante perciò quantificare queste cadute di pressione dovute ad ostruzioni e attrito.

Per acquisire dati numerici sugli scambi di calore e sulle perdite di carico in pressione dei fluidi durante l'attraversamento di queste strutture, sarebbe necessario svolgere esperimenti e test atti alla misurazione dei parametri di interesse (come pressione a monte e a valle o la differenza di temperatura del fluido tra l'ingresso e l'uscita del reticolo). Spesso svolgere tali attività risulta problematico, in quanto la fase sperimentale, con le varie strumentazioni e supporti necessari, comporta costi spesso consistenti che non tutti gli enti possono sostenere.

Proprio per il suddetto motivo, con il presente lavoro di tesi si vuole effettuare uno studio riguardante le strutture porose stocastiche. Lo scopo di tale studio è quello di sviluppare un modello numerico-geometrico che riesca a rappresentare al meglio le schiume, per quanto riguarda le perdite di carico lungo il deflusso, cosicché in futuro si possa ricorrere al modello piuttosto che dover sempre ricorrere alle prove sperimentali.

Per quanto riguarda i materiali porosi studiati, sono state valutate ed utilizzate inizialmente schiume di rame con un numero di pori per pollice (PPI) variabile tra 5 e 40 e una porosità dello 0.935 circa costante [4]; successivamente si è passati allo studio di schiume di alluminio dotate tutte di 10 PPI, ma porosità variabile da 0.903 a 0.956 [5].

Nel primo capitolo, *Generalità sulle schiume*, si espone un rapido riassunto delle strutture e caratteristiche delle schiume; nel secondo capitolo, invece, sono mostrati i modelli geometrici utilizzati in letteratura per effettuare simulazioni sulle schiume. In *Sviluppo del modello numerico*, sono delineati i passi di sviluppo del presente lavoro di tesi, con delucidazioni sul modello numerico, utilizzato nei programmi di simulazione sfruttati. Nel capitolo quarto sono esposti i modelli geometrici creati e le tecniche adoperate per costruirli. Nel capitolo *Taratura modello* si iniziano a presentare le prime simulazioni numeriche, condotte per analizzare parametricamente il comportamento del modello, al fine di determinare i parametri ottimali per ottenere dei risultati affidabili.

Nel capitolo sesto, *Analisi dei risultati*, vengono esposti tutti i risultati conseguiti per le diverse tipologie di schiume e geometrie. L'intero capitolo è suddiviso in svariati sottocapitoli utili alla analisi razionale del lavoro.

Infine negli ultimi due capitoli (*Discussione generale dei risultati e Conclusioni*) sono riportate tutte le implicazioni del lavoro svolto, con conclusioni definitive e giudizi finali sui modelli utilizzati.

1. Generalità sulle schiume

Le schiume metalliche sono una classe di materiali chiamata solidi cellulari, per la loro conformazione a piccoli spazi. Questi piccoli spazi sono associati casualmente nella formazione di un assemblato suddiviso in celle, a loro volta formate di bordi o facce solide a seconda della tipologia. Alcuni materiali porosi formati da celle esistono già in natura, quali le spugne o il sughero per esempio, altre sono fatte dall'uomo, come le meringhe tramite procedimento meccanico o il pane tramite un processo biologico naturale.

Il materiale cellulare mostra due tipologie predominanti nella microstruttura: vi è quella periodica, con una geometria che si ripete circa uguale nello spazio (strutture a nido d'ape o *honeycomb*) e quella stocastica individuabile nelle schiume in esame. La prima può essere semplicemente una conformazione basata su un insieme di figure poligonali, collegate a formare pannelli di struttura bidimensionale, poi impacchettati (come appunto accade nelle strutture esagonali costruite della api); un esempio di pannello *honeycomb* può essere visto in *Figura 1*.

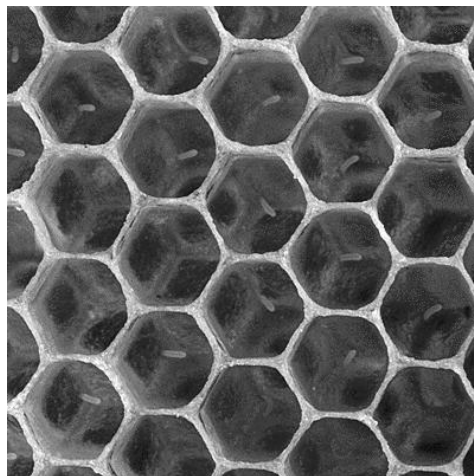


Figura 1. Esempio di struttura a nido d'ape.

La struttura, invece, più comune risulta la seconda, cioè quella aleatoria tridimensionale della schiuma, formata da poliedri collegati tra loro.

Un'ulteriore distinzione può essere effettuata all'interno di quest'ultimo gruppo, infatti le schiume si dividono in due categorie: se la parte solida della schiuma è formata

da celle contenenti solo i bordi, quindi non in presenza di ostruzioni nelle varie facce e con le sole fibre a fare da collegamento tra le celle, si ha a che fare con una schiuma a celle aperte (*open-cells foam*, *Figura 2, a*). In caso contrario, essendo presenti collegamenti basati su strati solidi sulle facce, la schiuma si dice a cella chiusa (*closed-cells foam*, *Figura 2, b*). Questa è appunto una sostanziale differenza tra le strutture stocastiche tridimensionali e le bidimensionali, le quali non hanno mai le facce chiuse. È comune il caso in cui le celle di una schiuma sono in parte aperte e in parte chiuse. Di seguito si può vedere una fotografia di entrambe le strutture:

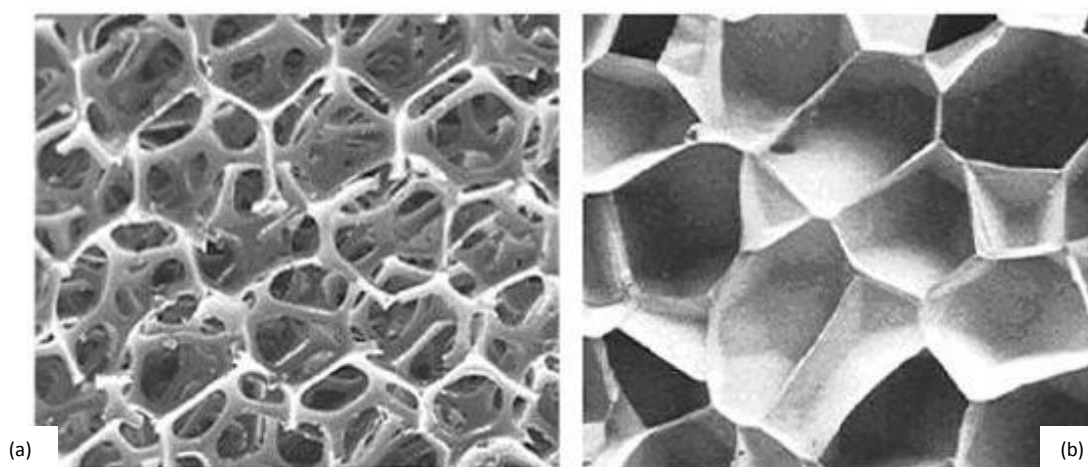


Figura 2. Esempio di struttura a cella aperta (a) e a cella chiusa (b).

Molti sono i materiali che possono essere resi in schiume, tra cui anche i metalli. Questi sono lavorati in differenti modalità al fine di ottenere un risultato soddisfacente: possono essere polverizzati, compattati e successivamente riscaldati fino a temperatura di fusione, per essere schiumati tramite particolari tecniche. Tramite agitazione e successivo raffreddamento di una mistura liquida contenente in buona parte alluminio, invece, è possibile creare una schiuma di tale metallo. Ancora si possono utilizzare tecniche come la deposizione elettrolitica, la deposizione elettrochimica o la *chemical vapour deposition* per rivestire una schiuma polimerica o adoperare un'infiltrazione di metallo liquido in una massa granulare, poi rimossa a seguito di raffreddamento, lasciando solo il reticolo desiderato.

Infine le schiume metalliche possono essere formate anche tramite una trasformazione eutettica: il metallo, fuso in un'atmosfera di idrogeno, viene poi raffreddato fino a

solidificazione al punto eutettico, portando il materiale ad essere composto da una fase gassosa al suo interno.

Il procedimento in fase solida invece usa le polveri metalliche e la tecnica della sinterizzazione: la polvere metallica viene mischiata con una agente che crea spazi all'interno della polvere, il quale si decompone o evapora durante il processo di formatura.

Queste schiume danno notevoli possibili applicazioni grazie alle loro caratteristiche: sono strutture leggere a bassa densità, sono dotate di elevata rigidezza e resistenza e buone caratteristiche di scambio termico. Con esse si possono creare strutture leggere, ma al tempo stesso molto rigide (come pannelli *sandwich*), dotate inoltre di ottimi coefficienti di scambio termico, grazie all'elevata superficie di scambio [1].

Sono materiali sfruttabili in svariati campi, come negli scambiatori di calore e in altri ambiti termici, ma trovano buon riscontro anche in campo aerospaziale, dove ogni elemento o struttura deve possedere buone proprietà ingegneristiche, ma soprattutto deve avere massa ridotta.

2. Modelli geometrici in letteratura

Molti sono stati gli studi svolti al fine di capire le funzioni e la conformazione delle schiume. Famosi scienziati si sono approcciati all'osservazione di queste strutture cercandone forma, proprietà e modalità di accoppiamento tra le varie celle. Le caratteristiche che interessano questo lavoro più da vicino sono la forma e il modello della singola cella studiata.

Uno dei parametri più importanti dello studio risulta la densità relativa ($\rho_r = \frac{\rho^*}{\rho_s}$), cioè il rapporto tra la densità della totale struttura porosa (ρ^*) rispetto a quella del solido di cui è composta la schiuma (ρ_s). Da questo dato si può ottenere la porosità (ε) dalle schiuma tramite la seguente formula:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad \text{Eq. 1}$$

Con porosità si intende lo spazio vuoto, non riempito da materiale solido, all'interno della schiuma; maggiore è la porosità, minore è la densità relativa.

La dimensione della cella risulta rilevante per quanto riguarda gli scambi di calore e le perdite di carico, ma lo è ancora di più in tutto questo lavoro la forma della cella: le caratteristiche termiche e meccaniche della schiuma sono estremamente influenzate dalla struttura della singola cella. Anche la loro disposizione conta nello specifico delle qualità della schiuma: celle tutte allineate in un reticolo regolare e periodico producono caratteristiche isotrope; quando invece le celle hanno bordi allungati o appiattiti le caratteristiche saranno dipendenti dalla direzione di studio.

Un'ulteriore parametro che differenzia le schiume, ma soprattutto le singole celle, è quello delle interconnessioni tra le fibre: data la grande quantità di celle impacchettate a formare la struttura, esse devono collegarsi in giunzioni o nodi a cui prendono parte solitamente quattro bordi, con una discreta variabilità, difatti capita di trovare anche un numero elevato di fibre connesse in un nodo singolo. Questo aspetto, legato solamente alle schiume a celle aperte, provoca deformazioni poco riproducibili nei modelli numerici.

Fin ora svariati famosi studiosi hanno proposto teorie e modelli al fine di riprodurre gli agglomerati porosi. Essendo la schiuma una struttura stocastica non esiste un modello universale che approssima ogni particolare conformazione. Ogni modello proposto, quindi, non può essere considerato giusto o sbagliato, semmai può essere valutato adatto o meno all'utilizzo nel problema considerato.

Una teoria fu proposta dal fisico Plateau nel 1873, il quale, in un suo trattato di geometria solida, presentò un modello di cella basata sulla forma di dodecaedro rombico (visibile in *Figura 3*), con la quale è possibile creare uno spazio a partire dall'impacchettamento di una serie di esse. Tuttavia si è compreso che questo non è il modo più efficiente per creare pannelli di strutture porose.

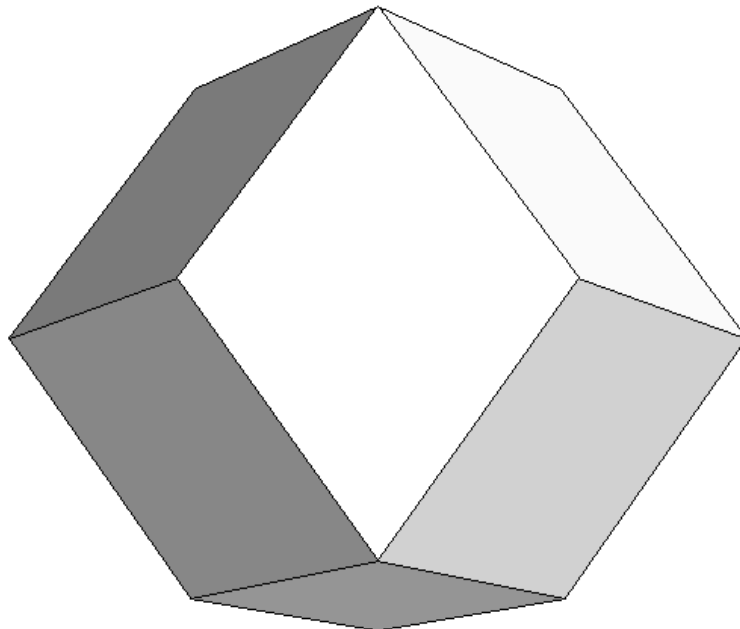


Figura 3. Dodecaedro Rombico.

Successivamente fu proposto da Kelvin nel 1887 il tetracaidecaedro, una figura geometrica formata da otto facce esagonali regolari e sei quadrate con lo stesso lato, visibile in *Figura 4*. In *Figura 5* sono inoltre visibili alcune foto di schiume prese in considerazione, nelle quali si può facilmente notare la struttura tetracaidecaedrica composta dalle superfici appena citate.

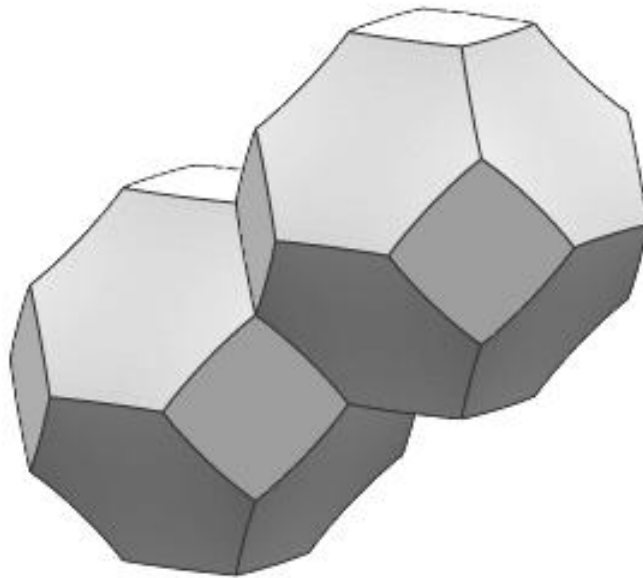


Figura 4. Tetracaidecaedro di Kelvin.

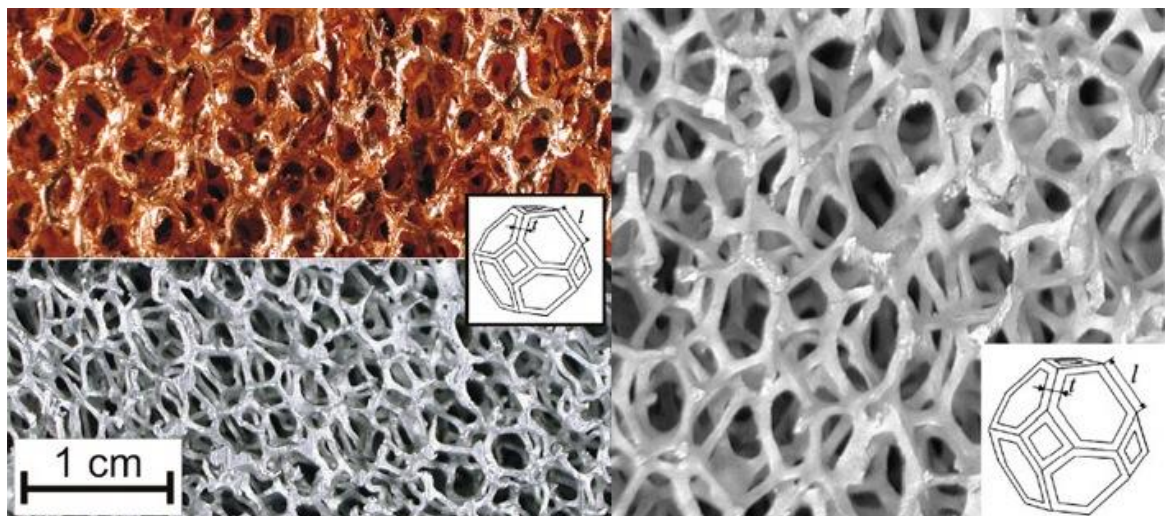


Figura 5. Foto di schiume trattate: quella in alto a sinistra in rame [4], le rimanenti due in alluminio [5].

Questo modello fu ritenuto il migliore per più di un secolo, in quanto era la figura che minimizzava la superficie dell'elemento a parità di volume dei solidi.

Solo recentemente, grazie alle potenze di calcolo fornite dai PC reperibili nel mercato, è stata trovata una figura che possedeva un rapporto superficie-volume ancora minore. La scoperta, pubblicata nel 1994, si deve a Weaire e Phelan, i quali identificarono la

struttura che risolveva al meglio il problema di Kelvin¹ nel volume unitario composto come presentato in *Figura 6*: otto celle complessive, di cui sei dotate in tutto di quattordici facce (dodici pentagonali e due esagonali) e due dodecaedri pentagonali, tutti dello stesso volume. Di tutte queste facce solo le esagonali sono piane, le pentagonali invece risultano leggermente incurvate.

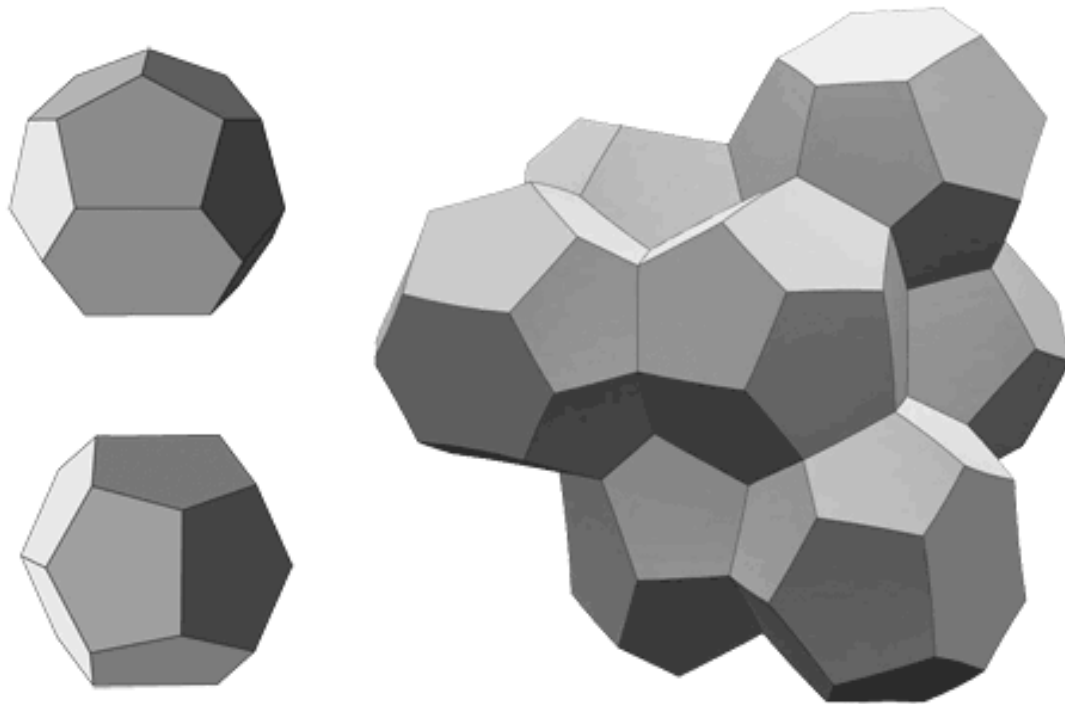


Figura 6. La cella unitaria di Weaire e Phelan con i due volumi base.

Altro modello utilizzato in letteratura per simulare una schiuma consiste in un cubo a cui viene sottratta una sfera, di centro coincidente con quello del cubo, ma di diametro maggiore del suo lato, in modo da bucarne le facce come in *Figura 7* [2].

¹ Il problema proposto da Kelvin nel XIX secolo chiedeva come potesse essere partizionato lo spazio in celle di ugual volume, ma dotate allo stesso tempo della minor quantità di area nelle superfici che le compongono; cioè quale fosse la cella di schiuma più efficiente. Come già detto, per più di un secolo si pensò che la cella da lui proposta fosse la soluzione, fino all'avvento di tale teoria.



Figura 7. Cella formata da un cubo svuotato di una sfera.

Tutti questi complessi di elementi sono ovviamente una idealizzazione del reticolo di una schiuma, infatti essi sono modelli geometrici più o meno regolari che si assemblano in modo ordinato. Una vera schiuma, d'altra parte, possiede una conformazione casuale come specificato precedentemente, perciò potrebbero esserci svariate geometrie nella composizione della medesima schiuma, con dimensioni, forme, numero di bordi o facce differenti tra loro.

Ipotizzando che le celle di una schiuma siano idealizzabili ad una dei poliedri esposti, è possibile studiarne porosità e densità relativa, partendo dalle caratteristiche della forma. In particolare per il tetracaidecaedro, Gibson e Ashby [6] sostenevano che tale solido fosse il più adatto nella creazione di un modello adeguato, in quanto presentava nel modo più fedele le proprietà geometriche delle schiume osservate. Nel loro lavoro i due studiosi ricavarono la seguente relazione matematica:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = 1.06 \left(\frac{t}{l} \right)^2 \quad \text{Eq. 2}$$

Questa legge lega i parametri di costruzione di una cella a forma tetracaidecaedrica (dotata di lunghezza l della fibra e spessore t delle giunzioni) alla sua densità relativa. Come lunghezza della fibra si intende la lunghezza di uno dei lati degli esagoni regolari, come si può vedere in *Figura 8*.

Il volume del tetracaidecaedro solido, invece, è calcolabile dalla seguente formula:

$$V_T = 8\sqrt{2} l^3$$

Eq. 3

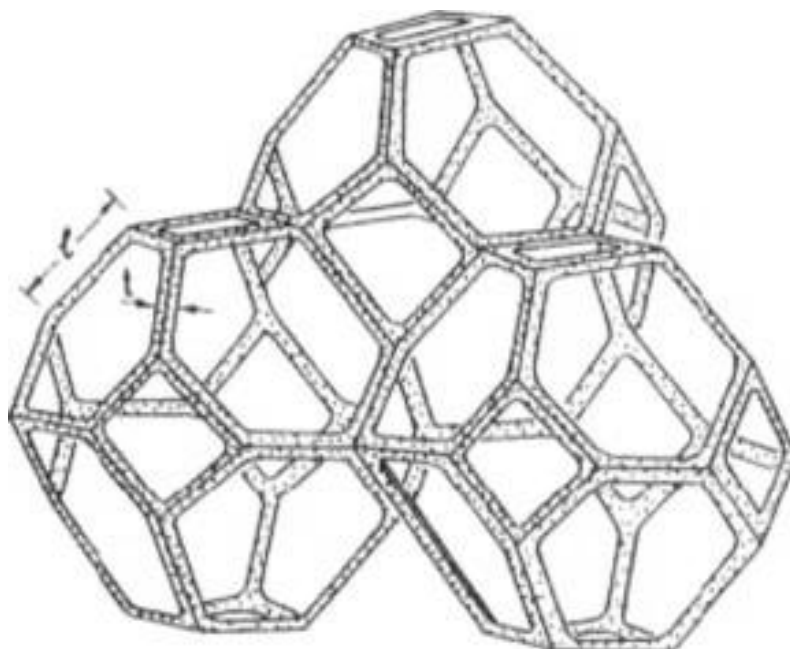


Figura 8. Struttura di celle tetracaidecaedriche secondo la teoria di Gibson e Ashby.

3. Sviluppo del modello numerico

Per svolgere il compito prestabilito ed ottenere quindi risultati numerici al computer, in modo da confrontarli con una serie di dati forniti da esperienze precedenti in laboratorio, è stato necessario ricorrere all'utilizzo di alcuni software adatti ai compiti.

Nel primo passo del lavoro, cioè la costruzione del modello geometrico di studio, si è sfruttato il programma di CAD 3D *SolidWorks* [7], con il quale si è potuto creare geometrie e poi esportarle in un formato speciale (IGES) per l'utilizzo delle fasi successive.

Il secondo passo si svolge interamente all'interno della piattaforma *Workbench* di ANSYS [8]: dopo aver aperto una sessione di lavoro, si importa la geometria e la si pone quale parte fluida. Dopodiché arriva una fase di cruciale importanza: la costruzione di una griglia di calcolo (o *mesh*), formata da una serie di piccole celle all'interno del volume e sulle superfici della geometria. Questa parte è di grande interesse per il fatto che la finitura e l'omogeneità della *mesh* (quanto grandi e quanto simili tra loro sono queste celle) influenza, talvolta in modo estremamente rilevante, i risultati che si ottengono dalle simulazioni effettuate. La creazione di tale reticolo è elaborata dal "meshatore" automatico interno a *Workbench*, cioè *ANSYS Meshing*, il quale crea *mesh* non strutturate².

Quindi si giunge all'utilizzo vero e proprio del software di calcolo CFD (*Computational Fluid Dynamics*): *Fluent*. Esso è un programma basato sul metodo dei volumi finiti, una tecnica utilizzata nell'integrazione numerica di equazioni differenziali alle derivate parziali; queste equazioni sono integrate nei volumi creati dalla griglia di calcolo, al cui contorno sono poste delle condizioni note. L'imprecisione di questo metodo, essendo numerico, risiede nel fatto che le celle della *mesh* hanno una dimensione finita e non infinitesima, portando ad approssimazioni. A causa di ciò è importante appunto la finitura della griglia di calcolo.

All'interno di questo software vengono impostate:

- le caratteristiche del fluido che si vuole utilizzare: in questo caso densità ρ e viscosità dinamica μ dell'aria;

² Le *mesh* non strutturate si differenziano da quelle strutturate per essere costituite spesso da elementi ibridi, cioè sia tetraedrici che esaedrici.

- la presenza o meno di turbolenza: il flusso turbolento prevede la scelta del tipo di turbolenza desiderata a seconda delle condizioni di moto del fluido (per esempio k-ε, k-ω, SST, ...), del grado di turbolenza e del raggio idraulico; altrimenti si utilizza un flusso laminare che non prevede turbolenze. La differenza tra queste due tipologie di flusso passa per il numero di Reynolds, così definito:

$$\text{Re} = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\mu} \quad \text{Eq. 4}$$

con ρ la densità del fluido, $\langle v \rangle$ la sua velocità media, μ la sua viscosità dinamica. Con il parametro d si inserirà il valore dello spessore della fibra della schiuma considerata.

Il moto laminare è tale per $\text{Re} < 2100$, quindi inserendo nell'Eq. 4 alcuni dati tipici utilizzati nelle simulazioni (quelli più "a favore" del moto turbolento) si ottiene:

$$\text{Re} = \frac{1.2 \cdot 5 \cdot 0.55 \times 10^{-3}}{1.88 \times 10^{-5}} \sim 176 < 2100$$

Dato questo risultato, nelle simulazioni si può utilizzare la condizione di moto laminare, che semplifica notevolmente la soluzione e ne velocizza l'ottenimento;

- le condizioni a contorno sulle superfici del volume fluido: nelle simulazioni qui svolte si fa uso delle condizioni di *inlet* (superficie in cui il flusso entra soltanto con una certa velocità o portata di massa), *outlet* (superficie da cui il flusso esce solamente), *symmetry* (superficie di simmetria del flusso, dalla quale viene specchiato) e *wall no slip* (superficie sulla cui estensione la velocità del fluido è nulla);

- il metodo di convergenza: il grado di precisione della risoluzione, il valore dei residui numerici di integrazione che soddisfa l'utente e il numero di iterazioni massimo entro il quale essi devono scendere al di sotto del valore imposto.

In *Figura 9* si può vedere una foto dell'andamento tipico dei residui nelle simulazioni svolte.

