

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Chimica e
dei Processi Sostenibili



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Simulazioni CFD per lo studio del trasporto multifase nei tessuti tecnici

Relatore

Prof. Gianluca BOCCARDO

Co-relatori

Prof. Daniele MARCHISIO

Prof.ssa Ada FERRI

Dott.ssa Eleonora BIANCA

Candidato

Alice PERUGINI

Luglio 2026

Sommario

L'orientamento del settore tessile verso prodotti ad alte prestazioni, progettati per garantire comfort, protezione e specifiche funzionalità, ha accresciuto l'interesse verso la comprensione dei fenomeni di interazione tra acqua e struttura tessile. La comprensione dei fenomeni di trasporto dei liquidi nei materiali tessili è infatti un requisito fondamentale in settori ingegneristici e industriali, dall'abbigliamento sportivo e tecnico a quello sanitario e biomedicale.

In questo contesto, la Fluidodinamica Computazionale (CFD) si configura come uno strumento strategico per valutare l'influenza delle proprietà geometriche e chimico-fisiche dei tessuti rispetto al trasporto capillare negli stessi. Tale approccio predittivo consente di ingegnerizzare il processo di sviluppo, prevedendo le prestazioni finali dei tessuti sin dalle prime fasi di progettazione e riducendo il numero di prototipi e di campagne sperimentali necessari.

È qui che si colloca il presente lavoro di Tesi, basato sullo sviluppo di un modello CFD, in ambiente OpenFOAM, volto a descrivere e predire il trasporto multifase attraverso tessuti, i cui fili sono stati modellati come impermeabili. Nello specifico lo studio si è focalizzato sul fenomeno della risalita capillare attraverso i pori interfilato, definiti dall'interlacciamento dei filati, valutando l'influenza combinata delle proprietà di bagnabilità superficiale e delle caratteristiche geometriche del tessuto. In assenza di gravità e di differenze di pressione imposte ai confini del dominio, il fenomeno è governato dalle sole forze capillari.

Le geometrie dei tessuti studiati in OpenFOAM sono state generate attraverso il software TexGen a partire da parametri geometrici e di design disponibili in letteratura.

A monte di queste analisi è stata condotta una fase di verifica del modello mediante confronto con una soluzione teorica disponibile in letteratura applicata ad un problema semplificato di risalita capillare in un condotto a sezione rettangolare, avente il medesimo diametro idraulico di uno dei tessuti studiati.

I risultati raccolti dalla campagna di simulazioni permettono di mappare quantitativamente l'evoluzione temporale della frazione volumetrica del liquido nel sistema, la porzione bagnata di superficie superiore del tessuto e di valutare il ruolo delle armature e delle proprietà superficiali sulla dinamica di risalita e sulla distribuzione superficiale del liquido. La definizione del Connectivity Index (CI) ha inoltre permesso, tramite un'analisi ad immagini condotta con il software ImageJ, di valutare il ruolo della geometria sulla modalità di trasporto, permettendo di definire se il trasporto è uniforme o se si verifica attraverso canali preferenziali.

Indice

Elenco delle tabelle	IX
Elenco delle figure	XI
Acronimi	XV
Lista dei simboli	XIX
1 Introduzione	1
2 Elementi teorici	5
2.1 I tessuti	5
2.1.1 Le fibre	5
2.1.2 I filati	7
2.1.3 I tessuti fibrosi	8
2.1.4 Le armature	9
2.1.5 Parametri fondamentali dei tessuti	10
2.2 TexGen	13
2.2.1 Modalità Wizard	14
2.2.2 Menu Modeller della Graphic User Interface (GUI)	14
2.2.3 Codice Python	15
2.3 Geometrie utilizzate	17
2.4 CFD – OpenFOAM	22
2.4.1 Il Metodo ai Volumi Finiti (FVM)	22

2.4.2	Discretizzazione spaziale	25
2.4.3	Discretizzazione temporale	27
2.4.4	Metodo Volume of Fluid (VOF)	28
2.4.5	Accoppiamento Pressione-Velocità e algoritmo di risoluzione	29
2.5	Capillarità	30
3	Dettagli numerici	37
3.1	Impostazione delle simulazioni in OpenFOAM	37
3.1.1	Definizione del dominio computazionale e generazione della mesh.	37
3.1.2	Condizioni iniziali e condizioni al contorno	43
3.1.3	Verifica preliminare del modello	46
3.1.4	Grid Independence	47
3.1.5	Estrapolazione dei risultati	50
4	Risultati	55
4.1	Risultati per la verifica preliminare del modello	55
4.2	Risultati per i tessuti intrecciati	59
4.2.1	Studio della dinamica di risalita	59
4.2.2	Valutazione della distribuzione superficiale del liquido	67
4.2.3	Valutazione del Connectivity Index (CI)	70
5	Conclusioni	81
Appendice A		85
Codice Python: generazione dei tessuti con TexGen		85
Appendice B		97
Geometrie dei tessuti generati con TexGen		97
B.1	BW	97
B.2	TW	98
B.3	PW	98

Bibliografia.....	99
Ringraziamenti.....	103

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1: Diametro idraulico D_h dei pori interfilato per le geometrie utilizzate, da Zupin et al. [11], e il rispettivo valore di r_f ottimale.	22
Tabella 3.1: Riassunto delle metriche utilizzate	53
Tabella 4.1: Riassunto dei risultati ottenuti da prove di risalita capillare per un condotto a sezione rettangolare, per due condizioni di bagnabilità e variando il valore dell'altezza iniziale del liquido, h_0 . Le grandezze $h_{f,CFD}$ e $h_{f,T}$ rappresentano l'altezza finale della colonna di liquido predetta e teorica, rispettivamente.....	58
Tabella 4.2: Valore della porzione della superficie superiore di tessuto bagnata ($f_{tex,wet}$) per le casistiche investigate a $t_{end} = 0.0025$ s	67
Tabella 4.3: Riassunto dei CI e del numero di clusters per il caso idrofilo ($\theta = 40^\circ$) ed il caso minormente idrofilo ($\theta = 80^\circ$) e per entrambe le combinazioni di densità, in corrispondenza del primo time step salvato ($t = 0.0001$ s)	71
Tabella 4.4: Riassunto dei CI e del numero di clusters per il caso idrofilo ($\theta = 40^\circ$) ed il caso minormente idrofilo ($\theta = 80^\circ$) e per entrambe le combinazioni di densità, in corrispondenza dell'istante temporale in cui l'acqua inizia ad oltrepassare il tessuto ($t = 0.0011$ s).....	74
Tabella 4.5: Riassunto dei CI e del numero di clusters per il caso idrofilo ($\theta = 40^\circ$) ed il caso minormente idrofilo ($\theta = 80^\circ$) e per entrambe le combinazioni di densità, in corrispondenza del tempo di interruzione $t_{end} = 0.0025$ s.....	78

Elenco delle figure

Figura 2.1: Rappresentazioni delle armature Plain Weave, Basket Weave e Twill Weave 1/3, da Zupin et al. [11]	10
Figura 2.2: Specifiche tecniche di base dei tessuti, da [10].....	11
Figura 2.3: Finestra di apertura di TexGen	13
Figura 2.4: Generica schermata della griglia bidimensionale interattiva	14
Figura 2.5: Generico esempio di filo, costituito da 5 nodi, creato attraverso il menu Modeller.....	15
Figura 2.6: Tessuto TW-22-15-0.4-0.90 generato tramite script Python. Visualizzazione del pattern di intreccio dei fili (a) e della struttura geometrica interna del filo che permette di osservare i nodi raccordati dalla linea di interpolazione (b).....	16
Figura 2.7: Rappresentazione della periodicità del sistema nello spazio	18
Figura 2.8: Vista laterale di un tessuto che riporta visivamente le grandezze effettive, larghezza w e spessore s , della sezione trasversale del filo.....	18
Figura 2.9: Vista frontale di un tessuto che mostra la distanza tra due fili consecutivi, S , in funzione della densità del filo, D	20
Figura 2.10: Influenza del tipo di armatura e della densità dei fili sulle dimensioni del dominio computazionale, per una configurazione con dieci fili in totale e considerando un reduction factor pari a 0.5.....	20
Figura 2.11: Vista trasversale del tessuto che mette in evidenza lo spessore.....	21
Figura 2.12: Dettaglio di un poro interfilato con diametro idraulico $D_h = 125.21 \mu m$	21
Figura 2.13: Rappresentazione grafica di una cella nei casi di dominio 2D (a) e 3D (b) [19]	24
Figura 2.14: Rappresentazione di un caso mono-dimensionale per l'applicazione di schemi Upwind	26

Figura 2.15: Valutazione della separazione di scala di flusso nei materiali fibrosi mediante il confronto tra permeabilità e dimensione dei pori. Adattato da Syerko et al. [24].....	31
Figura 3.1: Generica cella esaedrica [29]	37
Figura 3.2: Blocco geometrico costituito da 6 vertici, ottenuto in seguito al collasso di due coppie di vertici ($7 \rightarrow 4$, $6 \rightarrow 5$) tra loro [29].....	38
Figura 3.3: Dettaglio del differente livello di densità della mesh nell'intorno del tessuto	41
Figura 3.4: Configurazione iniziale del dominio. Si osservano il reservoir di acqua inizializzato e la definizione delle zone create con il comando <code>topoSet</code>	41
Figura 3.5: Risultati dello studio di grid independence per tre livelli di raffinamento, da Bianca et al. [35]	48
Figura 3.6: Risultati dello studio di grid independence. Velocità del fluido in uscita rispetto al numero di celle (a) e al numero di celle per diametro, CpD (b).....	50
Figura 4.1: Verifica della legge di Bosanquet tramite confronto, tra soluzione numerica (CFD, in rosso) e teorica (in blu), dell'evoluzione temporale della risalita del liquido per due condizioni di bagnabilità e $h_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ m; a) superficie idrofila, $\theta = 40^\circ$ e b) superficie minormente idrofila $\theta = 80^\circ$	56
Figura 4.2: Verifica della legge di Lucas-Washburn tramite confronto, tra soluzione numerica (CFD, in rosso) e teorica (in blu), dell'evoluzione temporale della risalita del liquido per due condizioni di bagnabilità; a) $\theta = 40^\circ$ e b) $\theta = 80^\circ$	57
Figura 4.3: Forma del menisco per due condizioni di bagnabilità: a) superficie idrofila, $\theta = 40^\circ$ e b) superficie minormente idrofila, $\theta = 80^\circ$	59
Figura 4.4: Evoluzione temporale della frazione volumetrica del liquido nel sistema per le due condizioni osservate: a) saturazione completa della fabriczone e presenza del breakthrough, b) parziale saturazione della fabriczone e assenza del breakthrough	60
Figura 4.5: Andamento della frazione volumetrica dell'acqua nella fabriczone per le armature a) BW, b) PW e c) TW	62
Figura 4.6: Andamento della frazione volumetrica dell'acqua nella fabriczone per le combinazioni di densità a) 22-15 fili/cm e b) 29.3-20 fili/cm.....	64
Figura 4.7: Andamento della frazione volumetrica dell'acqua nella fabriczone per le armature BW (rosso), PW (blu) e TW (verde) con densità 22-15 fili/cm e $\theta = 80^\circ$	66

Figura 4.8: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi in paraview a $t = 0.0025$ s per strutture con $\theta = 40^\circ$ (a, b, c) e $\theta = 80^\circ$ (d, e):	70
Figura 4.9: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi ad immagini a $t = 0.0001$ s per strutture con $\theta = 40^\circ$:	73
Figura 4.10: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi ad immagini a $t = 0.0011$ s per strutture con $\theta = 40^\circ$ (a, b) e $\theta = 80^\circ$ (c, d, e):	76
Figura 4.11: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi ad immagini a $t = 0.0025$ s per geometrie con $\theta = 40^\circ$ (a, b) e $\theta = 80^\circ$ (c, d, e):	79
 Figura B. 1: Immagini dei tessuti BW con r_f ottimale per ciascuna combinazione di densità di fili	97
Figura B. 2: Immagini dei tessuti TW con r_f ottimale per ciascuna combinazione di densità di fili	98
Figura B. 3: Immagini dei tessuti PW con r_f ottimale per ciascuna combinazione di densità di fili	98

Acronimi

A

ASTM

American Society for Testing and Materials; 8

B

BW

Basket Weave; 9

C

CFD

Computational Fluid Dynamics; 2

CI

Connectivity Index; 52

CpD

Cells per Diameter; 39

CSF

Continuum Surface Force; 29

F

FR

Filling Rib; 21

FVM

Finite Volume Method; 22

G

GUI

Graphic User Interface; 13

N

NIH

National Institute of Health; 52

O

OpenFOAM

Open-source Field Operation And Manipulation; 13

P

PF

Packing Fraction; 6

PISO

Pressure-Implicit with Splitting of Operator; 30

PW

Plain Weave; 9

R

REV

Representative Elementary Volume; 17

S

SIMPLE

Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations; 30

T

TVD

Total Variation Diminishing; 26

TW

Twill Weave; 9

V

VOF

Volume Of Fluid; 28

Lista dei simboli

Simbolo	Descrizione	Unità di misura
a	Termine nell'equazione di risalita capillare	s^{-1}
A_c	Superficie generica che racchiude V_c	m^2
A_i	Area del cluster i-esimo	m^2
A_{max}	Area del cluster con la maggiore estensione	m^2
A_{poro}	Area poro interfilato	m^2
A_{tex}	Area della superficie superiore del tessuto	m^2
$A_{tex,wet}$	Area bagnata della superficie superiore del tessuto	m^2
A_{tot}	Area totale dei cluster	m^2
b	Termine nell'equazione di risalita capillare	m^2/s^2
Bo	Numero di Bond	-
C_f	Cover factor	-
Co	Numero di Courant	-
Co_{max}	Valore del limite superiore per il numero di Courant	-
d	Numero di diffusione adimensionato	-
D_1	Densità dei fili di trama	$fili/cm$
d_1	Diametro dei fili di trama	cm
D_2	Densità dei fili di ordito	$fili/cm$
d_2	Diametro dei fili di ordito	cm
D_h	Diametro idraulico dei pori interfilato del tessuto	m
f	Parametro che riferisce al termine convettivo o diffusivo del flusso normale alla superficie	-
$f_{tex,wet}$	Porzione bagnata di superficie superiore del tessuto	-
f_σ	Forza volumetrica di tensione superficiale	N/m^3
g	Accelerazione gravitazionale	m/s^2
h	Posizione del fronte fluido nella prova capillare	m
h_0	Altezza iniziale del liquido nel capillare	m
h_{eq}	Altezza di equilibrio	m
h_f	Altezza della colonna di fluido al termine della prova capillare	mm
k	Parametro che riferisce al numero di facce del V_c	-
l	Lunghezza del campione di tessuto	m

L	Lunghezza caratteristica nel calcolo del numero di Bond	m
$lato_x$	Dimensione della sezione del capillare lungo x	m
$lato_y$	Dimensione della sezione del capillare lungo y	m
l_x	Lunghezza del lato della mesh lungo la direzione x	cm
l_y	Lunghezza del lato della mesh lungo la direzione y	cm
l_z	Lunghezza del lato della mesh lungo la direzione z	cm
m	Rapporto di due gradienti consecutivi nello schema TVD	-
$\mathbf{n}$	Versore normale alla superficie A_c	-
N	Numero di cluster	-
n_x	Numero di celle lungo la direzione x	-
n_y	Numero di celle lungo la direzione y	-
n_z	Numero di celle lungo la direzione z	-
N_z	Versore normale in direzione z	-
O_a	Open area	-
P_{poro}	Perimetro poro interfilato	m
r	Generico raggio	m
R, R_1, R_2	Raggi di curvatura	m
r_f	Reduction factor	-
s	Altezza effettiva del filo	cm
S_1	Spaziatura tra i fili di trama	cm
S_2	Spaziatura tra i fili di ordito	cm
S_ϕ	Termine sorgente nell'equazione di trasporto	-
t	Coordinata temporale	s
t_1	Tempo di transizione tra regime inerziale e regime visco-inerziale	s
t_2	Tempo di transizione tra regime visco-inerziale e regime viscoso	s
$\mathbf{U}$	Vettore velocità	m/s
U	Componente del vettore velocità lungo x	m/s
$\mathbf{U}_r$	Vettore velocità relativa	m/s
V	Componente del vettore velocità lungo y	m/s
V_{aria}	Volume degli spazi vuoti nel filato	m^3
V_c	Volume di controllo	-
V_{fibre}	Volume occupato dalle fibre nel filato	m^3
V_{filato}	Volume del filato	m^3
V_{water}	Quantità totale di liquido	m^3
w	Larghezza effettiva del filo	cm
x	Coordinata lungo l'asse delle ascisse	-
y	Coordinata lungo l'asse delle ordinate	-
Z	Componente del vettore velocità lungo z	m/s
z	Coordinata lungo l'asse verticale	-

z_{min}, z_{max}	Coordinate delle quote inferiore e superiore del tessuto	<i>cm</i>
α	Frazione volumetrica	-
Γ	Coefficiente di diffusione della generica grandezza ϕ	m^2/s
γ, σ	Tensione superficiale	N/m
δ	Estensione della regione di transizione fittizia	<i>m</i>
Δl	Differenza fra la lunghezza del filo quando viene disteso una volta rimosso dal tessuto e la lunghezza del campione di tessuto	<i>m</i>
ΔP	Pressione di Laplace	<i>Pa</i>
Δt	Variazione temporale	<i>s</i>
Δx	Variazione spaziale	<i>m</i>
θ	Angolo di contatto	°
κ	Curvatura	$1/m$
λ_c	Lunghezza capillare	<i>m</i>
μ	Viscosità dinamica	$kg/m/s$
ν	Poisson ratio	-
ρ	Densità	kg/m^3
τ	Sforzo viscoso	N/m^3
τ_t	Sforzo turbolento	N/m^3
ϕ	Generica grandezza nella trattazione FVM	-
ψ	Limitatore di flusso nello schema TVD	-
Ω	Dominio	-

1 Introduzione

Nel mercato tessile si registra una crescente domanda di prodotti di alta qualità e con specifiche caratteristiche tecniche [1], [2]. Il settore tessile è influenzato dai cambiamenti continui di tendenze e comportamenti e, al fine di mantenersi al passo, è necessaria una continua ricerca di innovazioni che permettano di rispondere alle esigenze, nonché di anticiparle [2]. Una delle prerogative chiave dell'abbigliamento è il comfort e sono quattro gli aspetti fondamentali che devono essere garantiti affinché sia totale: comfort sensoriale al tatto, comfort ergonomico, comfort estetico e comfort termico. In ambiente di lavoro, ad esempio, produttività e prestazioni mentali e fisiche sono relazionate al comfort termico, che se viene a mancare ne comporta un calo [2].

Oltre al settore dell'abbigliamento tecnico e sportivo, la comprensione dei fenomeni di trasporto dei liquidi nei materiali tessili riveste un ruolo fondamentale anche in ambito biomedicale e sanitario. La capacità di un tessuto di assorbire, distribuire e trasferire l'umidità influenza, infatti, le prestazioni di prodotti destinati all'igiene personale, alle medicazioni avanzate per il trattamento delle ferite (wound dressings) e ai dispositivi tessili impiegati per la prevenzione delle lesioni cutanee da pressione. In tali applicazioni, una corretta gestione dei fluidi contribuisce a mantenere condizioni microclimatiche favorevoli a contatto con la pelle, riducendo fenomeni di macerazione, irritazione e deterioramento dei tessuti biologici. Per questo motivo, lo studio dei meccanismi di imbibizione capillare e delle relazioni tra struttura tessile e trasporto dei fluidi rappresenta un tema di crescente interesse sia dal punto di vista industriale sia da quello scientifico.

Il corpo umano opera come un sistema omeotermico ed endotermico, la cui regolazione termica si basa sulla produzione interna di calore metabolico [3]. Per garantire il corretto funzionamento fisiologico, è necessario che l'organismo mantenga la propria temperatura interna tra i 36 °C e i 38 °C [4], [5], [6].

Durante un'attività lavorativa o sportiva intensa, l'accumulo di sudore nei capi d'abbigliamento è inevitabile e la percezione del discomfort aumenta proporzionalmente al livello di umidità [2], [6]. La presenza di umidità altera l'interazione fisica tra la pelle e il tessuto provocando una sensazione di adesione alla pelle [3], nonché riduce drasticamente il potere isolante del capo [2]. Il

problema principale si verifica non appena si termina l'attività, dal momento che la produzione di calore metabolico crolla bruscamente [2], [3] e quando il vapore intrappolato raggiunge le zone più fredde del capo, condensa, ed il calore latente è convertito in calore sensibile, comportando un aumento locale della temperatura [3]. Se gli indumenti presentano una bassa permeabilità al vapore acqueo, questo condensa all'interno del tessuto [3]. In casi estremi può aumentare il rischio di ipotermia, specialmente in condizioni fredde e umide [2], [3]. A valle di ciò risulta essenziale ottimizzare la progettazione dei materiali tessili che garantiscano un trasferimento efficiente dell'umidità in diverse condizioni attraverso una solida comprensione dei processi coinvolti [2], [6].

Nelle strutture fibrose il liquido può assumere diverse morfologie e può riempire parzialmente o completamente gli spazi interfibra, trovarsi tra i filati stessi, creare film lungo le fibre o nelle fessure delle stesse. Il processo di imbibizione del liquido avviene quindi su scale spaziali e temporali differenti, che dipendono dai materiali e dalla struttura del tessuto, dando così luogo a un'ampia varietà di dinamiche [7].

Proprietà quali bagnabilità, capacità di traspirazione, quantità di acqua che può essere assorbita ed il tempo richiesto per asciugarsi possono essere controllate grazie all'ampia scelta dei materiali, sintetici e naturali. Ad esempio, bagnabilità e assorbimento possono essere controllati variando la sezione trasversale delle fibre in modo da aumentarne l'area superficiale oppure combinando fibre idrofiliche ed idrofobiche nei fili, o ancora intrecciando fili idrofilici ed idrofobici nel processo di tessitura del tessuto [4]. In riferimento alla capacità di asciugarsi, è stato notato che le fibre asciugano tutte alla stessa velocità e conseguentemente il tempo richiesto per l'asciugatura è proporzionale alla quantità di acqua che il tessuto è in grado di assorbire, che dipende fortemente dallo spessore del tessuto [4].

La complessità dei fenomeni di trasporto nei materiali tessili rende tuttavia difficile descrivere in modo esaustivo la relazione tra struttura del tessuto e comportamento del liquido mediante approcci puramente sperimentali. I processi di imbibizione dipendono infatti simultaneamente dalla geometria tridimensionale del tessuto, dalle proprietà superficiali delle fibre, dalla distribuzione dei pori e dalle interazioni tra le fasi liquida e gassosa. Sebbene le tecniche sperimentali consentano di misurare il comportamento macroscopico del sistema, esse forniscono informazioni limitate sui meccanismi locali che governano il trasporto del fluido all'interno della struttura fibrosa.

In questo contesto, la Fluidodinamica Computazionale (Computational Fluid Dynamics, CFD) rappresenta uno strumento particolarmente efficace, in quanto permette di analizzare in dettaglio l'evoluzione dell'interfaccia liquido-gas e di investigare l'influenza delle caratteristiche geometriche e delle proprietà di bagnabilità sui fenomeni di trasporto capillare. Inoltre, l'utilizzo di modelli numerici consente di valutare rapidamente diverse configurazioni progettuali, riducendo il

numero di prototipi e campagne sperimentali necessarie durante lo sviluppo di nuovi materiali tessili.

L'obiettivo del presente studio è sviluppare un modello CFD in grado di descrivere e predire il trasporto multifase all'interno di strutture tessili, valutando l'influenza sia della geometria del tessuto sia della bagnabilità superficiale sui fenomeni di imbibizione capillare. In particolare, l'analisi viene condotta sulla scala dei pori interfilato del tessuto, nella quale la geometria dei fili e dei pori generati dal loro intreccio viene esplicitamente risolta. I tessuti sono stati modellati come impermeabili, conseguentemente, lo studio si è concentrato sul fenomeno di risalita capillare attraverso i pori interfilato, definiti dall'interlacciamento dei fili. Questo nell'ottica di riuscire ad ingegnerizzare il processo di sviluppo dei tessuti in modo tale da prevedere le proprietà finali dei tessuti, e conseguentemente dei capi d'abbigliamento, già in fase di progettazione [2], [6].

2 Elementi teorici

2.1 I tessuti

I tessuti sono strutture che presentano un elevato rapporto superficie su spessore e, come conseguenza di ciò, vengono spesso considerati bidimensionali. Si ottengono a partire dai filati, strutture che nella loro forma più semplificata sono assimilabili a dei fili di fibre lineari ed unidimensionali.

2.1.1 Le fibre

Le *fibre* sono le componenti elementari del filo. Vengono raggruppate tra loro e grazie a ciò svolgono un ruolo significativo nella realizzazione e nelle prestazioni del prodotto. Possono essere compattate e combinate in strutture nonwoven, consolidate in un filo o trasformate in un tessuto filato, a maglia (knit) o a trama (woven).