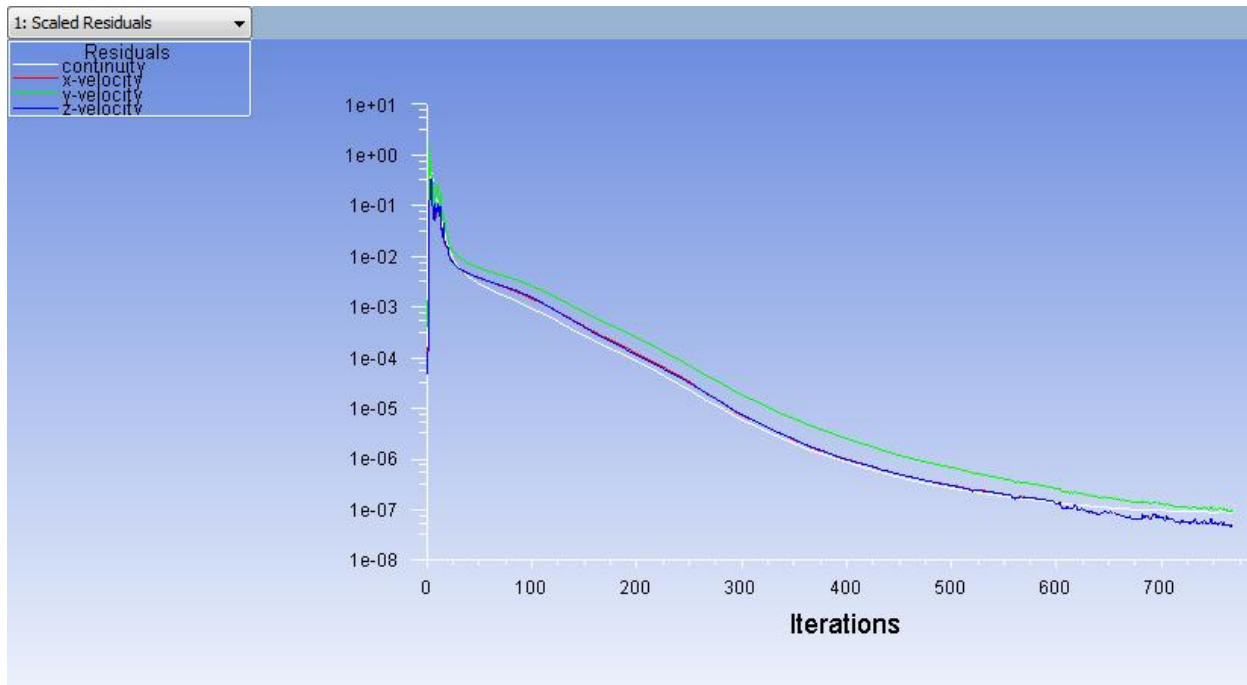


Figura 9. Andamento tipico dei residui numerici nelle simulazioni svolte.

Quindi, giunta la simulazione a convergenza, si passa all'ultima fase, cioè quella di *post-processing*. Qui si valuta la caduta di pressione Δp lungo la geometria (che sarà successivamente descritta), calcolando la pressione a monte (dato che la pressione relativa a valle è impostata nulla). Questa sarà divisa per la lunghezza del condotto di deflusso così da ottenere la perdita di carico per metro $\frac{\Delta p}{L}$, il parametro di studio e confronto utilizzato.

È necessario inoltre spiegare su cosa si basa il metodo di risoluzione del problema imposto. Il risolutore che sarà utilizzato si basa su una classe di metodi di discretizzazione numerica per la risoluzione di equazioni alle derivate parziali iperboliche, il sistema *upwind*. Esso simula numericamente la direzione di propagazione delle informazioni in un campo fluido, tramite una discretizzazione dello stesso, dando luogo ad una interpolazione che definisce i valori del flusso anche sulle facce delle celle.

Proprio il termine "*upwind*" descrive come si comporta questo metodo: i valori del potenziale del flusso sulle facce delle celle derivano dai valori delle celle a monte (*upstream*), relativamente alla direzione della velocità normale del fluido.

Questo metodo è molto robusto, quindi porta all'ottenimento di soluzioni a buona convergenza e in un numero limitato di iterazioni. D'altra parte è meno accurato di altri metodi appositi, difatti è soggetto a diffusività degli errori di discretizzazione. Proprio per questa ragione non è sempre vero che una soluzione ottenuta da una convergenza tramite questo metodo sia buona, poiché appunto meno precisa e la maggior parte delle volte si consiglia di utilizzarlo solo per il conseguimento di risultati preliminari o di scopo.

Il sistema *upwind*, inoltre, viene trattato con accuratezze del primo o del secondo ordine (ovviamente in ordine crescente di precisione), che lo caratterizzano. Se si desidera un'accuratezza del primo ordine, il potenziale sulle facce sono determinati assumendo che i valori al centro delle celle del campo fluido rappresentino il valore medio dell'intera cella. Le variabili sulle facce hanno poi il medesimo valore. Quindi quando si seleziona il metodo *upwind* del primo ordine i valori sulle facce sono impostati come quelli del centro della cella.

Quando invece si desidera un'accuratezza del secondo ordine, il potenziale sulle facce è ottenuto usando un approccio lineare multidimensionale alla interpolazione. Questa migliore accuratezza si raggiunge tramite un'espansione in serie di Taylor della soluzione al centro della cella [9]. Nei capitoli a venire sarà trattato uno studio di taratura per la tecnica più adatta con pro e contro.

4. Modelli geometrici sviluppati

In questo capitolo si tratta della costruzione delle geometrie solide e dei volumi fluidi che sono stati utilizzati negli studi e nelle fasi successive di lavoro.

La forma base sviluppata per tutte le simulazioni è quella del tetracaidecaedro. La sua costruzione necessita di una sola misura, cioè la lunghezza del lato di uno degli esagoni o dei quadrati (che è poi anche la lunghezza data della fibra stessa della cella di schiuma), a seguito della quale l'intera cella viene automaticamente costruita, in quanto figura geometrica regolare³.

La fase di costruzione parte dalla formazione di una piramide a base quadrata, di lato pari a tre volte la lunghezza del lato voluto dell'esagono, e altezza pari al valore del lato di base diviso $\sqrt{2}$. Specchiando tale piramide rispetto alla base, si ottiene un ottaedro regolare di lato quello della base del solido di partenza. Per ottenere la cella di Kelvin è quindi necessario troncare i vertici dell'ottaedro, sottraendo ad esso, tramite la suddetta operazione booleana, un cubo dotato del medesimo centro della figura, lato pari a $\frac{2\sqrt{2}}{3}$ volte il lato della stessa, ma ruotato di 45° attorno all'apotema delle piramidi, così, appunto, da troncarne i vertici.

La sequenza di lavoro eseguita per ottenere il tetracaidecaedro è esposta graficamente in *Figura 10*, nella quale sono ben visibili tutte le figure e forme elencate nel processo di costruzione: la piramide retta a base quadrata, l'ottaedro, la combinazione di ottaedro e cubo prima dell'operazione di sottrazione ed infine il tetracaidecaedro completo (anche chiamato ottaedro troncato).

³ Come già detto tutte le figure geometriche piane che compongono la superficie del tetracaidecaedro sono esagoni e quadrati regolari, dotati del medesimo lato.

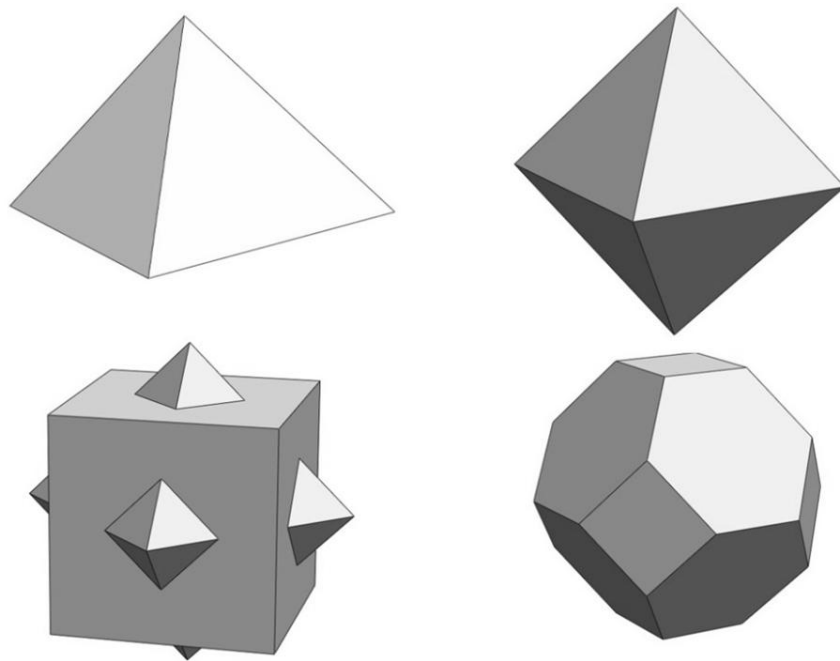


Figura 10. Sequenza di costruzione del tetracaidecaedro.

Una volta ottenuto il solido di base, è ora necessario creare la vera e propria forma della cella porosa della schiuma. Per fare ciò è necessario svuotare il solido, lasciando solo un certo spessore (come per esempio visto in *Figura 8*) a seconda della filosofia che si vuole seguire.

Il primo approccio utilizzato nel lavoro qui esposto è stato quello di svuotare il solido con una sfera, tramite l'operazione booleana sottrazione (approccio seguito anche da Bai e Chung nell'articolo [3]). Il risultato è una cella porosa, con le fibre simil-triangolari⁴ e fori circolari posti nelle facce, nella quale la lunghezza l e lo spessore t della fibra sono valori mediati ottenuti da rilevazioni sperimentali di schiume [4] [5].

Nella geometria creata con le operazioni sopra elencate lo spessore e la lunghezza della fibra sono stati impostati come riportato in *Figura 11*, dove è presente la cella intera e una rappresentazione della stessa che chiarifica la forma delle fibre e la struttura interna.

⁴ Vedi *Figura 11*.

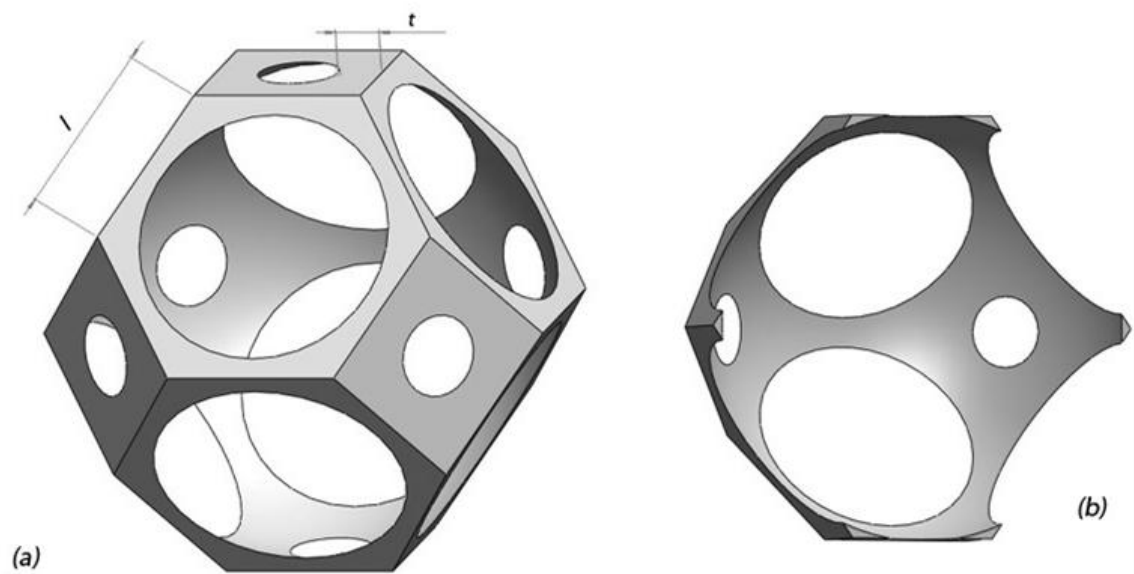


Figura 11. (a) Cella tetracaidecaedrica a cui è stata sottratta una sfera, specificando lo spessore t e la lunghezza della fibra l e (b) una sezione in cui è possibile vedere la forma triangolare della fibra.

A partire da questo modello è stato costruito il primo gruppo di celle, per mezzo dei valori sperimentali delle diverse schiume considerate. Nel testo a seguire ci si riferirà a questa geometria chiamandola "cella sferica".

Questa tipologia di cella è stata utilizzata considerando il fatto che le schiume hanno una microstruttura molto simile a quella appena costruita [3], perciò era necessario partire da tale struttura per le simulazioni. La somiglianza della cosiddetta "cella sferica" con le schiume reali può essere notata anche in *Figura 12*.

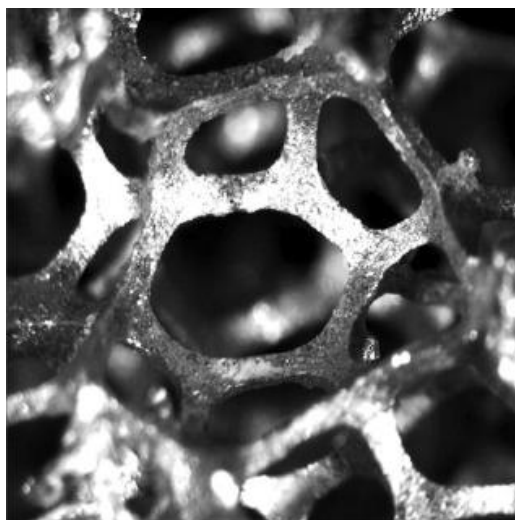


Figura 12. Cella reale [3].

Si nota come le forme delineate dal reticolo siano esagonali o quadrate, proprio come in un tetracaidecaedro. Inoltre all'aumentare della porosità, le fibre tendono gradualmente ad ottenere una sezione trasversale di forma triangolare, proprio come queste geometrie.

La seconda tecnica di costruzione mantiene la stessa lunghezza della fibra, ma usa un diverso approccio nella definizione dello spessore.

Partendo sempre da un tetracaidecaedro, esso viene svuotato mantenendo le facce con uno spessore pari a $\frac{t}{2}$ (il cui t è lo stesso preso in considerazione nella geometria sferica). Dopodiché su ogni faccia del solido svuotato si applica un foro della stessa forma della faccia in questione (un foro quadrato sulle facce quadrate ed uno esagonale su quelle esagonali) della grandezza adatta, in modo che la distanza tra un generico spigolo del tetracaidecaedro e i due bordi dei fori ai suoi lati sia pari a $\frac{t}{2}$ come si può vedere in *Figura 13*.

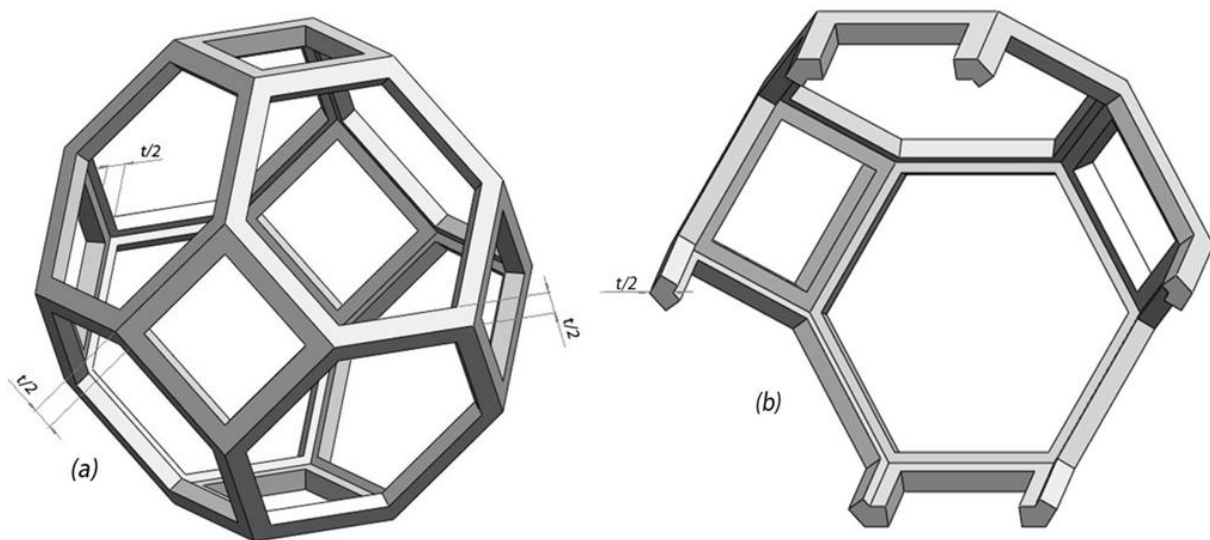


Figura 13. "Cella a spigoli" dove si può vedere l'utilizzo dello spessore t per i fori (a) e per lo svuotamento nella vista in sezione (b).

Con questo approccio si ottiene una struttura di forma e spessore più realistico, molto conforme alla teoria di Gibson e Ashby [6], avendo utilizzato lo stesso spessore t precedentemente descritto in prima approssimazione come sopra. Questa geometria sarà successivamente richiamata con il nome di "cella a spigoli".

Anche questa tecnica riflette la tendenza delle strutture create ad assomigliare alle schiume reali [5].

Create le celle base, bisogna costruire i volumi solidi elementari, che contengano una cella e i collegamenti della stessa con le altre del reticolo: cioè creare un volume cubico che si ripete uguale nello spazio, così da costruire successivamente volumi di lavoro in modo più rapido ed efficiente.

Per fare ciò è stato necessario specchiare la cella rispetto ad ogni sua faccia esagonale e ruotare la nuova cella creata di 60° rispetto alla normale della superficie. In questo modo, ogni faccia esagonale della cella "madre" è in continuità con una faccia quadrata della cella "figlia" e ogni faccia quadrata con una esagonale.

Il risultato di tali operazioni è la struttura riportata in *Figura 14*, dalla quale, eliminando tutte le parti delle celle non contenute in un ipotetico cubo con le facce coincidenti con quelle quadrate della cella primaria, si ricava il volume solido elementare (vedi *Figura 15*).

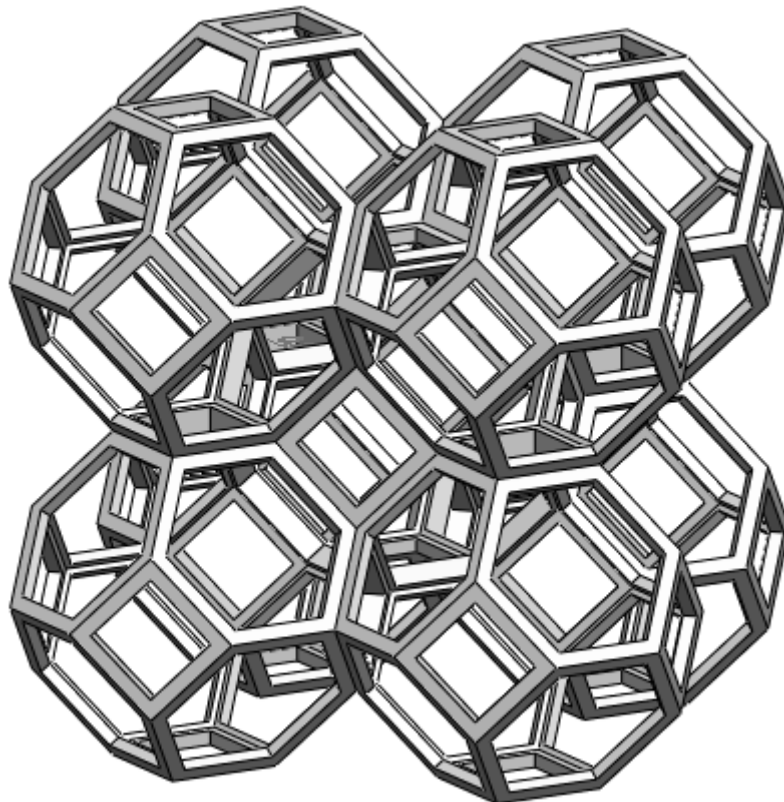


Figura 14. Vista di un reticolo di costruzione per un volume elementare tramite "celle a spigoli".

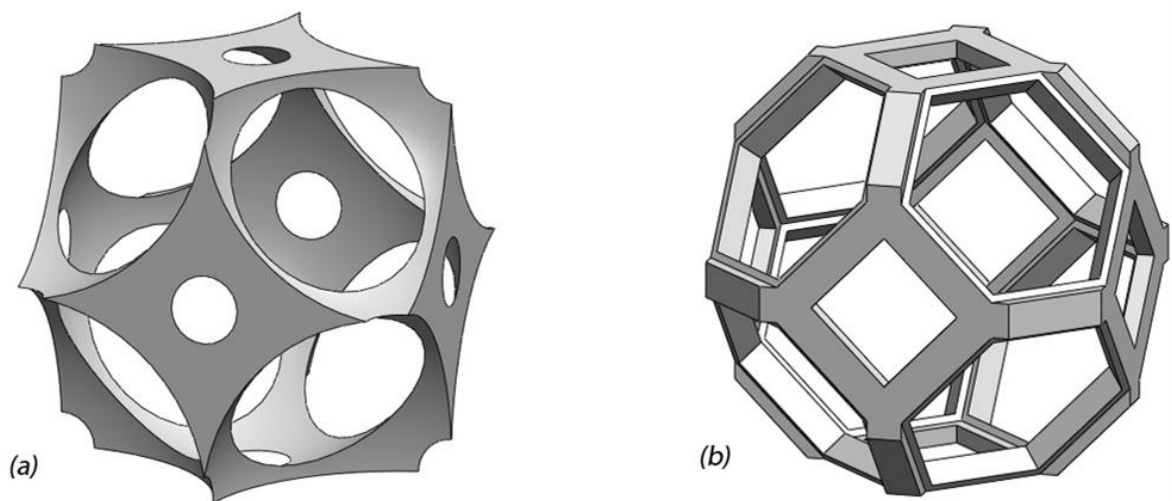


Figura 15. Volume solido elementare di una "cella sferica" (a) e di una "cella a spigoli" (b).

Quindi per ottenere il volume fluido di una cella elementare è sufficiente sottrarre ad un cubo, con le stesse dimensioni di quello precedentemente usato, il solido appena ottenuto.

Il risultato, rappresentato in *Figura 16* per le due tipologie diverse di cella, è quindi lo spazio del dominio fluido.

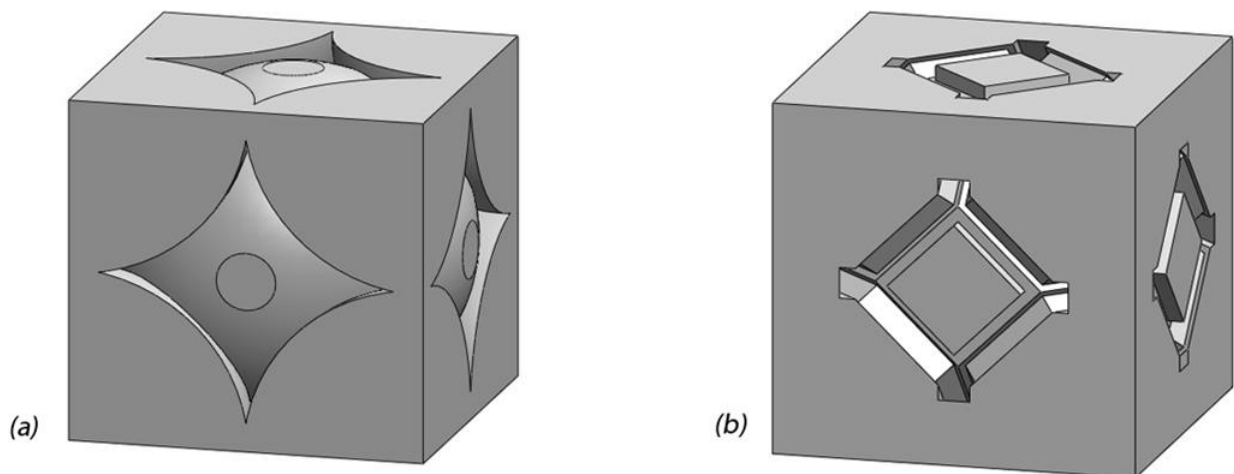


Figura 16. Volume fluido della "cella sferica" (a) e della "cella a spigoli" (b).

Mettendo in serie un certo numero di questi volumi, si ricava il volume di lavoro che è stato utilizzato, rappresentato in *Figura 17*.

Si nota come a monte e a valle della struttura siano stati aggiunti due parallelepipedi di lunghezza pari al doppio di una cella. Questi supplementi sono stati inseriti per favorire l'applicazione delle condizioni a contorno: su una delle due facce quadrate viene posta la condizione di *inlet*, mentre sull'altra quella di *outlet*.

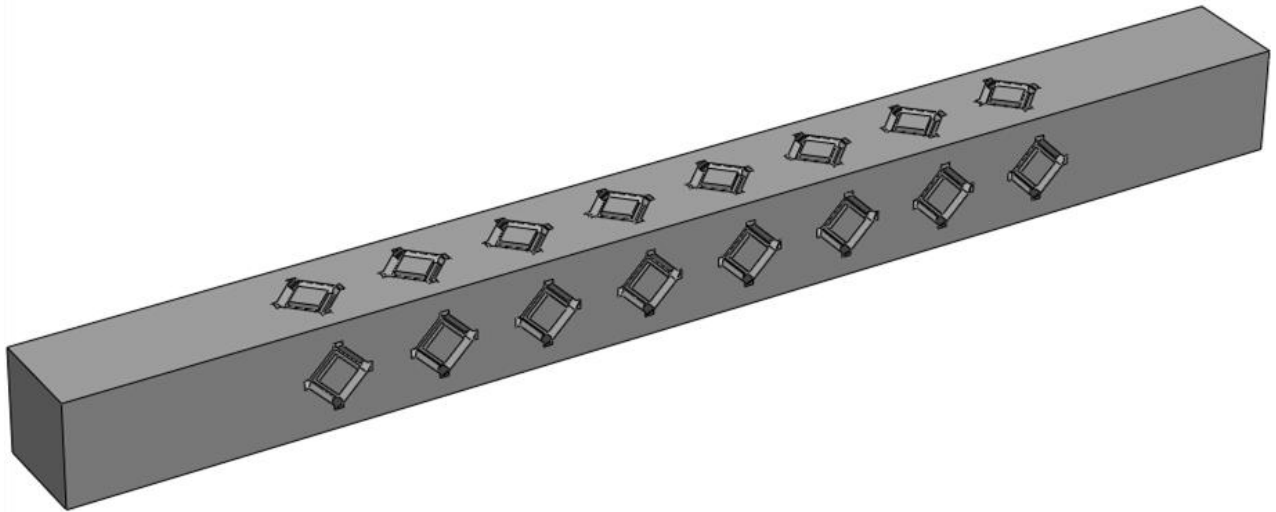


Figura 17. Esempio di volume fluido di lavoro con otto volumi fluidi elementari in serie e due parallelepipedi, uno a monte e uno a valle delle celle

A seguito della costruzione di queste figure è stato fatto uno studio geometrico delle strutture riportato in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche geometriche reali delle schiume prese in esame e caratteristiche costruttive dei modelli utilizzati nelle prime simulazioni svolte. Tutti i valori numerici, a meno dei termini relativi ai *PPI* e alle due diverse ρ_r (riportate in valore percentuale), sono riportati nell'unità di misura [mm] [4] [5].