Le fibre si possono suddividere in fibre *naturali*, fibre *artificiali* (viscosa, lyocell, poliestere) e fibre *tecniche* ad alte prestazioni (aramidiche, fibre di carbonio, fibre di vetro) [8].

Le fibre naturali sono quelle di derivazione vegetale o animale, e ne sono esempi il cotone, il lino e la lana.

Il *cotone* è la fibra cellulosica naturale per eccellenza ed è costituito da lunghe catene di cellulosa naturale, dove le unità cellulosiche sono tenute insieme da forze intermolecolari forti. È proprio grazie a queste ultime che tali fibre sono ragionevolmente resistenti.

Le fibre tessili sono caratterizzate da un elevato rapporto lunghezza/diametro [8]. Possono essere utilizzate tal quali, trattate chimicamente per migliorarne le performance oppure combinate con altre fibre. Nella produzione dei prodotti tessili tradizionali è comune l'uso sia di fibre naturali sia di un'ampia gamma di fibre sintetiche, tra cui poliestere, nylon, acrilico e propilene.

Il *poliestere* è un polimero sintetico a catena lunga ed è prodotto mediante un processo di filatura a fusione. Questa fibra gode di un'eccellente resistenza e di

buone proprietà di allungamento. La possibilità di essere miscelato con fibre naturali come il cotone contribuisce alla sua ampia diffusione nel settore dell'abbigliamento [8].

Come inizialmente accennato, il filato è un insieme di fibre e sono principalmente tre i fattori chiave che influenzano sia le prestazioni del filato durante la lavorazione o la tessitura, sia le prestazioni funzionali del tessuto ricavato dalle stesse. Tali fattori, presentati a seguire, sono la compattezza delle fibre, la disposizione delle fibre e la mobilità delle fibre [9].

- **Compattezza delle fibre.**

La *compattezza* delle fibre ricopre un ruolo importante nel garantire l'integrità della struttura del filato e la sua stabilità dimensionale. Per un dato tipo di fibra, un'elevata compattezza comporta una bassa comprimibilità del filato, elevata resistenza, bassa flessibilità, bassa porosità e maggiore assorbimento dell'umidità lungo la superficie del filato piuttosto che lungo le fibre costituenti il filato stesso [9].

Filati le cui fibre costituenti presentano diversi livelli di compattezza possono essere prodotti per soddisfare specifiche caratteristiche prestazionali del tessuto. A titolo di esempio si menzionano la resistenza, la gestione dell'umidità ed il comfort [9].

La compattezza delle fibre in un tessuto può essere espressa tramite la densità apparente del filo (g/cm^3), o analogamente il *volume specifico* (cm^3/g), oppure tramite il volume d'aria all'interno del filato.

Si può immaginare che la struttura tridimensionale del filato sia costituita da materiale fibroso e da zone d'aria che si creano in virtù della distribuzione spaziale delle fibre, nel caso dei fili da fibre discontinue, o delle separazioni tra i filamenti, nel caso dei fili a filamento continuo o testurizzati. Ne segue che un filato è definibile come una struttura porosa [9].

Il volume specifico effettivo del filo è funzione del volume delle fibre e della porosità interna. A tal proposito si introduce la *frazione di riempimento*, o packing fraction (PF), che quantifica la frazione di volume occupata dalle fibre rispetto al volume totale del filato (Equazione 2.1). Maggiore è la frazione di riempimento, maggiore sarà il volume occupato dalle fibre e conseguentemente minore sarà la porosità in relazione alla minore frazione di vuoto [9].

$$PF = \frac{V_{fibre}}{V_{filato}} = \frac{V_{fibre}}{V_{fibre} + V_{aria}} \quad (2.1)$$

- **Arrangiamento delle fibre.**

L'*arrangiamento* delle fibre è un fattore che influisce notevolmente su alcune caratteristiche prestazionali del filato e del tessuto, quali l'aspetto e la resistenza del filato, e la stabilità dimensionale e la copertura del tessuto [9].

- **Mobilità delle fibre.**

L'ultimo fattore menzionato è la *mobilità* delle fibre, aspetto fondamentale nella progettazione del filato perché determina anch'esso la stabilità dimensionale sia del filato che del tessuto che se ne ricava [9].

2.1.2 I filati

Il *filato* è una struttura lineare costituita da fibre discontinue o da filamenti continui assemblati mediante differenti tecniche di consolidamento. In base agli elementi costituenti, i filati possono essere classificati in filati a filamento continuo e filati da fibre discontinue (spun yarns) [9].

Il *filato a filamenti continui* presenta una struttura semplice nella quale i filamenti sono disposti l'uno accanto all'altro a formare una configurazione parallela. Possono essere monofilamento oppure multifilamento. Questo tipo di filato è tipicamente prodotto tramite un processo di estrusione di un polimero da una filiera (*spinneret*) per formare filamenti che vengono successivamente solidificati mediante raffreddamento, evaporazione del solvente o coagulazione, a seconda del processo utilizzato.

Diversamente, i *fili da fibre discontinue* vengono prodotti da fibre in fiocco, di origine naturale o sintetica, tramite dei processi consecutivi con il fine di consolidarle in un filato tramite torsione o altre modalità.

Un'altra classificazione distingue i filati in base alla complessità strutturale.

In generale, l'assenza di una classificazione univoca e quindi la possibilità di classificarli in più categorie, rappresenta un vantaggio perché consente di adattare l'approccio progettuale in funzione delle specifiche esigenze, semplificando quindi la fase di selezione dei filati stessi.

La scelta è quindi guidata direttamente dalle proprietà fisiche desiderate e dalle caratteristiche prestazionali richieste [9].

Dopo aver classificato i filati, si introducono i principali parametri strutturali utilizzati per caratterizzarli, tra cui titolo e torsione.

- Titolo del filato.

Il *titolo del filato* (yarn count) è noto anche come *finezza* del filato. La *finezza* descrive la dimensione del filo ed intuitivamente il parametro più immediato per la sua descrizione risulta essere il diametro. La definizione del diametro del filato è però molto complessa, in relazione all'elevata variabilità dello spessore e dalla deviazione dalla perfetta rotondità della sezione trasversale del filato lungo la sua estensione. Per questo si preferisce utilizzare la *densità lineare* del filato come misura indiretta della *finezza*.

Per esprimere la densità lineare si possono utilizzare due sistemi: il sistema diretto o il sistema indiretto. Il sistema diretto definisce la densità lineare come peso per unità di lunghezza e ne sono esempi il *denier* ed il *tex*. Il *tex* esprime la densità

lineare utilizzando il peso in grammi di 1000 m di filato, mentre il *denier* esprime il peso in grammi di 9000 m di filato. Diversamente, il sistema indiretto la esprime come lunghezza per unità di peso e sono esempi i sistemi dei filati di cotone e dei filati di lana pettinata [9]. Il sistema tex è considerato dall'ASTM (*American Society for Testing and Materials*) come il sistema universale di misurazione del titolo dei filati. In particolare, per la descrizione della finezza delle fibre o dei filamenti si utilizzano estensioni del tex quali il *millitex* ed il *decitex*, mentre per i prodotti di peso intermedio si usa il *kilotex* [9].

- Torsione del filato.

La torsione è un processo meccanico che consiste nel far ruotare su sé stesso un fascio di fibre per ottenere un filato coeso.

Ci si ricollega così alla *torsione del filato* (yarn twist), descritta solitamente tramite due parametri: il livello di torsione e la direzione di torsione [9].

Il *livello di torsione* viene definito dal numero di giri di torsione per unità di lunghezza, e tipi di filato diversi richiedono livello di torsione differenti in base alle prestazioni desiderate. I filamenti continui tipicamente non richiedono torsione per assicurare resistenza, ma può essere comunque prevista con il fine, ad esempio, di evitare la separazione delle fibre. È importante sottolineare però, d'altro canto, che un livello di torsione troppo elevato comporta il deterioramento della resistenza. In riferimento ai fili da fibre discontinue, invece, la torsione è necessaria al fine di mantenere l'integrità del filato e garantire la resistenza ed in generale, anche in questa categoria, tipologie diverse di filati richiedono diversi livelli di torsione.

Per quanto riguarda la *direzione di torsione*, questo parametro permette di specificare l'inclinazione apparente delle fibre rispetto l'asse del filato: senso orario, 'Z Twist', oppure antiorario, 'S Twist'. In termini pratici, l'importanza della torsione si comprende quando due filati singoli vengono ritorti tra loro per formare un filato ritorto: la torsione può essere Z/Z, Z/S, S/S oppure S/Z.

2.1.3 I tessuti fibrosi

I *tessuti fibrosi* sono costituiti da fibre e possono essere classificati in tre categorie principali [10]:

1. Tessuti costituiti da fili (*Yarn-based fabrics*);
2. Tessuti costituiti direttamente dalle fibre (*Fiber-direct fabrics*);
3. Tessuti composti o accoppiati (*Compound fabrics*).

Questo lavoro è stato focalizzato sui tessuti costituiti da filati ottenuti da fibre discontinue o da filamenti continui e comprendono i tessuti a trama (woven fabrics), a maglia (knit fabrics) e non woven.

Tra questi, il focus è stato posto sui *tessuti a trama*, nei quali due o più serie di fili vengono intrecciati tra di loro, generalmente in modo ortogonale, per ottenere il tessuto. Questa tipologia di tessuti è la predominante sia per quanto riguarda i prodotti tradizionali sia quelli con specifiche funzionalità, grazie alla maggiore resistenza, elevata stabilità dimensionale rispetto agli altri tipi di tessuto, nonché il fatto che permettono di soddisfare diversi criteri prestazionali tramite un'adeguata definizione di parametri del tessuto quali spessore, cover factor, combinazioni di tipi di filato e combinazioni di tipi di fibre [10].

2.1.4 Le armature

Nei tessuti a trama, i fili sono organizzati in due sistemi principali noti come fili di *ordito* (warp yarns) e fili di *trama* (weft yarns), in relazione a se corrono lungo la lunghezza oppure lungo la larghezza del tessuto, rispettivamente.

I fili di trama e di ordito possono essere intrecciati secondo diverse modalità ed in relazione a questa si distinguono le cosiddette *armature* del tessuto [10].

La più semplice e comunemente utilizzata è il *Plain Weave* (PW). È un tessuto particolarmente adeguato a stampe superficiali o soprattutto se si ha il fine di applicare in modo uniforme delle finiture superficiali di tipo chimico o meccanico [10]. L'unità ripetitiva della struttura è costituita da due fili di trama e due di ordito: in modo alternato, un filo di ordito passa al di sopra e al di sotto del filo di trama.

Quando più di un filo di ordito si intreccia con più di un filo di trama, si parla di *Basket Weave* (BW). A titolo di esempio si possono citare il BW 2/2 ed il BW 4/4: in riferimento al primo (2/2) questo è costituito da due fili di ordito che passano, alternatamente, due volte sopra e due volte sotto due fili di trama [10]. Per un BW 2/2 l'unità ripetitiva è formata da quattro fili di trama e quattro di ordito.

Un'altra armatura interessante è il *Twill Weave* (TW), il quale presenta una struttura diagonale sulla superficie del tessuto sono presenti delle ripetizioni su tre o più fili di ordito e trama. Prendendo come esempio il Twill 1/3, il primo filo di ordito dell'unità ripetitiva passa al di sopra del primo filo di trama e sotto i successivi, mentre spostandosi verso destra il filo di ordito passa sopra al secondo filo di trama, al terzo ed infine al quarto, passando sotto a tutti gli altri. In relazione alla direzione di queste linee diagonali il tessuto viene definito '*Z Twill*' o '*destrorso*', se si estendono verso l'alto a destra, oppure '*S Twill*' o '*sinistrorso*', se si estendono in direzione opposta. In relazione alla modalità di costruzione, presenta un minor numero di intersezioni ed una struttura più aperta rispetto ad un Plain Weave con le stesse caratteristiche [10].

In Figura 2.1 vengono riportate le rappresentazioni delle armature appena presentate, al fine di comprenderne maggiormente il pattern. Per ognuna viene inoltre riportata, in colore nero, l'unità ripetitiva.

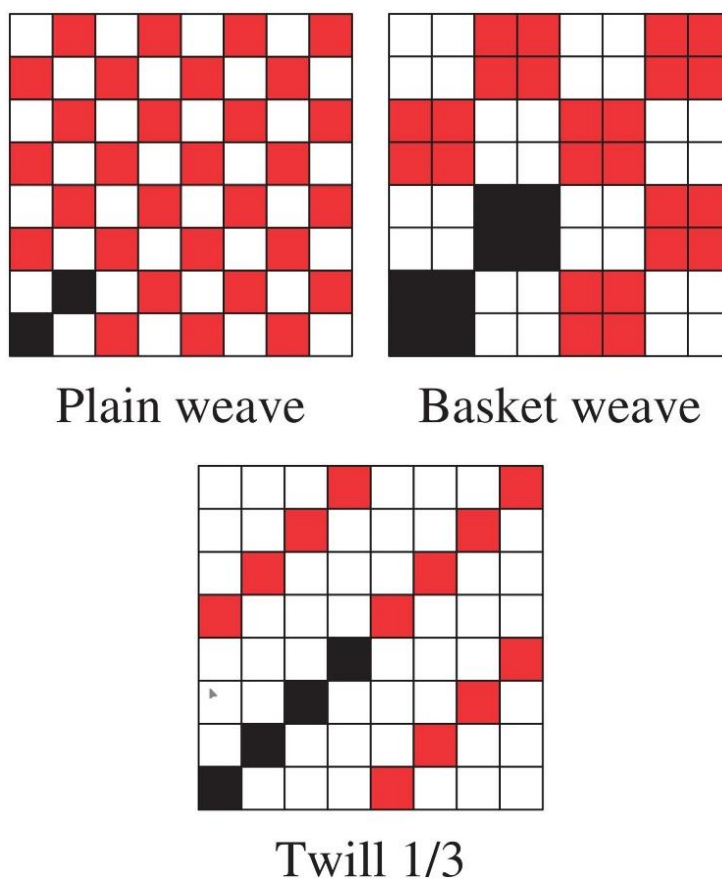


Figura 2.1: Rappresentazioni delle armature Plain Weave, Basket Weave e Twill Weave 1/3, da Zupin et al. [11]

2.1.5 Parametri fondamentali dei tessuti

Le performance e le caratteristiche di un tessuto non sono determinate solamente dall'armatura, ma anche da una serie di parametri fondamentali [10], elencati a seguire:

1. Densità dei fili, di trama e di ordito (*Fabric count*);
2. Larghezza del tessuto (*Fabric width*);
3. Spessore del tessuto (*Fabric thickness*);
4. Densità superficiale (*Area density*);
5. Ondulazione del tessuto (*Fabric crimp*);
6. Fattore di copertura (*Cover factor*).

È possibile osservare e comprendere visivamente alcuni di questi parametri in Figura 2.2.

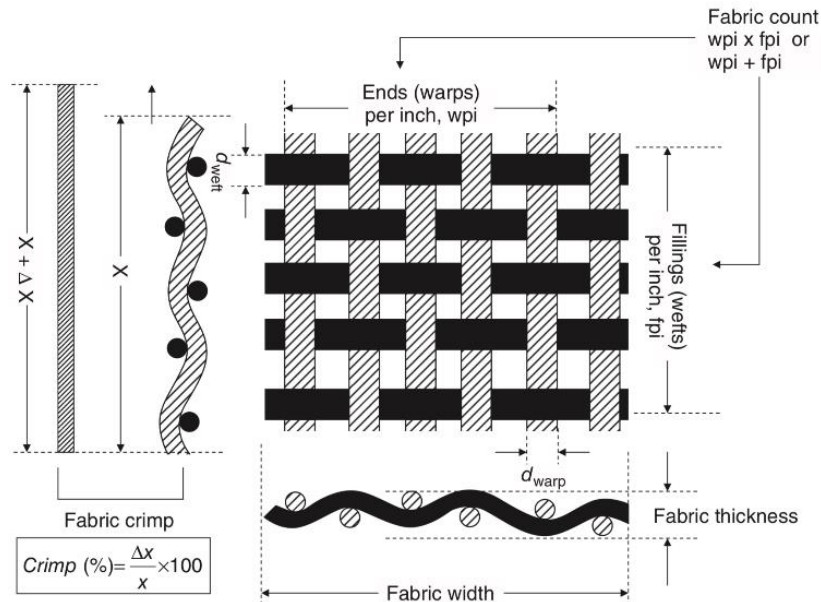


Figura 2.2: Specifiche tecniche di base dei tessuti, da [10]

1. Densità dei fili, di trama e di ordito (Fabric count).

La *densità dei fili* di trama e di ordito rappresenta il numero di fili, per unità di lunghezza, nella direzione dell'ordito e della trama e si esprime come *fili/cm* o *fili/pollice*. La densità aumenta quando i fili sono molto ravvicinati fra di loro, usando filati più fini o più grossi e modificando l'armatura, quindi prevedendo un numero minore di intrecci per unità di superficie rispetto un tessuto più rado [10].

2. Larghezza del tessuto (Fabric width).

La *larghezza del tessuto* è una grandezza che è necessario specificare a priori della fabbricazione di qualsiasi tessuto ed è soggetta a variazioni al momento dell'uscita dal telaio e per effetto di operazioni di finitura chimica e meccanica a monte [10].

3. Spessore del tessuto (Fabric thickness).

Lo *spessore del tessuto* è un parametro dipendente dalle condizioni di misura, dal momento che dipende dall'entità della deformazione del filato durante il processo di tessitura e finitura ed è difficile da misurare [10].

La misurazione dipende dalle condizioni nelle quali viene svolta, quali la pressione esercitata (nel momento in cui maggiore è la stessa, minore sarà lo spessore misurato) e il tempo di misurazione. Come conseguenza di ciò, lo spessore viene determinato sperimentalmente in accordo alla norma *BS EN ISO 5084:1997*

[12]. La misurazione viene effettuata dopo un intervallo di 30 ± 5 s, e si considera la distanza tra due piatti di riferimento, uno fisso e l'altro esercitante sul tessuto la specifica pressione, pari a 1 ± 0.01 kPa (o 0.1 ± 0.001 kPa, se si intende testare tessuti a rilievo, pile o alcuni tessuti a maglia).

4. Densità superficiale (Area density).

La *densità superficiale* è misurata in g/m^2 o in oz/yd^2 . Focalizzandosi sul campo dell'abbigliamento, tipicamente i tessuti a maggiore densità superficiale vengono utilizzati per produrre camicie e magliette, mentre i tessuti a minore densità superficiale vengono utilizzati per capi come pantaloni o gonne. Il peso del tessuto può essere modificato o controllato agendo su parametri costruttivi e progettuali come la scelta del tipo di fibra, il titolo del filo, il fabric count e l'armatura. In aggiunta, anche trattamenti meccanici o chimici post-tessitura possono permettere di intervenire sullo stesso [10].

5. Ondulazione del tessuto (Fabric crimp).

Il *fabric crimp* deriva dal fatto che nel tessuto, al fine di ottenere una certa armatura, i fili vengono costretti ad intrecciarsi tra di loro, incurvandosi ed assumendo quindi una struttura ondulata. Crimp infatti significa proprio 'ondulatura', 'arricciatura'. Ne segue che la lunghezza del filato contenuto nel tessuto è maggiore della lunghezza proiettata del tessuto.

Il crimp, espresso in termini percentuali, si determina come segue:

$$Crimp (\%) = \frac{\Delta l}{l} 100 \quad (2.2)$$

dove, l è la lunghezza del campione di tessuto e Δl la differenza fra la lunghezza del filo quando viene disteso una volta rimosso dal tessuto e la lunghezza del campione di tessuto. Il crimp stesso rappresenta una forma di deformazione del filo e conseguentemente la sua misurazione risulta difficoltosa, soprattutto perché la misura dipende dal carico applicato durante il raddrizzamento del filato [10].

6. Cover factor.

Il *cover factor* è un indice geometrico derivato relazionato alla frazione dell'area del tessuto occupata da un insieme di fili, di trama o di ordito. Si possono definire infatti sia il cover factor dell'ordito che quello della trama.

In aggiunta, anche quello globale del tessuto, noto come *cloth cover factor* (C_f) e definito nell'equazione:

$$C_f = (D_1 d_1 + D_2 d_2 - D_1 d_1 D_2 d_2) \quad (2.3)$$

dove, D_1 e D_2 sono le densità dei fili di ordito e di trama, mentre d_1 e d_2 sono i diametri dei fili di ordito e trama [10]. L'equazione 2.3 è valida nel caso di fili cilindrici, distribuzione regolare ed assenza di compressione.

Il parametro complementare al cover factor è l'*Open area* (O_a) quale è relazionata alla superficie dei fori del tessuto [10] e si calcola come:

$$O_a = 1 - C_f \quad (2.4)$$

2.2 TexGen

TexGen è un software Open Source sviluppato dall'Università di Nottingham per modellare la geometria di tessuti ed è stato utilizzato come base per modelli relativi a varie proprietà, tra cui la meccanica dei tessuti, la permeabilità e il comportamento meccanico dei compositi [13]. I modelli creati possono poi essere esportati, in vari formati, quando si ha la necessità di svolgere ulteriori analisi.

In questo studio l'uso di TexGen ha permesso la generazione delle geometrie dei tessuti di interesse: i tessuti sono stati modellati a partire dai fili, i quali sono trattati come volumi solidi.

Le geometrie risultanti sono state successivamente esportate in formato .stl, quindi inserite ciascuna in un caso OpenFOAM, con l'obiettivo di studiare il trasporto multifase attraverso tessuti tecnici tramite Fluidodinamica Computazionale (CFD).

Le geometrie si possono generare tramite tre modalità [14]:

1. Wizard;
2. Menu Modeller della Graphic User Interface, GUI. La generazione viene fatta passo passo, consentendo il controllo totale sulla geometria tessile;
3. Script Python. Python è integrato nell'interfaccia grafica e tramite l'esecuzione dello script, che permette un facile accesso alle funzionalità, si ottiene la generazione della geometria.

Dalla finestra di apertura del software, mostrata in Figura 2.3 è possibile selezionare la modalità di generazione del tessuto desiderata.

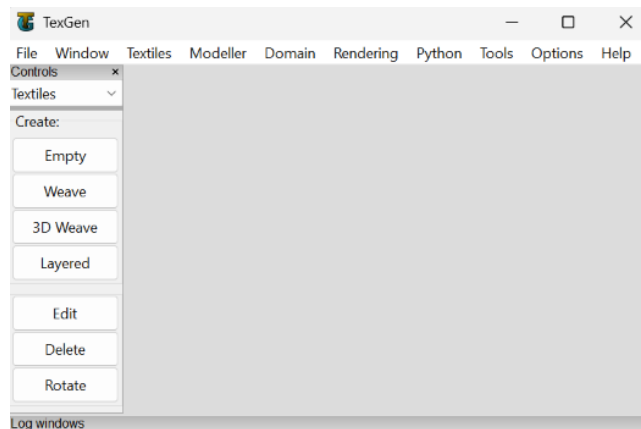


Figura 2.3: Finestra di apertura di TexGen

2.2.1 Modalità Wizard

La modalità *Wizard* [15] è la più intuitiva e permette di creare facilmente la geometria del tessuto, grazie anche alla possibilità di definire le caratteristiche desiderate mediante una griglia bidimensionale interattiva, mostrata in Figura 2.4. Nonostante ciò, comporta una perdita di flessibilità e controllo sulla geometria ottenibile.

Le limitazioni relazionate a questo metodo sono la sola possibilità di creare tessuti con la medesima distanza tra fili di trama e di ordito ed il fatto che la sezione trasversale può essere definita solo come costante e di forma ellittica.

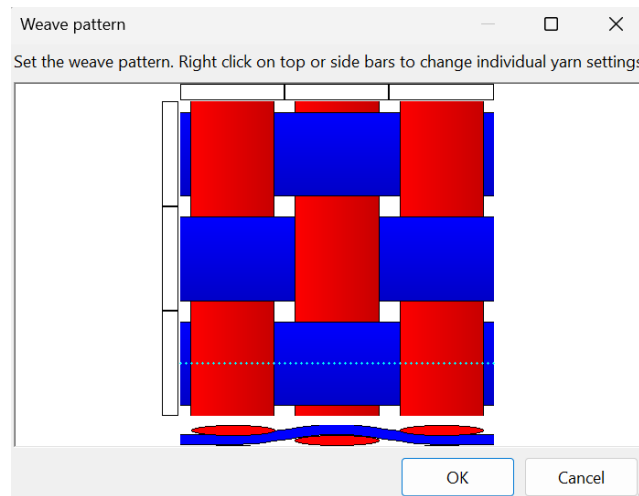


Figura 2.4: Generica schermata della griglia bidimensionale interattiva

2.2.2 Menu Modeller della Graphic User Interface (GUI)

Mediante l'utilizzo del menu *Modeller* della Graphic User Interface (GUI) si riesce ad avere maggiore libertà e manualità nella realizzazione di strutture tessili complesse o asimmetriche [15].