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$	l_{fibra}	t_{fibra}	d_{cella}	$\rho_{r,calc}$	<i>s</i>	t_{GA}	t_{calc}
sferica	5	6.5	1.890	0.495	5.345	4.2	0.495	0.468	
sferica	10	6.6	1.739	0.432	4.918	4.0	0.432	0.434	
sferica	20	6.5	1.402	0.320	3.965	3.7	0.320	0.347	
sferica	40	6.4	0.999	0.244	2.825	3.9	0.244	0.245	
sferica	10	4.4	1.351	0.445	3.821	5.1	0.445	0.275	
sferica	10	6.6	1.785	0.450	5.048	4.0	0.450	0.445	
sferica	10	9.7	1.870	0.529	5.289	4.5	0.529	0.566	

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$	l_{fibra}	t_{fibra}	d_{cella}	$\rho_{r,calc}$	<i>s</i>	t_{GA}	t_{calc}
a spigoli	5	6.5	1.890	0.495	5.345	6.3	0.248	0.468	0.440
a spigoli	10	6.6	1.739	0.432	4.918	5.7	0.216	0.433	0.384
a spigoli	20	6.5	1.402	0.320	3.965	4.8	0.160	0.347	0.284
a spigoli	40	6.4	0.999	0.244	2.825	5.5	0.122	0.245	0.217
a spigoli	10	4.4	1.351	0.445	3.821	9.6	0.223	0.275	0.395
a spigoli	10	6.6	1.785	0.450	5.048	5.8	0.225	0.445	0.400
a spigoli	10	9.7	1.870	0.529	5.289	7.2	0.265	0.566	0.470

Il primo campo esposto è il tipo di cella, costruita con una delle tecniche sopra descritte. I campi dal secondo al quinto (*PPI*, $\rho_{r,exp}$, l_{fibra} , t_{fibra}) sono invece dati avuti da studi sperimentali delle schiume [4] [5]: sono, in ordine, una valutazione del numero di pori per pollice di lunghezza lineare, la densità relativa della schiuma misurata e gli ultimi due un valore mediato delle rilevazioni della lunghezza e dello spessore delle fibre delle celle [4] [5].

Gli ultimi cinque campi sono invece valutazioni svolte all'interno dello spazio di lavoro di *SolidWorks* [7] o calcoli svolti: d_{cella} è il lato del cubo del volume fluido mostrato in *Figura 16*, calcolato per costruzione con la seguente formula:

$$d_{cella} = 2\sqrt{2} l_{fibra} \quad \text{Eq. 5}$$

La lunghezza del volume di celle di studio sarà pari a d_{cella} moltiplicato per il numero di volumi posti in serie.

$\rho_{r,calc}$ è, invece, la densità relativa del volume fluido costruito nel software CAD: stimata la capacità del volume fluido elementare V_{fluido} tramite uno strumento di valutazione, si calcola nel seguente modo:

$$\rho_{r,calc} = 1 - \frac{V_{fluido}}{d_{cella}^3} \quad \text{Eq. 6}$$

Il parametro s è il valore che è stato inserito nel disegno della geometria CAD per definire lo spessore della cella. Per capire il suo significato a livello geometrico si può guardare in *Figura 11*: s , visibile nella quota, in questo caso è stato preso uguale allo spessore della fibra t_{fibra} , infatti per ogni "cella sferica" s e t hanno lo stesso valore, come si può vedere nella tabella; invece, nelle geometrie "a spigoli", s è preso pari a $\frac{t_{fibra}}{2}$, come visibile in *Figura 13* ⁵.

Il campo t_{GA} , invece, è lo spessore della fibra ideale per la cella tetracaidecaedrica di Gibson e Ashby [6], partendo da $\rho_{r,exp}$ e sfruttando l'Eq. 2. Estraendo il valore dello spessore si ottiene:

$$t_{GA} = \sqrt{\frac{\rho_{r,exp}}{1.06}} l_{fibra} \quad \text{Eq. 7}$$

Infine t_{calc} è il valore dello spessore della fibra della cella tetracaidecaedrica, valutato come si può vedere in *Figura 18*.

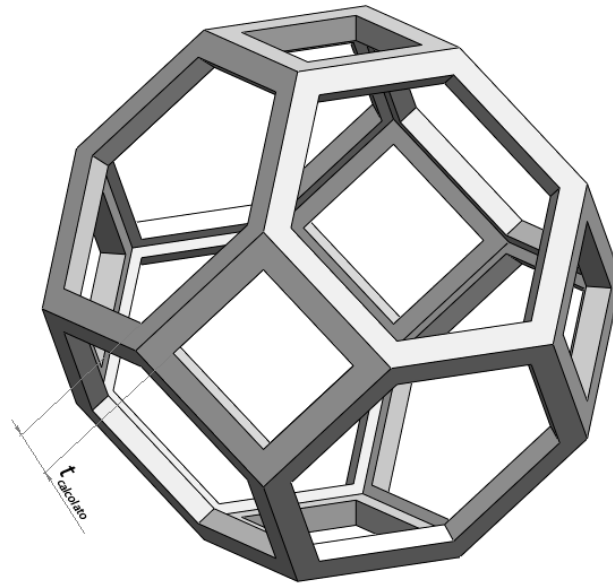


Figura 18. Visualizzazione del parametro t_{calc}

⁵ Questo parametro può attualmente sembrare inutile, dato che per le "celle sferiche" è uguale a t_{fibra} e per le "celle a spigoli" è pari a $\frac{t_{fibra}}{2}$. Tuttavia esso acquisirà significato successivamente, nella costruzione di geometrie con approcci diversi da quelli finora esposti, dove presenterà valori non immediatamente correlabili con quelli degli altri campi. A differenza degli altri campi, che presentano utilità anche a livello di valutazione e accettabilità delle geometrie, s non presenta interesse al di fuori dell'ambito prettamente costruttivo.

Vediamo come la casella del t_{calc} per le geometrie di tipologia sferica sia barrata. La ragione di tale scelta risiede nel fatto che le "celle sferiche" di *Figura 11* sono ben diverse da quelle teorizzate da Gibson e Ashby [6] di *Figura 8*, con uno spessore geometrico della fibra molto variabile, perciò ne risultava inutile l'inserimento.

Nella suddetta tabella si può vedere come le due densità relative (quella "sperimentale" e quella "calcolata" della geometria CAD) siano talvolta molto diverse. Lo stesso discorso può essere fatto per gli spessori considerati (cioè quello sperimentale della fibra, quello ricavato dalla Eq. 7 e quello calcolato dalla cella CAD): i loro valori sono sempre discordanti in modo non sempre trascurabile.

Per questa ragione sono state pensate tre nuove serie di geometrie da testare numericamente. Esse sono tutte celle simili a quella "a spigoli" e ne mantengono invariato il valore della lunghezza della fibra l , ma variano il parametro s secondo tre diverse filosofie:

- la prima tecnica ha come scopo riprodurre un volume di lavoro dotato della medesima densità relativa della schiuma che deve simulare, in modo da avere quindi $\rho_{r,calc}$ uguale a $\rho_{r,exp}$, mantenendo tutte le altre tecniche di costruzione della "cella a spigoli". Questa tipologia di cella sarà poi richiamata con l'appellativo di "cella t_ρ ";
- la seconda tecnica mira ad avere una cella la cui fibra abbia uno spessore pari a quello ricavato dalla teoria di Gibson e Ashby. Il risultato è una cella il cui t_{calc} sia uguale a t_{GA} ⁶. Questa tipologia di cella sarà poi richiamata con l'appellativo di "cella t_{GA} ";
- la terza ed ultima tecnica impone invece che la fibra della cella creata nel software CAD abbia lo spessore reale, cioè quello calcolato mediando valori sperimentali dalle schiume in esame. Affinché ciò avvenga si deve ottenere un t_{calc} uguale a t_{fibra} . Questa tipologia di cella sarà poi richiamata con l'appellativo di "cella t_{real} ".

⁶ Sebbene sia stato sfruttato questo principio, la cella non riesce a possedere un $\rho_{r,calc}$ uguale a $\rho_{r,exp}$ come dovrebbe accadere. Ciò succede poiché, in effetti, la "cella a spigoli" non ha una forma identica a quella di Gibson e Ashby, che si può vedere in *Figura 8* e *Figura 13*.

Nella seguente tabella possono essere visti i vari parametri per queste tre nuove tipologie, con le rispettive caratteristiche numeriche.

Tabella 2. Caratteristiche geometriche reali delle schiume prese in esame e caratteristiche costruttive dei modelli utilizzati nelle prime simulazioni svolte. . Tutti i valori numerici, a meno dei termini relativi ai *PPI* e alle due diverse ρ_r (riportate in valore percentuale), sono riportati nell'unità di misura [mm] [4] [5].

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$	l_{fibra}	t_{fibra}	d_{cella}	$\rho_{r,calc}$	<i>s</i>	t_{GA}	t_{calc}
t_ρ	5	6.5	1.890	0.495	5.346	6.5	0.253	0.468	0.449
t_ρ	10	6.6	1.739	0.432	4.919	6.6	0.235	0.434	0.417
t_ρ	20	6.5	1.402	0.320	3.965	6.5	0.188	0.347	0.334
t_ρ	40	6.4	0.999	0.244	2.826	6.4	0.133	0.245	0.234
t_ρ	10	4.4	1.351	0.445	3.821	4.4	0.147	0.275	0.261
t_ρ	10	6.6	1.785	0.450	5.049	6.5	0.239	0.445	0.424
t_ρ	10	9.7	1.870	0.529	5.289	9.7	0.311	0.566	0.525
t_{GA}	5	6.5	1.890	0.495	5.346	7.0	0.264	0.468	0.468
t_{GA}	10	6.6	1.739	0.432	4.919	7.1	0.244	0.434	0.434
t_{GA}	20	6.5	1.402	0.320	3.965	7.0	0.195	0.347	0.347
t_{GA}	40	6.4	0.999	0.244	2.826	7.1	0.138	0.245	0.245
t_{GA}	10	4.4	1.351	0.445	3.821	4.9	0.155	0.275	0.275
t_{GA}	10	6.6	1.785	0.450	5.049	7.1	0.251	0.445	0.445
t_{GA}	10	9.7	1.870	0.529	5.289	10.2	0.319	0.566	0.566
t_{real}	5	6.5	1.890	0.495	5.346	7.8	0.279	0.468	0.495
t_{real}	10	6.6	1.739	0.432	4.919	7.1	0.243	0.434	0.432
t_{real}	20	6.5	1.402	0.320	3.965	6.5	0.180	0.347	0.320
t_{real}	40	6.4	0.999	0.244	2.826	6.9	0.137	0.245	0.244
t_{real}	10	4.4	1.351	0.445	3.821	11.9	0.251	0.275	0.445
t_{real}	10	6.6	1.785	0.450	5.049	7.3	0.253	0.445	0.450
t_{real}	10	9.7	1.870	0.529	5.289	9.0	0.298	0.566	0.529

Guardando i vari valori ottenuti di $\rho_{r,calc}$ in questo secondo gruppo di geometrie, si vede come siano molto meglio rappresentanti della realtà per quanto riguarda i dati in possesso (a meno di qualche eccezione).

Un ragionamento analogo può essere effettuato per quanto riguarda la somiglianza dei vari spessori t considerati: anche qui, tranne per qualche irregolarità, i valori non si discostano molto tra loro, dando omogeneità alla costruzione.

Tutto questo secondo gruppo di geometrie si basa come già detto sulla "cella a spigoli", tralasciando nuove teorie circa la "cella sferica". Ciò è dovuto al fatto che provando a creare, per esempio, la "cella a t_ρ " o la "cella a t_{real} "⁷, le facce quadrate del tracaidecaedro, le quali dovrebbero essere forate circolarmente, finiscono per essere chiuse per costruzione prima ancora di aver raggiunto i valori di spessore o densità relativa adeguati.

Per tale ragione è risultato impossibile l'ottenimento di nuove geometrie basate anche sulla prima cella presentata.

⁷ In effetti la "cella t_{GA} " non ha senso per il modello "sferico", in quanto questo non ha nulla a che vedere con il reticolo delle celle di Gibson e Ashby [6].

5. Taratura modello

Prima di svolgere la parte centrale del lavoro e di immergersi nello studio dei risultati, è stato necessario eseguire alcune valutazioni su alcune condizioni poste al contorno, sulle geometrie a cui si è ricorso, sulle dimensioni utilizzate per creare la *mesh* e sul metodo sfruttato per ottenere le soluzioni desiderate.

Bisogna inoltre comprendere che questi sono tutti punti centrali nella costruzione di un modello e che la soluzione più accurata non è sempre la scelta migliore. Infatti risultano centrali anche i tempi di calcolo e quindi di attesa, che dipendono dalla complessità del problema, ma soprattutto dalla potenza dei calcolatori, non sempre adatti. Perciò la capacità dello studioso e dell'utilizzatore sta proprio nella scelta del miglior compromesso tra rapidità della soluzione e la precisione con la quale la si ottiene.

Partendo dalla prima questione, nel capitolo *Sviluppo del modello numerico* erano già state esposte in parte le condizioni al contorno utilizzate. Ora precisando, e basandosi sulla *Figura 19*, particolarmente esplicativa, la superficie quadrata più a sinistra è quella di imbocco, a cui dare la condizione di *inlet*, nella quale viene impostata una certa velocità del flusso in entrata.

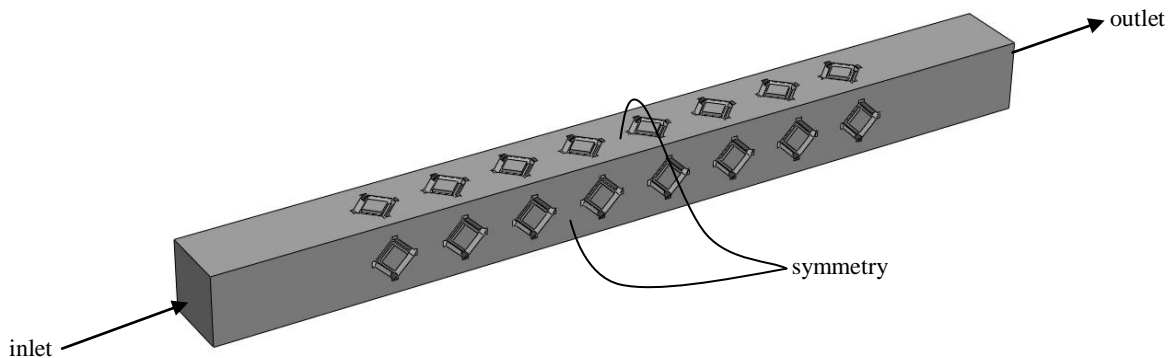


Figura 19. Rappresentazione delle condizioni al contorno utilizzate.

Alla fine del percorso, invece, sulla superficie quadrata nascosta dalla vista assometrica, viene imposta la condizione di *outlet*, dove il flusso può solo uscire, con una pressione relativa nulla, così da poter ottenere il Δp delle perdite esclusivamente calcolando la pressione all'imbocco del condotto fittizio.

All'interno dei volumi fluidi elementari, dove sono presenti le superfici di contatto con il reticolo solido (non presente in figura) si utilizza la condizione di *no slip wall*, imponendo la velocità nulla in parete.

Sulle pareti laterali del condotto, invece, sono state tentate condizioni differenti: in alcune simulazioni è stata posta la condizione di *symmetry* come dovrebbe essere (infatti, essendo una schiuma formata da molte di queste serie di celle accostate e concatenate, tramite tale imposizione è possibile simulare una geometria più grande di quella che si presenta e su cui si lavora⁸); in altre simulazioni si è tentato di porre alle pareti la condizione di *no slip wall*. Tale tentativo è stato fatto poiché con quest'ultimo vincolo il tempo di calcolo si riduceva di molto, portando inoltre a convergenze con andamento dei residui numerici molto pendenti, fino a valori di 1×10^{-7} .

In Tabella 3 si possono vedere gli esiti di alcune di queste simulazioni, le più interessanti, nelle quali sono state utilizzate alcune caratteristiche comuni: la schiuma in esame è di rame, da 5 PPI, con densità relativa di 6.5% [4]; la *mesh* di tutti i condotti di studio usa celle di forma tetraedrica, di 0.25 mm di dimensione; la tipologia di moto considerata è quella di flusso laminare (come per tutte le successive simulazioni fatte) e il metodo di risoluzione è del primo ordine *upwind*; il fluido in esame è aria con densità pari a $1.114 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ e viscosità dinamica pari a $1.900 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}$; la velocità di ingresso del fluido è di $2.198 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Le restanti caratteristiche sono riportate di seguito.

Tabella 3. Valori ottenuti per la taratura della condizione al contorno sulle pareti del condotto fluido.

<i>tipo</i>	<i>condizione contorno</i>	<i>mesh</i>	<i>converg</i>	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	<i>diff</i> %
sferica	<i>wall</i>	1136770	1×10^{-7}	47.1	1100.4	9.7
sferica	<i>sym</i>	1136770	3×10^{-5}	42.9	1003.4	
a spigoli	<i>wall</i>	1012640	1×10^{-7}	50.0	1169.4	28.1
a spigoli	<i>sym</i>	1012640	1×10^{-7}	39.0	912.6	

⁸ Ciò non toglie che il risultato di una serie di volumi unica come quella usata sia diverso dalla simulazione completa della schiuma.

Sono state utilizzate due delle geometrie precedentemente descritte ("sferica" e "a spigoli"), per portare alla luce due versioni e due risultati differenti, partendo dalla stessa schiuma.

Per entrambe le geometrie sono stati riportati i casi in esame, cioè le due diverse condizioni a contorno alle pareti del condotto.

Sebbene gli elementi della mesh siano delle stesse dimensioni, come visto prima, il numero di elementi per le due geometrie sono diversi. Ciò è imputabile al fatto che le geometrie, pur rifacendosi alla stessa schiuma e con le stesse caratteristiche, sono costruttivamente eterogenee, perciò una leggera differenza è accettabile.

La prima diversità che balza all'occhio è sicuramente nell'ambito della convergenza: tutte le simulazioni sono converse in modo eccellente, fino a lasciare i residui numerici inferiori a 1×10^{-7} , tranne per il caso della geometria "sferica" con condizione di *symmetry* alle pareti. Questa difficoltà sarà poi riscontrata in tutte le simulazioni in possesso di tali due caratteristiche⁹, cosa che le rende più lente e meno affidabili.

Quindi si portano all'attenzione i due parametri che definiscono i risultati: il primo è Δp , cioè la caduta di pressione tra l'ingresso e l'uscita del fluido aria dal condotto di celle. Il secondo parametro di interesse dei risultati è $\frac{\Delta p}{L}$, cioè il rapporto tra la suddetta perdita di carico e la lunghezza del condotto. Questi due parametri presentano valori sostanzialmente diversi nei quattro casi.

Tuttavia il valore di principale interesse proviene dall'ultimo campo, cioè *diff %*, o differenza percentuale tra il risultato raggiunto con la condizione *no slip wall* rispetto a quello ottenuto con la condizione di *symmetry*. Tale parametro è così calcolato:

$$diff \% = \frac{\frac{\Delta p}{L_{wall}} - \frac{\Delta p}{L_{sym}}}{\frac{\Delta p}{L_{sym}}} \times 100 \quad \text{Eq. 8}$$

Si nota come nel caso della geometria "sferica" la differenza percentuale raggiunga quasi il 10%, mentre nel caso di geometria "a spigoli" addirittura il 30%. Essendo la condizione di *no slip wall* una comodità per l'utente, in ambito di celerità nella risoluzione, lo scopo di tali prove era esclusivamente quello valutare l'utilizzabilità o meno

⁹ Si intende sempre la "cella sferica" con condizione sulle pareti di *symmetry*.

della stessa. A seguito di questi valori è indiscutibilmente d'obbligo fare a meno della condizione vantaggiosa ed utilizzare sulle pareti laterali solo quella di simmetria.

Passando ora alla valutazione delle geometrie, in *Figura 17* è possibile vedere il volume fluido di lavoro, decisamente diverso da una vera schiuma. Difatti, idealmente, le migliori costruzioni creabili sarebbero state strutture grandi quanto la vera schiuma testata in laboratorio, quindi un parallelepipedo (di dimensioni $100 \times 100 \times 40$ mm) costituito di un certo numero di volumi come quelli di *Figura 16*. Dimensioni tali, tuttavia, avrebbero necessitato di decine di milioni di celle nel reticolo della mesh, numeri che ovviamente non possono essere supportati dai calcolatori in possesso.

Utilizzare una geometria così grande e complicata avrebbe inoltre accresciuto la già presente imprecisione, in quanto gli errori o le differenze rispetto alla realtà che si verificano in una singola cella si sarebbero aggiunte a quelle di tutte le altre, portando ad esiti non accettabili. Così si è passati a una semplificazione notevole, cioè allo studio di una semplice colonna di celle come in *Figura 17*.

Riducendo così drasticamente le dimensioni della struttura, si ottengono comunque errori inferiori che l'utilizzo intero della stessa.

Oltretutto, mentre lo scambio di calore interessa tutta l'estensione della schiuma, obbligandone lo studio in almeno due dimensioni, per quanto riguarda le perdite di carico è invece sufficiente studiarne una piccola porzione in una dimensione, sfruttando la condizione al contorno di *symmetry*. Infatti il parametro di studio qui utilizzato è la variazione di pressione per unità di lunghezza $\frac{\Delta p}{L}$, parametro indipendente dall'estensione della superficie nella sezione ortogonale alla velocità media.

Il problema, quindi, si riduce a trovare la minima lunghezza (o il minimo numero di volumi unitari in serie) per cui questo parametro di studio si ripresenti il medesimo o, per lo meno, con un errore o differenza accettabili rispetto ad una lunghezza superiore. Si vuole cioè trovare il numero di elementi base oltre il quale il gradiente di pressione resta invariato.

A tale scopo sono state eseguite una serie di simulazioni preliminari con diversi numeri di celle (quattro, otto e dodici in serie, sempre con i due piccoli parallelepipedi in ingresso e uscita).

Da precisare è il fatto che è stata utilizzata la condizione di *wall no slip* piuttosto che quella di *symmetry* sulle pareti del volume fluido, in quanto il calcolo era più rapido e i

risultati servivano solo come tecnica di accettazione del numero di celle e non come valore assoluto.

In Tabella 4 si possono vedere gli esiti di tali simulazioni, nelle quali sono state utilizzate le stesse caratteristiche comuni, già viste nella valutazione precedente, circa le condizioni al contorno. La *mesh*, inoltre, usa ancora celle di forma tetraedrica, ma di 1 mm di dimensione¹⁰. Le restanti caratteristiche o quelle differenti sono riportate di seguito.

Tabella 4. Simulazioni circa la taratura del modello geometrico per il numero minimo di volumi in serie, atto all'ottenimento di una precisione sufficiente.

<i>tipo</i>	<i>n° volumi</i>	<i>L</i> [mm]	<i>mesh</i>	<i>converg</i>	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ $\left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}}\right]$	<i>diff</i> %
sferica	4	21.383	323525	1×10^{-7}	30.3	1418.4	11.7
sferica	8	42.766	623114	1×10^{-7}	54.3	1269.7	4.0
sferica	12	64.149	907854	1×10^{-7}	78.4	1221.4	

Il tipo di cella adoperata è solo quella "sferica", con quattro, otto o dodici volumi unitari.

Le *mesh* hanno, ovviamente, un diverso numero di celle, in quanto il numero di volumi viene prima raddoppiato, poi aumentato della metà; il numero di celle cresce da circa trecentomila a più di novecentomila

La convergenza dei residui numerici è stata ottima e ha portato ai risultati che si possono vedere negli ultimi tre campi della tabella.

Anche in questo caso il parametro di interesse risulta essere la differenza percentuale tra i valori ottenuti: calcolata con l'Eq. 8 (con la differenza che non si sta parlando di condizioni al contorno, ma di numero di volumi), la simulazione con quattro volumi riporta differenze sopra il 10% rispetto a quella con otto e quest'ultima, a sua volta, presenta una differenza attorno al 4% rispetto a quella da dodici.

¹⁰ Pur essendo un valore troppo elevato per le celle tetraedriche (fatto che sarà esposto successivamente all'interno di questo capitolo), le tre simulazioni non hanno particolare importanza circa i risultati numerici assoluti che forniscono, ma esclusivamente per quanto riguarda i valori differenziali. Questo, come già esposto, serve per capire il numero sufficiente di volumi elementari da adottare nelle simulazioni. Perciò il lettore si concentri in questa parte sul parametro *diff* %.

Alla luce di questi valori, si può affermare che la differenza tra la prima e la seconda è troppo elevato per essere accettabile. A causa di ciò la geometria costituita da quattro volumi deve essere abbandonata. D'altra parte vi è una lieve differenza tra la simulazione da otto e quella da dodici volumi. Si è scelto un numero di celle pari a otto, ritenuto il giusto compromesso fra il numero di celle stesso e lo sforzo computazionale associato.

In Tabella 5 si possono vedere le perdite di carico in ogni volume di cui è composto il condotto.

Tabella 5. Perdite di carico in ogni cella del condotto per le tre geometrie considerate misurate in [Pa].

$n^\circ \text{volumi}$	$\Delta p_{\text{cella}_1}$	$\Delta p_{\text{cella}_2}$	$\Delta p_{\text{cella}_3}$	$\Delta p_{\text{cella}_4}$	$\Delta p_{\text{cella}_5}$	$\Delta p_{\text{cella}_6}$
4	8.3	6.2	6.0	6.0		
8	9.7	6.1	6.2	5.9	6.0	6.0
12	8.4	6.3	6.0	6.1	6.0	6.0

$\Delta p_{\text{cella}_7}$	$\Delta p_{\text{cella}_8}$	$\Delta p_{\text{cella}_9}$	$\Delta p_{\text{cella}_{10}}$	$\Delta p_{\text{cella}_{11}}$	$\Delta p_{\text{cella}_{12}}$
6.0	6.0				
6.0	6.0	6.1	6.0	6.0	6.0

Da tali valori si nota come, a meno della prima cella dove le perdite sono maggiori, tutte le altre celle sono caratterizzate da perdite molto simili tra loro. Da ciò deriva il fatto che le simulazioni sono eseguite correttamente, senza differenze tra loro (a meno del numero di volumi in serie ovviamente) e che il fluido si comporta in modo simile in tutte le celle.

Inoltre si comprende la ragione per la quale vi siano differenze a seconda del numero di volumi in sequenza: la perdita nella prima cella è molto superiore delle perdite nelle altre. Conseguenza di ciò, e del fatto che si sta valutando il parametro $\frac{\Delta p}{L}$, è che il surplus ivi prodotto viene spalmato su tutta la lunghezza del condotto e, essendo questa

direttamente proporzionale al numero di volumi, il risultato ne è condizionato. Aumentando il numero di volumi tale surplus diventa sempre più influente¹¹.

Quindi si può concludere che una geometria come quella di *Figura 17*, formata da otto volumi elementari e due parallelepipedi, è sufficiente a rappresentare in modo preciso la schiuma in esame.

Come in parte esposto precedentemente nel capitolo "*Sviluppo del modello numerico*", la *mesh* risulta un passo fondamentale nella creazione di un modello accurato e ripetibile. Infatti, costruendo un ipotetico reticolo di celle di dimensione infinitesimamente piccola e disponendo di potenze di calcolo "sufficienti", si otterrebbe la soluzione corretta (ovviamente a seconda del fatto che il modello di partenza sia adatto o meno agli scopi). Dato che, tuttavia, queste ipotesi non sono realizzabili, bisogna scegliere un giusto compromesso tra dimensione degli elementi ed accuratezza della soluzione, dando agli elementi della griglia una dimensione finita.

Dalla dimensione delle celle del reticolo dipendono due fatti: più piccole sono le celle, maggiore è il loro numero all'interno della geometria e, di conseguenza, la precisione della soluzione sul modello creato. D'altra parte svantaggiosi sono gli effetti sul tempo di calcolo, che aumenta vertiginosamente con l'aumentare del numero di celle.

Ciononostante celle troppo grandi, pur rendendo rapida la soluzione, darebbero risultati talmente imprecisi da essere inutilizzabili. Per tali ragioni si deve optare per una condizione di equilibrio, sacrificando un po' la precisione per una soluzione sufficientemente rapida.

Al fine di avere comunque una precisione sufficiente nelle simulazioni si è optato per un compromesso. Per fare ciò, tuttavia, bisogna svolgere uno studio di varie *mesh*, trovando quella che più aggrada e soddisfa la precisione desiderata: provando reticoli dal numero di celle via via crescente, quindi di dimensione sempre più piccola, si cerca di trovare un risultato che vari sempre meno all'infittirsi del reticolo. Infine, trovando il punto in cui si ha una differenza minima nel risultato tra due griglie diverse, allora si può utilizzare il reticolo dei due con minor quantità di elementi.

¹¹ A questo discorso va aggiunto il fatto che vi sono i due parallelepipedi di entrata ed uscita che portano leggeri aumenti nelle perdite, ma dato il loro indispensabile compito, non possono essere rimossi dal volume di lavoro. Il loro contributo risulta essere comunque trascurabile rispetto alle perdite di carico interne alla schiuma.

In Tabella 6 sono riportate le simulazioni effettuate con tale scopo. Le caratteristiche comuni tra di esse sono il tipo di moto (laminare) e il metodo (del primo ordine, *u-pwind*); le altre sono riportate di seguito.

Tabella 6. Risultati delle simulazioni circa la taratura del modello per il numero di elementi della mesh atto all'ottenimento di una precisione sufficiente.