Questa modalità si basa su un approccio bottom-up, che parte dalla caratterizzazione del singolo filato. Garantisce una maggiore flessibilità, che si esprime sia nella gestione della traiettoria del filato nello spazio, consentendo all'utente di scegliere tra diverse funzioni interpolanti (cubica, lineare e Bézier) per definirne il percorso, sia nella variabilità della sezione, che può essere modificata localmente.

In Figura 2.5 si riporta un esempio di filo creato utilizzando questa modalità.

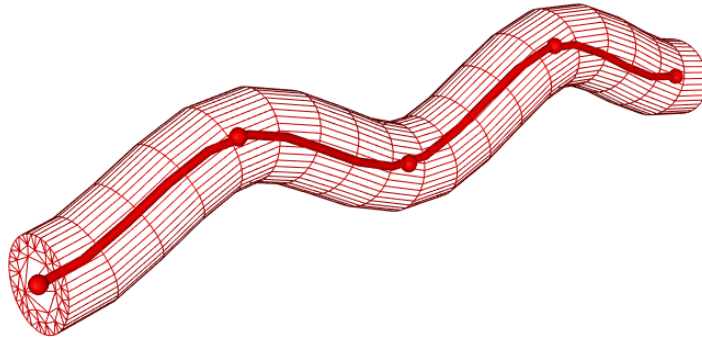


Figura 2.5: Generico esempio di filo, costituito da 5 nodi, creato attraverso il menu Modeller

2.2.3 Codice Python

La terza modalità menzionata per la generazione della geometria si basa sull'utilizzo del linguaggio di programmazione *Python*. Nonostante l'interfaccia di TexGen sia scritta in C++, tutti gli elementi e le funzioni della GUI sono interamente mappati ed accessibili tramite stringhe di codice Python [15], [16].

È un metodo che consente di replicare sia l'approccio bottom-up del menu Modeller sia quello di Wizard.

Nel primo caso, il codice va a richiamare le funzioni delle librerie native di TexGen per inizializzare un tessuto vuoto, inserire i singoli filati, mapparne i nodi di passaggio ed assegnarne le funzioni di interpolazione e le proprietà della sezione.

Considerando invece l'altro caso, la possibilità di utilizzare uno script strutturato secondo la logica del Wizard si riesce ad agevolare la modellazione di armature complesse e quindi superare le precedenti limitazioni.

L'utente specifica i parametri macroscopici come la larghezza, l'altezza e la spaziatura dei filati, e definisce l'armatura tramite l'uso di funzioni specifiche quali il comando *SwapPosition*, che fa calcolare il posizionamento e l'ondulazione dei fili nello spazio al solutore geometrico di TexGen, in modo autonomo.

Questa metodologia è quella utilizzata in questo studio, in virtù dei vantaggi che si possono trarre dall'automazione e dalla riproducibilità. In particolare, il codice è stato sviluppato per la generazione di geometrie costituite ciascuna da 5 fili di trama e 5 fili di ordito, partendo da parametri geometrici e meccanici specificati, quali la densità dei filati (D_1 , D_2), il diametro del filo (d_1 , d_2), il *Poisson ratio* (ν) ed il *reduction factor* (r_f).

A partire da questi dati vengono definite la sezione trasversale costante dei fili, la spaziatura e la posizione reciproca degli stessi nel tessuto. Maggiori informazioni rispetto a questi parametri e alla scelta del numero di fili nel tessuto generato sono riportati al Capitolo 2.3.

Nel definire la struttura, tutte le coordinate geometriche vengono calcolate direttamente nella funzione dello script. La spaziatura tra i fili (S_1 , S_2) è ricavata dalla densità dei fili (D_1 , D_2) come riportato nell'equazione 2.7 al Capitolo 2.3.

Vengono poi calcolate le dimensioni della sezione trasversale dei filati, che vengono definite di forma lenticolare poiché i fili risultano schiacciati quando intrecciati. Lo schiacciamento del filato comporta una riduzione della sua altezza ed un allargamento orizzontale: l'altezza effettiva s è funzione del Reduction factor, mentre la larghezza w è funzione del Poisson ratio. Le espressioni che permettono la descrizione matematica di queste grandezze sono riportate nel Capitolo 2.3.

Determinate queste dimensioni di base, viene definito il percorso dei fili nello spazio attraverso una sequenza di nodi, le cui coordinate utilizzano i valori di spaziatura e di spessore appena calcolati. Questo permette che i fili si incrocino sopra e sotto seguendo lo schema dell'armatura selezionata, ma prevenendo sovrapposizioni o compenetrazioni.

Infine, viene applicata ai filati un'interpolazione cubica, utilizzata per simulare il reale andamento curvilineo del filato. In questa fase lo script definisce anche la risoluzione geometrica, i vettori per la ripetizione del pattern e i confini esatti del dominio che delimitano il volume del tessuto.

Per garantire una semplice ed intuitiva distinzione tra le varie geometrie create, il cui numero può essere elevato in base alle informazioni fornite in input dall'utente, a ciascuna viene assegnata una stringa identificativa ed univoca: "*Armatura- D_1 - D_2 - ν - r_f* ". In fase di esportazione, viene generata e salvata automaticamente la mesh superficiale di ogni configurazione, in formato .stl. Si riporta, a titolo di esempio, un tessuto generato tramite script Python in Figura 2.6.

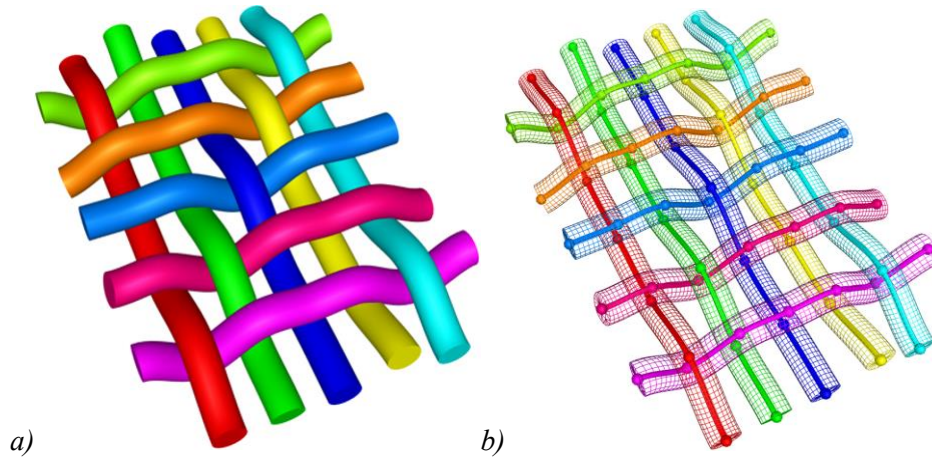


Figura 2.6: Tessuto TW-22-15-0.4-0.90 generato tramite script Python. Visualizzazione del pattern di intreccio dei fili (a) e della struttura geometrica interna del filo che permette di osservare i nodi raccordati dalla linea di interpolazione (b)

2.3 Geometrie utilizzate

Le geometrie riprodotte ed utilizzate in questo progetto di tesi sono state definite considerando le armature precedentemente descritte al Paragrafo 2.1.4 e variando alcuni parametri geometrici e meccanici, quali le densità dei fili di ordito, D_1 , e di trama, D_2 , ed il reduction factor, r_f , discussi maggiormente a seguire.

Si riporta nuovamente, per facilitazione, la stringa identificativa assegnata a ciascuna geometria in fase di generazione: "*Armatura- D_1 - D_2 - ν - r_f* ".

Il comportamento dei tessuti intrecciati può essere descritto riferendosi semplicemente ad una piccola porzione, ripetitiva, dell'intero tessuto. Questo elemento prende il nome di *Volume Elementare Rappresentativo*, o semplicemente REV (Representative Elementary Volume).

L'individuazione del REV permette di ridurre notevolmente le dimensioni del dominio computazionale, traducendosi in un minore numero di nodi e celle quindi una notevole riduzione del costo computazionale. La grande utilità risiede nel fatto che i risultati ottenuti da questo dominio possono essere trasferiti al resto del tessuto, quindi considerati rappresentativi dell'insieme.

In linea generale, come riportato nel Capitolo 2.1.4, si potrebbe riferire ad una cella elementare costituita da quattro fili, due di ordito e due di trama, per descrivere il PW e otto fili, quattro di ordito e quattro di trama, per il BW ed il TW.

Per rendere uniforme la trattazione e mantenere una simmetria nelle geometrie si è però optato per una configurazione composta da dieci fili, cinque di ordito e cinque di trama, per ognuna delle armature.

In Figura 2.7 viene mostrata la periodicità del sistema.

I filati che compongono un tessuto reale non preservano una geometria regolare: la flessione nei punti di incrocio, lo schiacciamento indotto dal contatto e l'impaccamento eterogeneo generano delle deformazioni variabili nello spazio che portano a discrepanze rispetto alla struttura idealizzata del filo.

La variabilità della deformazione e del compattamento del filato viene considerata tramite il reduction factor (r_f), un parametro definito per descrivere il grado di appiattimento della sezione trasversale del filato, e che permette di far corrispondere lo spessore della geometria generata (.stl) a quello del tessuto reale riportato nel lavoro di Zupin et al. [11], i cui risultati sperimentali provengono da tessuti realizzati con fili di cotone aventi tutti la stessa densità lineare.

I dati relativi al diametro dei fili di ordito e di trama ($d_{1,2}$) misurati tramite il microscopio ottico forniti dallo stesso lavoro sono particolarmente interessanti ed utili per definire le caratteristiche del filo e poterlo modellare utilizzando il software TexGen, secondo le modalità descritte nel Capitolo 2.2.3.

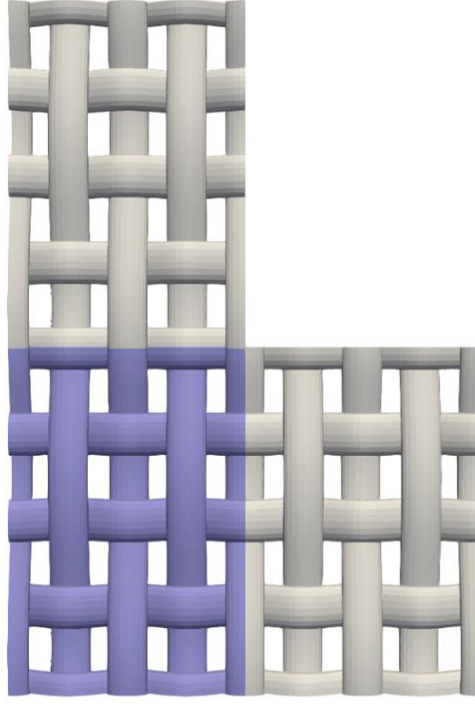


Figura 2.7: Rappresentazione della periodicità del sistema nello spazio

A partire dai diametri dei filati, d_1 e d_2 , le dimensioni della sezione del filo vengono definite come segue:

$$s_{1,2} = r_f \cdot d_{1,2} \quad (2.5)$$

$$w_{1,2} = d_{1,2} + \nu \cdot (d_{1,2} - s_{1,2}) \quad (2.6)$$

dove, $s_{1,2}$ è lo *spessore effettivo* del filato, $w_{1,2}$ è la *larghezza effettiva* del filato, ν il Poisson ratio ed r_f il Reduction factor.

Al fine di definire un limite inferiore fisicamente motivato per il reduction factor si è ipotizzato che la sezione trasversale del filato passi quindi da una forma circolare iniziale di diametro d a una forma lenticolare con spessore s e larghezza w . Spessore e larghezza effettiva del filato si possono osservare in Figura 2.8.

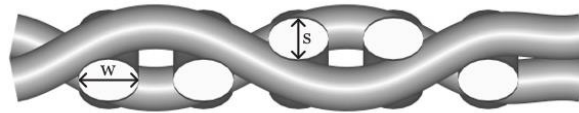


Figura 2.8: Vista laterale di un tessuto che riporta visivamente le grandezze effettive, larghezza w e spessore s , della sezione trasversale del filo

La diminuzione del Reduction factor comporta un maggiore appiattimento del filato. Questo comportamento è coerente con l'espansione laterale associata alla compressione (determinata dal Poisson ratio) e riflette un aumento della ondulazione effettiva.

Per questo, il Reduction factor definisce in modo implicito una relazione di tipo geometrica tra la compressione trasversale della sezione del filato e l'allungamento assiale del percorso del filato.

Insieme al Poisson ratio, che tiene conto della deformazione del filato in direzione perpendicolare al carico applicato e contribuisce alla stima della larghezza effettiva del filato, il reduction factor fornisce una descrizione completa della risposta strutturale del tessuto.

Il valore del Poisson ratio (ν) è stato mantenuto pari a 0.4, tipicamente usato nel settore tessile, per tutte le combinazioni considerate, mentre il valore di r_f è stato definito singolarmente per le varie strutture al fine di far corrispondere lo spessore del tessuto generato con quello misurato sperimentalmente da Zupin et al. [11] in studi sulla permeabilità all'aria dei tessuti.

Per quanto riguarda i valori dei diametri dei filati, sono stati utilizzati i medesimi della fonte [11] e mantenuti costanti pari a $d_1 = 0.262$ mm e $d_2 = 0.293$ mm per i fili di ordito e di trama, rispettivamente.

Rispetto alle combinazioni di densità dei fili ed armatura studiate da Zupin et al. [11] e nel precedente studio [17], qui si è concentrata l'analisi ad un insieme più ristretto. Le armature considerate sono il Plain Weave, il Basket Weave e il Twill Weave 1/3.

Per ognuna di queste sono state studiate due combinazioni di densità dei fili D_1 e D_2 : 22-15 e 29.3-20 fili/cm, nonché meno e più densa, rispettivamente, in relazione al fatto che la distanza tra due fili consecutivi, S , si definisce come il reciproco della densità dei fili:

$$S_{1,2} = \frac{1}{D_{1,2}} \quad (2.7)$$

Queste grandezze sono riportate in Figura 2.9.

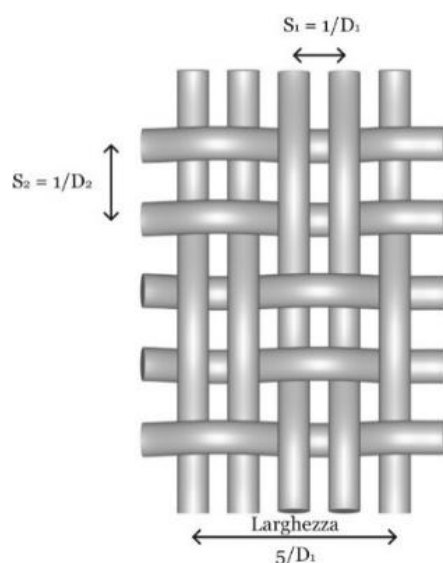


Figura 2.9: Vista frontale di un tessuto che mostra la distanza tra due fili consecutivi, S , in funzione della densità del filo, D

Essendo la distanza tra due fili consecutivi inversamente proporzionale alla rispettiva densità, la dimensione del tessuto e del volume del parallelepipedo che include lo stesso sarà differente al variare dell'armatura e della densità dei fili, come riportato nel precedente lavoro [17] e visibile in Figura 2.10.

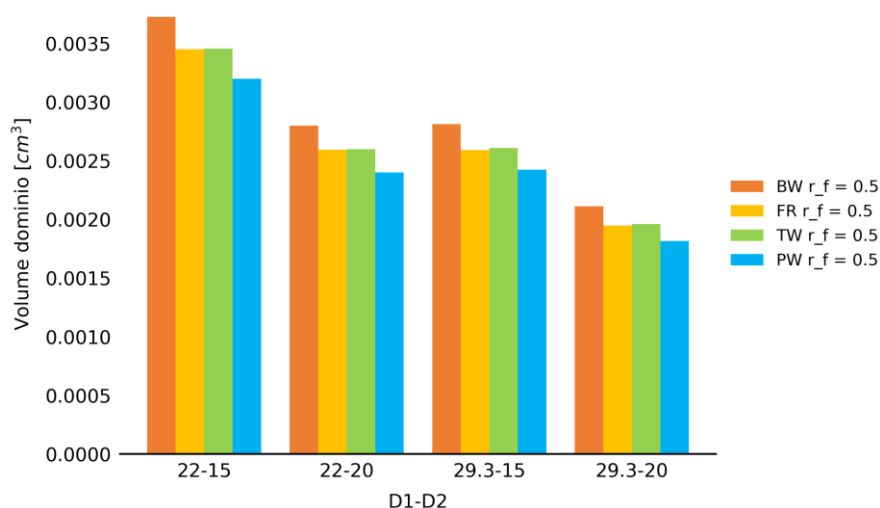


Figura 2.10: Influenza del tipo di armatura e della densità dei fili sulle dimensioni del dominio computazionale, per una configurazione con dieci fili in totale e considerando un reduction factor pari a 0.5

I dati dalla fonte [17] comprendono combinazioni di densità (22-20 e 29.3-15 fili/cm) e un'armatura (Filling Rib, FR) non esaminate in questo lavoro. Tuttavia, si riportano nella descrizione per completezza.

Dalla Figura 2.10 si osserva che, per le geometrie con densità 22-15 fili/cm, le dimensioni del dominio sono le maggiori, qualsiasi sia l'armatura considerata; al contrario, alle geometrie con densità 29.3-20 fili/cm è associata una minore dimensione del dominio in ogni casistica. Diversamente, le geometrie con densità 22-20 e 29.3-15 fili/cm presentano delle dimensioni del dominio comparabili tra loro per stesse armature, ma intermedie rispetto le due combinazioni precedenti.

Dal confronto tra differenti armature a pari densità, il BW risulta quello più voluminoso, seguito da TW e FR che presentano valori simili, mentre il PW è quello con il dominio più ristretto. Ciò è relazionato allo spessore del tessuto (Figura 2.11), ovvero la sua estensione lungo l'asse z, verticale: come menzionato al Capitolo 3.1.1, la dimensione del dominio viene calcolata pari al doppio dello spessore del tessuto.



Figura 2.11: Vista trasversale del tessuto che mette in evidenza lo spessore

L'articolo di Zupin et al. [11] fornisce anche i valori del *diametro idraulico* (D_h) dei pori interfilato, definiti dall'intreccio dei fili nelle diverse armature e presentato in Figura 2.12.

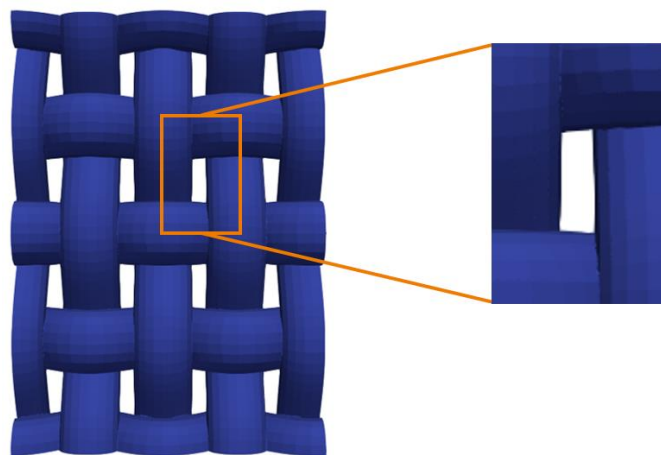


Figura 2.12: Dettaglio di un poro interfilato con diametro idraulico $D_h = 125.21 \mu\text{m}$

Le configurazioni geometriche risultanti e quindi utilizzate nella campagna di simulazioni sono nel complesso sei e sono riassunte in Tabella 2.1, dove vengono riportati anche il valore di diametro idraulico corrispondente ed il rispettivo valore di r_f ottimale.

Tabella 2.1: Diametro idraulico D_h dei pori interfilato per le geometrie utilizzate, da Zupin et al. [11], e il rispettivo valore di r_f ottimale.

Armatura	D1/D2	D_h (μm)	r_f
BW	22/15	274.25	0.75
BW	29.3/20	118.94	0.84
PW	22/15	274.25	0.75
PW	29.3/20	125.21	0.88
TW	22/15	255.67	0.90
TW	29.3/20	110.94	0.93

2.4 CFD - OpenFOAM

2.4.1 Il Metodo ai Volumi Finiti (FVM)

Il *Metodo ai Volumi Finiti* (Finite Volume Method, FVM) [18] è una tecnica numerica che si basa sulla discretizzazione del dominio geometrico in elementi di calcolo non sovrapposti, i cosiddetti volumi di controllo (V_c), sui quali le equazioni differenziali alle derivate parziali, che esprimono le leggi di conservazione, vengono integrate per essere trasformate in un sistema di equazioni algebriche risolvibile per via numerica.

La prerogativa fondamentale dell'approccio FVM risiede nella sua *natura strettamente conservativa*: i termini di trasporto vengono convertiti in flussi attraverso le facce dei volumi e, poiché il flusso uscente da una cella coincide esattamente con quello entrante nella cella adiacente, il bilancio delle grandezze è garantito intrinsecamente sia a livello locale che globale.

Le equazioni da risolvere derivano dall'equazione di trasporto per una generica grandezza ϕ , la cui forma viene riportata a seguire:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (2.8)$$

dove, ρ è la densità del fluido, $\mathbf{U}$ la velocità del fluido e Γ la diffusività della grandezza trasportata.

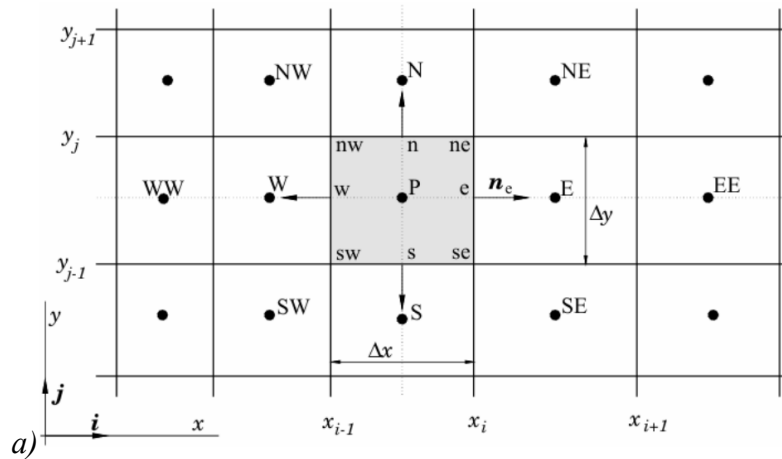
I termini costituenti l'equazione sono, da sinistra, il termine transitorio, il termine convettivo, il termine diffusivo ed il termine sorgente.

Questa equazione non è risolvibile analiticamente e qualora il caso studio trattato sia stazionario, il primo termine viene semplificato, ma ciò non si applica al corrente studio. Nel caso transitorio il termine temporale viene per l'appunto mantenuto e al fine della risoluzione è necessaria sia l'integrazione spaziale sul volume dell'elemento che l'integrazione temporale.

Il *processo di discretizzazione* può essere riassunto in due step [18]:

- Step 1: le equazioni differenziali vengono integrate e trasformate in bilanci applicati alle singole celle del dominio computazionale;
- Step 2: si applicano degli algoritmi di approssimazione che permettono di associare il valore superficiale della variabile ϕ a quello noto all'interno del volume del singolo elemento.

In Figura 2.13 si riporta un esempio di rappresentazione di cella bidimensionale (a) e tridimensionale (b), con rispettive nomenclature.



$$\int_S \rho \phi \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} dA = -\rho[(UA_c\phi)_w - (UA_c\phi)_e + (VA_c\phi)_s - (VA_c\phi)_n + (ZA_c\phi)_b - (ZA_c\phi)_t] \quad (2.12)$$

$$\int_S \Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} dA = -[\left(\Gamma A_c \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_w - \left(\Gamma A_c \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_e + \left(\Gamma A_c \frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_s - \left(\Gamma A_c \frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_n + \left(\Gamma A_c \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_b - \left(\Gamma A_c \frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_t] \quad (2.13)$$

dove, i pedici w, e, s, n, b e t riferiscono alle facce *west, east, south, north, bottom* e *top*, rispettivamente, della cella 3D mostrata in Figura 2.13, mentre U, V e W sono le componenti del vettore velocità lungo le direzioni x, y e z .

Per quanto riguarda invece il termine sorgente, questo si può riscrivere in termini del suo valore medio nel volume di controllo:

$$\int_{V_c} S_\phi dV \approx \overline{S_\phi} V_c \quad (2.14)$$

Nel metodo dei volumi finiti il valore della generica variabile scalare viene definito e risolto solo in corrispondenza del centroide della cella, mentre la valutazione dei termini convettivo e diffusivo così come appena definiti richiede che sia noto il valore della proprietà al centro di ciascuna faccia. Dal momento che le equazioni vengono risolte al centro della cella e non sulle facce è necessario ottenere i valori di $\phi, \mathbf{U}$ e Γ sulle facce attraverso un'operazione di interpolazione. A questo proposito si possono adottare varie tecniche, alcune delle quali presentate nel seguente paragrafo.

2.4.2 Discretizzazione spaziale

Nel modello implementato in OpenFOAM, i termini convettivi relativi al campo di velocità sono stati discretizzati mediante lo schema *linearUpwind* del secondo ordine, per il trasporto della fase è stato adottato lo schema *VanLeer*, mentre per la compressione dell'interfaccia lo schema *interfaceCompression*.