<i>tipo</i>	<i>PPI-ρ_r</i>	<i>mesh</i>	<i>dim</i> ¹² [mm]	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ $\left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}}\right]$	<i>diff</i> %
sferica	5-6.5	623114	1	54.3	1269.7	17.8
sferica	5-6.5	1136770	0.25	47.1	1100.4	2.1
sferica	5-6.5	2034142	0.2	46.1	1077.7	
a spigoli	10-6.6	1029896	0.23	40.2	1020.9	-0.5
a spigoli	10-6.6	1783173	0.19	39.8	1010.4	-1.5
a spigoli	10-6.6	2969723	0.16	40.4	1026.2	

Sono state riportate in totale sei simulazioni, delle quali tre con geometria "sferica" e tre con quella "a spigoli". Si deve sottolineare il fatto che sulle pareti delle geometrie delle prime tre simulazioni è stata utilizzata la condizione di *no slip wall*, mentre, nelle ultime tre simulazioni, le geometrie hanno sulle pareti la condizione di *symmetry*.

Trattando prima il primo gruppo, è stata simulata appunto una geometria "sferica", da 5 PPI e densità relativa di 6.5%.

Le caratteristiche del fluido sono le medesime in tutte e tre le simulazioni, cioè densità di $1.114 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, viscosità dinamica di $1.900 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}$ e velocità del flusso di $2.199 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. D'altra parte a cambiare è il parametro *dim*, cioè la dimensione che possiedono gli elementi tetraedrici della griglia di celle e, conseguentemente, il numero di elementi nel campo *mesh*.

Si è partiti da una dimensione relativamente grande, cioè cella da 1 mm, per passare poi a 0.25 mm, con circa un milione di elementi, fino ad arrivare a poco più di due milioni di elementi da 0.2 mm. Come nelle altre tabelle di taratura, il parametro *diff* % fornisce un riscontro immediato sulla dipendenza del risultato dalla qualità della *mesh*. Esso è calcolato come differenza tra la *mesh* in questione e quella più fitta delle tre.

¹² Questa è la dimensione generale, non necessariamente quella dell'elemento più piccolo.

Si può vedere come la *mesh* da 1 mm abbia una differenza percentuale rispetto a quella da 0.2 mm attorno al 17%, valore troppo alto per rendere tale griglia valida nelle simulazioni future.

La griglia da un milione di elementi, invece, presenta una differenza di circa il 2%. Da ciò si può ritenere che aumentare ancora il numero di elementi sarebbe superfluo, poiché già con quest'ultima percentuale trovata si è all'interno di una soglia d'errore accettabile. Usare reticoli da due milioni di elementi sarebbe quindi un'accortezza superflua e dispendiosa in termini di tempo.

Guardando ora le caratteristiche del secondo gruppo, le geometrie sono "a spigoli", la schiuma è caratterizzata da 10 PPI e densità relativa da 6.6%; un flusso d'aria da $1.132 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ di densità e $1.902 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}$ di viscosità dinamica scorre nel condotto alla velocità di $2.324 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Guardando i parametri *dim* e *mesh* si nota come sia stata infittita la mesh e resa via via meno rada. Partendo da una griglia di circa un milione di celle si passa fino a quasi tre milioni di elementi, con le celle di 0.16 mm.

Dal parametro *diff* % si nota come la differenza tra le prime due *mesh* e l'ultima sia estremamente esigua (entrambe sotto il 2%), perciò non ci sono effettive differenze apprezzabili con un buon margine e un numero di elementi così elevato non è giustificabile per miglioramenti in precisione di un'esigua percentuale.

Per tali ragioni si può concludere anche qui che la griglia da un milione di elementi è più che sufficiente per questi scopi. In tutte le simulazioni eseguite sono state utilizzate *mesh* da circa un milione di elementi proprio in virtù di questo ragionamento.

Come ultimo test di taratura si è investigato sul metodo di risoluzione delle simulazioni.

All'interno del software *ANSYS Fluent* ci sono svariate tecniche di risoluzione a seconda delle necessità dell'utente. In questo lavoro ci si è soffermati sul sistema di risoluzione *upwind*.

Come già in parte esposto nel capitolo "*Sviluppo del modello numerico*", il metodo in questione è un sistema che garantisce una buona convergenza e precisione in un numero ristretto di iterazioni, a differenza degli altri metodi, dotati certamente di accuratezza maggiore, ma con tempi di calcolo molto più lunghi e non sempre vantaggiosi.

Quindi in questo lavoro si è mantenuto l'approccio *upwind*, al fine di raggiungere un buon numero di dati numerici da confrontare.

A prescindere da ciò una taratura è stata ugualmente effettuata: si è studiato il vantaggio di usare il suddetto metodo con un'accuratezza del primo o del secondo ordine, valutando così il vantaggio di usare l'uno o l'altro metodo.

Un metodo del primo ordine è una scelta accettabile, nel caso in cui la *mesh* in oggetto di studio sia allineata con il flusso in questione (quindi nel caso di reticoli piani composti di quadrilateri o griglie spaziali composte di esaedri). Ciò nonostante, se la griglia è composta di forme triangolari o tetraedriche, tale tecnica risulta soggetta ad un incremento dell'errore nella discretizzazione numerica, in quanto queste celle non si dispongono mai allineate con il flusso.

Per questi ultimi tipi di *mesh* è consigliabile l'utilizzo di tecniche del secondo ordine, al fine di ottenere risultati più accurati. Sarebbe doveroso l'utilizzo del metodo del secondo ordine anche nel caso in cui si tratti di reticoli rettangolari o esaedrici, soprattutto quando si ha a che fare con flussi complessi.

Riassumendo, mentre, da una parte, una discretizzazione del primo ordine porta generalmente a convergenze più rapide e migliori rispetto ad un sistema del secondo ordine, quest'ultimo conduce a risultati più precisi ed accurati, soprattutto per *mesh* triangolari o tetraedriche.

Se si inizia una simulazione con valori di partenza distanti da quelli finali che si ottengono¹³ è possibile anche iniziare la simulazione con il metodo del primo ordine, per poi, giunti più vicino al valore finale, passare al metodo più accurato del secondo ordine, per concludere in maggior precisione il lavoro fino a convergenza.

Infine, per casi in cui si presentino difficoltà nel raggiungimento della soluzione con il sistema del secondo ordine, conviene tentare la risoluzione con il sistema del primo ordine [9].

In Tabella 7 si possono vedere le simulazioni eseguite a tale scopo, cioè differenziando tra il sistema del primo e del secondo ordine, mantenendo sempre una discretizzazione con il metodo *upwind*. Il materiale delle schiume rimane rame e il flusso laminare.

¹³ Questa possibilità si riferisce ai casi nei quali si abbia idea o una stima del risultato finale della simulazione.

Tabella 7. Risultati delle simulazioni circa la taratura del metodo di risoluzione, al fine di scoprire quello migliore o con una precisione sufficiente per le simulazioni successive.

<i>tipo</i>	<i>PPI-ρ_r</i>	<i>metodo</i>	<i>converg</i>	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ $\left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}}\right]$	<i>diff</i> %
sferica	5-6.5	1 st order	1×10^{-7}	54.3	1269.7	
sferica	5-6.5	2 nd order	5×10^{-5}	44.0	1027.9	-19.0
a spigoli	10-6.6	1 st order	1×10^{-7}	40.2	1020.9	
a spigoli	10-6.6	2 nd order	5×10^{-6}	34.5	875.5	-14.2

Sono state utilizzate due geometrie differenti: una "sferica" e una "a spigoli". Esse sono le medesime utilizzate nell'esame precedente della qualità della *mesh*, utilizzando anche le stesse caratteristiche: le geometrie di tipo "sferico" hanno reticoli da 623114 elementi di 1 mm di dimensione e condizione di *no slip wall* alle pareti; quelle di tipo "a spigoli" usano, invece, una *mesh* da 1029896 elementi di 0.23 mm di dimensione e la condizione di *symmetry* alle pareti.

Le caratteristiche del fluido e la velocità del flusso sono esattamente le stesse appena viste nello studio di accettabilità delle *mesh* per le due diverse geometrie. Le restanti caratteristiche sono riportate in Tabella 7.

Confrontando tra loro le prime due simulazioni, si nota come la convergenza del sistema del secondo ordine sia estremamente più difficoltosa, necessitando un numero molto superiore di iterazioni, a parità di residui numerici, con quella del primo ordine. Qui infatti, a causa della dilatazione dei tempi, dovuta appunto intrinsecamente all'utilizzo del suddetto metodo, ci si è bloccati ben prima, ottenendo una convergenza meno soddisfacente: la pendenza della curva che definiva i residui della simulazione era molto tenue e anche dopo qualche migliaio di iterazioni la situazione restava invariata.

Ciò nonostante si può considerare il livello di convergenza raggiunto come accettabile, considerando quindi i risultati valutabili e confrontabili tra di loro.

Come si può vedere dalla tabella, la caduta di pressione nella simulazione risolta con il sistema del secondo ordine è ben minore di quella ottenuta con il sistema del primo ordine, arrivando quasi a sfiorare un difetto del 20%.

D'altra parte, per quanto riguarda le seconde due simulazioni con la geometria "a spigoli", vi è un livello di convergenza migliore, raggiunto con un numero di iterazioni minore e in tempi più brevi per la prima simulazione, svolta con il metodo del primo

ordine, mentre anche in questo caso la simulazione con il metodo del secondo ordine raggiunge un livello dei residui meno soddisfacente, ma sempre migliore che nel gruppo precedente.

I risultati ottenuti rispecchiano l'andamento precedentemente illustrato nel caso di geometria "sferica": la soluzione del secondo ordine stima delle perdite di carico inferiori rispetto a quella del primo.

Dal punto di vista attuale sembrerebbe necessario l'utilizzo del sistema del secondo ordine, poiché la differenza tra le soluzioni è troppo elevata per essere trascurata. Tuttavia dalla Tabella 8 si può notare come le soluzioni ottenute siano diverse da quelle ottenute sperimentalmente.

Tabella 8. Confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni di taratura del metodo e i risultati sperimentali [4].

<i>tipo</i>	<i>metodo</i>	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	<i>errore %</i>
sferica	1 st order	1269.7	1100.3	15.4
sferica	2 nd order	1027.9	1100.3	-6.6
a spigoli	1 st order	1020.9	1458.9	-30.0
a spigoli	2 nd order	875.5	1458.9	-40.0

Il parametro *errore %* è stato calcolato come segue:

$$errore \% = \frac{\frac{\Delta p}{L} - \frac{\Delta p}{L_{exp}}}{\frac{\Delta p}{L_{exp}}} \times 100 \quad \text{Eq. 9}$$

Bisogna premettere che, sebbene riportati, i valori di errore percentuale per la tipologia "sferica" non siano da tenere in considerazione, in quanto le condizioni al contorno usate (*no slip wall* sulle pareti laterali del condotto) e la *mesh* troppo grossolana (celle di 1 mm di dimensione) non permettono di ottenere delle soluzioni sufficientemente precise da poter essere confrontate con i valori sperimentali. Tuttavia essi possono essere considerati per valutazioni differenziali. I risultati riportati in Tabella 7 e Tabella 8 mostrano un andamento calante dei valori calcolati all'aumentare dell'accuratez-

za; in Tabella 8 inoltre si può notare ulteriormente che la griglia di celle da 1 mm di dimensione è inadatta e fuorviante.

Per quanto riguarda la seconda coppia di risultati, molto più interessanti, si nota che il metodo del primo ordine porta ad una soluzione un po' più simile a quella sperimentale rispetto alla seconda simulazione, la quale sottostima maggiormente il fenomeno.

Dato che le perdite di carico diminuiscono all'aumentare della precisione del metodo e che, come si vedrà nei capitoli successivi, le soluzioni numeriche tendono maggiormente a sottostimare il fenomeno sperimentale che a sovrastimarlo [4], si può concludere che è sufficiente il metodo *upwind* del primo ordine per ottenere una precisione adeguata.

Per di più il rapporto tra precisione ottenuta e tempo impiegato avvantaggia enormemente il sistema del primo ordine, a confronto con un metodo (quello del secondo ordine) troppo lento per effettuare un lavoro sufficientemente vasto.

6. Analisi dei risultati

In questo capitolo saranno presentati e discussi i risultati ottenuti dalle simulazioni fluidodinamiche, al fine di confrontarle con i valori sperimentali. Questo lavoro si prodiga nel ricercare un modello che sia sfruttabile in futuro senza ricorrere forzatamente a costose analisi sperimentali.

Le varie simulazioni effettuate sono state suddivise in tre gruppi principali e distinti per geometrie e schiume testate:

- il primo gruppo che sarà riportato presenta schiume di rame, simulate tramite le geometrie già espone, nelle quali è stato fatto scorrere un flusso di aria a velocità, densità e viscosità dinamica diverse. I valori sperimentali saranno ripresi da un articolo di Mancin et al. [4];
- il secondo gruppo invece presenta le schiume di alluminio, nelle quali, come per il primo gruppo, il flusso di aria viene variato nei tre parametri che lo contraddistinguono. I valori sperimentali saranno ripresi da un altro articolo di Mancin et al. [5];
- il terzo ed ultimo gruppo infine contiene una serie di geometrie (riportate anche in Tabella 2), testate tutte con circa le stesse caratteristiche del flusso, soprattutto per quanto riguarda la velocità, in modo da eseguire uno studio sull'andamento delle perdite di carico al variare della densità relativa ρ_r per le schiume di alluminio e uno studio sulle perdite di carico al variare del numero di pori per pollice lineare PPI per le schiume di rame.

I risultati saranno proposti in alcune tabelle, nelle quali saranno visibili anche tutti i dati e le caratteristiche di ciascuna simulazione. Successivamente, tramite appositi grafici, saranno illustrati gli esiti delle simulazioni, dando un'idea più chiara su come le perdite di carico cambino a seconda della variazione di un parametro di interesse o come si differenzino rispetto alle curve di andamento sperimentale della caduta di pressione.

6.1. Schiume di rame

Le schiume di rame che sono state studiate presentano delle caratteristiche geometriche particolari: hanno la medesima densità relativa (circa 6.5%), ma diverso numero di pori per pollice lineare (5, 10, 20 e 40 PPI).

Qui di seguito è riportato un richiamo alle caratteristiche delle schiume di rame in esame.

Tabella 9. Caratteristiche geometriche sperimentali delle schiume di rame.

<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$ %	l_{fibra} [mm]	t_{fibra} [mm]	d_{cella} [mm]
5	6.5	1.890	0.495	5.345
10	6.6	1.739	0.432	4.918
20	6.5	1.402	0.320	3.965
40	6.4	0.999	0.244	2.825

6.1.1. Cu 5-6.5

Partendo quindi dalla prima schiuma, in Tabella 10 sono presentati i primi risultati riguardanti la schiuma di rame da 5 PPI di dimensione e densità relativa ρ_r pari a 6.5%.

Tutte le simulazioni riportate utilizzano il metodo *upwind* del primo ordine, il flusso è considerato sempre laminare e alle pareti vi è sempre la condizione di *symmetry*. Le rimanenti caratteristiche si possono vedere in tabella:

Tabella 10. Dati riguardanti le simulazioni della schiuma di rame da 5 PPI e densità relativa 6.5%, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [4] delle perdite di carico.

<i>tipo</i>	v $\left[\frac{m}{s}\right]$	ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	μ $\left[\frac{kg}{m\ s}\right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	<i>errore</i> %
sferica	2.199	1.114	1.900×10^{-5}	42.9	1003.4	1100.3	-8.8
sferica	3.621	1.155	1.884×10^{-5}	117.6	2749.9	2927.3	-6.1
sferica	4.301	1.153	1.883×10^{-5}	165.6	3872.3	4052.6	-4.5
sferica	5.004	1.171	1.881×10^{-5}	227.1	5310.3	5474.3	-3.0

<i>tipo</i>	$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$\mu \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	<i>errore</i> %
a spigoli	2.199	1.114	1.900×10^{-5}	39.0	912.6	1100.3	-17.1
a spigoli	3.621	1.155	1.884×10^{-5}	100.6	2352.4	2927.3	-19.6
a spigoli	4.301	1.153	1.883×10^{-5}	138.7	3243.2	4052.6	-20.0
a spigoli	5.004	1.171	1.881×10^{-5}	187.2	4377.3	5474.3	-20.0

Si considerino inizialmente le simulazioni con le "celle sferiche": i volumi di lavoro sono composti ovviamente da otto celle unitarie, con una griglia di calcolo composta di 1136770 elementi di 0.25 mm di dimensione.

I residui di convergenza ottenuti per queste simulazioni sono nell'ordine di 1×10^{-4} , che non è un risultato ottimale, ma è comunque un livello sufficiente per una precisione accettabile.

Le simulazioni sono caratterizzate da un andamento della velocità visibilmente crescente, affiancato da un andamento lievemente crescente di densità e decrescente della viscosità dinamica del fluido.

I risultati sono quelli riportati nella sesta e settima colonna, mentre nell'ottava colonna sono riportati i valori sperimentali di perdite di carico riscontrati con i suddetti valori del flusso [4].

Si nota come, all'aumentare della velocità, il parametro $\frac{\Delta p}{L}$ cresca in modo abbastanza regolare, come d'altra parte anche la controparte sperimentale. Tale fatto è piuttosto prevedibile, in quanto le perdite di carico, anche in un semplice tubo, sono funzione della velocità al quadrato. Per di più in un condotto fortemente ostacolato internamente, quale quello in oggetto di studio di *Figura 17*, le perdite sono molto soggette all'andamento della velocità.

Guardando ora i valori che assume il parametro *errore* %, cioè la differenza percentuale tra i risultati ottenuti e i valori sperimentali, si nota come esso non abbia grandi variazioni al variare dei parametri del flusso. Ciò è un fatto positivo, in quanto denota la buona riuscita delle simulazioni. Inoltre i valori limitati che esso raggiunge (in valore assoluto sempre inferiori al 10%) portano a concludere che il modello geometrico-numerico testato dia buoni riscontri con la realtà per la schiuma in questione.

I valori negativi dell'errore percentuale denotano che il modello scelto tende a sotto-stimare le perdite. La plausibile ragione per un comportamento del genere è rintracciabile nella reale struttura della schiuma: il reticolo che è stato costruito in *SolidWorks* [7] è estremamente regolare e si ripete con volumi uguali nello spazio; d'altra parte una vera schiuma è sostanzialmente un materiale stocastico, quindi le sue celle sono sempre disposte in modo casuale, fatto che rende difficile la ripetibilità della stessa. Inoltre essa presenta svariate irregolarità, come ad esempio delle celle con qualche faccia chiusa nell'interconnessione tra le fibre, che provocano un aumento di perdite di carico, a causa del fatto che il flusso si scontra con quelle superfici senza poter passare oltre, perciò parte dell'energia del fluido viene meno.

Passando alla seconda parte di simulazioni, sulle geometrie "a spigoli" è stata creata una *mesh* con elementi della stessa dimensione della precedente, cioè 0.25 mm, mentre il numero di celle create è leggermente minore al precedente, cioè 1012640. Questa differenza, come già spiegato, si riconduce alla differenza di costruzione delle stesse celle.

Con questo tipo di geometria si arriva ottimamente a valori dei residui di 1×10^{-7} conferendo una buona affidabilità nella qualità della soluzione.

I parametri del flusso velocità, densità e viscosità dinamica hanno gli stessi andamenti descritti per le prime simulazioni, mentre gli esiti riportati sono estremamente diversi dalle prime, per quanto riguarda i valori. Sebbene gli errori percentuali siano tutti vicini tra loro, dando l'idea di una buona risoluzione, e gli andamenti crescenti del parametro $\frac{\Delta p}{L}$ all'aumentare della velocità del flusso siano anche qui rispettati, i risultati numerici si discostano da quelli sperimentali. Essi sottostimano all'incirca del 20% la soluzione sperimentale.

In *Figura 20* è possibile vedere i valori calcolati del gradiente di pressione, confrontato con quello sperimentale:

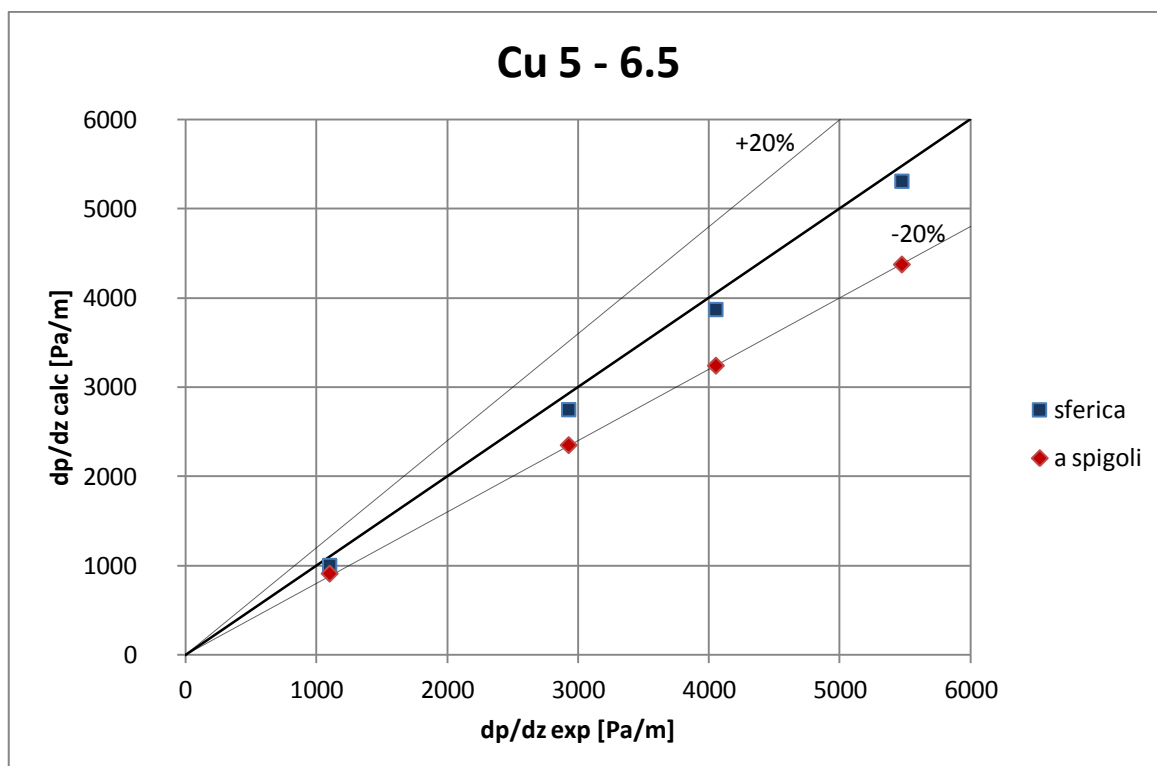


Figura 20. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 5 PPI.

Con questo metodo di rappresentazione si può vedere come si pongono i risultati delle simulazioni rispetto ai valori sperimentali ottenuti: mettendo in ascissa il gradiente della pressione sperimentale lungo il condotto (considerato uguale a $\frac{\Delta p}{L}$, in quanto quest'ultimo ne è il valore medio) e in ordinata quello calcolato nelle simulazioni, si trova subito quando i risultati ottenuti sottostimano o sovrastimano la caduta di pressione all'interno della schiuma.

Qualora le rilevazioni numeriche calcolate giacessero sulla bisettrice del quadrante cartesiano del grafico, significherebbe che la simulazione avrebbe riprodotto perfettamente l'andamento sperimentale; stando sopra alla retta bisettrice, i risultati sovrastimerebbero le perdite, mentre stando sotto le sottostimerebbero.

Due rette sono state rappresentate anche per definire le soglie di errore a -20% e +20%, in modo da aiutare la comprensione e l'immediatezza alla lettura. Inoltre si vuole conferire alle due rette un significato di soglia di accettabilità: un valore compreso nello spicchio di piano definito dalle due linee viene considerato di buona riuscita e fa-

vorevole; d'altra parte se un punto non è contenuto in tale spicchio, significa che la simulazione che lo definisce non ha avuto esito favorevole.

Grazie a tale grafico ora è più facile la visualizzazione degli andamenti descritti numericamente in Tabella 10: buona accuratezza da parte del modello "sferico", mentre precisione attorno al -20% del condotto "a spigoli".

Per un ulteriore punto di vista nelle ragioni di tali risultati in Tabella 11 sono state riportate le densità relative della schiuma ($\rho_{r,exp}$) e delle geometrie costruite nel software di CAD 3D ($\rho_{r,calc}$).

Tabella 11. Confronto tra le densità relative delle costruzioni e della schiuma di rame per la dimensione 5 PPI.

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$ %	$\rho_{r,calc}$ %	<i>errore medio</i> ¹⁴ %
sferica	5	6.5	4.2	-5.6
a spigoli	5	6.5	6.3	-19.2

Da tale confronto, senza considerare i risultati appena esposti e l'ultima colonna della qui proposta tabella, si direbbe intuitivamente che la costruzione con una densità relativa calcolata più fedele all'originale sia la più coerente anche nei risultati. Infatti una ρ_r minore dovrebbe portare a sottostime e una maggiore dovrebbe sovrastimare la caduta di pressione, in quanto tale parametro è direttamente proporzionale alla quantità di volume del reticolo della schiuma, decretandone teoricamente il grado di ostruzione.

Con l'ultima colonna, invece, questa teoria cade inesorabilmente, poiché la "cella sferica", con una densità relativa estremamente inferiore, ottiene risultati migliori di oltre il 10%.

Tale comportamento è spiegabile considerando che le due geometrie qui viste hanno una non trascurabile differenza tra di loro in fase di costruzione: una è stata svuotata tramite una sfera, mentre l'altra è stata svuotata e forata da poliedri. Proprio per questa ragione, come si può vedere in *Figura 21*, le sezioni di entrata sono ben diverse e il foro di passaggio nella faccia quadrata della cella è dimensionalmente differente da quel-

¹⁴ Si considera come la media degli di tutti gli errori raggiunti per quella geometria nella simulazione alle varie velocità considerate.

lo circolare: aumentando il parametro di costruzione s^{15} il cerchio in *Figura 21 (a)* si chiude molto prima del quadrato in *Figura 21 (b)*, creando un'ostruzione maggiore del semplice aumento di ρ_r , che dà esiti minori in caduta di pressione.

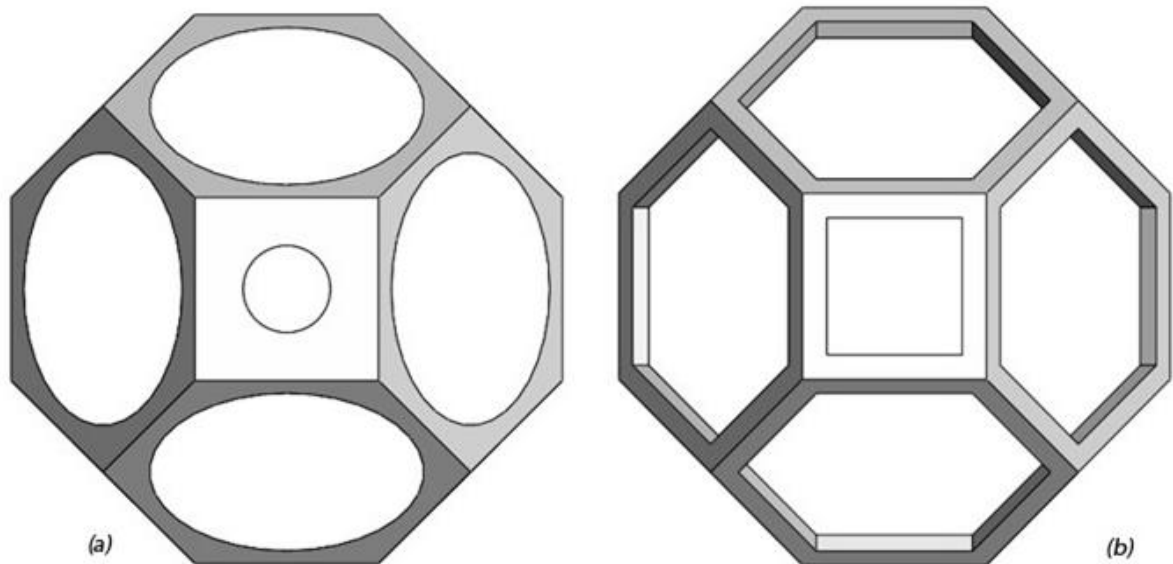


Figura 21. *Facce di entrata viste dal fluido per la "cella sferica" e la "cella a spigoli" per la schiuma di rame da 5 PPI.*

Secondo le tecniche costruttive, classificate nel capitolo "*Modelli geometrici sviluppati*", aumentando la densità relativa della "cella sferica" si potrebbe arrivare a chiudere il foro prima di raggiungere quella reale della schiuma (infatti successivamente le tecniche di costruzione alternative del terzo gruppo di simulazioni non saranno utilizzate anche sulle geometrie "a sfera").