A titolo di esempio, si riporta un'applicazione del metodo *linearUpwind* ad un caso mono-dimensionale nell'ipotesi di voler determinare il valore di ϕ in corrispondenza della faccia *est* riportata nello schema in Figura 2.14 nel caso in cui il flusso sia diretto verso destra.

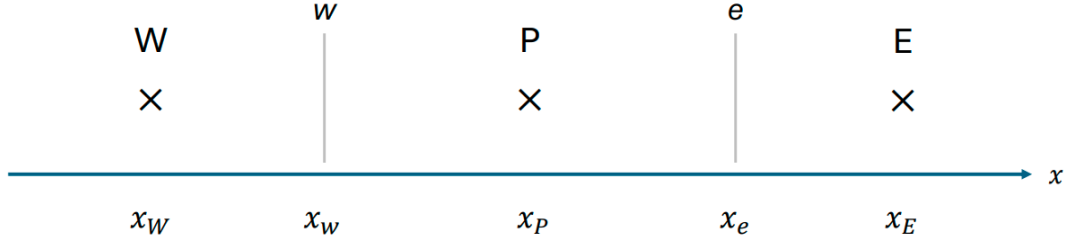


Figura 2.14: Rappresentazione di un caso mono-dimensionale per l'applicazione di schemi Upwind

Per gli schemi di tipo *Upwind*, il valore di ϕ_i viene approssimato con quello immediatamente 'a monte' rispetto al verso del flusso: in questo esempio, il valore di ϕ_w , corrispondente alla faccia sinistra della cella P, viene posto pari a ϕ_W e così via. Tuttavia, nello schema implementato, si va a considerare anche il gradiente di ϕ_P , valutato utilizzando i valori al centro delle celle W ed E. Il valore di ϕ_e risulta essere calcolato come segue:

$$\phi_e = \phi_P + \nabla\phi_P(x_e - x_P) \quad (2.15)$$

con,

$$\nabla\phi_P = \frac{\phi_E - \phi_W}{x_E - x_W} \quad (2.16)$$

L'errore associato a questo schema di discretizzazione scala proporzionalmente al quadrato della dimensione delle celle (per questo è uno schema del secondo ordine), ma la dimostrazione che porta a tale risultato non viene qui trattata.

Per la discretizzazione del termine di flusso convettivo viene utilizzato lo schema *vanLeer*, che appartiene alla famiglia degli schemi TVD (Total Variation Diminishing) [20].

Si consideri anche qui un caso mono-dimensionale dove si ipotizza di voler determinare il valore di ϕ in corrispondenza della faccia *est* e nel caso in cui il flusso sia diretto verso destra.

Lo schema calcola questo valore applicando un fattore correttivo ψ (limitatore di flusso) allo schema *Upwind* del primo ordine, al fine di raggiungere l'accuratezza del secondo ordine senza introdurre oscillazioni numeriche spurie.

$$\phi_e = \phi_P + \frac{1}{2}\psi(m)(\phi_E - \phi_P) \quad (2.17)$$

con,

$$\psi(m) = \frac{m + |m|}{1 + m} \quad (2.18)$$

$$m = \frac{\phi_P - \phi_W}{\phi_E - \phi_P} \quad (2.19)$$

L'equazione 2.17 indica la forma locale della soluzione:

- Se $m \approx 1$, il profilo di ϕ è regolare ed il limitatore assume anch'esso un valore circa unitario, $\psi \approx 1$;
- Se $m < 0$, significa che la cella P rappresenta un estremo locale dove la pendenza cambia segno. In questo caso il limitatore è nullo, $\psi \approx 0$;
- Se m molto grande o molto piccolo, si è in presenza di una forte variazione di pendenza.

2.4.3 Discretizzazione temporale

Per le simulazioni transitorie, le equazioni che ne descrivono il comportamento vengono discretizzate sia nello spazio che nel tempo. Mentre la discretizzazione spaziale viene eseguita nel dominio dello spazio, come nel caso dello stato stazionario, la discretizzazione temporale comporta la definizione di una coordinata temporale lungo la quale viene calcolata la derivata (nel Metodo delle Differenze Finite) o l'integrale (nel Metodo dei Volumi Finiti) del termine transitorio.

In particolare, si è utilizzato il metodo di Eulero implicito (Backward Euler Scheme), uno schema del primo ordine *incondizionatamente stabile*, il cui algoritmo di funzionamento è riportato di seguito.

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n + \Delta t \left(-U \frac{\phi_{i+1}^{n+1} - \phi_{i-1}^{n+1}}{2 \Delta x} + \frac{\Gamma (\phi_{i+1}^{n+1} - 2 \phi_i^{n+1} + \phi_{i-1}^{n+1})}{\Delta x^2} \right) \quad (2.20)$$

L'indice i riferisce alla discretizzazione spaziale precedentemente presentata al Capitolo 2.4.2, mentre l'indice n riguarda la discretizzazione temporale.

Si può procedere a riformulare l'equazione in maniera più compatta, introducendo due parametri adimensionali: il numero di Courant (Co) e il numero di diffusione adimensionato (d) riportati a seguire nell'equazione 2.21.

$$Co = \frac{U \Delta t}{\Delta x}, \quad d = \frac{\Gamma \Delta t}{\rho \Delta x^2} \quad (2.21)$$

Sostituendo nello schema di calcolo del metodo si ottiene:

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n - \frac{Co}{2} (\phi_{i+1}^{n+1} - \phi_{i-1}^{n+1}) + d (\phi_{i+1}^{n+1} - 2 \phi_i^{n+1} + \phi_{i-1}^{n+1}) \quad (2.22)$$

dalla quale, raccogliendo i termini:

$$(1 + 2d) \phi_i^{n+1} + \left(\frac{Co}{2} - d \right) \phi_{i+1}^{n+1} + \left(-\frac{Co}{2} - d \right) \phi_{i-1}^{n+1} = \phi_i^n \quad (2.23)$$

Riferendo alla nomenclatura utilizzata per la discretizzazione spaziale nel Capitolo 2.4.2 e riconducendosi alla forma canonica $a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + c$ (con $P = i$, $W = i-1$ e $E = i+1$) si ottiene:

$$a_P = (1 + 2d), \quad a_W = (d + \frac{co}{2}), \quad a_E = (d - \frac{co}{2}), \quad c = \phi_i^n \quad (2.24)$$

Lo schema di discretizzazione può essere riscritto anche in forma matriciale.

Inoltre, servendosi di metodi iterativi, quale il metodo di Gauss-Seidel, questo sistema può essere risolto permettendo quindi la valutazione temporale del valore di ϕ all'interno delle celle definite durante il processo di discretizzazione spaziale.

2.4.4 Metodo Volume of Fluid (VOF)

Il metodo *Volume of Fluid* (VOF) implementato nel solver Open Source `interFoam` consente di descrivere flussi multifase immiscibili. Il trasporto della funzione indicatrice $\alpha(\mathbf{x}, t)$ è governato dall'equazione di conservazione della frazione volumetrica, presentata a seguire:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha) = 0 \quad (2.25)$$

La funzione indicatrice rappresenta la frazione del volume di una cella occupata da una delle fasi costituenti il sistema. Nel caso di sistema bifase, come quello proposto in questa tesi, risulta necessaria una sola funzione indicatrice, che descrive la presenza o l'assenza di una delle due fasi. Nel contesto di questo lavoro, le due fasi considerate sono acqua e aria e la funzione indicatrice descrive la frazione di liquido presente in ciascuna cella.

Il metodo VOF permette di modellare il sistema costituito da due fluidi immiscibili come se fossero un unico fluido continuo le cui proprietà, quali densità e viscosità, vengono definite come medie pesate rispetto alla frazione volumetrica:

$$\rho = \rho_l \alpha + \rho_g (1 - \alpha) \quad (2.26)$$

$$\mu = \mu_l \alpha + \mu_g (1 - \alpha) \quad (2.27)$$

dove, 'l' si riferisce alla fase liquida, ovvero l'acqua, mentre 'g' riferisce alla fase gassosa, l'aria.

Viene definita una regione di transizione fittizia, di spessore infinitesimo δ , fra i due fluidi all'interno della quale la funzione indicatrice può variare in modo continuo fra 0 e 1.

Assume un valore unitario nella regione del liquido (acqua), il valore '0' nella regione del gas (aria) ed un valore intermedio fra i due nella regione di transizione.

Nel solver `interFoam` il modello convenzionale del metodo VOF viene modificato: è presente un termine aggiuntivo nell'equazione di trasporto della frazione volumetrica che permette di fornire una più nitida risoluzione dell'interfaccia andando a comprimere la superficie libera.

Questo termine modella la velocità in termini di media pesata delle corrispondenti velocità del liquido e del gas. È denominato termine di compressione, anche se il termine 'compressione' viene usato solo come denotazione e non è legato in alcun modo a fluidi comprimibili.

Inoltre, questo termine fittizio agisce esclusivamente all'interno della regione di transizione ($0 < \alpha < 1$) L'equazione di trasporto modificata assume la forma:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\alpha) + \nabla \cdot (\mathbf{U}_r\alpha(1 - \alpha)) = 0 \quad (2.28)$$

con,

$$\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_l - \mathbf{U}_g \quad (2.29)$$

dove, $\mathbf{U}_r$ è il vettore velocità relativa (o velocità di compressione).

L'equazione di trasporto della funzione indicatrice (equazione 2.28) viene risolta simultaneamente con l'equazione di continuità e di quantità di moto, presentate nel Capitolo 2.4.5.

2.4.5 Accoppiamento Pressione-Velocità e algoritmo di risoluzione

Le metodologie numeriche e gli schemi di discretizzazione spaziale e temporale non permettono di risolvere le equazioni di *Navier-Stokes*. La modellazione dei flussi di fluidi richiede un algoritmo specifico, capace di gestire la mutua dipendenza, quindi l'accoppiamento, tra il campo vettoriale di velocità e il campo scalare di pressione.

A seguire si riportano le equazioni di continuità e della quantità di moto per un fluido incomprimibile, nella loro forma differenziale:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{tji}) + \rho g_i + f_{\sigma i} \quad (2.31)$$

dove, U è la velocità, g_i l'accelerazione gravitazionale, p la pressione, τ_{ij} e τ_{tji} sforzo viscoso e turbolento, mentre $f_{\sigma i}$ la forza di tensione superficiale.

La forza di tensione superficiale è modellata come una *forza superficiale continua* (Continuum Surface Force, CSF) ed è calcolata come segue [21], [22]:

$$f_{\sigma i} = \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (2.32)$$

dove, σ è il valore della tensione superficiale e κ è la curvatura, che può essere approssimata come segue [21], [22]:

$$\kappa = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (2.33)$$

La criticità di queste equazioni risiede nella non disponibilità di un'equazione esplicita che permetta il calcolo del campo di pressione che compare nell'equazione della quantità di moto. Analizzando queste equazioni si osserva, come accennato inizialmente, un disaccoppiamento formale: se il campo di velocità può essere ricavato risolvendo l'equazione della quantità di moto, il campo di pressione non si può ricavare direttamente dall'equazione di continuità.

Come riportato al Capitolo precedente 2.4.4, le equazioni 2.30 e 2.31 vengono risolte assieme all'equazione 2.28 di trasporto della funzione indicatrice.

In questo lavoro è stato adottato un approccio segregato e questo significa che le equazioni vengono risolte in sequenza. L'algoritmo di risoluzione utilizzato è il PIMPLE [23], utilizzato per sistemi transitori come quello trattato. Questo algoritmo combina il PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operator) ed il SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), ma può lavorare in modalità PISO, come in questo studio.

La caratteristica più importante dell'algoritmo PISO è il fatto che risulta necessario soddisfare un criterio di stabilità, ovvero assicurarsi che il numero di Courant non sia maggiore di 1. Come conseguenza di ciò, il passo temporale è di tipo adattativo. Nello specifico, questo aspetto della stabilità viene trattato maggiormente al Capitolo 3.1.1.

2.5 Capillarità

Un tessuto è un mezzo poroso a doppia scala. Infatti, la porosità si sviluppa su due scale distinte: i pori interfilato, definiti dall'interlacciamento dei fili stessi, e i micropori tra le fibre costituenti il filo.

Questo si traduce in un sistema in cui un fluido può essere trasportato in modo continuo attraverso il tessuto, poiché questi canali meso e micro sono interconnessi tra loro. I pori interfilato offrono al fluido una resistenza al passaggio minore rispetto a quella riscontrata nei micropori.

La capacità del mezzo fibroso di trasmettere il fluido è una proprietà cruciale.

Nel lavoro precedente [17], basato sullo studio della permeabilità dei tessuti all'aria, era stato possibile assumere che il flusso alla microscala risultasse trascurabile e

permettesse quindi di considerare i fili come impermeabili, ovvero che il flusso attraverso i pori interfilato fosse l'unico considerato.

Più precisamente, l'uso del diagramma di Syerko et al. [24], consente di verificare preventivamente la validità della separazione di scala. Incrociando i valori estremi del diametro idraulico delle configurazioni studiate con i rispettivi valori calcolati di micro-permeabilità, l'intero intervallo di soluzioni si è posizionato all'interno della zona del diagramma in cui il flusso alla micro-scala risulta del tutto trascurabile, come mostrato in Figura 2.15.

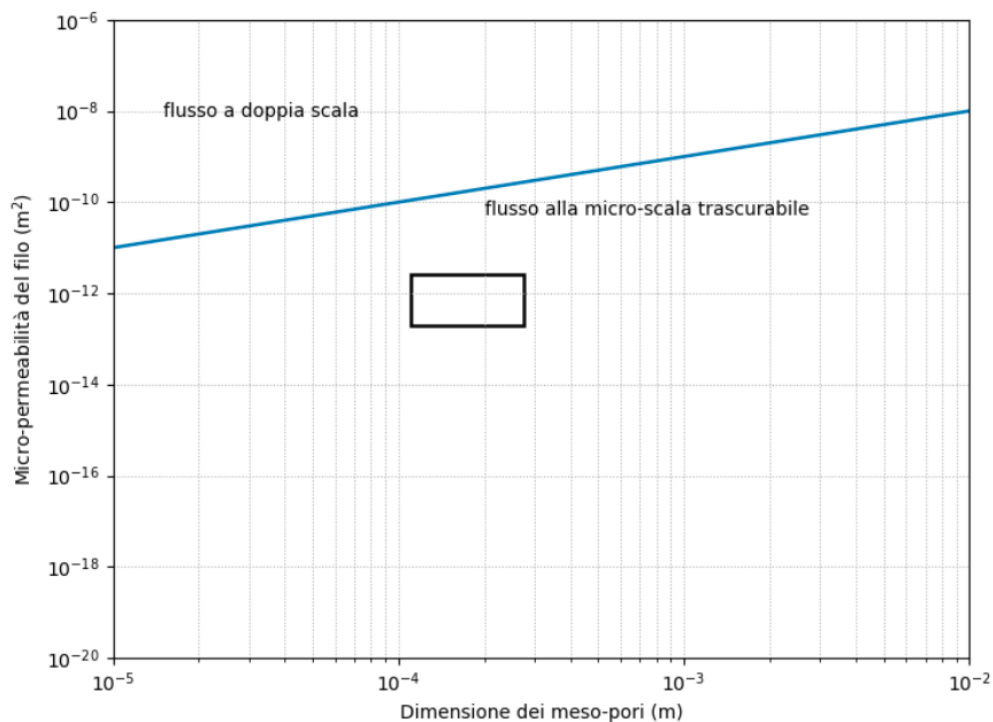


Figura 2.15: Valutazione della separazione di scala di flusso nei materiali fibrosi mediante il confronto tra permeabilità e dimensione dei pori. Adattato da Syerko et al. [24]

Considerando invece un caso di trasporto di liquido attraverso il tessuto, sia i pori interfilato che i micropori contribuiscono al fenomeno stesso. Sarebbe quindi opportuno considerare l'effetto di entrambi. Tuttavia, in questo lavoro la microporosità dei filati è stata per il momento trascurata, essendo principalmente interessati allo studio dell'evoluzione dell'interfaccia liquido-gas e alla valutazione del ruolo di proprietà geometriche e chimico-fisiche sul trasporto multifase nei tessuti. Di conseguenza, anche in questo lavoro il tessuto è stato considerato

impermeabile, ma con caratteristiche di bagnabilità superficiale specifiche, dettate dall'angolo di contatto impostato in corrispondenza della superficie del tessuto, come specificato al Capitolo 3.1.2.

Il fenomeno studiato è quindi puramente di trasporto capillare attraverso i pori interfilato, definiti dall'interlacciamento dei fili di trama e di ordito. Il sistema è isoterma, in regime laminare e multifase: i fluidi considerati sono aria (gas) e acqua (liquido).

Il fenomeno della risalita capillare si verifica in modo significativo quando le dimensioni del condotto sono estremamente ridotte, tipicamente nell'ordine dei micrometri o dei millimetri. Più il tubo è stretto, più il liquido sale. Quando le dimensioni superano una certa soglia critica, la forza di gravità prevale sulle forze di coesione e adesione, impedendo la risalita capillare.

La scala caratteristica in corrispondenza della quale si ha la transizione tra questi due regimi è la *lunghezza capillare* λ_c (capillary length) ed è definita come segue:

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta\rho g}} \quad (2.34)$$

dove, $\Delta\rho$ è la differenza di densità tra i due fluidi all'interfaccia (kg/m^3), g è l'accelerazione gravitazionale (m/s^2) e γ è la tensione superficiale (N/m). Il valore di g è 9.81 m/s^2 , γ è 0.072 N/m mentre $\Delta\rho$ è la differenza tra la densità dell'acqua (1000 kg/m^3) e quella dell'aria (1.23 kg/m^3).

Nel caso in esame, il valore di λ_c è pari a 2.71 mm e per valori della dimensione caratteristica (L) del sistema minori di λ_c si osserva il fenomeno della risalita capillare. La lunghezza caratteristica è rappresentata dal diametro idraulico D_h dei pori interfilato del tessuto e, nello specifico, la verifica è stata fatta riferendo al valore maggiore tra quelli delle configurazioni in esame, presentati in Tabella 2.1, ovvero $2.7425 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Questo valore è, per l'appunto, minore della dimensione critica.

Ulteriori semplificazioni hanno previsto l'assunzione di assenza di gravità siccome il numero di *Bond* (Bo), definito nell'equazione 2.35, è molto minore dell'unità. Infatti, il numero di Bond è un gruppo adimensionale che indica l'importanza relativa tra la forza di gravità e la tensione superficiale, conseguentemente, per valori molto piccoli di tale numero sono prevalenti le forze di tensione superficiale.

$$Bo = \frac{\rho g L^2}{\gamma} \quad (2.35)$$

dove, ρ è la densità del fluido (kg/m^3), più precisamente l'acqua, mentre L è la lunghezza caratteristica (m) come precedentemente riportato.

La capacità di trasporto del fluido è influenzata da alcuni fattori tra cui la pressione di Laplace (ΔP), che dipende dalla tensione superficiale del fluido γ , dall'angolo di

contatto θ tra il fluido ed il solido e dalle dimensioni del canale, D_h . La formulazione di *Young-Laplace* per la descrizione della pressione di Laplace è la seguente:

$$\Delta P = \frac{4 \gamma \cos \theta}{D_h} \quad (2.36)$$

La differenza di pressione all'interfaccia fluida può essere riscritta in termini della tensione superficiale e della curvatura superficiale κ , o analogamente dei raggi di curvatura R_1 ed R_2 , nel seguente modo:

$$\Delta P = \gamma \kappa = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.37)$$

Nel caso di un tubo capillare cilindrico di raggio r si ha $R_1 = R_2 = R$, dove il raggio di curvatura del menisco R è relazionata all'angolo di contatto θ tramite la relazione seguente:

$$R = \frac{r}{\cos \theta} \quad (2.38)$$

Per valori di $\theta < 90^\circ$ la risalita del fluido è positiva (*capillary rise*), contrariamente, per $\theta > 90^\circ$ la risalita è negativa (*capillary fall*).

Nel caso di risalita positiva, si possono comunque distinguere due comportamenti generali. Per angoli piccoli (es. $\theta = 40^\circ$) il valore di $\cos \theta$ è relativamente alto (tende all'unità), il raggio di curvatura R è più piccolo, la curvatura è più accentuata e la forza capillare è più intensa (ΔP maggiore). La bagnabilità sarà maggiore, così come la risalita.

Diversamente, per angoli maggiori (es. $\theta = 80^\circ$) il valore del coseno tende a zero, il raggio di curvatura diventa più grande e questo si traduce in un menisco quasi piatto, ovvero caratterizzato da una curvatura minima. La forza capillare è minima, e pure la risalita.

In un fenomeno di capillarità, la dinamica di risalita è governata dal bilanciamento istantaneo tra la forza motrice, rappresentata dalla tensione superficiale, e le forze oppponenti, ovvero le forze inerziali e viscosi e la pressione idrostatica. Si possono distinguere vari regimi [25]:

- Regime puramente inerziale;
- Regime visco-inerziale;
- Regime puramente viscoso;
- Regime viscoso e gravitazionale.

Le formulazioni presentate a seguire sono valide per un condotto a sezione circolare di raggio r , ma possono essere facilmente riformulate per una sezione con geometria differente, sostituendo il diametro idraulico D_h al raggio r . La relazione tra i due è riportata di seguito:

$$r = \frac{D_h}{2} \quad (2.39)$$

- Regime puramente inerziale (o lineare).

Nei primi istanti della risalita l'effetto della gravità e delle forze viscosi si può trascurare, in accordo alla formulazione proposta da Quéré [25], [26] che descrive una risalita capillare a velocità costante. La posizione del fluido nel tempo $h(t)$ si calcola come:

$$h(t) = t \sqrt{\frac{2 \gamma \cos \theta}{\rho r}} \quad (2.40)$$

- Regime visco-inerziale.

La risalita del fluido qui viene descritta da Bosanquet [25], che si basa sull'effetto delle forze inerziali e viscosi. La formulazione per la posizione del fluido nel tempo è descritta come segue:

$$h^2(t) = h_0^2 + \frac{2b}{a} \left[t - \frac{1}{a} (1 - e^{-at}) \right] \quad (2.41)$$

con,

$$a = \frac{8\mu}{r^2 \rho}; \quad b = \frac{2 \gamma \cos \theta}{r \rho} \quad (2.42)$$

- Regime puramente viscoso [25], [26], [27], [28].

In questa fase Lucas e Washburn trascurano sia l'influenza dell'inerzia che della gravità. La rispettiva formulazione per descrivere la risalita nel tempo è la seguente:

$$h^2(t) = h_0^2 + \frac{\gamma r \cos \theta}{2 \mu} t \quad (2.43)$$

- Regime viscoso e gravitazionale.

Nelle fasi finali della risalita capillare la gravità non può più essere trascurata e la formulazione assume una forma più complessa. In accordo a Fries and Dreyer [25] è necessario andare a considerare l'effetto della gravità quando $h(t) > 0.1 h_{eq}$. In particolare, h_{eq} è l'altezza di equilibrio in corrispondenza della quale la pressione idrostatica bilancia la pressione capillare ed è riportata nell'equazione 2.44.

$$h_{eq} = \frac{2 \gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad (2.44)$$

La separazione tra un regime e l'altro può essere scandita riferendo a dei tempi di transizione [25], quali:

- t_1 : transizione tra il regime puramente inerziale e quello visco-inerziale;
- t_2 : transizione tra il regime visco-inerziale e quello puramente viscoso.

Le espressioni dei tempi t_1 e t_2 appena descritti vengono definiti come segue.

$$t_1 = \frac{0.1856}{a} \quad (2.45)$$

$$t_2 = \frac{16.921}{a} \quad (2.46)$$

dove, a è definito come sopra (equazione 2.42).

3 Dettagli numerici

3.1 Impostazione delle simulazioni in OpenFOAM

3.1.1 Definizione del dominio computazionale e generazione della mesh

- `blockMesh`.

In OpenFOAM la mesh viene generata mediante il comando `blockMesh` utilizzando le informazioni contenute nel dizionario `blockMeshDict` presente nella directory `system/`. A partire da questo file, `blockMesh` genera la mesh e ne memorizza la descrizione nei files `points`, `faces` e `boundary` nella stessa directory [29].

Questo comando suddivide il dominio geometrico in un insieme di uno o più blocchi esaedrici tridimensionali (suddiviso in un numero definito di celle lungo le tre direzioni locali), di cui un esempio in Figura 3.1, ciascuno dei quali è identificato da 8 vertici, corrispondenti ai vertici dell'esaedro.