Nonostante tali conclusioni il confronto eseguito tramite la Tabella 11 rimane utile nello studio delle differenze degli esiti all'interno di una stessa geometria, come si vedrà anche dalle seguenti analisi.

¹⁵ Questo parametro è descritto nel capitolo "*Modelli geometrici*" ed esplicitato in *Figura 11* e *Figura 13*.

6.1.2. Cu 10-6.6

Passando alla Tabella 12, si trovano ivi riportati i risultati riguardanti la schiuma di rame da 10 PPI e densità relativa pari a 6.6%.

Anche qui il metodo utilizzato è sempre quello *upwind* del primo ordine e il flusso è di tipo laminare. Le caratteristiche rimanenti sono riportate sotto:

Tabella 12. Dati riguardanti le simulazioni della schiuma di rame da 10 PPI e densità relativa 6.6%, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [4] delle perdite di carico.

<i>tipo</i>	v $\left[\frac{m}{s}\right]$	ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	μ $\left[\frac{kg}{m\ s}\right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	<i>errore</i> %
sferica	2.324	1.132	1.902×10^{-5}	46.4	1177.9	1458.9	-19.3
sferica	3.030	1.149	1.895×10^{-5}	78.3	1990.4	2339.0	-14.9
sferica	4.423	1.182	1.880×10^{-5}	169.2	4300.0	4990.1	-13.8
sferica	5.152	1.205	1.874×10^{-5}	233.1	5923.9	6777.3	-12.6
a spigoli	2.324	1.132	1.902×10^{-5}	40.2	1020.9	1458.9	-30.0
a spigoli	3.030	1.149	1.895×10^{-5}	65.6	1665.9	2339.0	-28.8
a spigoli	4.423	1.182	1.880×10^{-5}	134.9	3428.3	4990.1	-31.3
a spigoli	5.152	1.205	1.874×10^{-5}	182.8	4645.6	6777.3	-31.5

Nelle geometrie "sferiche" è stata utilizzata una griglia di calcolo da 1166953 elementi da 0.13 mm di dimensione, mentre per la struttura "a spigoli" possiede 1081145 celle della stessa dimensione, in numero minore per la diversità delle strutture, come precedentemente spiegato. Entrambe le *mesh* sono costituite interamente di elementi tetraedrici.

Il livello di convergenza dei residui numerici è anche qui ben differente, in quanto la convergenza per i "volumi sferici", che si ferma 1×10^{-4} , è ben più difficile di quelle del condotto formato da "celle a spigoli" (per le quali i residui arrivano a 1×10^{-7}), ma rimane comunque sufficiente per una precisione adatta agli scopi.

Le caratteristiche del fluido e del flusso riportano gli stessi andamenti del gruppo precedente: la velocità viene aumentata ad ogni simulazione, mentre la densità e la viscosità dinamica rimangono pressoché costanti.

Le cadute di pressione sono ancora crescenti con l'aumentare della velocità, sia per quelle calcolate che per quelle sperimentali, dimostrando la forte dipendenza delle stesse all'andamento delle velocità.

Tuttavia le differenze tra la terzultima e la penultima colonna aumentano, perciò i risultati sono molto più imprecisi del caso precedente: gli errori infatti sono molto più elevati, raggiungendo, nel caso della geometria "a spigoli", il 30%.

I dati descritti sono meglio evidenziati dalla *Figura 22*.

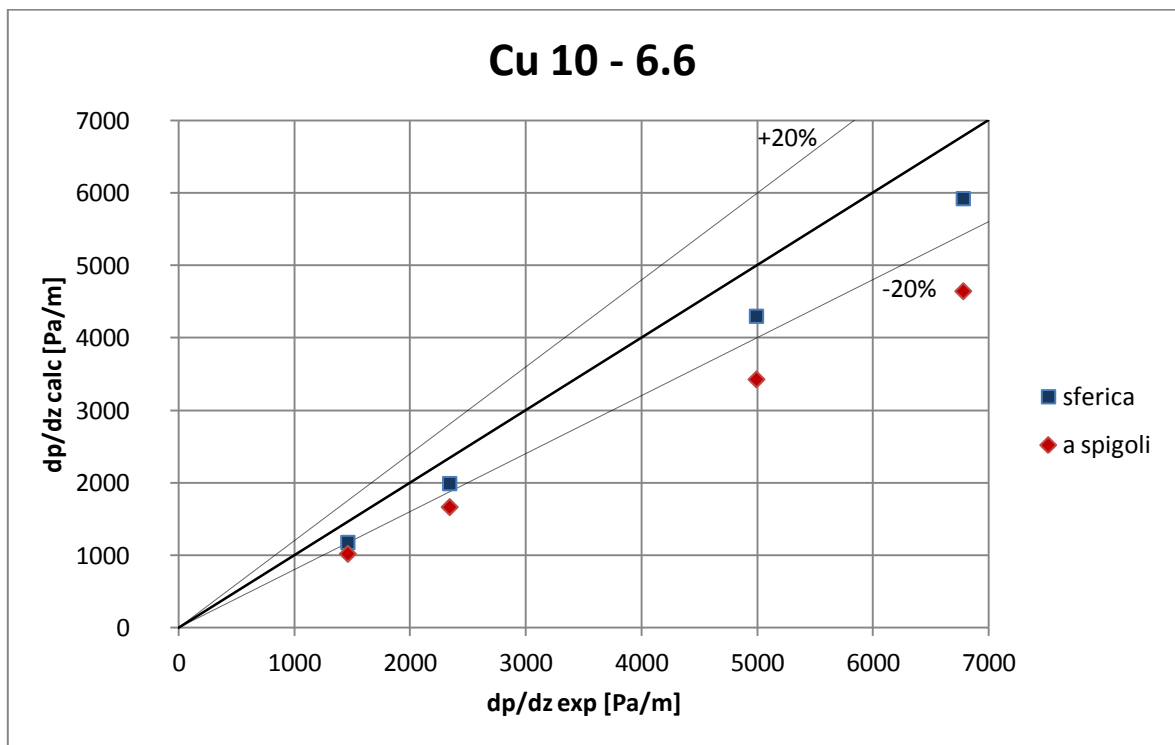


Figura 22. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 10 PPI.

Come già detto si vede che per la geometria "sferica" gli scarti rimangono contenuti entro il 20%, mentre per quella "a spigoli" sono superiori.

Le spiegazioni per queste sottostime sono in parte rimandabili al discorso espresso precedentemente sulla presenza di alcune imperfezioni e irregolarità nelle schiume reali; inoltre dalla seguente tabella, dove sono riportate le densità relative, si nota che quella calcolata è ancora più discostata da quella sperimentale rispetto alla schiuma precedente.

Tabella 13. Confronto tra le densità relative delle costruzioni e della schiuma di rame per la dimensione 10 PPI.

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$ %	$\rho_{r,calc}$ %	<i>errore medio</i> %
sferica	10	6.6	4.0	-15.1
a spigoli	10	6.6	5.7	-30.4

Confrontando i valori di Tabella 11 con quelli in Tabella 13 si nota che vi è un incremento minimo di $\rho_{r,exp}$ accompagnato da una diminuzione più sostanziosa di $\rho_{r,calc}$, portando a valori meno precisi del parametro *errore medio* %. Tale esito era prevedibile in quanto un minore volume solido dovrebbe portare a minori ostruzioni, quindi a perdite minori. Rimane comunque la teoria precedentemente esposta, secondo la quale contano principalmente la forma della cella immersa nel flusso e le reali irregolarità.

Perciò si nota un gran peggioramento degli esiti delle simulazioni: la tipologia "sferica" passa dal -5% di Tabella 11 al -15% delle schiume da 10 PPI di differenza media tra i risultati calcolati e quelli sperimentali, mentre quella "a spigoli" passa da un già un -19%, al limite, ad un eccessivo -30%.

Si deve concludere che la "cella a spigoli" finora non ha dato buoni esiti, mentre quella "sferica" presenta scostamenti ancora accettabili.

6.1.3. Cu 20-6.5

Guardando ora la Tabella 14, sono ivi riportati i risultati e le caratteristiche delle simulazioni per la schiuma di rame da venti pori per pollice lineare e con densità relativa pari a 6.5%.

Le caratteristiche comuni non riportate nella tabella sono il metodo adoperato nella risoluzione (*upwind* del primo ordine) e il tipo di flusso passante nel condotto (laminare). I restanti parametri sono presentati qui sotto in Tabella 14.

Tabella 14. Dati riguardanti le simulazioni della schiuma di rame da 20 PPI e densità relativa 6.5%, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [4] delle perdite di carico.

<i>tipo</i>	$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$\mu \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	<i>errore</i> %
sferica	2.047	1.128	1.892×10^{-5}	34.6	1089.4	1644.6	-33.8
sferica	2.801	1.146	1.881×10^{-5}	62.7	1976.4	2900.9	-31.9
sferica	3.508	1.163	1.875×10^{-5}	97.8	3082.2	4416.9	-30.2
sferica	4.900	1.200	1.870×10^{-5}	193.5	6099.6	8496.3	-28.2
a spigoli	2.047	1.128	1.892×10^{-5}	29.5	930.5	1644.6	-43.4
a spigoli	2.801	1.146	1.881×10^{-5}	51.4	1620.9	2900.9	-44.1
a spigoli	3.508	1.163	1.875×10^{-5}	77.6	2446.4	4416.9	-44.6
a spigoli	4.900	1.200	1.870×10^{-5}	146.3	4611.7	8496.3	-45.7

Le tipologie utilizzate sono sempre le stesse, cioè la "cella sferica" e quella "a spigoli", la quale finora non ha avuto ottimi riscontri con la realtà. Entrambi i volumi fluidi sono stati suddivisi in un reticolo di calcolo da elementi tetraedrici di 0.18 mm di dimensione. La *mesh* che si ottiene per la prima tipologia consta 1191026 elementi, mentre per la seconda struttura la griglia di calcolo è formata da 1132056 celle.

Il livello di convergenza raggiunto è sempre il medesimo ottenuto nelle altre simulazioni finora mostrate: una convergenza più difficile contraddistingue il primo tipo di condotto, con i residui numerici che raggiungono uno scarto di 1×10^{-4} , valore comunque sufficiente. D'altra parte la seconda tipologia raggiunge il rassicurante e preciso scarto di 1×10^{-7} dei residui, garantendo una riuscita ottima della simulazione.

I tre parametri caratterizzanti del fluido e del flusso d'aria (velocità, densità e viscosità dinamica) presentano i soliti andamenti già descritti nei precedenti raggruppamenti di simulazioni: la velocità cambia in ogni simulazione, mentre le rimanenti due variabili rimangono pressoché invariate.

Per quanto riguarda le perdite ottenute dal flusso simulato all'interno del condotto poroso, si vede anche qui un andamento crescente all'aumentare della velocità, che rispecchia quello delle altre schiume. Qui tuttavia si arriva ad errori percentuali ancora più elevati: da una parte si ha il condotto formato da celle sferiche, nel quale il flusso

simulato sottostima le perdite di mediamente il 30%, mentre la seconda tipologia arriva addirittura a superare negativamente la soglia di -40%.

Questi esiti confermano il fatto che la "cella a spigoli" sia, come già concluso, inadatta agli scopi, in quanto la stima della caduta di pressione raggiunge risultati in difetto di quasi il cinquanta per cento, valore inaccettabile in un modello scientifico.

Per quanto riguarda invece le simulazioni effettuate sulla geometria "sferica", in questa serie si è avuto un ulteriore peggioramento nella precisione, portando anche in questo caso al superamento della soglia dell'"accettabilità" del $\pm 20\%$, infatti i risultati danno errori percentuali negativamente superiori a -30%.

A causa dei fattori elencati bisogna concludere che pure questa tipologia, sebbene migliore della precedente, non può soddisfare i requisiti imposti.

In *Figura 23* si può vedere un confronto tra i gradienti di pressione numerici e sperimentali:

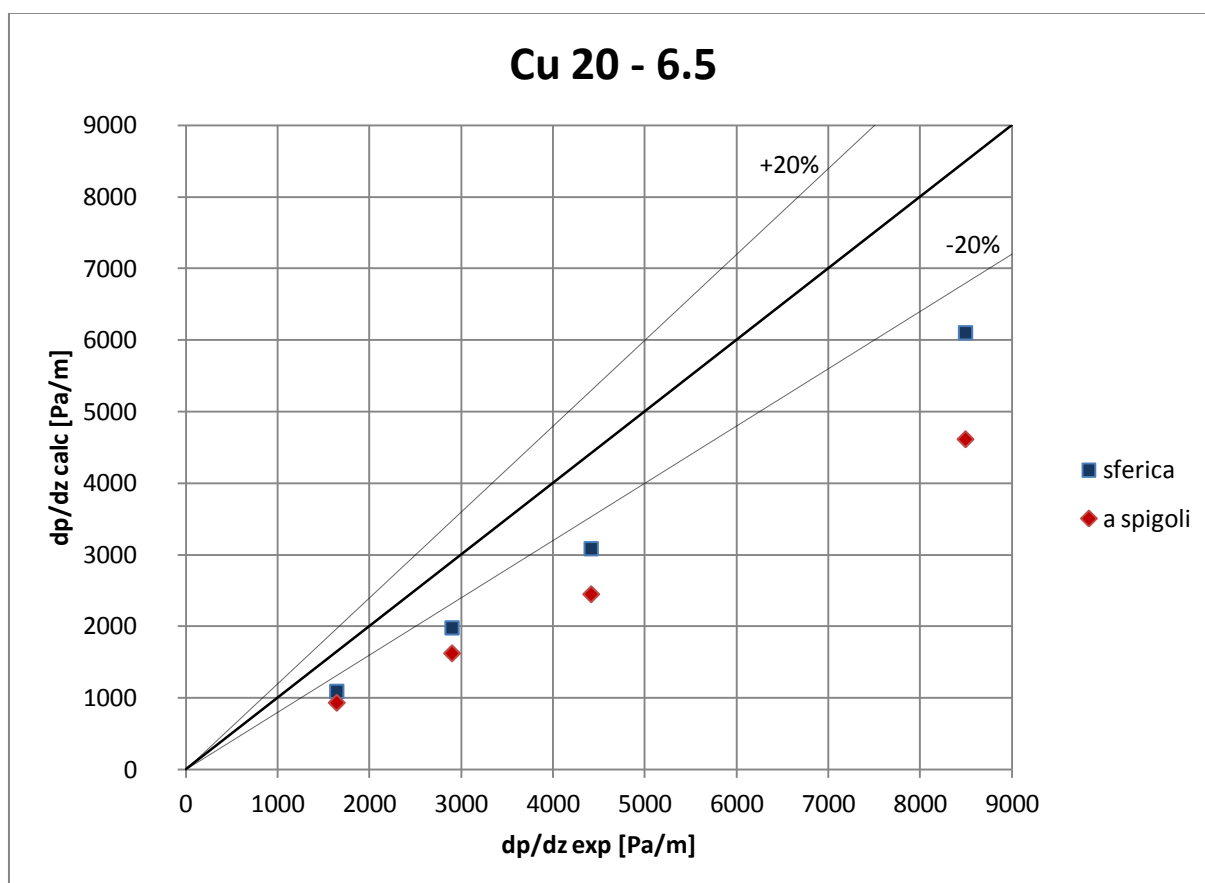


Figura 23. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 20 PPI.

I risultati numerici risultano essere al di sotto della retta del -20%, constatando che per tale schiuma entrambi i modelli siano inadatti allo scopo, soprattutto la geometria "a spigoli", la quale conduce a sottostime eccessive.

Guardando anche Tabella 15, si nota quanto elevata sia la differenza tra le densità relative "sperimentale" e "calcolata":

Tabella 15. Confronto tra le densità relative delle costruzioni e della schiuma di rame per la dimensione 20 PPI.

<i>tipologia</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}\%$	$\rho_{r,calc}\%$	<i>errore medio</i> %
sferica	20	6.5	3.7	-31.0
a spigoli	20	6.5	4.8	-44.5

Questa sostanziale differenza porta agli esiti visibili nell'ultima colonna della tabella, cioè a pessimi risultati, non sfruttabili.

6.1.4. Cu 40-6.4

L'ultima schiuma in rame è quella da 40 PPI di dimensione e con densità relativa nominale da 6.4%.

Le solite caratteristiche comuni delle simulazioni sono il metodo *upwind* del primo ordine e il flusso di tipo laminare; le altre proprietà sono riportate in Tabella 16.

Tabella 16. Dati riguardanti le simulazioni della schiuma di rame da 40 PPI e densità relativa 6.4%, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [4] delle perdite di carico.

<i>tipo</i>	$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	<i>errore</i> %
sferica	1.953	1.138	1.895×10^{-5}	36.7	1623.1	1779.5	-8.8
sferica	2.715	1.158	1.881×10^{-5}	66.9	2957.8	3359.3	-12.0
sferica	3.459	1.177	1.872×10^{-5}	106.3	4702.5	5383.3	-12.6
sferica	4.850	1.216	1.859×10^{-5}	209.8	9281.2	10438.1	-11.1

<i>tipo</i>	$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$\mu \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	<i>errore</i> %
a spigoli	1.953	1.138	1.895×10^{-5}	33.7	1491.7	1779.5	-16.2
a spigoli	2.715	1.158	1.881×10^{-5}	59.6	2634.4	3359.3	-21.6
a spigoli	3.459	1.177	1.872×10^{-5}	91.9	4067.3	5383.3	-24.4
a spigoli	4.850	1.216	1.859×10^{-5}	172.9	7648.8	10438.1	-26.7

Trattando sempre le solite due tipologie, cioè quella "sferica" e "a spigoli", le *mesh* sono state costruite con celle di 0.13 mm di dimensione, portando la prima geometria ad una griglia da 1166953 elementi, mentre la seconda ne ha ottenuti 1081145.

Le simulazioni svolte hanno raggiunto il già mostrato livello di convergenza dei residui: gli scarti numerici si sono assestati sempre ai medesimi valori, rispettivamente di 1×10^{-4} e 1×10^{-7} ; tali livelli sono per la prima sufficiente e per la seconda ottimo.

I tre parametri del flusso mostrano i soliti andamenti, cioè crescente fortemente per la velocità e leggermente per la densità; la viscosità cala lievemente.

Ancora una volta, come atteso, le perdite di carico aumentano con la velocità del flusso, perciò si trovano valori crescenti per i parametri Δp e $\frac{\Delta p}{L}$ in tabella, similmente al valore calcolato sperimentalmente da Mancin et al. [4].

I valori dell'*errore* % si assestano attorno a quelli trovati per la schiuma da 5 PPI, solo leggermente meno precisi: come si può notare la tipologia "sferica" ottiene precisioni all'incirca attorno al -10%, mentre la seconda geometria si pone attorno al -20%, con divari tra loro talvolta non indifferenti (ci si muove anche da un -16% della simulazione a velocità $1.953 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ fino al -26% dell'ultima simulazione a velocità pari a $4.850 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

Di seguito in *Figura 24* è riportato il grafico rappresentante gli scostamenti tra i valori numerici e sperimentali.

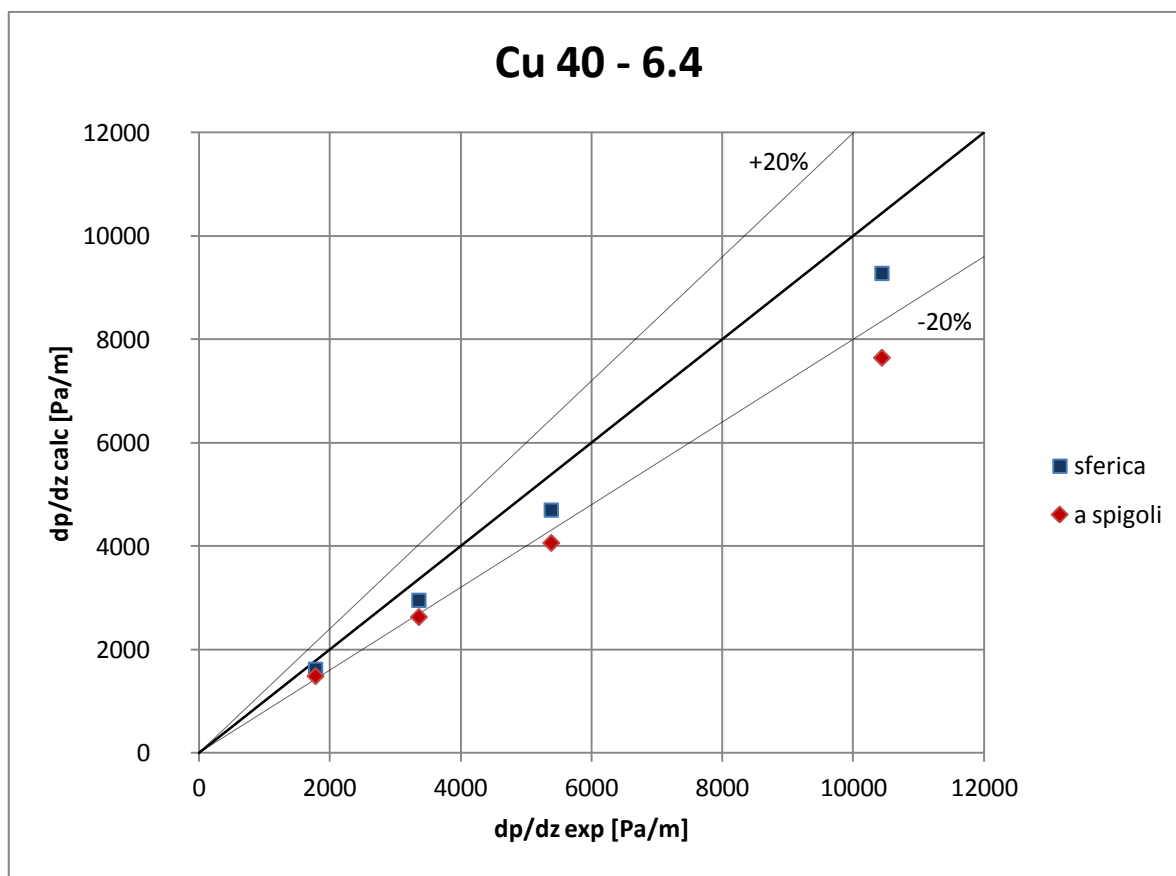


Figura 24. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 40 PPI.

Si può notare un miglioramento degli esiti, che portano la "cella sferica" ad errori contenuti, lasciando però la già, in altre occasioni, poco accurata geometria "a spigoli" al di fuori della porzione accettabile del grafico.

Si trovano ancora, anche in questa schiuma simulata, valori in difetto delle perdite di carico, suffragati ancora una volta dalle teorie precedentemente espresse, cioè la presenza di irregolarità nella schiuma reale e l'utilizzo dello spessore sperimentale della fibra nel modello geometrico probabilmente in un modo non del tutto appropriato.

Difatti, guardando anche questa volta i valori di confronto tra le densità relative delle geometrie in Tabella 17; si nota come le densità relative risultanti dai modelli geometrici si discostino dai valori reali.

Tabella 17. Confronto tra le densità relative delle costruzioni e della schiuma di rame per la dimensione 40 PPI.

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$ %	$\rho_{r,calc}$ %	<i>errore medio</i> %
sferica	40	6.4	3.9	-11.1
a spigoli	40	6.4	5.5	-22.2

Anche qui, come c'era da aspettarsi, i risultati sottostimati sono accompagnati anche da un difetto nel campo $\rho_{r,calc}$. Tale fatto giustifica, almeno in parte, gli errori medi percentuali a cui si arriva.

6.1.5. Confronti

Confrontando la Tabella 17 con le precedenti (Tabella 11, Tabella 13 e Tabella 15), si nota che la variazione della densità relativa del modello CAD è strettamente legata ai buoni o cattivi risultati che le simulazioni possono produrre: si vede che aumentando il difetto di massa (quindi diminuendo la densità relativa) generalmente gli errori nella stima delle perdite di carico aumentano, diventando sempre più negativi in punti percentuali.

Un'ulteriore caratteristica dei flussi in schiume porose può essere estratta dai valori presenti in Tabella 18.

Tabella 18. Dati ed esiti di simulazioni già proposte su schiume di rame di densità relativa circa 6.5%, con il fluido dotato sempre della stessa velocità, circa 5 m/s.

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	v $\left[\frac{m}{s}\right]$	ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	μ $\left[\frac{kg}{m\ s}\right]$	$\frac{\Delta p}{L}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	<i>errore</i> %
sferica	5	5.004	1.171	1.881×10^{-5}	5310.3	5474.3	-3.0
sferica	10	5.152	1.205	1.874×10^{-5}	5923.9	6777.3	-12.6
sferica	20	4.900	1.200	1.870×10^{-5}	6099.6	8496.3	-28.2
sferica	40	4.850	1.216	1.859×10^{-5}	9281.2	10438.1	-11.1

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$\mu \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	<i>errore</i> %
a spigoli	5	5.004	1.171	1.881×10^{-5}	4377.3	5474.3	-20.0
a spigoli	10	5.152	1.205	1.874×10^{-5}	4645.6	6777.3	-31.5
a spigoli	20	4.900	1.200	1.870×10^{-5}	4611.7	8496.3	-45.7
a spigoli	40	4.850	1.216	1.859×10^{-5}	7648.8	10438.1	-26.7

Queste simulazioni sono già state presentate precedentemente, ma sono ora suddivise tra loro in gruppi differenti. Il fattore che le accomuna è il valore della velocità del deflusso che si aggira attorno a $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Per una velocità costante si nota che il gradiente delle pressioni ha un andamento crescente con l'aumentare dei pori per pollice della schiuma¹⁶. La colonna delle perdite numeriche calcolate mostra lo stesso andamento (a meno dell'errore percentuale) di quelle sperimentali¹⁷, conferendo alle strutture create (sebbene anche molto imprecise) un lato positivo nel seguire le tendenze sperimentali.

Tale fatto è molto importante per le future valutazioni sui risultati delle schiume di alluminio, le quali mostreranno un comportamento molto differente che sarà confrontato con questi valori.

Di seguito sono riportati dei grafici riassuntivi dove sono mostrati gli andamenti generali per entrambe le geometrie utilizzate.

Partendo da *Figura 25*, sono presentati tutti i risultati per la geometria "sferica" trovati nelle simulazioni delle schiume di rame, cioè nelle simulazioni del primo dei tre gruppi inizialmente considerati.

¹⁶ Le densità relative non sono state riportate in quanto, essendo molto simili tra loro, non influiscono nelle tendenze.

¹⁷ Questo è vero a meno del caso della struttura "a spigoli", che ha una piccola inversione nell'andamento tra la schiuma da 10 e 20 PPI. Dato che tale geometria ha già dimostrato di non essere in grado di rappresentare in modo sufficientemente coerente i risultati, si può in parte trascurare questa piccola divergenza dall'andamento generale. Inoltre si vede che tra le due schiume appena citate vi è anche una piccola diminuzione di velocità, la quale è, facilmente, la diretta responsabile di tale controtendenza.

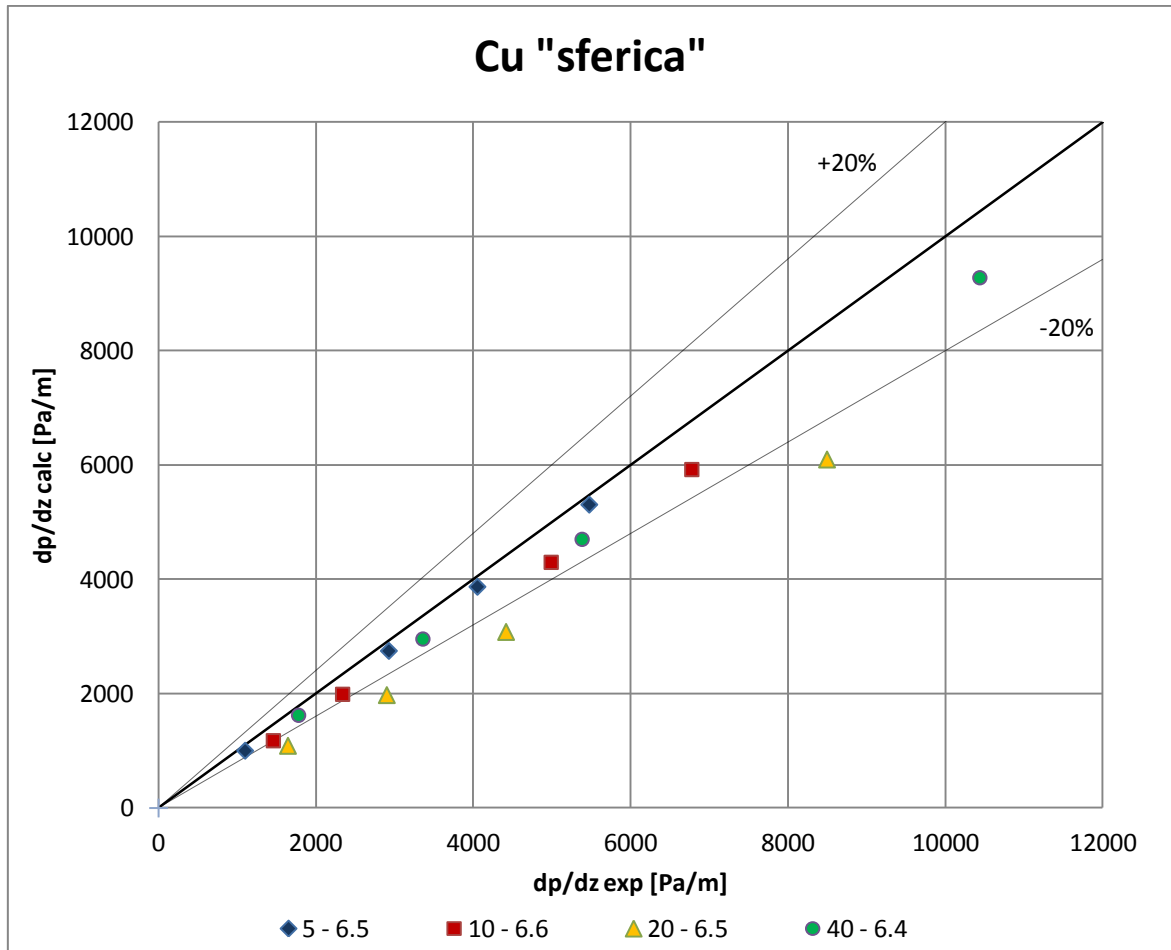


Figura 25. Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "sferiche" per le schiume di rame.

Come già mostrato prima, gli scostamenti tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche ed i valori sperimentali sono contenuti nello spicchio tra +20% e -20% in tutti i casi, tranne per la schiuma da 20 PPI, la quale, come si è visto in Tabella 15, è mediamente discostata del 30% in difetto.

Le sottostime risultano quindi presenti in ogni simulazione, ma rimangono quasi sempre contenute, portando a valutazioni abbastanza buone. Tuttavia esse non del tutto soddisfacenti, come appunto per i segnalatori della schiuma da 20 PPI, in quanto allontanandosi palesemente dalle stime delle altre simulazioni, non danno continuità nei risultati.

Il grafico di *Figura 26*, invece, riassume i risultati per le simulazioni delle schiume di rame tramite la geometria "a spigoli".

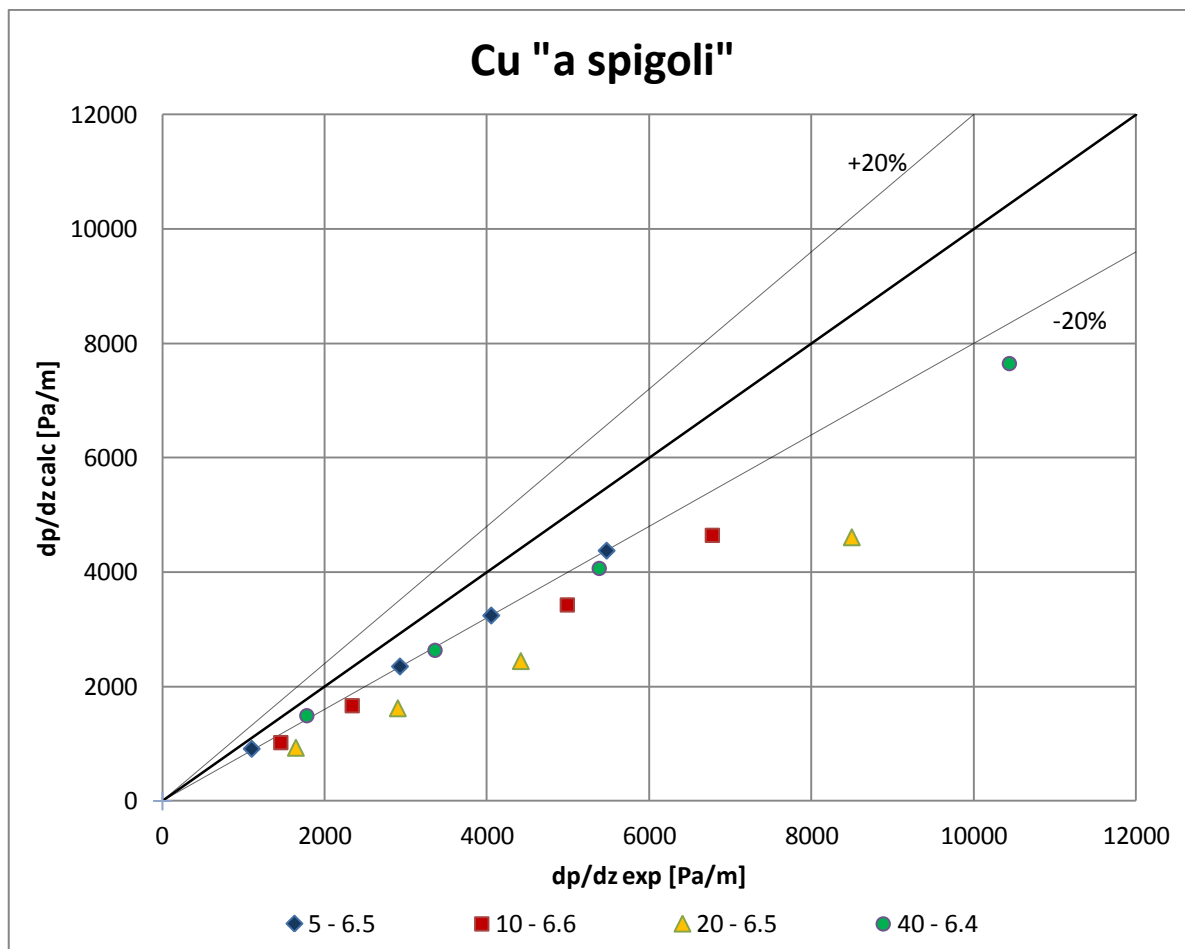


Figura 26 Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "a spigoli" per le schiume di rame.

Qui si vede che praticamente tutte (a meno della schiuma da 5 PPI) danno risultati estremamente sottostimati. Solo i punti della schiuma da 5 PPI portano a valori accettabili attorno al 20%, mentre tutti i restanti esiti sono pressoché inutilizzabili per tracciare un andamento che segua sufficientemente la realtà.

Si conclude che quindi mentre la geometria "sferica" è abbastanza buona, quella "a spigoli" è del tutto inadeguata al calcolo.

6.2. Schiume di alluminio

Trattate le prime schiume di rame, si passa ora alle tre schiume di alluminio, che, a differenza delle precedenti, presentano tutte lo stesso valore di pori per pollice (10 PPI) ma densità relativa della schiuma crescente.

Qui di seguito è riportato un richiamo alle caratteristiche delle schiume di rame in esame.

Tabella 19. Caratteristiche geometriche sperimentali delle schiume di alluminio.

PPI	$\rho_{r,exp}$ %	l_{fibra} [mm]	t_{fibra} [mm]	d_{cella} [mm]
10	4.4	1.351	0.445	3.821
10	6.6	1.785	0.450	5.048
10	9.7	1.870	0.529	5.289

6.2.1. Al 10-4.4

Iniziando con la prima, in Tabella 20 sono stati riportati i risultati e le caratteristiche delle simulazioni riguardanti la schiuma in alluminio da 10 PPI e densità relativa pari a 4.4%.

In ogni simulazione riportata è stato utilizzato il metodo *upwind* del primo ordine, il flusso è considerato sempre laminare e alle pareti vi è sempre la condizione di *symmetry*. Le rimanenti caratteristiche si possono vedere in tabella.

Tabella 20. Dati riguardanti le simulazioni della schiuma di alluminio da 10 PPI e densità relativa 4.4%, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [5] delle perdite di carico.

tipo	v $\left[\frac{m}{s}\right]$	ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	μ $\left[\frac{kg}{m\ s}\right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}}$ $\left[\frac{Pa}{m}\right]$	errore %
sferica	2.430	1.130	1.887×10^{-5}	66.4	2171.4	1879.9	15.5
sferica	3.307	1.157	1.874×10^{-5}	123.2	4030.1	3441.8	17.1
sferica	3.781	1.154	1.867×10^{-5}	159.4	5214.3	4276.6	21.9
sferica	4.506	1.171	1.863×10^{-5}	228.4	7471.5	6016.7	24.2
sferica	5.154	1.190	1.859×10^{-5}	301.3	9856.2	7836.0	25.8

<i>tipo</i>	v [$\frac{m}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\frac{kg}{m s}$]	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ [$\frac{Pa}{m}$]	$\frac{\Delta p}{L_{exp}}$ [$\frac{Pa}{m}$]	<i>errore</i> %
a spigoli	2.430	1.130	1.887×10^{-5}	78.0	2550.9	1879.9	35.7
a spigoli	3.307	1.157	1.874×10^{-5}	141.6	4632.0	3441.8	34.6
a spigoli	3.781	1.154	1.867×10^{-5}	181.8	5947.1	4276.6	39.1
a spigoli	4.506	1.171	1.863×10^{-5}	257.5	8423.4	6016.7	40.0
a spigoli	5.154	1.190	1.859×10^{-5}	338.0	11056.7	7836.0	41.1

La geometria "sferica" è stata suddivisa in una griglia dotata di 1118001 elementi da 0.19 mm di dimensione; d'altra parte il volume di lavoro creato tramite "celle a spigoli" possiede 1040907 celle, anch'esse tetraedriche, da 0.185 mm di lato. A differenza di tutti i casi precedenti, qui la dimensione delle celle tra le due geometrie è stata diversificata a causa del fatto che, mantenendola invariata, il numero di celle che sarebbero andate a formare la geometria "a spigoli" sarebbe sceso troppo sotto la soglia di un milione. Per tale ragione, riducendo anche di solo un valore minimo, si è rimasti attorno al valore desiderato.

La convergenza considerata soddisfacente rimane quella trattata in precedenza, cioè un residuo numerico di 1×10^{-4} per le "celle sferiche", che sono più difficili nel raggiungimento della soluzione, e 1×10^{-7} per quelle "a spigoli", le quali ottengono sempre un valore ottimale.

Osservando quindi i risultati si vede come la differenza di pressione tra monte e valle del flusso sia crescente con la velocità come già visto in precedenza per le schiume di rame.

La grande differenza che balza all'occhio tra questo gruppo di simulazioni a confronto con tutte quelle svolte sinora è che gli errori percentuali non portano come prima il segno negativo. Ciò implica che le perdite sono state sovrastimate piuttosto che, come sempre finora, sottostimate.

Un confronto tra i risultati numerici e sperimentali sul gradiente di pressione può essere visto in *Figura 27*, dove le rilevazioni numeriche delle due tipologie sono state inserite e trovate al limite del +20%, o ben al di sopra di esso.

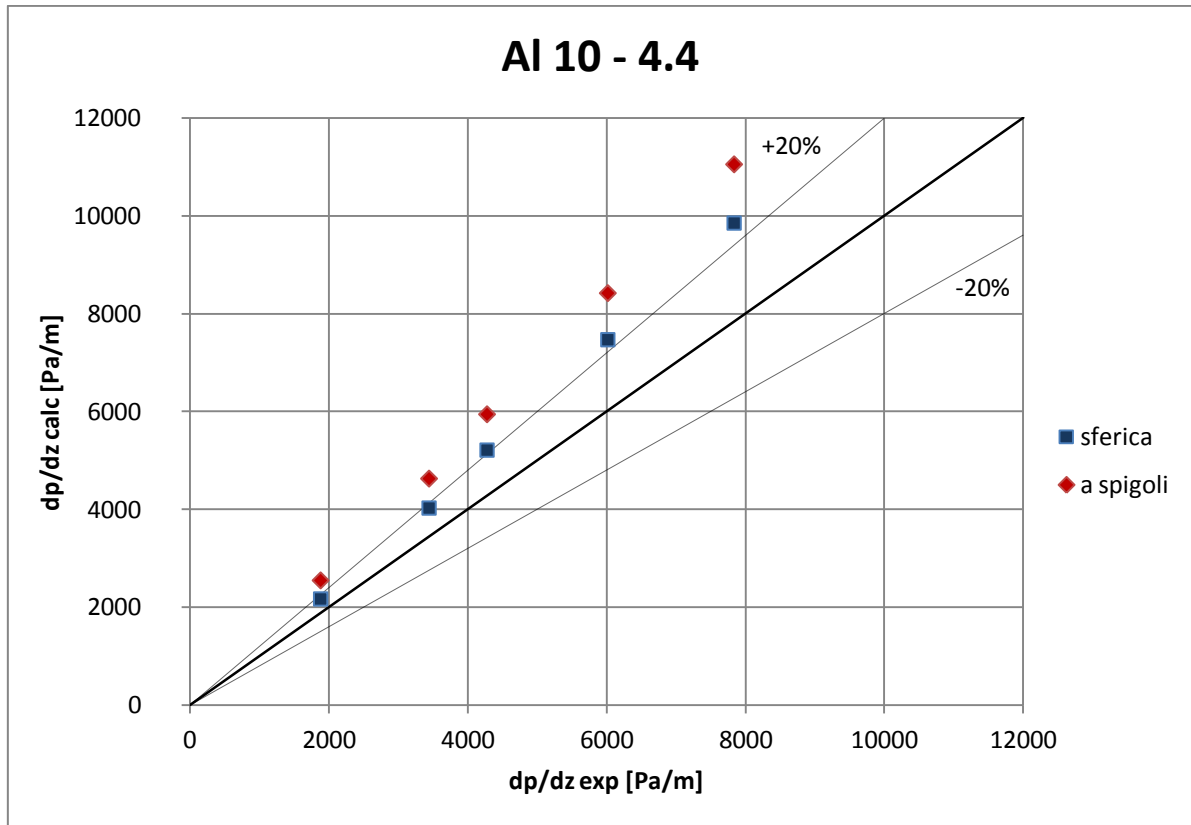


Figura 27. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in alluminio da 4.4% di densità relativa.

Per tentare di spiegare le ragioni di tali andamenti si farà ricorso, come già effettuato, ad una serie di dati sulla geometria in questione, visibili in Tabella 21.

Tabella 21. Confronto tra le densità relative delle costruzioni e della schiuma di alluminio per la dimensione 10 PPI e densità di 4.4%.

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$ %	$\rho_{r,calc}$ %	<i>errore medio</i> %
sferica	10	4.4	5.1	20.9
a spigoli	10	4.4	9.6	38.1

Anche in questo caso la geometria "sferica" simula mediamente meglio gli andamenti del gradiente di pressione rispetto alla "cella a spigoli".

Si vede inoltre nella quarta colonna che la densità relativa "calcolata" è, diversamente dalle costruzioni trattate precedentemente, maggiore di quella "sperimentale". Questo in parte spiega la sovrastima dei risultati, in quanto vi è più massa solida che

spazio vuoto per far scorrere il deflusso, portando ad un aumento delle ostruzioni allo scorrere dell'aria.

Più avanti si tratterà nuovamente questa schiuma e, incrociando i risultati con quelli che saranno proposti di seguito, si giungerà ad una spiegazione migliore degli esiti.

6.2.2. Al 10-6.6

Si presentano ora i risultati per la schiuma di alluminio sempre con 10 PPI, ma con una densità relativa ρ_r di 6.6%.

Le simulazioni sono state svolte con il metodo *upwind* del primo ordine, il flusso è considerato sempre laminare e alle pareti vi è sempre la condizione di *symmetry*. Le rimanenti caratteristiche sono riportate in Tabella 22.

Tabella 22. Dati riguardanti le simulazioni della schiuma di alluminio da 10 PPI e densità relativa 6.6%, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [5] delle perdite di carico.

<i>tipo</i>	v [$\frac{m}{s}$]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	μ [$\frac{kg}{m s}$]	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L}$ [$\frac{Pa}{m}$]	$\frac{\Delta p}{L_{exp}}$ [$\frac{Pa}{m}$]	<i>errore</i> %
sferica	2.220	1.128	1.892×10^{-5}	42.9	1062.1	1293.2	-17.9
sferica	3.305	1.158	1.878×10^{-5}	95.1	2354.5	2776.3	-15.2
sferica	3.909	1.156	1.875×10^{-5}	132.3	3275.6	3680.3	-11.0
sferica	4.856	1.177	1.868×10^{-5}	206.5	5112.7	5671.0	-9.8
a spigoli	2.220	1.128	1.892×10^{-5}	37.5	928.7	1293.2	-28.2
a spigoli	3.305	1.158	1.878×10^{-5}	78.7	1949.5	2776.3	-29.8
a spigoli	3.909	1.156	1.875×10^{-5}	107.3	2656.6	3680.3	-27.8
a spigoli	4.856	1.177	1.868×10^{-5}	163.5	4048.0	5671.0	-28.6

Il volume di lavoro formato da "celle sferiche" è stato "meshato" con 1139434 elementi tetraedrici da 0.235 mm di grandezza; la geometria a spigoli è stata suddivisa in celle dello stesso tipo e dimensione, raggiungendo i 1041272 elementi.

Il livello di convergenza raggiunto è sempre il medesimo per entrambi i tipi di geometria, considerato sufficiente in entrambi i casi (1×10^{-4} per la "sferica", mentre 1×10^{-7} per quella "a spigoli").

Il parametro *errore* % segna andamenti migliori rispetto alla schiuma precedente, mantenendo sempre la differenza della geometria "sferica" al di sotto della soglia del 20%¹⁸. D'altra parte la geometria "a spigoli" dimostra ancora una volta la sua incapacità di seguire sufficientemente bene gli andamenti reali della schiuma che simula.

Si riscontra inoltre un ritorno a valori negativi dell'errore percentuale: il modello torna perciò a sottostimare risultati ottenuti sperimentalmente dagli esperimenti come in precedenza.

In *Figura 28* si può vedere un confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in alluminio da 6.6% di densità relativa.

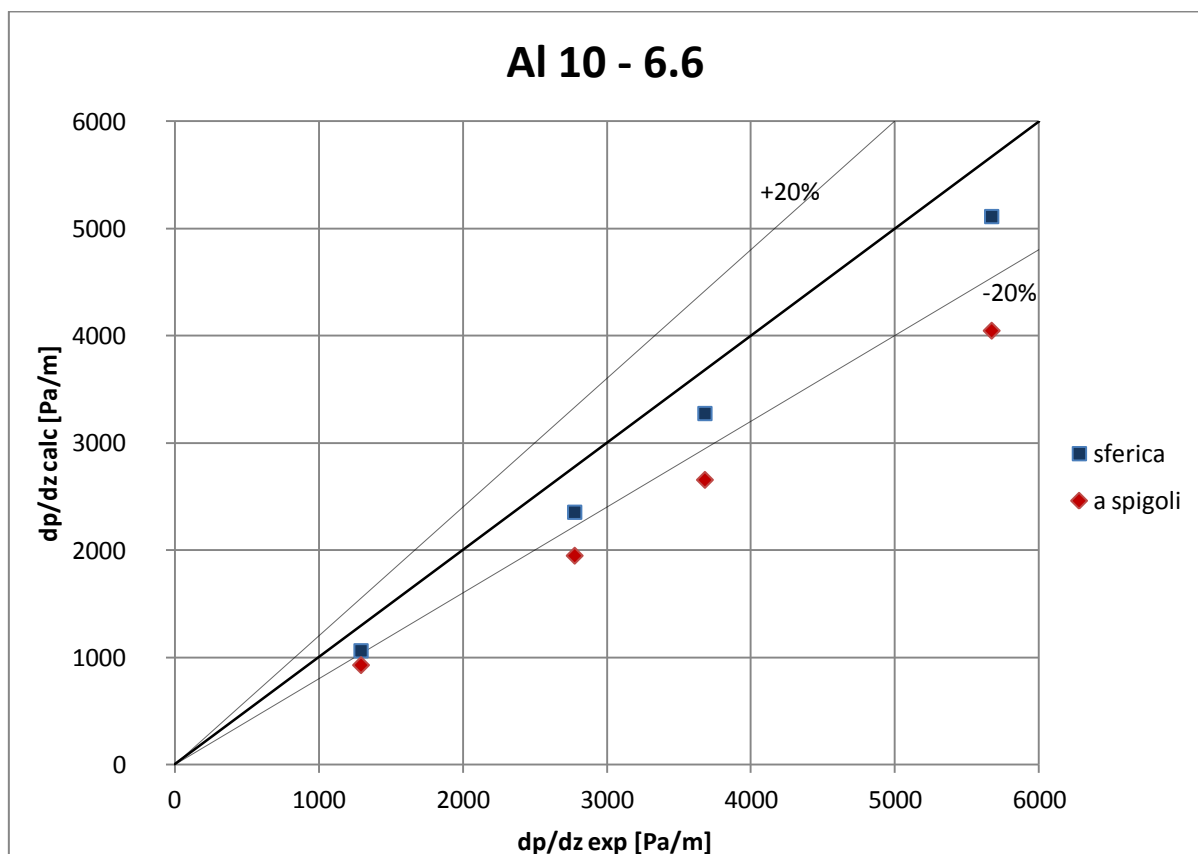


Figura 28. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in alluminio da 6.6% di densità relativa.

¹⁸ Considerando i valori assoluti delle percentuali.

Si nota come la geometria "sferica" sia contenuta nello spicchio $\pm 20\%$, conferendosi quindi una buona affidabilità, d'altra parte, come si vede, la geometria "a spigoli" non ha buone affinità con il caso sperimentale, portando a pessimi risultati.

In Tabella 23 si vede che vi è un difetto di massa tra la densità "calcolata" e "sperimentale", confermando quanto già visto in precedenza.

Tabella 23. Confronto tra le densità relative delle costruzioni e della schiuma di alluminio per la dimensione 10 PPI e densità di 6.6%.

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}\%$	$\rho_{r,calc}\%$	<i>errore medio</i> %
sferica	10	6.6	4.0	-13.5
a spigoli	10	6.6	5.8	-28.6

Infatti la sottostima è in parte causata da questo difetto e in parte dalle irregolarità della schiuma reale, che la rende sostanzialmente diversa da quella creata nel software CAD.

6.2.3. Al 10-9.7

Valutando ora il deflusso di aria nella schiuma di alluminio da 10 PPI e densità relativa di 9.7%, in Tabella 24 si possono vedere le condizioni del fluido e i risultati ottenuti.

Ogni simulazione è stata svolta con il metodo *upwind* del primo ordine, il flusso è considerato sempre laminare e alle pareti vi è sempre la condizione di *symmetry*. Le rimanenti caratteristiche sono riportate di seguito in Tabella 24.

Tabella 24. Dati riguardanti le simulazioni della schiuma di alluminio da 10 PPI e densità relativa 9.7%, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [5] delle perdite di carico.

<i>tipo</i>	$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$\mu \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$	$\Delta p \text{ [Pa]}$	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right]$	<i>errore</i> %
sferica	2.527	1.149	1.873×10^{-5}	62.9	1486.3	1508.3	-1.5
sferica	3.328	1.168	1.871×10^{-5}	110.4	2609.1	2558.9	2.0
sferica	3.915	1.180	1.861×10^{-5}	154.5	3651.3	3364.1	8.5
sferica	4.638	1.196	1.861×10^{-5}	219.2	5180.4	4697.9	10.3
sferica	5.040	1.209	1.854×10^{-5}	262.0	6191.9	5725.9	8.1
a spigoli	2.527	1.149	1.873×10^{-5}	58.8	1389.4	1508.3	-7.9
a spigoli	3.328	1.168	1.871×10^{-5}	99.6	2354.8	2558.9	-8.0
a spigoli	3.915	1.180	1.861×10^{-5}	136.6	3228.3	3364.1	-4.0
a spigoli	4.638	1.196	1.861×10^{-5}	190.9	4511.6	4697.9	-4.0
a spigoli	5.040	1.209	1.854×10^{-5}	226.1	5343.5	5725.9	-6.7

Le due geometrie sono le medesime viste sinora. La prima è stata suddivisa in un reticolo da 1252011 elementi tetraedrici da 0.24 mm di dimensione; la seconda è stata "meshata" tramite celle della stessa dimensione, totalizzando un reticolo che ne consta 1097509.

Il livello di convergenza, considerato sufficiente, raggiunto è il solito di tutte le altre simulazioni: 1×10^{-4} per la geometria "sferica" e 1×10^{-7} per quella "a spigoli".

Nella colonna degli errori riscontrati tra prove sperimentali e numeriche si trovano valori buoni, che non eccedono mai la soglia $\pm 20\%$ per entrambe le geometrie. Questa volta anche la "cella a spigoli" sembra simulare correttamente l'andamento sperimentale.

Anche dalla *Figura 29* si vede subito che i risultati numerici sono compresi nello spicchio delle percentuali di errore considerate limite e che la geometria "a spigoli" è più vicina alla bisettrice rappresentante l'andamento sperimentale.

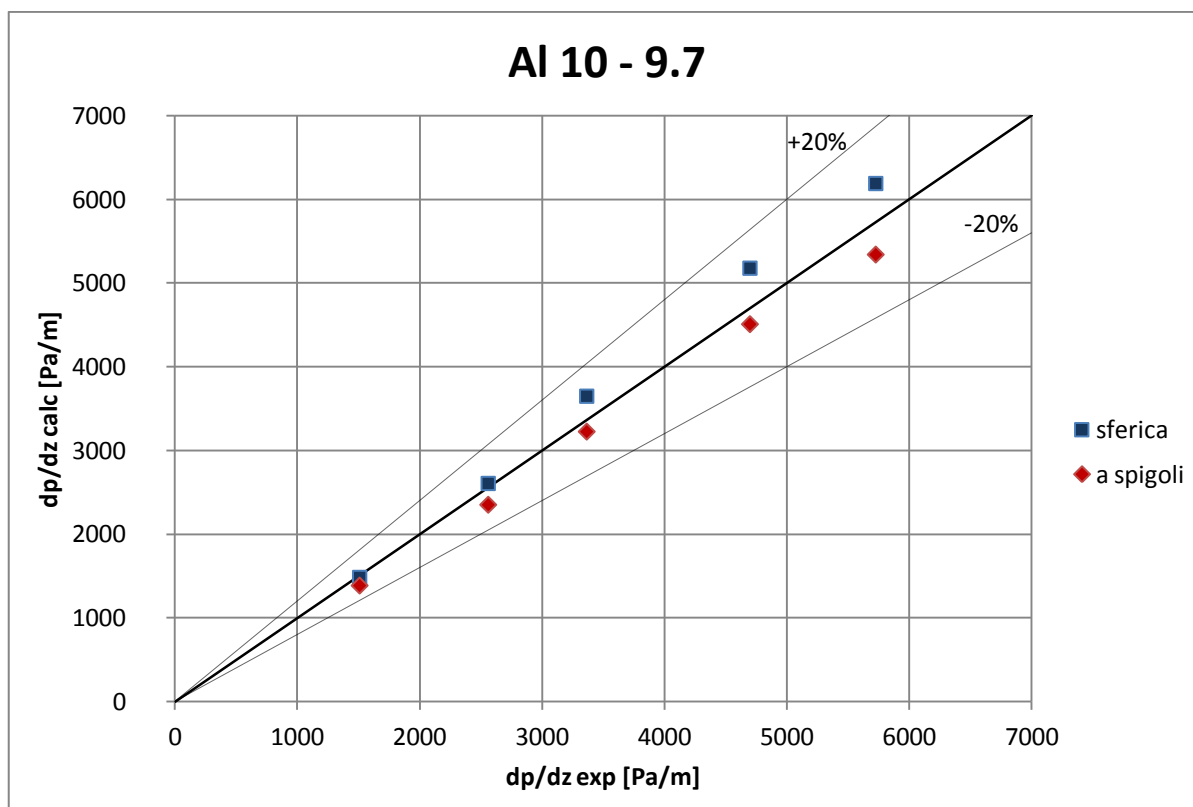


Figura 29. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in alluminio da 9.7% di densità relativa.