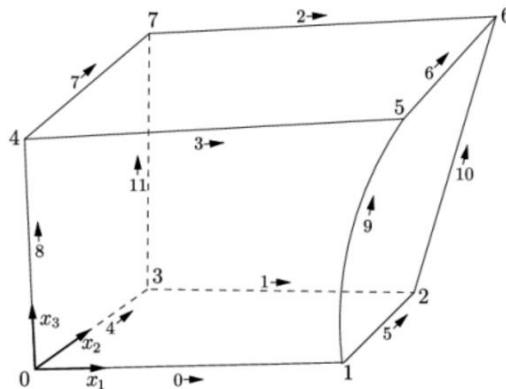


Figura 3.1: Generica cella esaedrica [29]

È altresì possibile generare blocchi con meno di 8 vertici facendo collassare una o più coppie di vertici tra di loro, come mostrato in Figura 3.2.

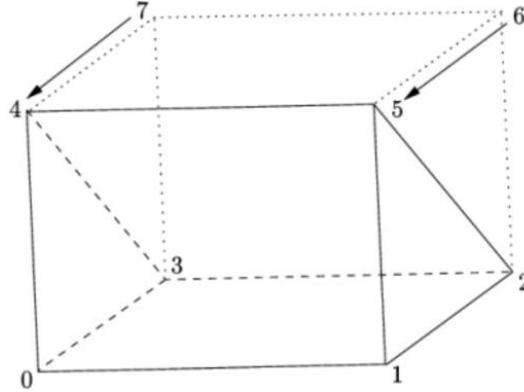


Figura 3.2: Blocco geometrico costituito da 6 vertici, ottenuto in seguito al collasso di due coppie di vertici ($7 \rightarrow 4$, $6 \rightarrow 5$) tra loro [29]

Ogni blocco è associato ad un sistema di coordinate locali (x_1 , x_2 , x_3). I vertici devono essere numerati secondo la convenzione adottata da OpenFOAM, in modo da definire il sistema di riferimento. I vertici dei blocchi vengono specificati nel file `blockMeshDict` all'interno della sezione `vertices`, mentre gli spigoli possono essere definiti come segmenti rettilinei, archi o spline mediante la sezione `edges`.

In questo studio, i vertici sono stati posizionati in modo da intersecare la mezzeria dei fili più esterni, sia di ordito sia di trama.

Il tessuto è posizionato trasversalmente all'interno del dominio computazionale ed è centrato rispetto allo stesso. La porzione trasversale di tessuto di interesse nelle simulazioni presenta delle dimensioni dipendenti interamente dalle caratteristiche geometriche del tessuto stesso.

Tali configurazioni geometriche rappresentano l'unità periodica elementare della struttura tessile e vengono utilizzate come dominio rappresentativo, il REV, nelle simulazioni. Per maggiori informazioni sul REV si rimanda al Capitolo 2.3.

Lo spessore del sistema, che si estende lungo la coordinata z , è impostato pari al doppio dello spessore del tessuto.

Al fine di automatizzare il processo di calcolo al variare delle caratteristiche e dei parametri del tessuto, è stato sviluppato uno script *Python* di pre-processing, denominato *'bounding.py'*. Questo codice, che rappresenta il primo vero comando della simulazione, funge da collegamento tra la cartella del caso ed i dati geometrici estratti sia dal nome della cartella di lavoro sia dal file `.stl` del tessuto.

Vengono in primo luogo estratti parametri quali le densità dei fili d'ordito e di trama (D_1 e D_2), il Poisson ratio (ν) ed il Reduction factor (r_f); a partire da questi dati il codice calcola le proprietà geometriche locali dei fili, quali la spaziatura tra i fili (S_1, S_2), le larghezze (w_1, w_2) ed i relativi spessori (s_1, s_2) della sezione trasversale dei fili d'ordito e trama. Permette anche il calcolo delle dimensioni del parallelepipedo: vengono calcolate le quote inferiori e superiori ($z_{\min}$ e $z_{\max}$) creando quindi la regione proporzionale allo spessore reale del tessuto.

Lo script calcola anche le coordinate ottimali per il parametro `locationInMesh (xloc, yloc, zloc)`: la quota `zloc` viene posizionata garantendo che il punto cada sempre all'interno della sola regione fluida e non all'interno della geometria solida. Tutte le grandezze calcolate vengono poi scritte in un file di riepilogo *boundingBoxDims.txt* ed inserite all'interno del file *caseSetup*.

Al fine di limitare gli errori numerici e mantenere una buona qualità della discretizzazione, si cerca di ottenere celle con un aspect ratio prossimo all'unità. A questo proposito, nel file `blockMeshDict` vengono specificate il numero di celle in cui suddividere ogni direzione (n_x, n_y, n_z). Questi valori si calcolano in accordo alla seguente formula:

$$n_x = \frac{CpD}{w_1} \cdot l_x \quad (3.1)$$

dove, n_x è il numero di celle lungo la direzione x , l_x è la lunghezza del lato della mesh lungo la direzione x , CpD è il numero di celle per diametro del filato, parametro il cui ruolo viene discusso al Capitolo 3.1.4, e w_1 è la larghezza della sezione trasversale del filo, nonché il diametro dello stesso in condizioni di deformazione, di cui si è discusso al Capitolo 2.3.

L'equazione 3.1 assume la medesima forma anche nel calcolo di n_y ed n_z , con l'accortezza di specificare le grandezze relativamente al rispettivo pedice, quindi coordinata.

Per ottenere una griglia uniforme, ad esempio a partire da n_x , si definiscono i numeri di celle nelle altre due direzioni secondo delle proporzioni, come riportato nelle equazioni 3.2 e 3.3.

$$n_x : l_x = n_y : l_y \quad (3.2)$$

$$n_x : l_x = n_z : l_z \quad (3.3)$$

- `snappyHexMesh`.

Creata la mesh di base, detta anche di background, lo step successivo è l'utilizzo del comando `snappyHexMesh` che consente di generare mesh conformi a geometrie complesse attraverso processi di raffinamento locale, snapping della superficie e, opzionalmente, generazione di strati prismatici [30].

Affinché il processo possa essere eseguito correttamente, è necessario disporre di una mesh di background costituita da celle esaedriche, generate mediante il comando `blockMesh`.

Il raffinamento avviene attraverso tre fasi principali, dove l'utility opera sulla mesh di background e ne esegue un raffinamento iterativo in prossimità delle superfici e degli spigoli vivi della geometria solida, andando a dividere le celle ivi presenti in elementi sempre più piccoli.

La prima fase ha lo scopo di creare una griglia iniziale che approssimi l'oggetto solido attraverso una struttura geometrica a gradini. Il blocco `refinementSurfaces` individua la superficie e le assegna un livello di raffinamento specificato dall'utente. In questo studio il livello di raffinamento è stato impostato pari a `level (2 2)` ed è stato discusso nel Capitolo 3.1.4.

Tale comando impone di dividere ogni cella che interseca la geometria per un numero di volte pari al valore specificato, densificando la maglia solo dove necessario.

Completata la suddivisione, per selezionare esclusivamente la zona del fluido, esterna, il comando porta a scartare le celle interne al solido, a partire dalle coordinate spaziali specificate in `locationInMesh (xloc, yloc, zloc)`. Tutti gli elementi geometrici, quindi le celle, connessi a tale punto sono mantenuti, mentre le altre vengono rimosse.

La mesh ottenuta da questo primo step presenta un andamento seghettato, risulta quindi necessario un successivo step definito di snapping. I nodi esterni della griglia a gradini vengono proiettati sulle superfici reali del file del tessuto, stirando e deformando le celle di frontiera fino a farle combaciare con il profilo originale.

Segue l'ultima fase, che riguarda l'inserimento dello strato limite di celle in corrispondenza della parete dell'oggetto. In questo studio, la voce `addLayers` è impostata su `false`, indicando che questa fase viene esclusa dal processo.

Per garantire la qualità della mesh, questo processo appena descritto viene monitorato dal sotto-dizionario `meshQualityControls`. Questo richiama il dizionario `meshQualityDict`, nel quale sono definiti i valori massimi accettabili per indici critici come la non-ortogonalità delle facce e l'asimmetria delle celle (*skewness*).

Se una cella viola questi vincoli di sicurezza, l'utility riduce localmente la deformazione alla ricerca di una configurazione geometrica più stabile. Una volta superati tutti i controlli di qualità, la topologia definitiva della griglia viene salvata all'interno della cartella di progetto `constant/polyMesh/`.

In Figura 3.3 si riporta un dettaglio della mesh finale, in corrispondenza del tessuto, che permette di apprezzare come la griglia risulti più fitta localmente mano a mano che ci si avvicina alla superficie del tessuto.

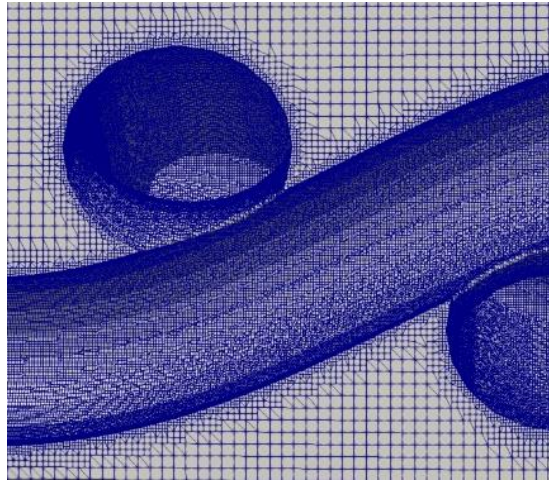


Figura 3.3: Dettaglio del differente livello di densità della mesh nell'intorno del tessuto

- `setFields`.

Segue la definizione di una configurazione pensata per simulare un fenomeno di assorbimento capillare spontaneo attraverso il tessuto, andando ad inizializzare un layer di acqua appena al di sotto del tessuto stesso, come si può osservare in Figura 3.4. A tale scopo si utilizza il comando `setFields` [31]. Le informazioni specificate nel dizionario `setFieldsDict`, allocato in `system/`, permettono in primo luogo di inizializzare l'aria in tutto il dominio, assegnando quindi alla frazione volumetrica dell'acqua un valore nullo (`alpha.water 0`). Tramite la funzione `boxToCell`, viene successivamente definito un volume che si estende dalla base del dominio fino a `zTexMin`, ovvero in corrispondenza del limite inferiore del tessuto, dove viene specificata la presenza di sola acqua (`alpha.water 1`).

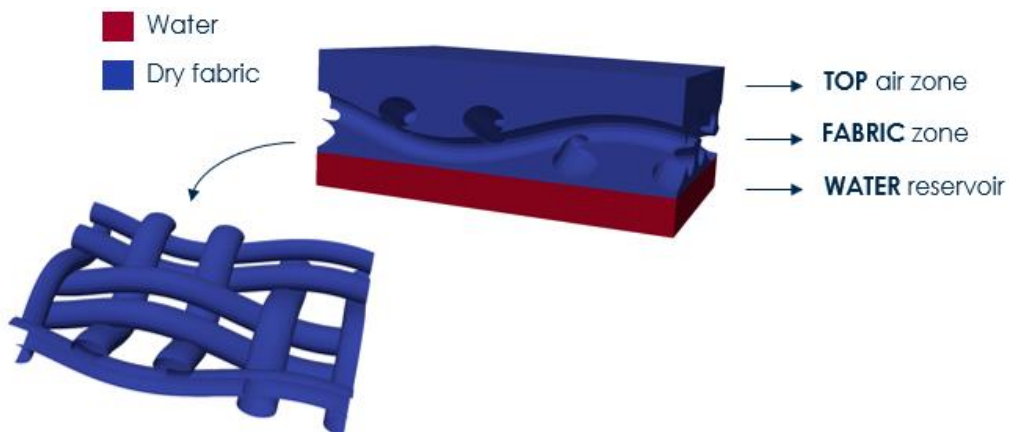


Figura 3.4: Configurazione iniziale del dominio. Si osservano il reservoir di acqua inizializzato e la definizione delle zone create con il comando `topoSet`.

- `topoSet`.

Il comando successivo, `topoSet`, permette di identificare e classificare specifiche regioni del dominio computazionale: questa operazione risulta essere particolarmente utile al fine di andare a monitorare localmente l'avanzamento della colonna di acqua attraverso il tessuto mediante la frazione volumetrica o il volume della stessa [32].

Il dizionario di riferimento è `topoSetDict`, presente nella `directory system/`. Mediante delle azioni sequenziali che si basano sulla funzione geometrica `boxToCell`, vengono selezionati i volumi d'interesse identificandoli prima come gruppi di celle (`cellSet`) e convertendoli poi in zone topologiche formali (`cellZone`). Nello specifico, il dominio viene suddiviso in tre regioni: una zona centrale occupata dal tessuto (`fabricZone`), una zona al di sopra del tessuto (`airTopZone`) ed una al di sotto (`airBottomZone`). Una rappresentazione di queste zone è presente in Figura 3.4, presentata precedentemente.

- `transformPoints`.

L'operazione finale di manipolazione della griglia prevede l'uso dell'utility `transformPoints` "`scale = (1e-2 1e-2 1e-2)`", la quale è necessaria per scalare la dimensione del dominio lungo i tre assi al fine di riportarlo alle dimensioni originarie, e quindi ottenere una descrizione realistica del sistema [32].

La mesh viene inizialmente generata su una scala geometrica amplificata di un fattore 100. Tale scelta consente di ridurre i problemi di tolleranza numerica che possono manifestarsi durante le operazioni di raffinamento e snapping su geometrie di dimensioni micrometriche.

Una volta completata la generazione della mesh, l'utility `transformPoints` viene utilizzata per riportare il dominio alle dimensioni fisiche reali mediante una trasformazione di scala pari a 10^{-2} . Si preferisce agire in questo modo, quindi effettuando tutte le operazioni precedentemente citate, di creazione ed ultimazione della mesh (*trimming e fitting*), su un dominio sovradimensionato al fine di evitare problemi di tolleranza numerica tipici delle scale microscopiche, i quali influenzerebbero negativamente la qualità della mesh finale.

- `checkMesh`.

Le fasi conclusive vengono dedicate al controllo della qualità della mesh e all'ottimizzazione del dominio finale.

In primis si fa uso dell'utility `checkMesh` che consente di verificare la conformità della griglia rispetto a vincoli geometrici e topologici imposti, analizzando parametri critici quali la non-ortogonalità, skewness, aspect ratio e altri indicatori geometrici.

A seguire, uno script condizionale permette di ripulire il dominio da eventuali imperfezioni residue introdotte durante la fase di snapping. Qualora venga identificata una regione valida denominata `region0`, il comando `subsetMesh` viene utilizzato per estrarre esclusivamente la componente connessa di interesse, eliminando eventuali regioni isolate generate durante le operazioni di snapping.

Dopo questa pulizia viene effettuato un ulteriore controllo con `checkMesh` con il fine di garantire che la griglia definitiva sia geometricamente stabile e pulita.

A questo punto è possibile lanciare la simulazione. `interFoam` è il solver multifase scelto per questo studio, concepito per simulare il comportamento di due fluidi incomprimibili, isotermini e non miscibili [33], in questo caso aria e acqua.

L'obiettivo del solutore è determinare l'evoluzione temporale dei campi di moto, di pressione e della frazione volumetrica dell'acqua. Dal punto di vista matematico, questo obiettivo viene raggiunto risolvendo l'equazione di continuità per la conservazione della massa, le equazioni di *Navier-Stokes* per la quantità di moto e, infine, un'equazione di trasporto e avvezione dedicata al tracciamento dell'interfaccia tra i due fluidi.

Attraverso il *Metodo dei Volumi Finiti* (FVM), descritto nel Capitolo 2.4.1, l'intero impianto di equazioni differenziali alle derivate parziali viene applicato alla mesh precedentemente validata, convertendo le equazioni differenziali in un sistema discreto di equazioni algebriche risolto iterativamente ad ogni passo temporale.

Come introdotto nel Paragrafo 2.4.3, è consuetudine utilizzare un passo temporale variabile, definito *adattativo*. Questa gestione dinamica del passo temporale viene implementata nel file `controlDict`, specificando `adjustableTimeStep yes`. Nel corso della simulazione il solutore adatta l'intervallo temporale Δt , inizializzato con il valore 10^{-5} , al fine di rispettare i limiti imposti dal *Numero di Courant* (Co):

$$Co = \frac{|U|\Delta t}{\Delta x} \quad (3.4)$$

dove, $|U|$ è il modulo della velocità locale del fluido, Δx è la dimensione lineare della cella nella direzione del flusso e Δt è il passo temporale. Co_{max} è il valore del limite superiore ammissibile per il Co e nel presente studio è stato posto pari a 0.2 .

Sebbene gli schemi impliciti non siano soggetti ai vincoli di stabilità tipici degli schemi espliciti, il numero di Courant rimane un importante parametro di controllo dell'accuratezza numerica. Nel caso di simulazioni VOF, è pratica comune mantenere limiti relativamente bassi del numero di Co , così da limitare gli errori di trasporto della frazione volumetrica e garantire una corretta risoluzione dell'interfaccia liquido-gas.

3.1.2 Condizioni iniziali e condizioni al contorno

L'opportuna definizione delle condizioni iniziali ed al contorno nel sistema è di cruciale importanza siccome specificano il comportamento del sistema in corrispondenza dei confini geometrici e stabiliscono lo stato dello stesso all'istante iniziale ($t = 0$ s) [34].

Le condizioni iniziali e al contorno sono state definite in modo da riprodurre un processo di risalita capillare attraverso il tessuto lungo la direzione positiva dell'asse z . L'evoluzione del sistema è pertanto governata dalle forze capillari, essendo stato trascurato il contributo della gravità (come descritto nel Capitolo 2.5) mediante l'impostazione del vettore accelerazione gravitazionale nullo nel file `constant/g/`.

I confini esterni vengono definiti a monte nel file `system/blockMeshDict/` in fase di creazione della mesh di background, come riportato al Capitolo 3.1.1. All'interno del dizionario stesso si trova anche la sezione `boundary`, dove vengono mappate le facce del dominio esaedrico di partenza: per ognuna si specificano la voce `faces`, che individua la faccia stessa tramite i suoi quattro vertici, e la voce `type`, che ne definisce la natura geometrica o fisica.

Il dominio è costituito da sei patch distinte:

- `inlet` e `outlet`: sono la faccia inferiore e quella superiore, rispettivamente, definite lungo l'asse verticale z e specificate semplicemente come `type patch`;
- `bottom`, `top`, `left` e `right`: le quattro facce perimetrali verticali specificate come `type symmetry`.

Così facendo si è in grado di simulare un dominio idealmente infinito lungo i piani x e y , e quindi la soluzione sarà estesa per simmetria lungo le altre dimensioni, nonostante si stia concentrando la simulazione solo sul REV.

In aggiunta, con l'esecuzione del comando `snappyHexMesh` la mesh viene adattata attorno alla geometria del solido e ciò determina l'introduzione di un'ulteriore patch, denominata genericamente `fabriCName` ma che assume, indirettamente, il nome del tessuto in esame specificato in `caseSetup`.

In riferimento alle condizioni al contorno, queste vengono specificate per ogni patch nei file `p_rgh`, `u` e `alpha.water` presenti nella directory `0/`, ovvero corrispondente al tempo iniziale.

- `0/alpha.water`.

Nel file `alpha.water` si vanno a riportare le informazioni e le specifiche necessarie a definire il campo della frazione volumica dell'acqua. Specificando `internalField uniform 0`, il dominio viene inizializzato con sola aria: l'acqua viene definita separatamente mediante il comando `setFields`, come discusso al Capitolo 3.1.1.

Sulle patch di `inlet` ed `outlet` si applica una condizione di tipo `inletOutlet`. All'ingresso si va ad imporre un valore fisso unitario, `inletvalue 1`, consentendo di mantenere una frazione volumetrica unitaria nelle regioni in cui si verifica un ingresso di fluido nel dominio.

All'uscita, si assicura che l'aria possa liberamente uscire dal dominio o rientrare in caso di inversioni locali del flusso, preservando la stabilità del pelo libero.

In corrispondenza della superficie solida del tessuto, `fabricName`, è stata specificata una condizione che definisce un angolo di contatto statico, `constantAlphaContactAngle`. Questa permette di attribuire le proprietà superficiali desiderate al tessuto stesso, definendo il gradiente locale della frazione volumica necessario a ricreare la bagnabilità reale e le forze capillari che regolano l'assorbimento spontaneo.

Nelle varie prove sono stati utilizzati due valori: 40° e 80° , al fine di rappresentare superfici caratterizzate da differente affinità nei confronti dell'acqua, rispettivamente più idrofile, come il cotone, e meno idrofile, come il poliestere.

Per quanto riguarda le quattro pareti laterali `bottom`, `top`, `left` e `right` viene applicata coerentemente la condizione di `type symmetry`.

- `0/p_rgh`.

Considerando ora il campo di pressione dinamica modificata, questo viene inizializzato con un valore nullo ovunque.

Sulle patch di `inlet` ed `outlet`, la pressione viene vincolata a zero impostando la condizione come `type fixedValue` e `value uniform 0`. Tale scelta permette di simulare un sistema aperto in cui non viene imposto alcun gradiente di pressione esterno.

In corrispondenza delle pareti laterali viene applicata la condizione `type symmetry`, mentre sulla parete del tessuto la pressione è gestita dalla condizione `type fixedFluxPressure`, che calcola il gradiente di pressione coerentemente con il flusso imposto dal campo di velocità, garantendo la consistenza tra le equazioni di pressione e quantità di moto.

- `0/U`.

Il campo della velocità viene inizializzato impostando velocità nulla ovunque e, essendo una grandezza vettoriale, la condizione corrispondente viene riportata come `internalField uniform (0 0 0)`.

La condizione `pressureInletOutletVelocity` determina il valore della velocità in funzione del verso del flusso: in uscita viene imposta una condizione di gradiente nullo, mentre in ingresso il valore della velocità viene calcolato coerentemente con il campo di pressione.

Coerentemente con i campi precedentemente citati, in corrispondenza delle pareti viene impostata la condizione `type symmetry`.

Diversamente, sulla superficie solida del tessuto si definisce `type noSlip`, che impone un profilo di velocità nullo a contatto con la parete.

In assenza di gravità e di differenze di pressione imposte ai confini, il moto del liquido è generato esclusivamente dalle forze capillari associate alla tensione superficiale e alle condizioni di bagnabilità imposte sulla superficie del tessuto.

3.1.3 Verifica preliminare del modello

Il caso di studio si è focalizzato sul fenomeno della risalita capillare attraverso i pori interfilato di un tessuto con specifiche proprietà di bagnabilità e non considerando per il momento l'effetto della microporosità dei singoli fili.

In assenza di dati sperimentali relativi al tessuto studiato, non è stato possibile effettuare una validazione sperimentale del modello. È stata pertanto condotta una fase di verifica mediante confronto con una soluzione teorica disponibile in letteratura per un problema semplificato di risalita capillare in un condotto rettangolare caratterizzato dal medesimo diametro idraulico di uno dei tessuti studiati.

I risultati ottenuti sono stati confrontati, e quindi verificati, con il modello teorico presentato nel Capitolo 2.5. Un analogo processo di verifica del modello è stato adottato anche da Kumar et al. [27].

Nello specifico, l'altezza del condotto capillare è stata definita arbitrariamente pari a 40 mm, ma tale da apprezzare la risalita capillare, mentre le dimensioni dei lati della sezione rettangolare, genericamente definibili $lato_x$ e $lato_y$, sono state calcolate a partire dal diametro idraulico D_h relativo al tessuto BW-22-15-0.4-0.75, riportato in Tabella 2.1.

Noto il diametro idraulico ed assumendo che $lato_y = 2 lato_x$, dalla definizione del D_h stesso è possibile calcolare i valori di $lato_x$ ed $lato_y$, come riportato a seguire:

$$D_h = \frac{4 A_{poro}}{P_{poro}} \quad (3.5)$$

$$A_{poro} = lato_x lato_y = 2 lato_x^2 \quad (3.6)$$

$$P_{poro} = (2 lato_x) + (2 lato_y) \quad (3.7)$$

Sono state investigate due condizioni di bagnabilità delle pareti, impostando angoli di contatto pari a 40° e 80°, coerentemente con il caso del tessuto.

Per ognuno dei due angoli sono state eseguite tre simulazioni, differenziate in base all'altezza iniziale del liquido, h_0 , all'interno del condotto. I valori scelti per questa grandezza sono stati: $1 \cdot 10^{-2}$ m, $1 \cdot 10^{-3}$ m e $1 \cdot 10^{-4}$ m. Inoltre, la durata della prova è stata di 0.4 s.

I risultati di queste prove preliminari sono discussi al Capitolo 4.1.

3.1.4 Grid Independence

La robustezza di un'analisi CFD è di fondamentale importanza e risulta quindi necessario che la soluzione numerica sia indipendente dalla griglia di calcolo, ovvero dal numero di celle in cui il dominio computazionale viene suddiviso. In

linea generale, un aumento della risoluzione spaziale consente di rappresentare con maggiore accuratezza i gradienti presenti nel dominio e può migliorare la qualità della soluzione numerica.

D'altro canto, anche il costo computazionale aumenta nel momento in cui le equazioni differenziali che descrivono i bilanci vengono risolte per ogni cella. È quindi necessario andare ad individuare una griglia che rappresenti il miglior *trade-off* tra affidabilità dei risultati e costo computazionale.