Questi andamenti controtendenti, ottenuti per quest'ultima schiuma, sono stranamente buoni rispetto a quelli trovati per tutte le altre schiume.

Guardando anche in Tabella 25 si nota il contrasto con tutti gli andamenti precedenti.

Tabella 25. Confronto tra le densità relative delle costruzioni e della schiuma di alluminio per la dimensione 10 PPI e densità di 9.7%.

<i>tipo</i>	<i>PPI</i>	$\rho_{r,exp}$ %	$\rho_{r,calc}$ %	<i>errore medio</i> %
sferica	10	9.7	4.5	5.5
a spigoli	10	9.7	7.2	-6.1

Si vede che, sebbene la densità relativa calcolata sottostimi in modo considerevole la schiuma reale, i risultati vanno stranamente d'accordo con il fenomeno reale. In particolare, per quanto riguarda la geometria "sferica", essa mostra una differenza tra le due ρ_r molto elevata e addirittura mediamente sovrastima gli andamenti delle perdite.

Per tali ragioni bisogna concludere che le spiegazioni per la presenza di errori, portate nel caso delle schiume di rame, non sono del tutto compatibili ed utilizzabili anche con le schiume di alluminio.

6.2.4. Confronti

Al fine di dare una spiegazione a tali andamenti, è stata riportata di seguito in Tabella 26 una delucidazione sulle tendenze delle schiume di alluminio.

Tabella 26. Dati ed esiti di simulazioni già proposte su schiume di alluminio da 10 PPI, con il fluido dotato sempre della stessa velocità, circa 3.3 m/s.

<i>tipo</i>	$\rho_{r,exp}$	$\rho_{r,calc}$	$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	<i>errore</i> %
sferica	4.4	5.1	3.307	1.157	1.874×10^{-5}	4030.1	3441.8	17.1
sferica	6.6	4.0	3.305	1.158	1.878×10^{-5}	2354.5	2776.3	-15.2
sferica	9.7	4.5	3.328	1.168	1.871×10^{-5}	2609.1	2558.9	2.0
a spigoli	4.4	9.6	3.307	1.157	1.874×10^{-5}	4632.0	3441.8	34.6
a spigoli	6.6	5.8	3.305	1.158	1.878×10^{-5}	1949.5	2776.3	-29.8
a spigoli	9.7	7.2	3.328	1.168	1.871×10^{-5}	2354.8	2558.9	-8.0

Come in Tabella 18 per le schiume di rame, la tabella presenta le tendenze sperimentali e calcolate delle tre schiume al variare della densità relativa (i pori per pollice sono sempre gli stessi per tutte e tre), mantenendo la velocità di deflusso attorno ad un valore simile per tutte le simulazioni (in questo caso $3.3 \frac{m}{s}$).

Il parametro $\frac{\Delta p}{L_{exp}}$ presenta valori decrescenti all'aumentare della densità relativa, mentre i valori calcolati numericamente si spostano in modo tendenzialmente casuale: prima decrescono, poi aumentano.

È inoltre utile guardare come cambiano le densità relative "sperimentali" e "calcolate", che influenzano rispettivamente i risultati sperimentali la prima e quelli numerici la seconda: con $\rho_{r,exp}$ crescente il rispettivo parametro delle perdite di pressione cala, mostrando una apparente correlazione inversa tra i due parametri.

D'altra parte $\rho_{r,calc}$, partendo dal massimo, prima cala e poi aumenta; lo stesso andamento si manifesta per il parametro $\frac{\Delta p}{L}$. Questo sta a significare che le perdite calcolate sono strettamente legate alla costruzione geometrica e al suo parametro di densità relativa.

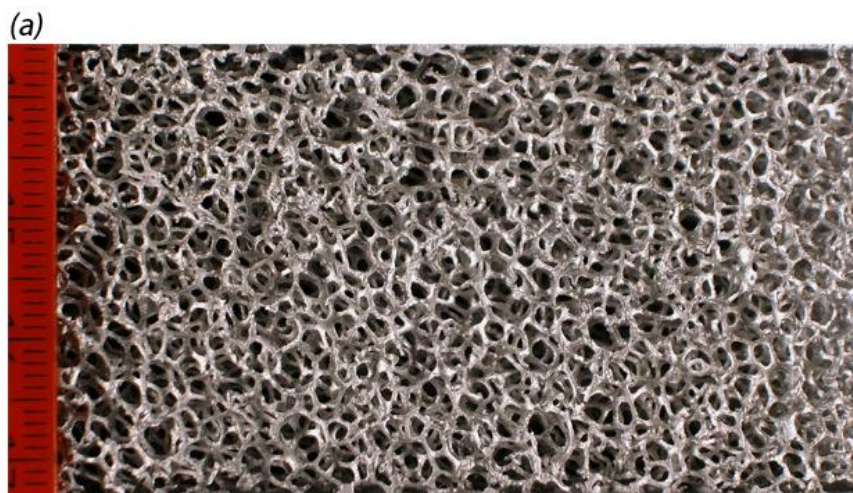
Ciò è anche spiegabile pensando a come sono costruite le celle e a come scorre l'aria all'interno del volume fluido: esse sono strutture geometriche regolari, perciò un aumento di ρ_r significa una maggiore presenza di massa, quindi una porosità minore, che comporta ostruzioni maggiori allo scorrere del flusso.

In questo caso, quindi, l'imprecisione del modello sta proprio a livello geometrico, in quanto la struttura ideata, creata e testata è inadatta a rappresentare le perdite di carico dell'aria nel suo deflusso. Infatti, riguardando le tecniche costruttive, si nota come un aumento della lunghezza della fibra provochi principalmente un aumento della dimensione generale della cella, mentre un maggiore spessore della fibra provoca una diminuzione considerevole della porosità, incrementando quindi la presenza di materia solida nel campo fluido, che crea ostruzioni maggiori al deflusso.

Con tali teorie precostruttive è impossibile creare una struttura che sia in grado di mostrare andamenti decrescenti con l'aumentare della densità relativa.

Per tali ragioni entrambe le geometrie non rispecchiano le reali tendenze e sono addirittura fuorvianti.

Un'ulteriore spiegazione a tale fatto può essere fatta guardando in *Figura 30*, dove è presente una fotografia per ognuna delle tre schiume considerate.



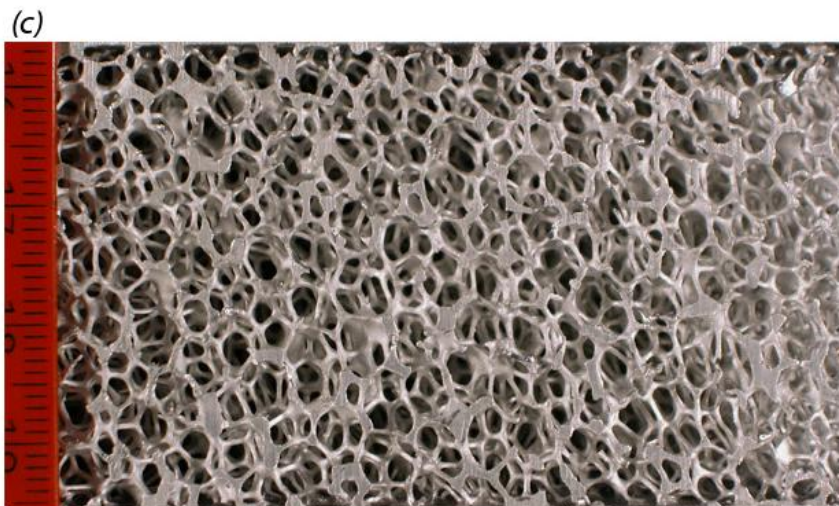
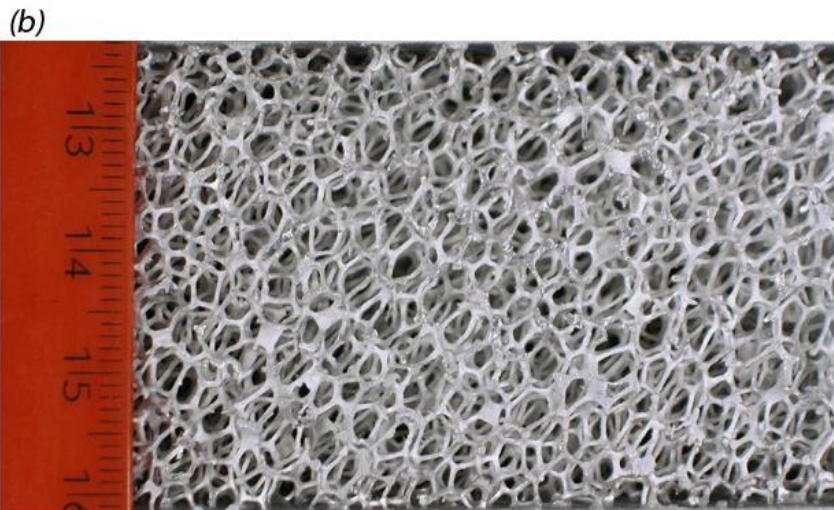


Figura 30. Fotografie delle tre schiume di alluminio reali: a) Al 10-4.4, b) Al 10-6.6 e c) Al 10-9.7.

Guardando queste immagini emerge palesemente la diversità che caratterizza le schiume tra loro: i righelli ai lati di tali immagini sono rappresentati con la stessa scala in tutte e tre le immagini, rendendo più efficace il confronto.

La prima delle tre fotografie raffigura la schiuma dotata di minor densità relativa e maggiori perdite di carico. Si nota infatti un infittimento particolare delle fibre delle celle, sebbene essa abbia lo stesso numero di pori per pollice delle altre: le celle sono più piccole e le fibre più corte.

Per tali ragioni si crea una forma di ostruzione al deflusso che aumenta in modo sostanzioso le perdite di carico in un modo non copiabile da un modello geometrico come quelli che sono stati presentati.

La *Figura 30 b)* rappresenta la schiuma da 10 PPI e 6.6% di densità relativa. Essa sembra molto più regolare, infatti presenta un andamento molto simile alle schiume di rame trattate precedentemente. Sono comunque presenti alcune ostruzioni, da parte di facce chiuse, che giustificano la sottostima dei risultati.

Per quanto riguarda l'ultima foto, si vede anche qui la diversità nella forma della struttura dalle altre considerate e, ovviamente, da quelle create nel software CAD, che portano ad una stima che non è coerente con le tecniche di costruzione adottate.

Dall'analisi di queste immagini si comprende in parte questo andamento inaspettato dovuto sostanzialmente a una conformazione nettamente diversa, che non permette di creare un modello universalmente valido, basato su valori medi di *PPI*, densità relativa, spessore e lunghezza della fibra.

Come per le schiume di rame, anche per quelle di alluminio sono stati presentati dei grafici riassuntivi per le due differenti geometrie. Il primo in *Figura 31* riassume i risultati visti per le geometrie "sferiche", mentre il secondo in *Figura 32* quelli per le strutture "a spigoli":

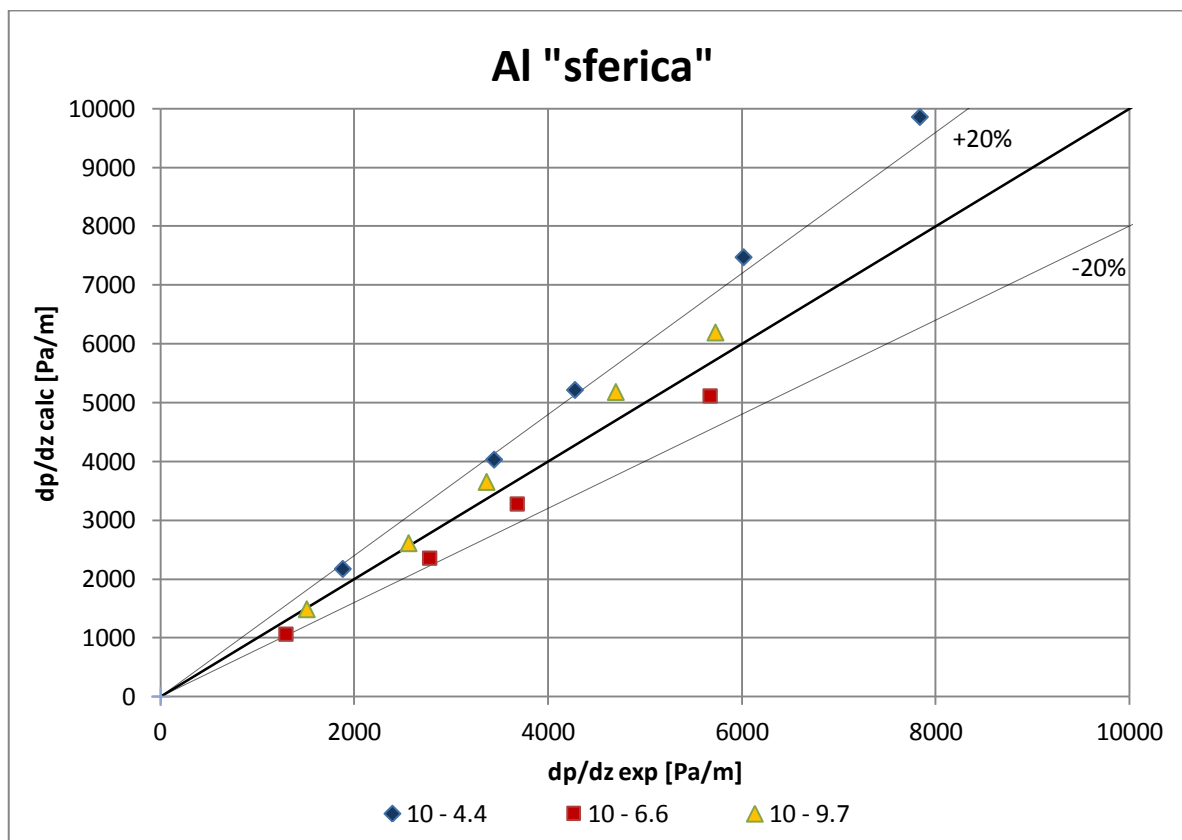


Figura 31. Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "sferiche" per le schiume di alluminio.

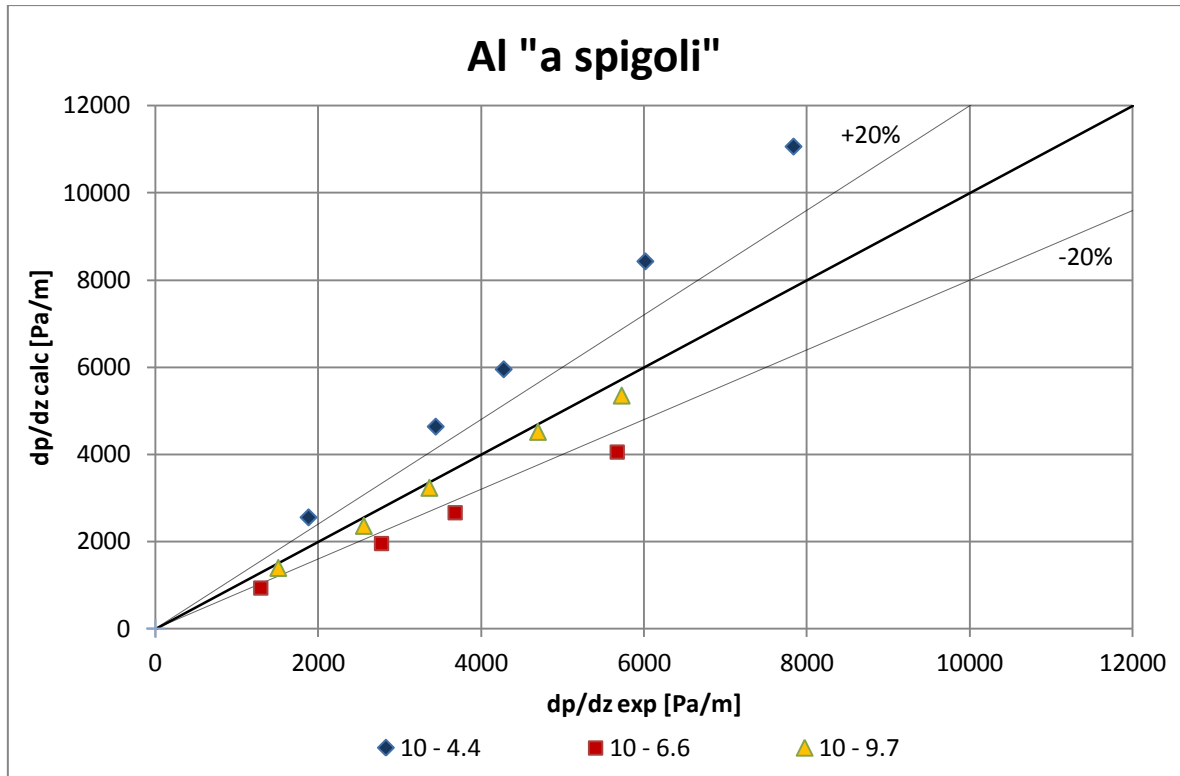


Figura 32. Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "a spigoli" per le schiume di alluminio.

Si vede che, a prescindere dalla generale incapacità di effettiva rappresentazione delle tendenze reali, la geometria "sferica" simula il reale comportamento delle schiume meglio di quella "a spigoli".

6.3. Altre geometrie con flusso a velocità costante

L'ultimo gruppo di simulazioni svolte tratta varie geometrie, sviluppate con le tecniche viste nel capitolo *Modelli geometrici sviluppati*, con tutte le porosità e tutti i valori di pori per pollice già visti nei primi due gruppi.

La caratteristica comune per queste prove numeriche è che tutte le simulazioni sono state fatte con un valore molto simile di velocità del flusso, in modo da poter confrontare direttamente le geometrie, dimensioni, porosità (che è come dire densità relativa) e *PPI* di tutte le schiume tra loro.

6.3.1. "Celle t_ρ "

La prima geometria testata è quella basata sulla "cella t_ρ ", già esposta nei capitoli precedenti.

Nella risoluzione delle simulazioni è stato utilizzato il metodo *upwind* del primo ordine, il flusso è considerato sempre laminare e alle pareti vi è sempre la condizione di *symmetry*. Le rimanenti caratteristiche sono riportate di seguito in Tabella 27:

Tabella 27. Dati riguardanti le simulazioni delle schiume di rame e alluminio da vari PPI e densità relativa, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [4] [5] delle perdite di carico, per un flusso a velocità circa costante a 3.5 m/s e geometria utilizzata a "cella t_ρ ".

$PPI-\rho_r$	$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	<i>errore</i> %
5-6.5	3.621	1.155	1.884×10^{-5}	104.7	2448.2	2927.3	-16.4
10-6.6	3.511	1.162	1.891×10^{-5}	101.9	2589.6	3037.3	-14.7
20-6.5	3.508	1.163	1.875×10^{-5}	102.6	3234.2	4416.9	-26.8
40-6.4	3.459	1.177	1.872×10^{-5}	106.9	4729.1	5383.3	-12.2
10-4.4	3.484	1.171	1.862×10^{-5}	74.2	2427.2	3816.5	-36.4
10-6.6	3.496	1.161	1.878×10^{-5}	99.1	2452.3	3093.0	-20.7
10-9.7	3.496	1.172	1.870×10^{-5}	157.4	3719.9	2813.1	32.2

Come già spiegato, tutte le schiume sono state testate creando una geometria ogni volta con la densità relativa adattata nello specifico.

Le *mesh* constano più o meno dello stesso numero di elementi, che si aggira sul milione, a dimensione variabile, in quanto le dimensioni delle celle sono diverse tra loro, ma mantenute uguali a quelle delle precedenti geometrie "a spigoli" della stessa dimensione.

Il fluido ha caratteristiche più o meno costanti in tutti e tre i parametri che lo definiscono; tutti i punti hanno una velocità molto stabile attorno ai $3.5 \frac{m}{s}$.

Tutte le simulazioni hanno raggiunto l'ottimale livello di convergenza di 1×10^{-7} dei residui numerici, perciò le si può considerare perfettamente riuscite ed affidabili.

Per quanto riguarda le schiume di rame, le perdite mostrano la tendenza già vista, cioè l'andamento crescente delle perdite di carico con l'aumentare dei pori per pollice, mantenendosi inoltre a valori di errore percentuale abbastanza contenuti, che quasi sempre, a meno di un caso, sono inferiori in valore assoluto al 20% di differenza. Questo è un enorme passo in avanti per la geometria, basata inizialmente su una struttura "a spigoli" che simulava molto male gli andamenti, come si è visto in precedenza.

Le schiume di alluminio hanno invece la solita tendenza sperimentale circa le perdite di carico: esse sono decrescenti con l'incremento della densità relativa, ma nemmeno questa geometria riesce a rispecchiare tale tendenza nel campo numerico. Le perdite calcolate sono crescenti con la densità relativa, mostrando una tendenza opposta a quella ottenuta sperimentalmente.

In *Figura 33* sono riportati i risultati per tutte le schiume, tramite i dati riportati in Tabella 27. I simboli pieni degli indicatori sono propri delle schiume di rame, mentre quelli vuoti delle schiume di alluminio.

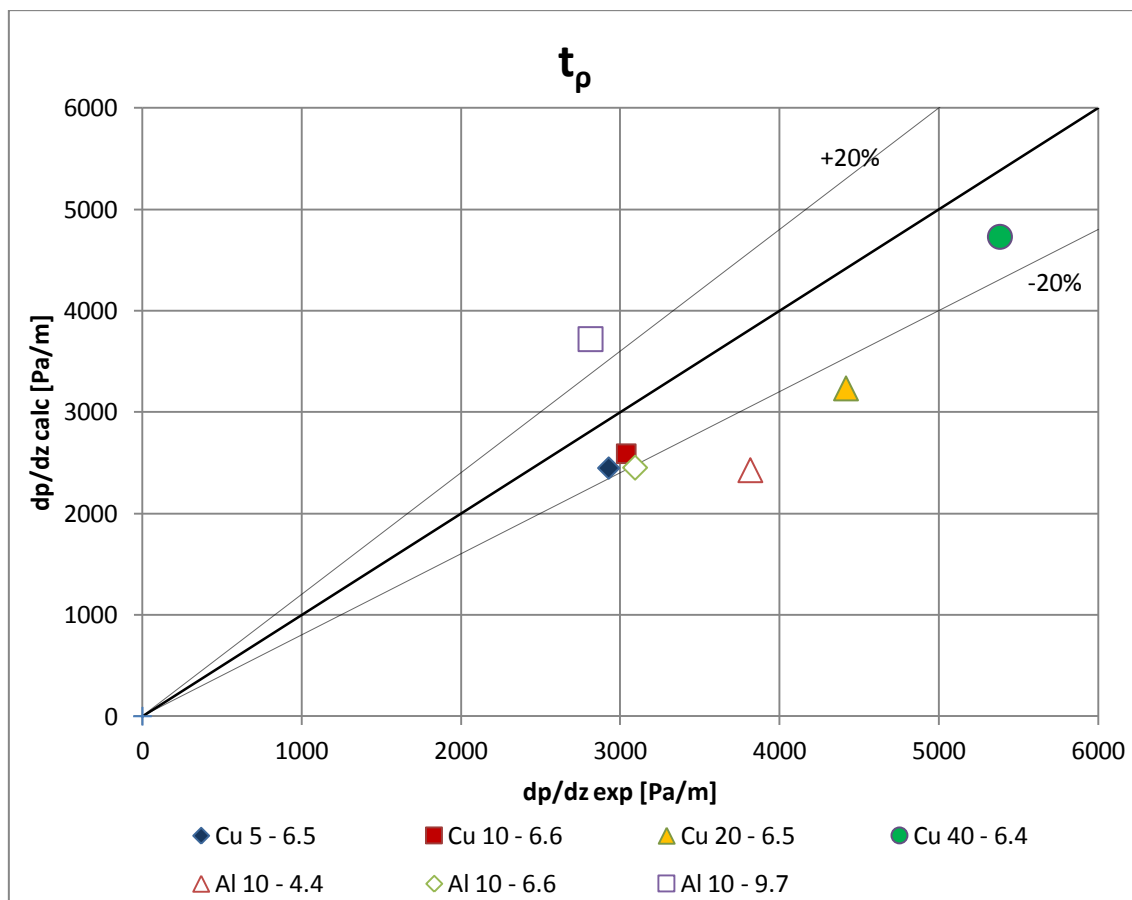


Figura 33. Grafico rappresentante gli esiti delle singole simulazioni con la geometria t_p .

Si vede come i risultati della geometria nella simulazione delle schiume di rame sia abbastanza buono, leggermente sottostimato, ma quasi sempre compreso nello spicchio di accettabilità $\pm 20\%$.

I simboli vuoti, rappresentanti le schiume di alluminio, hanno come sempre un comportamento inesatto e non corrispondente alla fase sperimentale, in quanto l'unica schiuma simulata bene è la Al 10-6.6, che porta con se un errore attorno al -20% .

Nel complesso questa tecnica di costruzione della geometria ha risultati abbastanza buoni per le schiume di rame ma nettamente insoddisfacenti per le quelle in alluminio.

6.3.2. "Celle t_{GA} "

Anche questa cella è stata spiegata nei capitoli precedenti ed è appunto basata sulla "cella t_{GA} ", cioè con lo spessore della fibra calcolato a ritroso grazie a Eq. 7.

Nelle simulazioni eseguite tramite questa tecnica costruttiva delle geometrie è stato utilizzato il metodo *upwind* del primo ordine, il flusso è considerato sempre laminare e alle pareti vi è sempre la condizione di *symmetry*. Le restanti caratteristiche sono riportate di seguito in Tabella 28.

Tabella 28. Dati riguardanti le simulazioni della schiume di rame e alluminio da varie PPI e densità relativa, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [4] [5] delle perdite di carico, per un flusso a velocità circa costante a 3.5 m/s e la geometria utilizzata a "cella t_{GA} ".

$PPI-\rho_r$	$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	<i>errore</i> %
5-6.5	3.621	1.155	1.884×10^{-5}	113.6	2656.3	2927.3	-9.3
10-6.6	3.511	1.162	1.891×10^{-5}	110.7	2813.3	3037.3	-7.4
20-6.5	3.508	1.163	1.875×10^{-5}	110.1	3470.6	4416.9	-21.4
40-6.4	3.459	1.177	1.872×10^{-5}	116.6	5158.2	5383.3	-4.2
10-4.4	3.484	1.171	1.862×10^{-5}	80.5	2634.6	3816.5	-31.0
10-6.6	3.496	1.161	1.878×10^{-5}	108.9	2696.2	3093.0	-12.8
10-9.7	3.496	1.172	1.870×10^{-5}	167.3	3953.8	2813.1	40.5

Come già visto le schiume sono state qui testate creando una geometria sempre con lo spessore della fibra pari a quello calcolato dalla suddetta equazione.

Le *mesh* hanno sempre approssimativamente lo stesso numero di elementi tetraedrici, contandone circa un milione, di dimensione, come nel caso precedente, uguale a quello delle stesse celle per la struttura "a spigoli".

I parametri del fluido sono gli stessi visti per il precedente sottogruppo di simulazioni (quelle con geometria t_ρ), sottolineando l'utilizzo di una velocità costante a circa $3.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

La convergenza è stata ottimale, con residui pari a 1×10^{-7} , perciò le si può considerare giunte al livello adatto dei risultati.

Guardando ora gli esiti specifici delle simulazioni sulle schiume di rame si nota un confronto di essi con i risultati sperimentali ancora migliore: gli errori percentuali di questi sono diminuiti ulteriormente rispetto al caso precedente della "cella t_ρ ", infatti ora il limite negativo raggiunto nelle sottostime dei risultati è il -21.4% della Cu 20-6.5.

Da questo punto di vista si può rimanere abbastanza soddisfatti degli esiti per tali schiume, in quanto sono più o meno contenuti nei limiti del $\pm 20\%$ preso in considerazione.

Per quanto riguarda invece le schiume di alluminio si trovano ancora andamenti controtendenti rispetto a quelli sperimentali, infatti le cadute di pressione calcolate sono crescenti, a differenza di quelle decrescenti sperimentali, all'aumentare della densità relativa.

Anche questo modello quindi, come il precedente, ottiene risultati soddisfacenti per le schiume di rame, ma non soddisfa minimamente il comportamento delle schiume di alluminio, nelle quali la variabile indipendente è la densità relativa della schiuma.