Nel precedente lavoro [17], [35] per lo studio di grid independence è stato scelto il tessuto PW con combinazione di densità 29.3-20 fili/cm ed un reduction factor di 0.5, ed è stato indagato il ruolo di due parametri, ovvero il numero di celle per diametro (CpD) ed il livello di raffinamento (RefLe) della mesh attorno alla superficie solida (.stl). La scelta dell'armatura è ricaduta sul Plain Weave perché è quella in cui l'interlacciamento dei fili è il più frequente, nonostante a livello pratico sia la più semplice da realizzare.

Poiché ogni combinazione tra armatura e fabric count definisce un dominio computazionale di dimensioni differenti (Figura 2.10, Capitolo 2.3), si è reso necessario individuare un parametro adimensionale ed univoco che quantificasse il livello finezza della mesh. È stato selezionato il numero di celle per diametro reale del filo di ordito (w_1), o *CpD*.

Il livello di raffinamento (RefLe) viene specificato in `level (RefLe RefLe)` nel dizionario `snappyHexMeshDict`. In termini generici si può scrivere come `level (min max)`: 'min' definisce il livello minimo di suddivisione delle celle, mentre 'max' il livello massimo.

Il flusso di lavoro prevede l'impiego di uno script *Python* sviluppato ad hoc, il quale analizza il file della geometria in formato *.stl* e ne estrae i parametri geometrici principali necessari alla definizione del dominio computazionale, come già specificato nel Capitolo 2.2.3.

Tali valori vengono successivamente riportati nel file di configurazione `caseSetup`, dove vengono specificati dall'utente anche il CpD ed il RefLe. Sulla base delle informazioni nel `caseSetup`, viene generata la topologia del dominio computazionale.

La velocità media in uscita è stata scelta come parametro di riferimento da monitorare, in quanto direttamente correlata alla portata complessiva attraverso il dominio e particolarmente sensibile alle variazioni della discretizzazione spaziale.

Nel lavoro [17], [35] sono stati analizzati tre livelli crescenti di raffinamento a partire da `level (0 0)`, ovvero nessun raffinamento alla parete, seguito da `level (1 1)` e `level (2 2)`. Per ognuna di queste è stato variato il CpD tra 14 e 32 nel caso di `level (0 0)`, mentre tra 14 e 28 per `level (1 1)` e `level (2 2)`. I risultati dell'analisi sono riassunti in Figura 3.5.

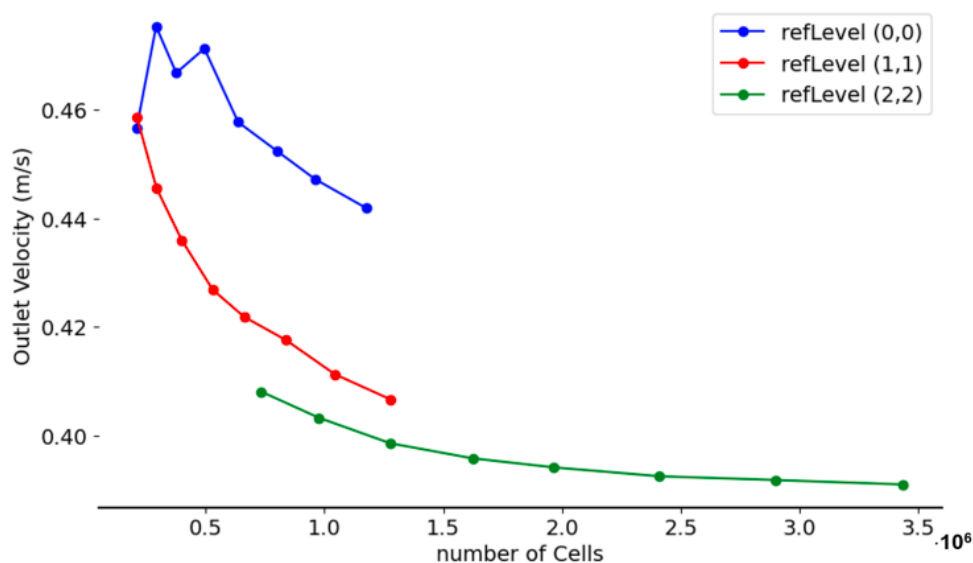


Figura 3.5: Risultati dello studio di grid independence per tre livelli di raffinamento, da Bianca et al. [35]

Osservando il grafico in Figura 3.5 si comprende come il livello di raffinamento (2, 2) risulta il meno sensibile alle variazioni del CpD e mostra una chiara tendenza alla convergenza verso un valore limite della velocità. Sebbene non si osservi un plateau perfettamente definito, a partire da $CpD = 20$ le variazioni della velocità risultano inferiori allo 0.2 % per ulteriori raffinamenti, rendendo tale configurazione un compromesso adeguato tra accuratezza e costo computazionale [17], [35].

A partire da questo risultato, è stata strutturata l'analisi di grid independence di questo lavoro, che si è concentrata sul tessuto PW-22-15-0.4-0.78 e fissando a priori il livello di raffinamento, pari a level (2, 2). Conseguentemente, è stato investigato soltanto il ruolo del CpD .

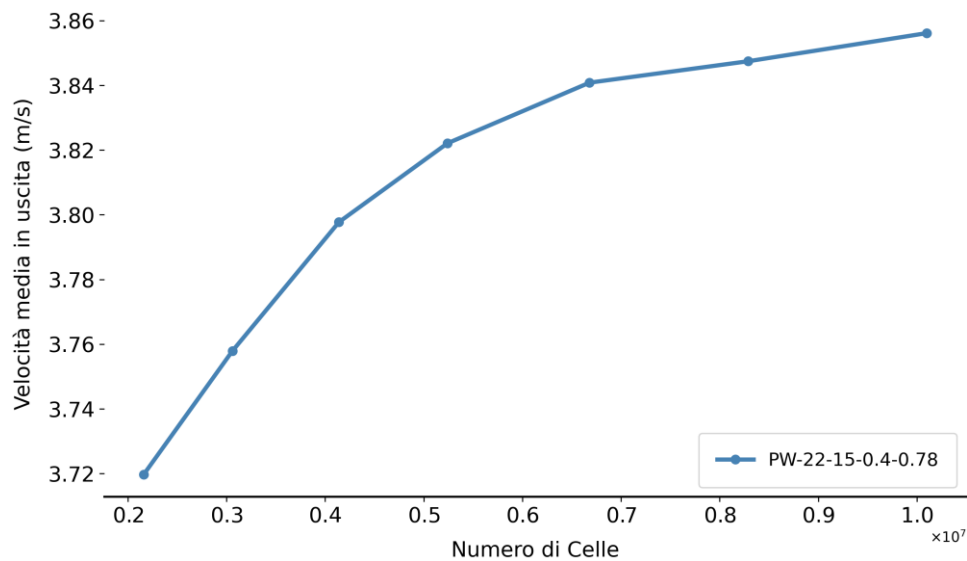
In questa analisi la mesh è stata generata per l'intero dominio computazionale, sia la regione del fluido che la regione del tessuto. La scelta è ricaduta sul caso biregione perché la microporosità del filato ha un ruolo chiave sul trasporto multifase attraverso il tessuto, a differenza del caso sulla permeabilità all'aria discusso al Capitolo 2.5. Il set up ha previsto l'uso del solver `poroussimpleFoam`, per un sistema monofase con sola aria ed impostando una differenza di pressione tra `inlet` ed `outlet`, rappresentante la driving force.

Il grafico in Figura 3.6 a) mostra che in un primo momento la curva presenta una pendenza notevole, con un netto aumento della velocità misurata, ma successivamente la variazione della curva è meno marcata. In questa seconda parte, grandi incrementi nel numero di celle si traducono in minime variazioni della

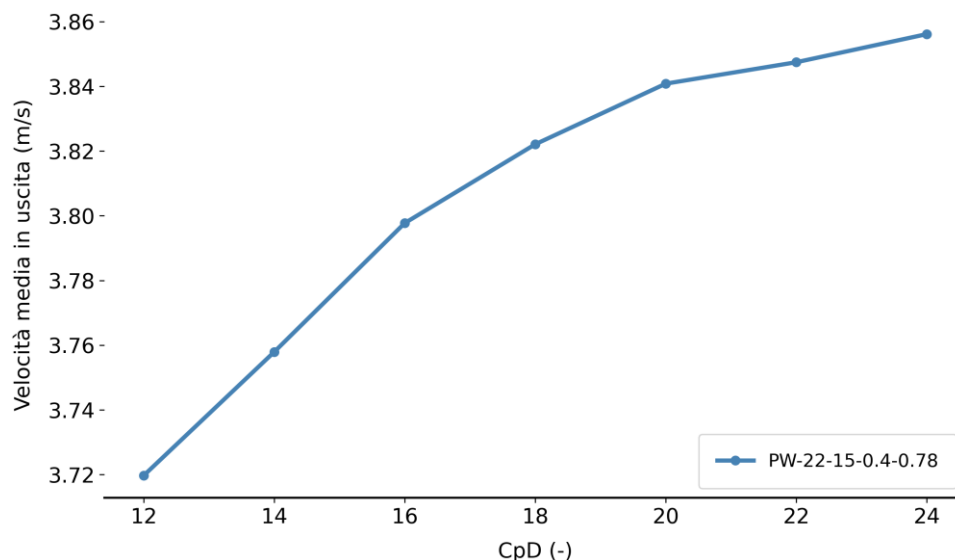
velocità. In modo analogo, la Figura 3.6 b) mostra i medesimi risultati ma in una veste leggermente diversa: l'andamento della velocità viene diagrammato rispetto al CpD, che risulta un parametro maggiormente indicativo rispetto al precedente.

La scelta del valore di CpD minimo che descrive accuratamente il problema, quindi per il quale l'aumento ulteriore del numero di celle non determina una variazione marcata dei risultati, è ricaduta su CpD pari a 20. In questo caso la velocità diminuiva dello 0.49 % rispetto al caso precedente (CpD pari a 18) con un aumento di celle del 21.58 %. Un ulteriore raffinamento (CpD pari a 22) avrebbe comportato una diminuzione della velocità dello 0.17 % a fronte di un ulteriore aumento del 19.44 % del numero di celle. Questo aumento di celle, circa da 6.7 milioni a 8.3 milioni, risulta ingiustificato in relazione all'esigua diminuzione del valore della velocità.

Il valore di CpD individuato viene quindi utilizzato come parametro di discretizzazione per tutti i casi successivamente analizzati, garantendo una qualità della mesh comparabile tra differenti configurazioni geometriche, in accordo con l'equazione 3.1.



a)



b)

Figura 3.6: Risultati dello studio di grid independence. Velocità del fluido in uscita rispetto al numero di celle (a) e al numero di celle per diametro, CpD (b)

3.1.5 Estrapolazione dei risultati

L'obiettivo della presente campagna di simulazioni è andare ad investigare l'influenza di parametri geometrici, quali armatura e densità dei fili di trama e ordito, e parametri chimico-fisici, nello specifico la bagnabilità del materiale definita tramite l'angolo di contatto sulla patch di tessuto, sul meccanismo di trasporto multifase.

A tale scopo, la strategia si è basata in primo luogo sul monitoraggio dell'evoluzione temporale della fase acquosa sia in termini relativi, tramite la frazione volumetrica, sia in termini assoluti attraverso il calcolo del volume. L'analisi ha interessato l'intero dominio di calcolo.

Come accennato nel Capitolo 3.1.1, l'uso dell'utility `setZones` ha permesso di definire tre zone distinte all'interno del volume di calcolo: una regione che include il tessuto (`fabricZone`), una al di sopra del tessuto (`airTopZone`) ed un'altra al di sotto (`airBottomZone`).

L'estrapolazione quantitativa del volume di fluido nel tempo in ciascuna zona è stata automatizzata mediante l'implementazione di opportune `functionObjects` definite direttamente in OpenFOAM nel file `system/controlDict/`.

Per ricavare il volume effettivo della fase liquida (V_{water}), l'algoritmo esegue l'operazione `volIntegrate`, ovvero un'integrazione numerica sul volume della zona specificata. Il calcolo viene applicato al campo scalare `alpha.water` (α_{water})

che mappa la frazione volumetrica in ogni cella. L'analisi simultanea di volume e frazione volumetrica consente di distinguere gli effetti legati alle dimensioni assolute del dominio da quelli riconducibili esclusivamente alla distribuzione relativa della fase liquida.

Tale operazione si riporta a seguire scritta in termini dell'intero dominio, Ω .

$$V_{water,\Omega} = \int_{\Omega} \alpha_{water} d\Omega \quad (3.8)$$

Poiché α_{water} rappresenta la frazione volumetrica locale della fase liquida, l'integrazione restituisce direttamente il volume totale occupato dall'acqua nella regione considerata. Questa formulazione può essere riscritta anche per le altre regioni, `fabricZone` e `airTopZone`, sostituendo formalmente Ω con la rispettiva zona.

Nel dizionario sono stati quindi configurati tre blocchi `volFieldValue` distinti. Il primo, `waterVolume`, calcola l'integrale sull'intero volume del dominio, mentre gli altri due, `waterInFabric` e `waterInAirTop`, limitano l'integrazione volumetrica alle regioni `fabricZone` e `airTopZone`, rispettivamente.

Ottenute le serie temporali dei dati estratti, si è provveduto alla loro elaborazione e visualizzazione grafica mediante uno script Python dedicato, diagrammando l'evoluzione nel tempo sia del volume assoluto sia della frazione volumetrica. Il profilo di α_{water} permette di visualizzare in modo più intuitivo ed immediato cosa accade all'interno del sistema e specificatamente nelle tre zone di suddivisione del dominio. Inoltre, in quanto grandezza normalizzata e conseguentemente indipendente dalle dimensioni geometriche del dominio stesso, rende immediati i confronti diretti fra le varie configurazioni geometriche scelte nella campagna in discussione.

Parallelamente a questa analisi quantitativa, è stato investigato il ruolo dell'armatura sul trasporto capillare mediante un'analisi visiva e topologica in ambiente `paraView`. Si è osservato il dominio secondo una vista planare lungo la direzione z al di sopra del tessuto, esaminando i singoli *frame*, è stato possibileappare la distribuzione superficiale del fluido.

L'interesse è stato posto anche sulla quantificazione della frazione, o similmente la percentuale, dell'area della porzione superiore del tessuto bagnata. Tale patch, che in breve è rappresentata dalla regione di tessuto che si affaccia lungo la direzione di uscita del flusso, è stata isolata in `ParaView`.

Il flusso di lavoro ha previsto, come primo step, l'impiego del filtro `GenerateSurfaceNormals` sul modello tridimensionale del tessuto: questa operazione ha permesso di calcolare i vettori normali uscenti da ciascun elemento della mesh superficiale. Generate le normali, è stato utilizzato il filtro `Calculator` per estrarre la sola componente orientata lungo l'asse verticale z . Successivamente, è stato imposto un filtro di soglia `Threshold1` per isolare la parte della superficie 'effettivamente' impregnata dal liquido. L'intervallo di inclusione della frazione

volumetrica è stato limitato ai soli elementi nei quali venisse soddisfatta la condizione $\alpha_{water} \geq 0.5$, ovvero quando l'acqua costituisce la fase fisicamente predominante. La soglia $\alpha_{threshold} = 0.5$ è comunemente utilizzata nei modelli VOF per identificare la posizione dell'interfaccia liquido-gas.

Successivamente, per valutare quanta frazione di questo fronte emergesse effettivamente sulla porzione superiore dell'architettura tessile, è stato utilizzato un secondo filtro di soglia `Threshold2`. Sono stati filtrati esclusivamente gli elementi geometrici aventi una componente normale strettamente positiva ($N_z > 0$). Ne segue che la porzione inferiore è stata tralasciata, per concentrare così l'analisi unicamente sulla faccia superiore esposta del tessuto.

Infine, su questa superficie bagnata isolata è stato applicato il filtro `IntegrateVariables`, che esegue un'integrazione numerica discreta sulla mesh e consente di calcolare l'estensione dell'area bagnata $A_{tex,wet}$ per ciascun istante temporale salvato.

Per il calcolo dell'area geometrica totale della faccia superiore esposta A_{tex} il procedimento è stato analogo, procedendo con l'applicazione di un unico filtro `Threshold` impostato unicamente alle normali positive ($N_z > 0$). Si isola così l'intera superficie geometrica (superiore) a prescindere dal fluido. Il rapporto tra $A_{tex,wet}$ e A_{tex} fornisce la porzione di superficie bagnata, ad un preciso istante temporale o la sua evoluzione nel tempo.

$$f_{tex,wet} = \frac{A_{tex,wet}}{A_{tex}} = \frac{\sum_j A_j(\alpha_j \geq 0.5)}{A_{tex}} \quad (3.9)$$

Per approfondire la topologia del fronte si è eseguita anche un'analisi morfologica basata sull'identificazione di *clusters* di liquido. A tale scopo è stato utilizzato *ImageJ*, un programma Open Source scritto in Java, progettato specificamente per visualizzare, elaborare e analizzare immagini e sviluppato dal *National Institutes of Health* (NIH) [36].

La strategia operativa si basa sulla binarizzazione d'immagine applicata alla sezione planare del tessuto, isolando le regioni sature d'acqua.

Per descrivere matematicamente lo stato di coesione o dispersione del liquido durante la risalita capillare è stato definito il *Connectivity Index* (CI), un parametro adimensionale esprimibile come segue:

$$CI = \frac{A_{max}}{A_{tot}} \quad (3.10)$$

$$A_{tot} = \sum_i^N A_i \quad (3.11)$$

dove, A_i corrisponde all'area del cluster i -esimo ed $i = 0, 1, \dots, N$ con N pari al numero totale di cluster individuati.

Monitorare questa metrica permette di definire la dinamica di invasione, nonché stabilire se il trasporto all'interno dei pori è *omogeneo*, localizzato o

governato da fenomeni di *channelling*. Valori prossimi all'unità indicano che gran parte dell'area liquida appartiene ad un unico cluster dominante. Valori marcatamente inferiori evidenziano un fronte liquido fortemente frammentato in una moltitudine di strutture isolate e indipendenti.

Tabella 3.1: Riassunto delle metriche utilizzate

Grandezza	Significato
V_{water}	Quantità totale di liquido
α_{water}	Distribuzione relativa del liquido
$\alpha_{\text{threshold}}$	Valore soglia della distribuzione relativa del liquido
$f_{\text{tex,wet}}$	Frazione di area superficiale bagnata
CI	Connettività del fronte liquido

4 Risultati

4.1 Risultati per la verifica preliminare del modello

Il sistema descritto al capitolo 3.1.3 è stato utilizzato, come anticipato, per la verifica del modello. I risultati numerici ottenuti dalle simulazioni, dunque, sono stati confrontati con i modelli teorici discussi al Capitolo 2.5.

Il modello, infatti, è stato calibrato e confrontato con le leggi teoriche descrittive del regime visco-inerziale descritto da Bosanquet e del regime puramente viscoso descritto da Lucas e Washburn.

Si ricorda inoltre che sono state investigate due condizioni di bagnabilità, $\theta = 40^\circ$ e $\theta = 80^\circ$, e per ognuna di queste tre prove con valori differenti dell'altezza iniziale del liquido h_0 , $1 \cdot 10^{-2}$ m, $1 \cdot 10^{-3}$ m e $1 \cdot 10^{-4}$ m.

Come accennato nel Capitolo 2.5 la transizione tra i regimi può essere scandita convenzionalmente da alcuni tempi caratteristici, e quello relazionato alla transizione tra i due regimi investigati (Bosanquet e Lucas-Washburn) è t_2 .

Il valore di t_2 , calcolato in accordo all'equazione 2.46 è risultato essere pari a 0.0398 s.

La Figura 4.1 riporta la risalita del fluido (mm) in funzione del tempo (s), mostrando il confronto tra soluzione teorica e soluzione numerica (CFD) per la verifica della legge di Bosanquet, con $h_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ m.

Come si può notare, nei grafici in Figura 4.1 sono stati riportati i dati fino ad un tempo di poco superiore a t_2 , quindi al termine teorico di validità di tale regime, in modo da facilitare l'interpretazione dei risultati. La linea verticale tratteggiata, in grigio, è tracciata in corrispondenza di $t = t_2$.

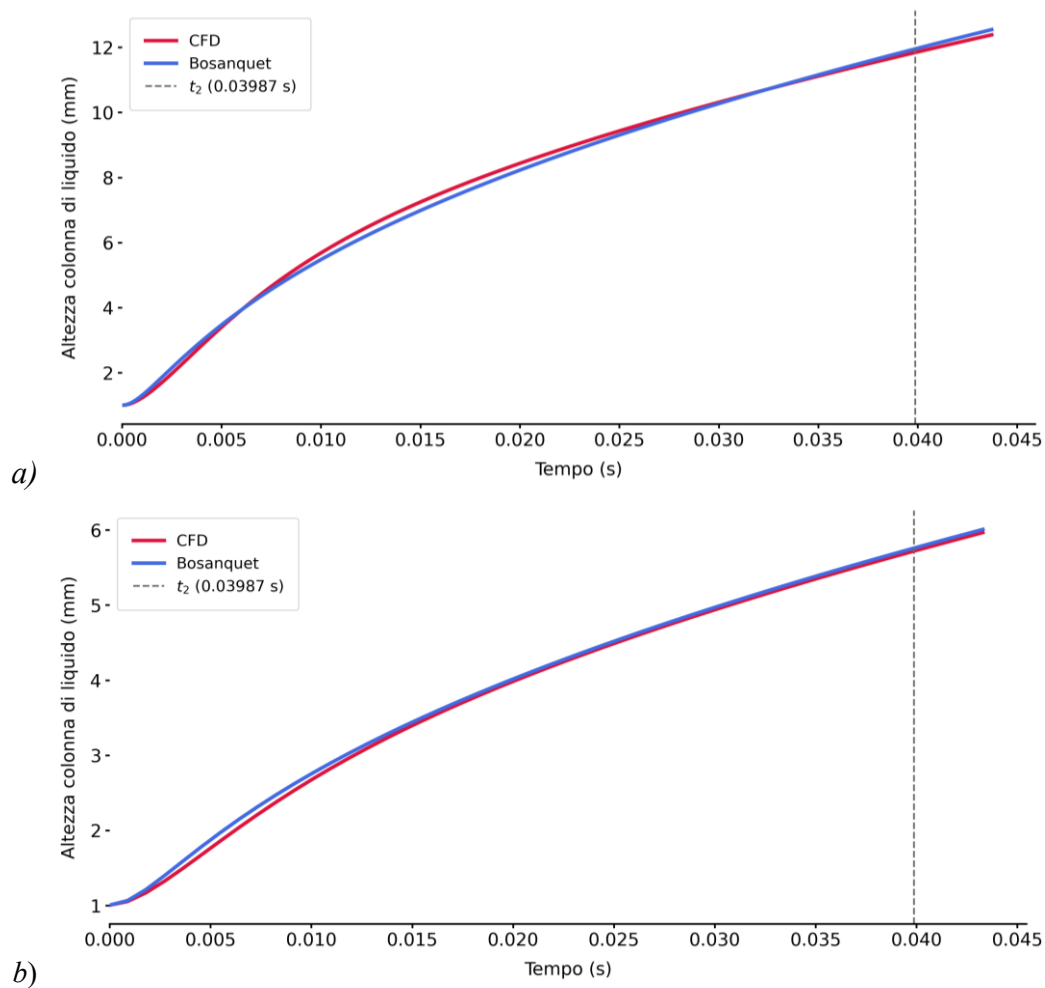


Figura 4.1: Verifica della legge di Bosanquet tramite confronto, tra soluzione numerica (CFD, in rosso) e teorica (in blu), dell'evoluzione temporale della risalita del liquido per due condizioni di bagnabilità e $h_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$;
a) superficie idrofila, $\theta = 40^\circ$ e b) superficie minormente idrofila $\theta = 80^\circ$

Osservando la Figura 4.1 si può comprendere come, per entrambe le condizioni di bagnabilità, le due curve (teorica in blu e numerica in rosso) siano pienamente in accordo tra loro.

In particolare, in Figura 4.1 b), corrispondente a $\theta = 80^\circ$, le due curve risultano praticamente sovrapposte, dimostrando un buon accordo tra il modello numerico e quello teorico.

Considerando invece $\theta = 40^\circ$, Figura 4.1 a), si osserva un leggero scostamento per tempi intermedi.

Per tempi maggiori a t_2 le forze viscosi prevalgono su quelle inerziali e la risalita capillare viene descritta dalla legge di Lucas-Washburn.

I risultati del confronto in questo regime, per $h_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ m, sono mostrati nei grafici in Figura 4.2.

Entrambi i grafici in Figura 4.2 mostrano la risalita del liquido (mm) in funzione del tempo (s) su un arco temporale esteso fino a 0.4 s, nonché il tempo di fine prova.

Le curve presentano un andamento parabolico, tipico della legge di Lucas-Washburn.

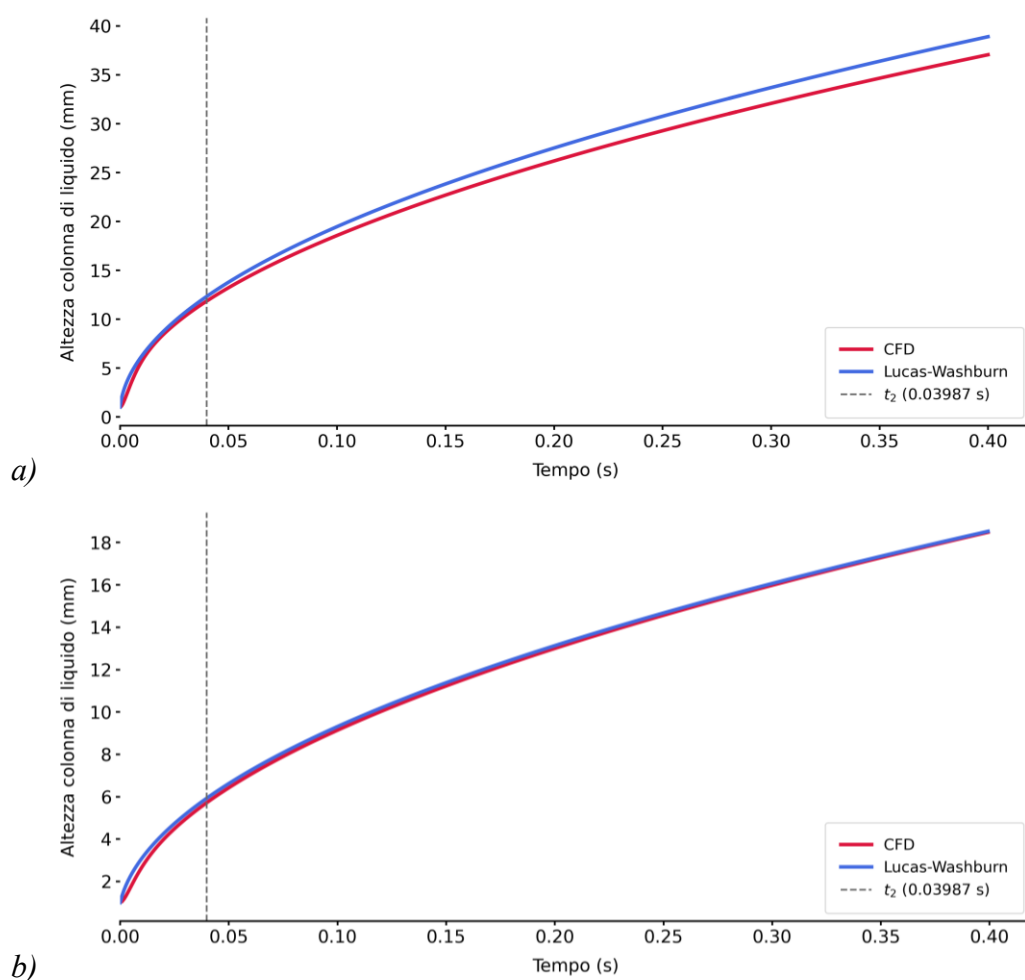


Figura 4.2: Verifica della legge di Lucas-Washburn tramite confronto, tra soluzione numerica (CFD, in rosso) e teorica (in blu), dell'evoluzione temporale della risalita del liquido per due condizioni di bagnabilità; a) $\theta = 40^\circ$ e b) $\theta = 80^\circ$

La Figura 4.2 *a*) mostra il confronto relativo ad un angolo di contatto pari a 40° e, nonostante si osservino delle leggere discrepanze tra le due curve per tempi maggiori, il fitting quantitativo risulta soddisfacente.

Per il caso a minore bagnabilità ($\theta = 80^\circ$), riportato in Figura 4.2 *b*) l'accordo tra il modello CFD e la legge teorica è pienamente soddisfacente per l'intero intervallo temporale investigato.

L'analisi congiunta tra i risultati mostrati in Figura 4.1 e quelli in Figura 4.2 evidenzia come il modello numerico permetta di predire quantitativamente il comportamento del sistema in maniera fedele, in particolar modo in condizioni di bassa bagnabilità, ovvero per angoli di contatto elevati.

Si riassumono in Tabella 4.1 i risultati di tutte le prove effettuate durante la fase di verifica preliminare del modello. Nello specifico, si riporta il valore dell'altezza della colonna di fluido al termine della prova (h_f), predetta e teorica, per ogni condizione di bagnabilità e per ogni valore di altezza iniziale del liquido h_0 .

Tabella 4.1: Riassunto dei risultati ottenuti da prove di risalita capillare per un condotto a sezione rettangolare, per due condizioni di bagnabilità e variando il valore dell'altezza iniziale del liquido, h_0 . Le grandezze $h_{f,CFD}$ e $h_{f,T}$ rappresentano l'altezza finale della colonna di liquido predetta e teorica, rispettivamente

	$\theta = 40^\circ$	$\theta = 80^\circ$
$h_0 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$	$h_{f,CFD} = 37.28 \text{ mm}$	$h_{f,CFD} = 18.53 \text{ mm}$
	$h_{f,T} = 38.88 \text{ mm}$	$h_{f,T} = 18.50 \text{ mm}$
$h_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	$h_{f,CFD} = 37.06 \text{ mm}$	$h_{f,CFD} = 18.49 \text{ mm}$
	$h_{f,T} = 38.90 \text{ mm}$	$h_{f,T} = 18.52 \text{ mm}$
$h_0 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}$	$h_{f,CFD} = 38.19 \text{ mm}$	$h_{f,CFD} = 21.05 \text{ mm}$
	$h_{f,T} = 40.16 \text{ mm}$	$h_{f,T} = 21.04 \text{ mm}$

Si riporta inoltre, in Figura 4.3, un'immagine del menisco in corrispondenza dell'interfaccia nei due casi di bagnabilità della parete studiati, 40° ed 80° , al tempo finale ($t = 0.4 \text{ s}$).

La Figura 4.3 mostra come la forma del menisco per un angolo di contatto con la parete di 40° (caso idrofilo, *a*) risulta molto più marcata, e quindi caratterizzata da una curvatura maggiore, rispetto a quella osservata per un angolo di contatto di 80° (caso minormente idrofilo, *b*).

Questi risultati sono in linea con la teoria nel momento in cui la curvatura del menisco, approssimabile con una calotta sferica, è funzione del raggio di curvatura nonché dell'angolo di contatto, come discusso nel Capitolo 2.5.

Conseguentemente, per valori minori di θ (elevata bagnabilità) il raggio di curvatura è minore e la forma del menisco è più marcata; differentemente, all'aumentare di θ il raggio di curvatura aumenta ed il menisco assume una forma sempre più piatta (minore bagnabilità).

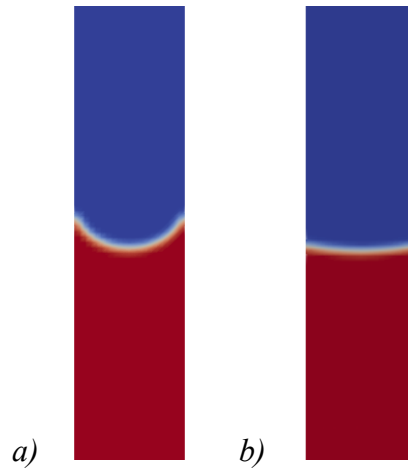


Figura 4.3: Forma del menisco per due condizioni di bagnabilità:
a) superficie idrofila, $\theta = 40^\circ$ e b) superficie minormente idrofila, $\theta = 80^\circ$

4.2 Risultati per i tessuti intrecciati

L'elaborazione dei risultati relativi ai tessuti, nonché ai casi di studio in cui sono state variate l'armatura, la combinazione di densità dei fili e la bagnabilità superficiale, è stata svolta in accordo a quanto riportato al Capitolo 3.1.5.

Questo Capitolo è dedicato alla presentazione e alla discussione dei risultati.

4.2.1 Studio della dinamica di risalita

In primo luogo, è stata analizzata l'evoluzione temporale della frazione volumetrica di acqua, α_{water} , nel sistema e questo ha permesso l'individuazione di due comportamenti globali rispetto la *dinamica* del fenomeno di trasporto del liquido.

In alcuni casi, si è osservato il raggiungimento di una condizione di completa saturazione della regione del tessuto (*fabric zone*), con l'individuazione di quello che è stato definito 'tempo di *breakthrough*', da interpretare come il momento in

cui il liquido raggiunge la regione al di sopra del tessuto (*airTopZone*). Questo comportamento è stato osservato solo per alcune tipologie di strutture, ovvero quelle idrofile ($\theta = 40^\circ$) con combinazione di densità dei fili 22-15 fili/cm, come nel caso in Figura 4.4 a).

Differentemente, per i casi idrofilo a maggiore combinazione di densità (29.3-20 fili/cm) e per i casi minormente idrofilo ($\theta = 80^\circ$) si è osservata una condizione di parziale saturazione della *fabricZone* con conseguente assenza di *breakthrough*, nel momento in cui il liquido non raggiunge la *airTopZone*, come mostrato in Figura 4.4 b).

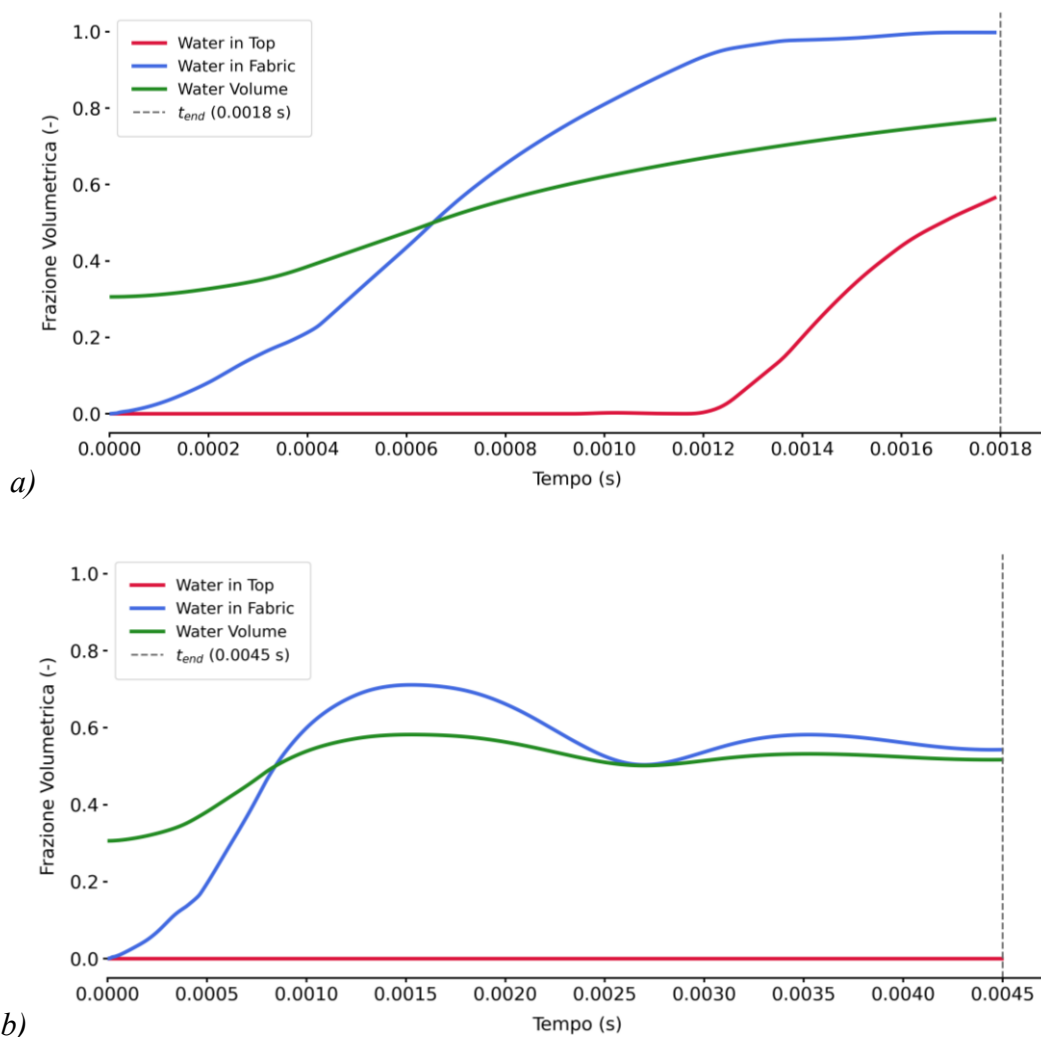


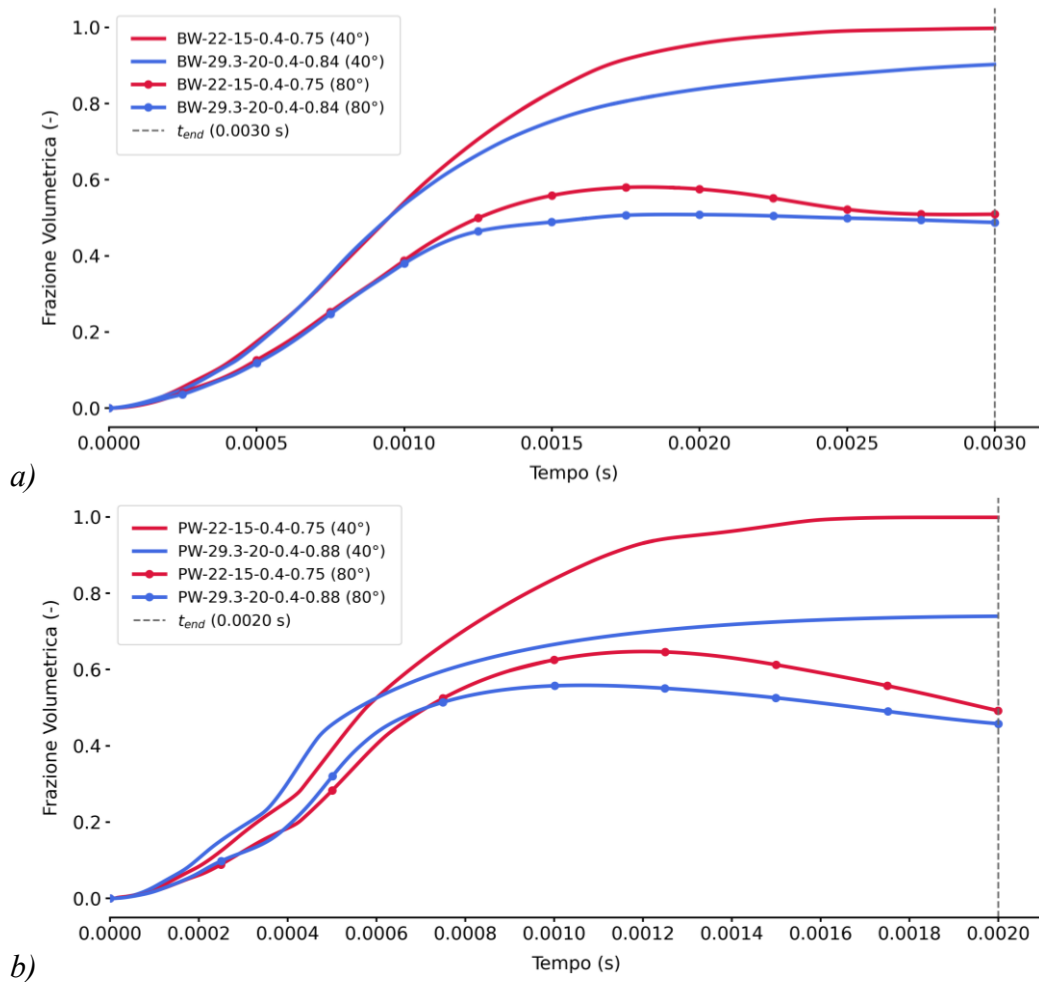
Figura 4.4: Evoluzione temporale della frazione volumetrica del liquido nel sistema per le due condizioni osservate: a) saturazione completa della *fabricZone* e presenza del *breakthrough*, b) parziale saturazione della *fabricZone* e assenza del *breakthrough*

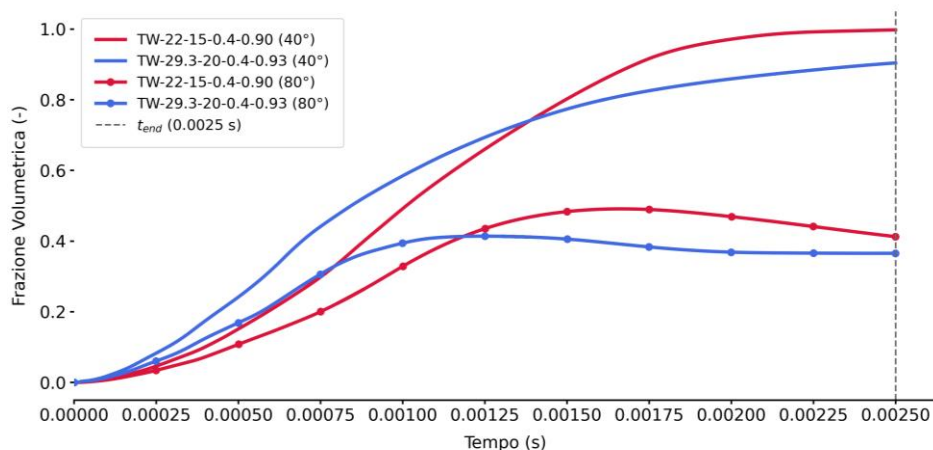
A seguire, in Figura 4.5, si presentano dei grafici che mostrano l'andamento temporale della frazione volumetrica dell'acqua, α_{water} , unicamente nella regione del tessuto (fabricsZone).

In ciascun grafico i risultati sono riportati fino ad un istante temporale, t_{end} , definito arbitrariamente in relazione alla curva che prima si stabilizza (raggiungendo un plateau), permettendo di effettuare confronti diretti tra le casistiche sulla medesima base temporale.

Nello specifico, ogni grafico riporta le curve relative ad una data armatura, nonché quelle relative alle quattro combinazioni risultanti dalla densità dei fili, 22-15 fili/cm (in rosso) e 29.3-20 fili/cm (in blu), e dalla bagnabilità, $\theta = 40^\circ$ (linea continua) e $\theta = 80^\circ$ (presenza di markers).

In ordine, la Figura 4.5 a) è relativa all'armatura BW, la Figura 4.5 b) al PW mentre la Figura 4.5 c) al TW.





c)

Figura 4.5: Andamento della frazione volumetrica dell'acqua nella fabriczone per le armature a) BW, b) PW e c) TW

Da questi grafici si comprende come, fissate l'armatura e la densità dei fili, l'evoluzione temporale della frazione volumetrica, α_{water} , sia fortemente governata dall'angolo di contatto, quindi dalle condizioni di *bagnabilità*. Come introdotto nel Capitolo 2.5, la dinamica di imbibizione è relazionata alla pressione capillare, descritta attraverso la formulazione di Young-Laplace mostrata nell'equazione 2.36.

Quando $\theta = 40^\circ$, in relazione al carattere maggiormente idrofilo della superficie, la forza capillare è elevata. Questa spinta maggiore si riflette, a livello visivo, su una pendenza maggiore nel tratto iniziale delle curve in Figura 4.5, indice di un trasporto del liquido più rapido. Inoltre, si osserva che la frazione volumetrica raggiunge e si stabilizza su valori globalmente maggiori rispetto al caso $\theta = 80^\circ$, ed in alcuni casi viene raggiunta la saturazione completa della regione del tessuto.

Diversamente, per un angolo di contatto maggiore ($\theta = 80^\circ$), relazionato a superfici a carattere minormente idrofilo, il trasporto capillare è rallentato in virtù della minore forza di risalita. Ne segue una più debole spinta iniziale, che si traduce in una minore pendenza delle curve, seguita da un arresto del processo di trasporto del liquido a valori minori di saturazione della regione del tessuto.

L'elevata bagnabilità combinata ad una bassa densità dei fili consente un trasporto efficiente del liquido attraverso il tessuto; infatti, il *breakthrough* dipende dalla formazione di percorsi capillari interconnessi, che nel caso citato presentano una minore tortuosità, favorendo quindi il trasporto.

In condizioni di bassa bagnabilità, o di elevata bagnabilità combinata con maggiore densità dei fili, il liquido è in grado di penetrare nella struttura, ma le forze capillari non sono sufficienti a sostenere il trasporto verso l'alto, soprattutto

quando $\theta = 80^\circ$. Di conseguenza, l'acqua si ridistribuisce all'interno del tessuto senza raggiungere la parte superiore.

In assenza di interventi di ingegneria strutturale e superficiale, il trasporto del liquido in tali condizioni non è garantito.

Nei tessuti reali, un trasporto efficiente dell'umidità non si ottiene solo grazie alla bagnabilità, ma dalla sinergia tra le proprietà superficiali e la struttura porosa ingegnerizzata.

Fissando l'armatura e l'angolo di contatto, si permette di evidenziare il ruolo della *densità dei fili* nel processo di imbibizione.

In particolare, per tempi minori la dinamica di risalita è pressoché analoga tra le casistiche indipendentemente dalla combinazione di densità (a parità di angolo di contatto), fatta eccezione per il caso *c*) per il quale si notano scostamenti più marcati. A tempi maggiori invece, le curve presentano tra loro un comportamento differente ed in particolare si osserva sistematicamente come le strutture con combinazione di densità minore (22-15 fili/cm) siano associate a valori di frazione volumetrica maggiori rispetto ai casi a densità maggiore (29.3-20 fili/cm).

A parità di condizione di bagnabilità superficiale, il trasporto del liquido è quindi favorito per strutture con combinazione di densità minore (22-15 fili/cm), e questo comportamento può essere descritto richiamando il concetto di tortuosità.

Le strutture caratterizzate da una densità maggiore di fili (29.3-20 fili/cm) presentano infatti dei percorsi capillari interfilo molto più tortuosi di quelli nelle strutture a minore densità. Conseguentemente il fluido incontrerà più ostacoli nel suo percorso, che rendono il trasporto meno favorevole.

Il moto del fluido non è quindi controllato solo dalla capillarità, ma anche dalla tortuosità, dettata dalla combinazione di densità dei fili nella struttura.

Per isolare il ruolo della modalità dell'intreccio e comprendere come interagisce con il trasporto del liquido, la Figura 4.6, *a*) e *b*), permette di confrontare direttamente le tre *armature* (BW, PW, TW) mantenendo costante la densità dei fili, rispettivamente al valore inferiore (22-15 fili/cm) e al valore superiore (29.3-20 fili/cm).

Il confronto, riportato fino a t_{end} pari a 0.0025 s, evidenzia come ogni tipologia di intreccio risponda in modo differente. Questo istante temporale non rappresenta la fine della prova, ma è stato scelto arbitrariamente al fine di confrontare in modo diretto le casistiche sulla medesima base temporale.

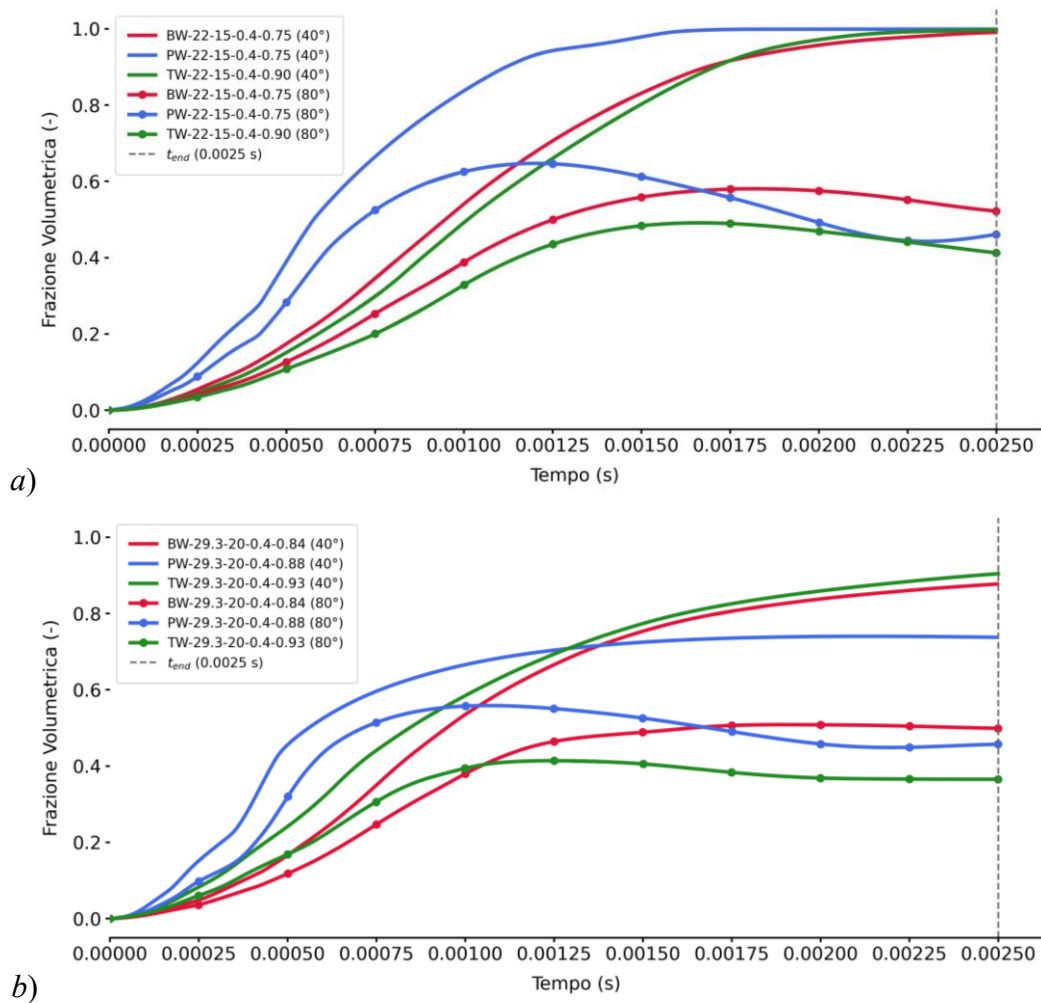


Figura 4.6: Andamento della frazione volumetrica dell'acqua nella fabbricazione per le combinazioni di densità a) 22-15 fili/cm e b) 29.3-20 fili/cm

In riferimento al grafico a bassa densità (22-15 fili/cm) in Figura 4.6 a), si osserva che le curve relative all'armatura PW presentano pendenze maggiori nei primi istanti, rispetto le altre tipologie di armature, per entrambe le condizioni di bagnabilità.