Le ragioni di tale inadeguato comportamento possono essere ricondotte a quanto già evidenziato in precedenza per le "celle t_ρ ", cioè nella sostanziale differenza geometrica tra le schiume, che non sono solo strutture semplicemente in scala, ma intrinsecamente diverse.

In *Figura 34* si ha una rappresentazione grafica dei risultati in Tabella 28, dove i vari simboli rappresentano il singolo risultato di ogni schiuma.

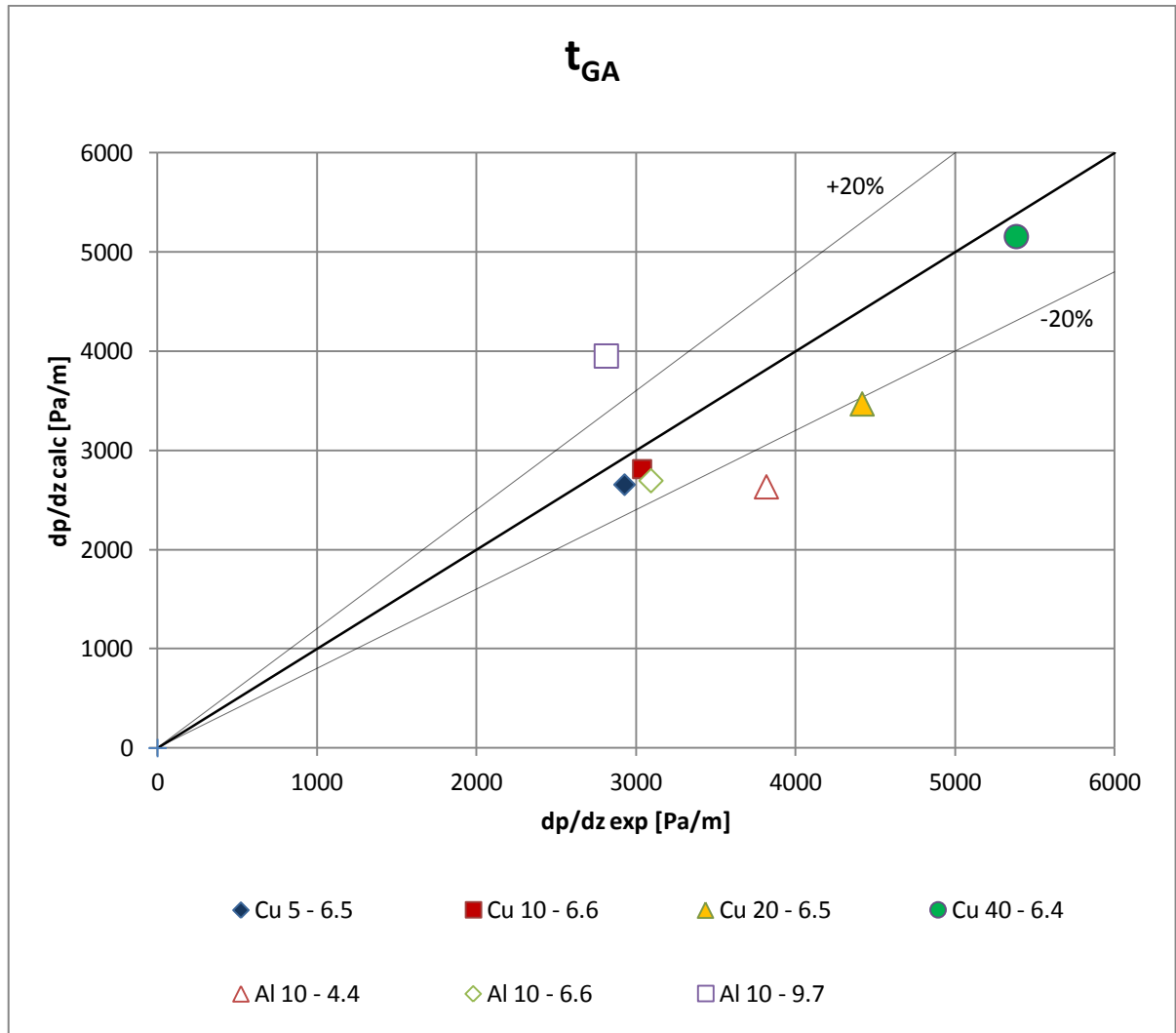


Figura 34. Grafico rappresentante gli esiti delle singole simulazioni con la geometria t_{GA} .

6.3.3. "Celle t_{real} "

Le ultime simulazioni eseguite sono state svolte su questa geometria, il cui spessore della fibra è quello calcolato sperimentalmente eseguendo una media degli spessori delle fibre reali delle schiume.

Nella risoluzione di tali simulazioni è stato utilizzato il metodo *upwind* del primo ordine, il flusso è considerato sempre laminare e alle pareti vi è sempre la condizione di *symmetry*. Le rimanenti caratteristiche sono riportate di seguito.

Tabella 29. Dati riguardanti le simulazioni della schiume di rame e alluminio da vari PPI e densità relativa, con confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali [4] [5] delle perdite di carico, per un flusso a velocità circa costante a 3.5 m/s e la geometria utilizzata a "cella t_{real} ".

$PPI-\rho_r$	$v \left[\frac{m}{s} \right]$	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$	Δp [Pa]	$\frac{\Delta p}{L} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	$\frac{\Delta p}{L_{exp}} \left[\frac{Pa}{m} \right]$	<i>errore</i> %
5-6.5	3.621	1.155	1.884×10^{-5}	127.4	2979.0	2927.3	1.8
10-6.6	3.511	1.162	1.891×10^{-5}	109.7	2787.9	3037.3	-8.2
20-6.5	3.508	1.163	1.875×10^{-5}	95.0	2994.6	4416.9	-32.2
40-6.4	3.459	1.177	1.872×10^{-5}	112.4	4972.4	5383.3	-7.6
10-4.4	3.484	1.171	1.862×10^{-5}	203.0	6640.6	3816.5	74.0
10-6.6	3.496	1.161	1.878×10^{-5}	111.5	2760.6	3093.0	-10.7
10-9.7	3.496	1.172	1.870×10^{-5}	143.2	3384.3	2813.1	20.3

I volumi di lavoro hanno sempre lo stesso tipo di elementi nella griglia della stessa dimensione delle "celle a spigoli" come già visto, le caratteristiche del fluido e la sua velocità sono quelle viste anche precedentemente e i residui numerici delle simulazioni hanno raggiunto il livello ottimale di 1×10^{-7} .

I risultati ottenuti sono un po' meno buoni delle precedenti geometrie, infatti sia per le schiume di rame che per quelle di alluminio ci sono dei picchi di errore fino a più del 30%.

Le prime simulazioni hanno esiti molto buoni, tranne per la schiuma Cu 20-6.5 con la quale, come negli altri gruppi, si ottengono risultati meno soddisfacenti; qui raggiunge un errore percentuale di -33.2%, valore abbastanza importante ed esterno allo spicchio di piano di accettabilità.

Per le schiume di alluminio, invece, la tendenza dei risultati è totalmente sbagliata: la schiuma Al 10-4.4 è estremamente fuorviante, arrivando ad una sovrastima di addirittura il 70% del risultato sperimentale. Il gradiente di pressione prima decresce, passando da una densità relativa di 4.4% ad una di 6.6%, per poi aumentare passando alla densità relativa di 9.7%, mentre secondo i risultati sperimentali i gradienti di pressione diminuiscono all'aumentare della densità relativa.

Di queste tre simulazioni, come anche nei precedenti due gruppi, l'unica che ottiene esiti abbastanza accurati è quella Al 10-6.6, che si avvicina sempre ai risultati sperimentali

Gli andamenti sono visibili nel grafico di *Figura 35*:

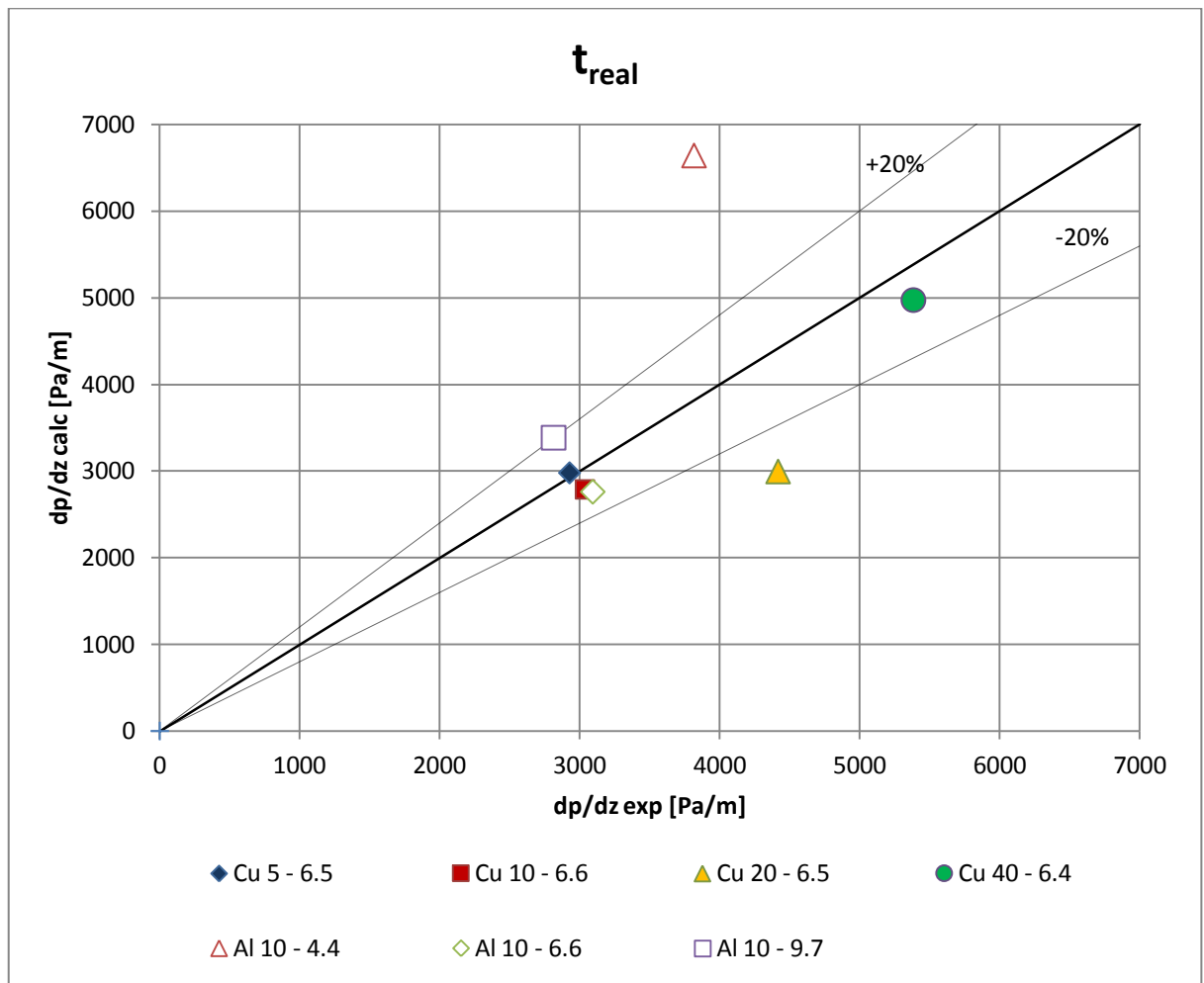


Figura 35. Grafico rappresentante tramite icone gli esiti delle singole simulazioni con la geometria t_{GA} .

Guardando appunto i simboli vuoti delle schiume di alluminio, è molto più chiaro quanto sia inadatta questa geometria. Anche le altre valutazioni non portano ad ottimi risultati, ma di certo migliori dei precedenti.

7. Discussione generale dei risultati

Volgendo un occhio generale a quanto si è raggiunto nel capitolo precedente, è possibile effettuare una discussione che riguardi tutti i risultati ottenuti.

Partendo dalle prime due geometrie create, si può concludere che quella "a spigoli" non rispecchia per niente gli andamenti sperimentali, rendendosi del tutto inutilizzabile in vista di prove numeriche sostitutive alla fase sperimentale; i valori ottenuti sono molto lontani da quelli sperimentali con scarti quasi sempre superiori al 20% dei risultati sperimentali.

Le ragioni per le quali si presentano tali errori, come esposto in precedenza, sono da attribuire principalmente alla bassa densità relativa della struttura, che, essendo quasi sempre inferiore alla realtà, porta a difetti nelle stime delle perdite di carico. Difatti successivamente, con le geometrie dotate di una ρ_r più simile a quella sperimentale, i risultati in parte migliorano.

Un'ulteriore motivazione per tali sottostime risiede nella generale irregolarità della schiuma reale, la quale presenta celle di forme differenti, con strutture non simmetriche e talvolta facce chiuse.

Queste spiegazioni non sono però sufficienti nella interpretazione degli andamenti controtendenti ottenuti nella simulazione delle schiume di alluminio, le quali erano caratterizzate da una variazione della densità relativa della schiuma: in questi casi il modello non riusciva assolutamente a seguire la realtà, portando spesso ad esiti poco chiari e apparentemente casuali.

La spiegazione di queste anomalie risiedono in due fatti principali: il primo è che le strutture create sono ovviamente più massive nel caso in cui si aumenti la densità relativa della geometria, portando quindi ad un aumento delle ostruzioni al deflusso di aria e a cadute di pressione maggiori, diversamente dalla realtà. La seconda causa è rintracciabile nell'illustrazione di *Figura 30*, dove le tre immagini denotano una sostanziale differenza nella struttura reticolare delle schiume, motivando così gli errori, in quanto se le schiume reali sono strutturalmente diverse, non è possibile creare un generico solido geometrico universale.

Queste motivazioni sono in accordo con tutti i risultati ottenuti e giustificano i comportamenti di tutte le altre geometrie utilizzate e testate, cioè la geometria " t_ρ ", " t_{GA} " e " t_{real} "¹⁹.

Esse ottengono risultati molto migliori delle prime due nella simulazione delle schiume di rame, infatti raggiungono errori quasi sempre contenuti nell'intervallo di accettabilità, mentre nella simulazione delle schiume di alluminio non si può dire altrettanto, in quanto le tendenze anche qui sono errate e, talvolta, estremamente inadeguate.

Discorso a parte deve essere fatto per le strutture "sferiche", le quali si basano su una costruzione differente rispetto alle restanti quattro geometrie (tutte simili a quella "a spigoli"). Infatti la prima cella, creata per sottrazione di una sfera da un tetracaidecaedro, come già detto non può essere creata utilizzando le teorie delle " t_ρ ", " t_{GA} " e " t_{real} ", poiché le facce quadrate si chiuderebbero. Questa geometria ottiene comunque risultati ben migliori di quella "a spigoli", riuscendo a seguire abbastanza, ma non in modo sufficientemente soddisfacente, le perdite reali delle schiume di rame.

Per quanto riguarda quelle di alluminio, anche questa non raggiunge i risultati sperati, portando a controtendenze, pur mantenendosi a livelli di errore molto più contenuti di tutte le altre geometrie.

In Tabella 30 è proposto un riassunto di tutti i risultati per ogni schiuma di rame e per ogni geometria. Come errore percentuale è riportato quello medio, nel caso in cui siano state svolte più simulazioni per una stessa geometria, o quello singolo riscontrato in una simulazione nel caso sia unica.

Tabella 30. Dati riassuntivi per ogni schiuma di rame, in ordine per miglior risultato ottenuto.

<i>tipo</i>	<i>PPI - $\rho_{r,exp}$</i>	<i>$\rho_{r,calc}$</i>	<i>errore medio %</i>
<i>t_{real}</i>	5-6.5	7.8	1.77
<i>sferica</i>	5-6.5	4.2	-5.58
<i>t_{GA}</i>	5-6.5	7.0	-9.26
<i>t_ρ</i>	5-6.5	6.5	-16.36
<i>a spigoli</i>	5-6.5	6.3	-19.18

¹⁹ Non si considera la "cella a spigoli", dato che ne si ha appena parlato portando generalmente a pessimi risultati, e la "cella sferica" in quanto di conformazione differente (sarà trattata successivamente).

<i>tipo</i>	<i>PPI - $\rho_{r,exp}$</i>	<i>$\rho_{r,calc}$</i>	<i>errore medio %</i>
<i>t_{GA}</i>	10-6.6	7.1	-7.38
<i>t_{real}</i>	10-6.6	7.1	-8.21
<i>t_{ρ}</i>	10-6.6	7.0	-14.74
sferica	10-6.6	4.0	-15.15
a spigoli	10-6.6	5.7	-30.39
<i>t_{GA}</i>	20-6.5	7.0	-21.43
<i>t_{ρ}</i>	20-6.5	6.5	-26.78
sferica	20-6.5	3.7	-31.01
<i>t_{real}</i>	20-6.5	6.5	-32.20
a spigoli	20-6.5	4.8	-44.47
<i>t_{GA}</i>	40-6.4	7.1	-4.18
<i>t_{real}</i>	40-6.4	6.9	-7.63
sferica	40-6.4	3.9	-11.12
<i>t_{ρ}</i>	40-6.4	6.5	-12.15
a spigoli	40-6.4	5.5	-22.23

In Tabella 31 è proposto lo stesso riassunto visto precedentemente ma per le schiume di alluminio.

Tabella 31. Dati riassuntivi per ogni schiuma di alluminio, in ordine per miglior risultato ottenuto.

<i>tipo</i>	<i>PPI - $\rho_{r,exp}$</i>	<i>$\rho_{r,calc}$</i>	<i>errore medio %</i>
sferica	10-4.4	5.1	20.90
<i>t_{GA}</i>	10-4.4	4.9	-30.97
<i>t_{ρ}</i>	10-4.4	4.4	-36.40
a spigoli	10-4.4	9.6	38.09
<i>t_{real}</i>	10-4.4	11.9	74.00

<i>tipo</i>	<i>PPI - $\rho_{r,exp}$</i>	<i>$\rho_{r,calc}$</i>	<i>errore medio %</i>
<i>t_{real}</i>	10-6.6	7.3	-10.75
<i>t_{GA}</i>	10-6.6	7.1	-12.83
sferica	10-6.6	4.0	-13.47
<i>t_ρ</i>	10-6.6	6.5	-20.71
a spigoli	10-6.6	5.8	-28.60
sferica	10-9.7	4.5	5.49
a spigoli	10-9.7	7.2	-6.11
<i>t_{real}</i>	10-9.7	9.0	20.30
<i>t_ρ</i>	10-97	9.7	32.23
<i>t_{GA}</i>	10-9.7	10.2	40.55

I risultati sono stati proposti in un ordine diverso: dalla geometria più precisa a quella meno, per ogni schiuma studiata. I tipi di geometria utilizzati, posti nella prima colonna, sono stati talvolta riportati in grassetto, solo nel caso la propria soluzione abbia portato un errore in valore assoluto minore del 20% rispetto al comportamento sperimentale. In questo modo si può subito vedere la tipologia di cella che ha simulato meglio quella particolare schiuma.

È evidente come nella simulazione delle schiume di rame le geometrie migliori siano la "cella t_{ρ} ", ma soprattutto quella " t_{GA} ", che si mantengono sempre più vicine all'errore minimo.

Le schiume di alluminio sono invece simulate meglio dalla "cella sferica", la quale comunque non segue le tendenze ed è perciò inaffidabile.

Un'ulteriore giustificazione o conferma del fallimento delle geometrie "a spigoli" e delle figlie, basate su di essa, può essere ritrovata in *Figura 36*.

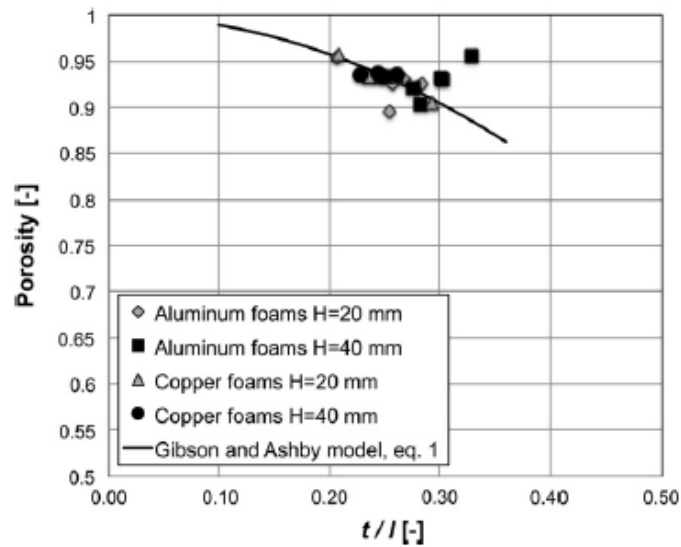


Figura 36. Grafico dell'andamento di varie schiume testate sperimentalmente a confronto con l'andamento della struttura di Gibson e Ashby [4].

Si nota immediatamente come le icone rappresentanti i singoli riscontri sperimentali non si adeguino sempre al comportamento generale simulato dalla cella proveniente dalla teoria di Gibson e Ashby, rappresentata dalla linea continua: solo determinate schiume la seguono, altre, come le "Alluminium foams" con i loro segnalatori quadrati, hanno posizioni al di fuori della curva stimata dai due scienziati.

Per tale ragione, dato che la "cella a spigoli" è in parte costruita e basata sulla suddetta teoria, è facile che la tecnica di costruzione adottata non sia adatta e tale inadeguatezza è sottolineata da questo grafico trovato in letteratura [4].

8. Conclusioni

Con l'analisi e la discussione dei risultati, effettuate nei capitoli precedenti, si è quindi visto come il comportamento delle varie geometrie proposte fosse adatto in taluni casi e inadeguato in altri.

Ogni geometria è stata indagata sotto vari punti di vista, soprattutto per le prime due considerate (quelle "sferica" e "a spigoli"), ottenendo anche buoni risultati in taluni casi, ma spesso accompagnati da carenze nelle tendenze o da altri inaspettati risultati.

Ogni tipo di cella creata in *SolidWorks* ha mostrato alcuni punti di forza e altri di debolezza (a meno di quella "a spigoli", trovata mancante un po' dappertutto). Questi vantaggi o svantaggi nell'utilizzo di una particolare struttura rispetto ad un'altra sono stati riassunti, esposti e commentati nelle precedenti Tabella 30 e Tabella 31. Come ribadito nel capitolo precedente, tuttavia, non si può fare ciecamente affidamento su di essa, in quanto oltre all'errore relativo che una geometria ottiene è molto importante anche la tendenza degli andamenti, che nel caso delle schiume di alluminio non sono mai rispettati.

Difatti si è giunti alla conclusione che se le schiume reali sono strutturalmente diverse (come si è visto per il caso di quelle di alluminio trattate, di *Figura 30*), non è possibile creare un generico solido geometrico con una filosofia che valga universalmente al variare dei parametri di costruzione per ogni schiuma. Esso non sarà in grado di simulare sufficientemente bene (quindi con errore contenuto) tutte le schiume che gli si portano in esame.

Per concludere, quindi, si può affermare che questo lavoro non ha portato ad esiti del tutto soddisfacenti, poiché solo una categoria di schiume è stata simulata più o meno correttamente (quella di rame), mentre per quella di alluminio non si può dire altrettanto, in quanto gli andamenti non sono stati minimamente rispettati.

Quindi i modelli trattati riescono a calcolare gli andamenti delle perdite al variare del numero di pori per pollice lineare, mentre l'effetto della porosità non è simulato correttamente.

Bibliografia

- [1] S. Mancin, "Two-phase and single-phase heat transfer and fluid flow through enhanced surfaces and in microgeometries".
- [2] B. E. Thompson, "Evaluation of Advanced Heat Recovery System".
- [3] M. Bai and J. Chung, "Analytical and numerical prediction of heat transfer and pressure drop in open-cell metal foams," *International Journal of Thermal Sciences*, no. 50, pp. 869-880, 2011.
- [4] S. Mancin, C. Zilio, A. Diani and L. Rossetto, "Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 62, p. 112–123, 2013.
- [5] S. Mancin, C. Zilio, A. Cavallini and L. Rossetto, "Pressure drop during air flow in aluminium foams," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010.
- [6] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solids: Structures and properties*, 1988.
- [7] SolidWorks® Office Premium, 2010.
- [8] ANSYS® Workbench™ 2.0 Framework, Version 14.0.0.
- [9] ANSYS, "ANSYS Help".

Indice delle figure

<i>Figura 1. Esempio di struttura a nido d'ape.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2. Esempio di struttura a cella aperta (a) e a cella chiusa (b).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3. Dodecaedro Rombico.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4. Tetracaidecaedro di Kelvin.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 5. Foto di schiume trattate: quella in alto a sinistra in rame [4], le rimanenti due in alluminio [5], nelle quali è possibile notare la struttura che in più di qualche occasione ricorda la forma tetracaidecaedrica, con facce a forma esagonale o quadrata.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6. La cella unitaria di Weaire e Phelan con i due volumi base.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7. Cella formata da un cubo svuotato di una sfera.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8. Struttura di celle tetracaidecaedriche secondo la teoria di Gibson e Ashby.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 9. Andamento tipico dei residui numerici nelle simulazioni svolte.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10. Sequenza di costruzione del tetracaidecaedro.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11. (a) Cella tetracaidecaedrica a cui è stata sottratta una sfera, specificando lo spessore t e la lunghezza della fibra l e (b) una sezione in cui è possibile vedere la forma triangolare della fibra.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 12. Cella reale tetracaidecaedrica [3].....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13. "Cella a spigoli" dove si può vedere l'utilizzo dello spessore t per i fori (a) e per lo svuotamento nella vista in sezione (b).</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14. Vista di un reticolo di costruzione per un volume elementare tramite "celle a spigoli".</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15. Volume solido elementare di una "cella sferica" (a) e di una "cella a spigoli" (b)..</i>	<i>26</i>
<i>Figura 16. Volume fluido della "cella sferica" (a) e della "cella a spigoli" (b).</i>	<i>26</i>
<i>Figura 17. Esempio di volume fluido di lavoro con otto volumi fluidi elementari in serie e due parallelepipedi, uno a monte e uno a valle delle celle.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 18. Visualizzazione del parametro t_{calc}.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 19. Rappresentazione delle condizioni al contorno utilizzate.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 20. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 5 PPI.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 21. Facce di entrata viste dal fluido per la "cella sferica" e la "cella a spigoli" per la schiuma di rame da 5 PPI.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 22. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 10 PPI.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 23. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 20 PPI.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in rame da 40 PPI.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25. Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "sferiche" per le schiume di rame.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 26 Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "a spigoli" per le schiume di rame.</i>	<i>65</i>

<i>Figura 27. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in alluminio da 4.4% di densità relativa.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 28. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in alluminio da 6.6% di densità relativa.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 29. Confronto tra i gradienti di pressione ottenuti dalle simulazioni numeriche e i risultati sperimentali per la schiuma in alluminio da 9.7% di densità relativa.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 30. Fotografie delle tre schiume di alluminio reali: a) Al 10-4.4, b) Al 10-6.6 e c) Al 10-9.7.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 31. Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "sferiche" per le schiume di alluminio.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 32. Grafico riassuntivo dei risultati delle geometrie "a spigoli" per le schiume di alluminio.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 33. Grafico rappresentante gli esiti delle singole simulazioni con la geometria t_p.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 34. Grafico rappresentante gli esiti delle singole simulazioni con la geometria t_{GA}.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 35. Grafico rappresentante tramite icone gli esiti delle singole simulazioni con la geometria t_{GA}.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 36. Grafico dell'andamento di varie schiume testate sperimentalmente a confronto con l'andamento della struttura di Gibson e Ashby [4].</i>	<i>91</i>

Ringraziamenti

Alla fine di questo lavoro, l'ultimo di questi cinque lunghi anni di università, vorrei ringraziare le persone che mi hanno aiutato e mi hanno appoggiato in queste fatiche, non prive di soddisfazioni.

Inizialmente ringrazio la mia famiglia e Marta, per avermi supportato e per aver appoggiato le mie scelte lungo questo percorso.

Un ringraziamento è doveroso verso tutti i miei amici e i miei colleghi universitari, senza i quali di certo non sarei dove sono ora.

Ringrazio la professoressa Rossetto per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro al meglio e la disponibilità dimostrata nei miei confronti.

Infine un enorme grazie a Simone Mancin e Andrea Diani per avermi seguito passo passo nell'ideazione, esecuzione e redazione di questo scritto, senza i quali non ce l'avrei di certo fatta.

Per ultimo un ringraziamento a tutti coloro che potrei aver involontariamente dimenticato.

Grazie di cuore

Giacomo