Questa dinamica è riconducibile alla regolarità della struttura stessa che, presentando il massimo numero di intrecci tra i fili di trama e di ordito nell'unità ripetitiva, permette un trasporto uniforme attraverso l'intera struttura. Questo aspetto verrà ripreso a seguire sulla base delle analisi discusse nei capitoli 4.2.2 e 4.2.3.

Tuttavia, a lungo termine si osservano comportamenti differenti. In condizioni idrofile ($\theta = 40^\circ$), l'elevata bagnabilità della superficie, combinata ad una modalità di intreccio regolare, porta alla saturazione completa della fabriczone in tempi brevi, ed in generale prima delle altre strutture.

Diversamente, per le armature BW e TW ($\theta = 40^\circ$), la risalita iniziale è più lenta. A differenza del PW, in queste strutture sono presenti minori punti di legatura tra i fili di trama e di ordito e questo, in combinazione con una tipologia di intreccio non regolare lungo le varie direzioni, comporta la risalita del liquido solo in corrispondenza di specifici punti della struttura. Come conseguenza di ciò, il fenomeno di trasporto capillare negli istanti iniziali risulta rallentato. Nuovamente, per questo aspetto si rimanda ai capitoli 4.2.2 e 4.2.3. Nonostante ciò, le curve crescono in modo continuo e progressivo raggiungendo anch'esse una condizione di saturazione completa della fabriczone all'istante t_{end} .

In condizioni di bassa bagnabilità ($\theta = 80^\circ$), il PW si conferma nuovamente come l'armatura caratterizzata da una velocità iniziale di risalita maggiore ma, una volta raggiunto il valore di picco, la curva mostra un andamento decrescente, nonché l'inizio di un andamento oscillatorio, più o meno marcato, che precede la stabilizzazione della curva, come mostrato in Figura 4.7 e discussa a seguire.

Le armature BW e TW, in modo analogo al caso idrofilo, presentano un comportamento ed una dinamica confrontabili in fase di risalita, ma sono comunque caratterizzate da una velocità di risalita minore di quella osservata per il corrispondente caso del PW. Anche in questo caso le curve mostrano il raggiungimento di un punto di massimo, seguito da un tratto decrescente che si prolunga fino al termine del grafico.

Incrementando la densità dei fili, Figura 4.6 b), si osserva che nessuna delle strutture raggiunge la saturazione completa e le curve si stabilizzano su valori di frazione volumetrica globalmente inferiori rispetto il caso a), per entrambe le condizioni di bagnabilità. Questo differente comportamento è associato alla tortuosità del percorso capillare interfilo che influenza il trasporto, come discusso precedentemente nell'analisi dei grafici in Figura 4.5.

Nuovamente, l'armatura PW mostra una risalita iniziale più rapida, ma porta ad una condizione di saturazione parziale della regione del tessuto, contro la saturazione completa osservata per il caso a).

Le armature BW e TW presentano sempre un comportamento confrontabile, soprattutto a tempi maggiori e per $\theta = 40^\circ$, anche se nella fase iniziale di trasporto il TW si mostra lievemente più performante del BW per entrambe le condizioni di bagnabilità.

A tempi maggiori si osserva quindi che, in condizioni di elevata bagnabilità, mentre nel caso a) per tutte le geometrie a minore densità di fili veniva raggiunta la saturazione completa, benché secondo dinamiche differenti, con strutture con densità di fili maggiore si raggiungono solo condizioni di parziale bagnatura e tra

queste il PW si stabilizza ad un valore di frazione volumetrica minore rispetto le altre.

Risulta particolarmente interessante anche studiare il comportamento a tempi maggiori rispetto $t = 0.0025$ s, che si ricorda essere stato scelto come base per il confronto diretto tra le casistiche. A tal proposito, si riporta in Figura 4.7 il grafico relativo alle strutture con densità dei filati 22-15 fili/cm e bassa bagnabilità, che mostra come i comportamenti non fossero pienamente apprezzabili nel transitorio a breve termine, discusso precedentemente.

Il raggiungimento del plateau finale non avviene in maniera monotona e graduale, come osservato per le casistiche in cui la regione del tessuto viene saturata completamente, ma è relazionato al bilanciamento delle forze in gioco (capillari, inerziali e viscosi) e dalla geometria.

A livello visivo, questo si traduce in comportamenti oscillatori che si smorzano nel tempo fino alla stabilizzazione in corrispondenza di un valore finale di frazione volumetrica.

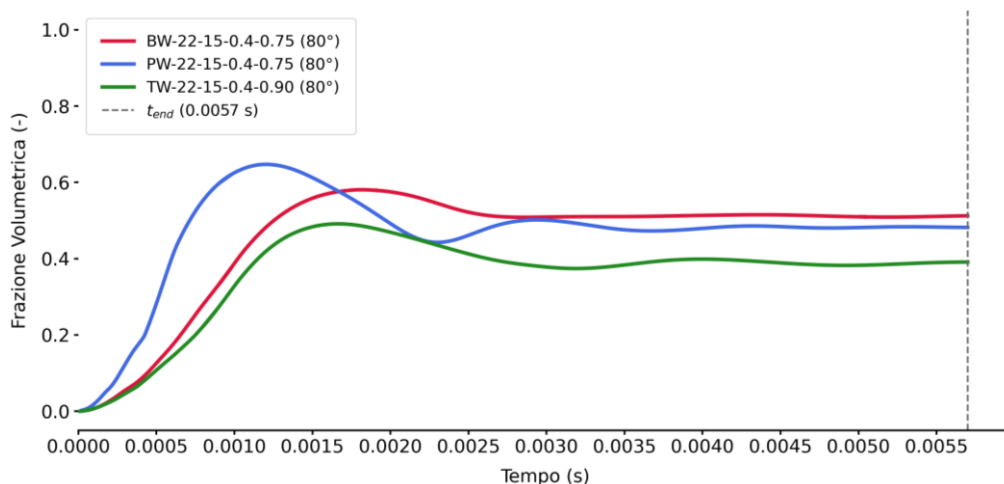


Figura 4.7: Andamento della frazione volumetrica dell'acqua nella fabbricazione per le armature BW (rosso), PW (blu) e TW (verde) con densità 22-15 fili/cm e $\theta = 80^\circ$

In tutte le curve si osserva la presenza di un picco seguito da oscillazioni di assestamento più o meno marcate. In termini generali si ha che, lungo il tratto iniziale la risalita del fluido è particolarmente rapida. In relazione a questa elevata velocità, il fluido possiede molta energia cinetica che provoca la risalita fino al valore di picco. A seguire, la curva decresce ed inizia a stabilizzarsi fino a che le forze in gioco non sono bilanciate.

Questo comportamento risulta più o meno marcato in base alla struttura, combinazione di densità e condizione di bagnabilità. Nel caso del PW si notano fluttuazioni evidenti e prolungate, in funzione dell'elevata accelerazione iniziale. Al contrario, nel BW e nel TW, la velocità di ingresso iniziale è inferiore e le fluttuazioni finali sono presenti, benché minime.

4.2.2 Valutazione della distribuzione superficiale del liquido

In accordo a quanto riportato al Capitolo 3.1.5, è stata svolta un'analisi in *paraview* che permette di valutare la porzione di superficie del tessuto bagnata, $f_{\text{tex,wet}}$, in corrispondenza del tempo $t_{\text{end}} = 0.0025$ s definito precedentemente.

I risultati sono riassunti in Tabella 4.2 e discussi a seguire.

Tabella 4.2: Valore della porzione della superficie superiore di tessuto bagnata ($f_{\text{tex,wet}}$) per le casistiche investigate a $t_{\text{end}} = 0.0025$ s

θ	Struttura	$f_{\text{tex,wet}}$
40°	BW-22-15-0.4-0.75	1.00
	BW-29.3-20-0.4-0.84	0.90
80°	BW-22-15-0.4-0.75	0.26
	BW-29.3-20-0.4-0.84	0.21
40°	PW-22-15-0.4-0.75	1.00
	PW-29.3-15-0.4-0.88	0.82
80°	PW-22-15-0.4-0.75	0.17
	PW-29.3-15-0.4-0.88	0.13
40°	TW-22-15-0.4-0.90	1.00
	TW-29.3-20-0.4-0.93	0.93
80°	TW-22-15-0.4-0.90	0.23
	TW-29.3-20-0.4-0.93	0.11

Osservando la tabella si può comprendere come fissata l'armatura, la frazione di superficie bagnata è maggiore all'aumentare del carattere idrofilo della superficie e

al diminuire della densità dei fili nella struttura, in accordo con la teoria e la tortuosità, rispettivamente.

Confrontando le armature, la tipologia di intreccio a cui è relazionata una maggiore superficie bagnata è il BW, indipendentemente dalla combinazione di densità e dal valore dell'angolo di contatto. Si osserva però che, fissata l'armatura e la densità dei fili, per $\theta = 40^\circ$ la seconda armatura in ordine di estensione dell'area bagnata è il TW, seguito dal PW, mentre per $\theta = 80^\circ$ si osservano in ordine, BW, PW e TW.

In generale, si può notare quindi che il fattore che influenza maggiormente la porzione superficiale bagnata è la condizione di bagnabilità della superficie, in relazione alla differente entità della forza capillare in gioco. Infatti, si osserva un'ampia differenza tra i valori di $f_{tex,wet}$ al variare dell'angolo di contatto θ , ma a parità degli altri fattori.

A parità di bagnabilità, l'armatura influisce in modo significativo sulle dinamiche di risalita capillare, ma mentre la velocità di risalita caratterizza l'invasione capillare interna, la diffusione superficiale del liquido rivela come il liquido si ridistribuisce attraverso la struttura.

La sola risalita capillare non è quindi sufficiente a descrivere le prestazioni delle varie strutture, poiché queste presentano una diffusione superficiale differente, come si può osservare dai risultati.

Infatti, è particolarmente importante, notare come il valore di $f_{tex,wet}$ (Tabella 4.2) e quello della frazione volumetrica α_{water} (Figura 4.5 e Figura 4.6), valutate al medesimo istante temporale ($t = 0.0025$ s), non forniscano le medesime informazioni sul sistema e sul processo in corso, benché siano relazionate tra loro.

Infatti, gli andamenti osservati precedentemente rispetto l'evoluzione della frazione volumetrica nella regione del tessuto, forniscono delle informazioni più globali, relative alla dinamica e alla velocità del trasporto del liquido nella struttura in funzione dei fattori studiati (densità dei fili, armatura e angolo di contatto).

Differentemente, i risultati ottenuti dall'analisi appena discussa permettono di ricavare maggiori informazioni, quantitative (e qualitative), rispetto la distribuzione superficiale del liquido.

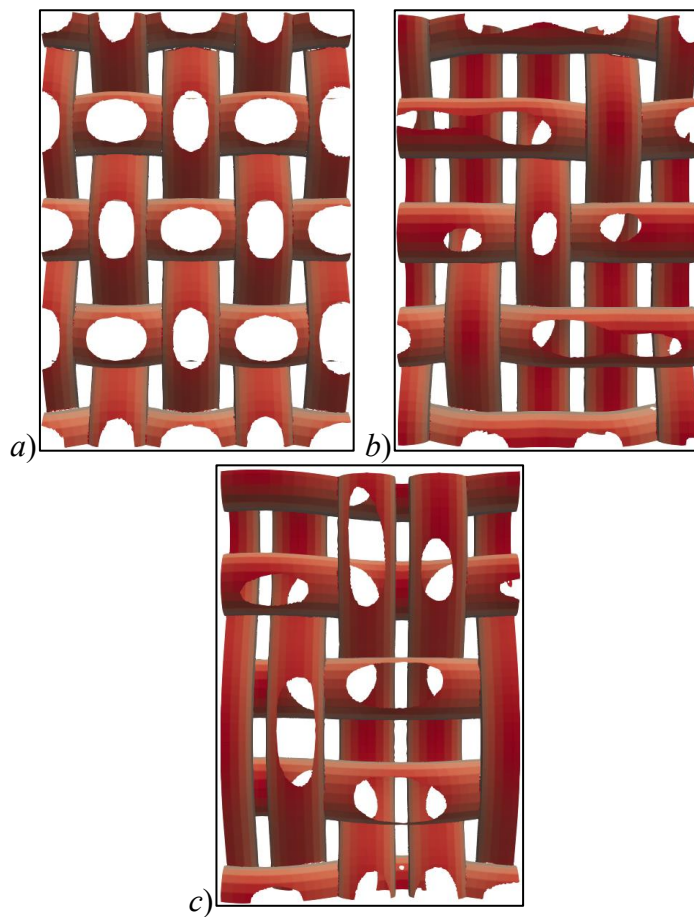
È dall'insieme di queste informazioni che si è in grado di avere un quadro più completo sul fenomeno.

Al fine di comprendere la modalità secondo la quale il liquido si distribuisce sulla superficie nelle diverse strutture si riportano, in Figura 4.8, alcuni dei risultati (in forma visiva) ricavati dall'analisi in paraview, corrispondenti al tempo $t = 0.0025$ s e relativi ai valori di $f_{tex,wet}$ appena discussi. Queste rappresentano, per l'appunto, la sola porzione di superficie superiore del tessuto a cui corrisponde una frazione volumetrica di acqua $\alpha_{water} \geq 0.5$, in accordo a quanto discusso nel Capitolo 3.1.5.

Da queste immagini si comprende sia l'effetto dell'angolo di contatto che dell'armatura.

Confrontando le prime tre immagini, relative a $\theta = 40^\circ$, si osserva proprio come in relazione all'armatura, il fluido sia distribuito superficialmente in modo differente. In particolare, la distribuzione risulta uniforme nel caso di armatura PW (*a*), mentre più dis-omogenea nel caso di BW e TW (*b*, *c*) nei quali si possono notare delle regioni del tessuto maggiormente bagnate dal liquido ed altre meno, in relazione al pattern definito dall'intreccio dei fili.

Questa differenza può essere osservata, ed apprezzata maggiormente, confrontando i casi *d*) ed *e*), relativi a $\theta = 80^\circ$. Infatti, nel caso *d*) ritroviamo il pattern regolare riconducibile al PW, mentre in *e*) si nota la maggiore distribuzione del liquido lungo la spina diagonale tipica dell'armatura TW.



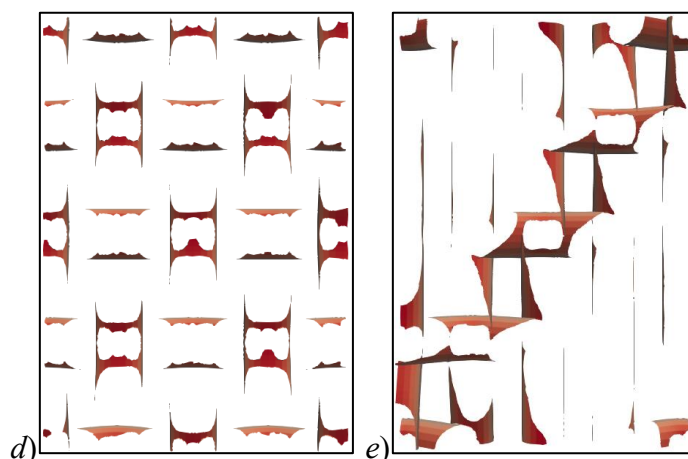


Figura 4.8: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi in paraview a $t = 0.0025$ s per strutture con $\theta = 40^\circ$ (a, b, c) e $\theta = 80^\circ$ (d, e):

a) PW-29.3-20-0.4-0.88, b) TW-29.3-20-0.4-0.93, c) BW-29.3-20-0.4-0.84,
d) PW-22-15-0.4-0.75 ed e) TW-22-15-0.4-0.90

La grande influenza delle caratteristiche di bagnabilità superficiale può essere osservata a seguito del confronto fra le immagini relative a $\theta = 40^\circ$ (a, b, c) e $\theta = 80^\circ$ (d, e). Si nota, per l'appunto, una notevole differenza rispetto l'estensione della regione di superficie bagnata.

4.2.3 Valutazione del Connectivity Index (CI)

Considerando ora i risultati ottenuti dall'analisi ad immagini condotta con ImageJ e, conseguentemente, il calcolo del Connectivity Index (CI) e del numero di clusters (N), questo è stato valutato in corrispondenza di tre istanti temporali distinti, per tutte le prove.

Più precisamente, $t = 0.0001$ s ovvero il primo time step salvato in OpenFOAM durante la simulazione, $t = 0.0011$ s momento in cui l'acqua indicativamente raggiunge la superficie superiore del tessuto ed infine $t = 0.0025$ s, nonché il tempo t_{end} definito nelle precedenti analisi come istante finale in corrispondenza del quale strutturare il confronto diretto tra le varie casistiche.

È importante specificare che, nel primo caso, l'analisi è stata svolta sulla superficie inferiore del tessuto, ovvero quella esposta in direzione z negativa. Diversamente, negli altri due istanti temporali, è stata considerata la superficie superiore del tessuto, esposta in direzione dell'asse z positivo.

I risultati sono riassunti in Tabella 4.3, Tabella 4.4 e Tabella 4.5, rispettivamente.

La scelta di svolgere questa analisi in corrispondenza di tre istanti temporali differenti permette di delineare un'analisi più completa, ricoprendo l'intero corso del fenomeno.

In Tabella 4.3, sono riportati i risultati relativi a $t = 0.0001$ s.

L'analisi al tempo iniziale è importante perché, rappresentando l'istante temporale in cui avviene il primo contatto tra la superficie inferiore del tessuto ed il liquido, permette di comprendere la modalità secondo la quale si verifica, che detta poi le condizioni per la successiva propagazione del liquido all'interno della struttura del tessuto nei successivi istanti temporali. Inoltre, i dati ottenuti da questa prima analisi ad immagini trovano riscontro con le dinamiche discusse in precedenza e relative alla Figura 4.5 ed alla Figura 4.6.

In Tabella 4.3 si può osservare come il numero di clusters individuati per ogni caso analizzato sia molto diversificato, non solo confrontando diverse combinazioni di densità dei fili, ma anche al variare dell'armatura stessa.

Tabella 4.3: Riassunto dei CI e del numero di clusters per il caso idrofilo ($\theta = 40^\circ$) ed il caso minormente idrofilo ($\theta = 80^\circ$) e per entrambe le combinazioni di densità, in corrispondenza del primo time step salvato ($t = 0.0001$ s)

θ	Struttura	CI	N clusters
40°	BW-22-15-0.4-0.75	0.17	10
	BW-29.3-20-0.4-0.84	0.25	5
80°	BW-22-15-0.4-0.75	0.19	10
	BW-29.3-20-0.4-0.84	0.25	5
40°	PW-22-15-0.4-0.75	0.07	25
	PW-29.3-15-0.4-0.88	0.08	25
80°	PW-22-15-0.4-0.75	0.07	25
	PW-29.3-15-0.4-0.88	0.10	22
40°	TW-22-15-0.4-0.90	0.19	8
	TW-29.3-20-0.4-0.93	0.15	10
80°	TW-22-15-0.4-0.90	0.19	8
	TW-29.3-20-0.4-0.93	0.16	10

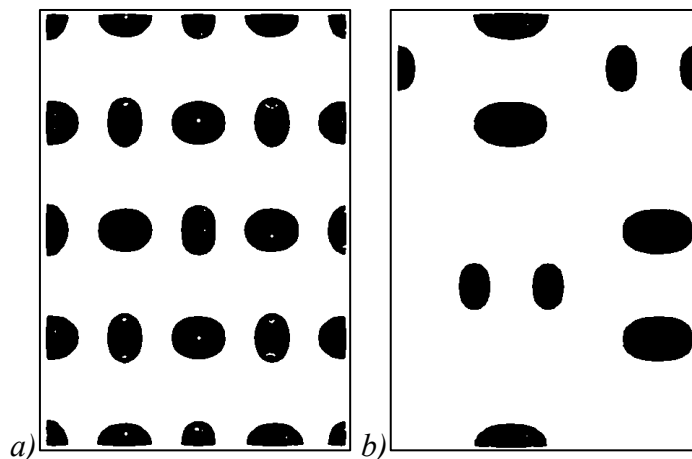
Si nota inoltre che, a pari tipologia di armatura e densità dei fili, i valori di CI e numero di clusters tra le due condizioni di bagnabilità risultano molto simili.

Il maggior numero di clusters e al contempo i minori valori di CI sono stati individuati per l'armatura PW. Confrontando le quattro casistiche relative a questa armatura si nota che tutte condividono valori pienamente analoghi.

Nonostante il numero di cluster sia elevato, il CI è piuttosto basso: questo è relazionato al fatto che la modalità di intreccio del PW è regolare ed omogenea in tutte le direzioni. Ne segue che i cluster sono tanti e ben distribuiti, nonché indicativamente di dimensioni confrontabili, come si può osservare in Figura 4.9 *a*). Questo è comprensibile anche in relazione alla definizione stessa di Connectivity Index (equazione 3.10).

In accordo a quanto detto, l'armatura PW favorisce un trasporto omogeneo del liquido attraverso tutti i pori interfilato e questa simultanea risalita nei pori permette di spiegare la dinamica di risalita iniziale caratterizzata da un'alta velocità di imbibizione osservata nei grafici precedentemente discussi (Figura 4.5 e Figura 4.6). La Figura 4.9 *a*) permette inoltre di apprezzare il pattern regolare di distribuzione dei clusters per un tessuto PW.

Per quanto riguarda il BW, si nota come la variazione di CI ed N è relazionata alla combinazione di densità dei filati. A densità maggiore si osservano meno clusters ed un CI maggiore, come anche visibile in Figura 4.9 *b*) e *c*), dove si riportano due casi per il BW a differenti densità e relative a $\theta = 40^\circ$. Si può notare infatti che nel caso *b*) (22-15 fili/cm) i cluster presentano tutti indicativamente la stessa dimensione, mentre in *c*) (29.3-20 fili/cm) sono presenti sia cluster di maggiore dimensione che altri più ridotti.



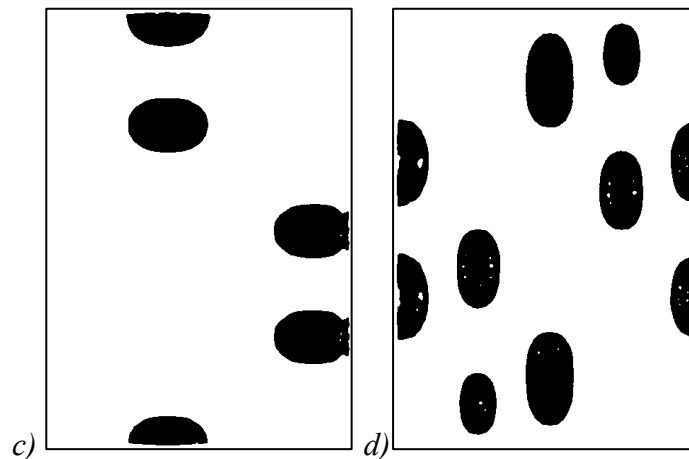


Figura 4.9: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi ad immagini a $t = 0.0001$ s per strutture con $\theta = 40^\circ$:

a) PW-22-15-0.4-0.75, b) BW-22-15-0.4-0.75,
c) BW-29.3-20-0.4-0.84 e d) TW-29.3-20-0.4-0.93

Infine, per quanto riguarda il TW, si ha una situazione simile al BW, ovvero che la variazione è relazionata alla combinazione di densità, anche se con trend opposto. Nonostante ciò, in generale, il numero di clusters individuati nelle quattro casistiche è pressoché il medesimo, così come i valori di CI. In Figura 4.9 d) si riporta, a titolo di esempio, l'immagine per un caso di TW.

In relazione a queste ultime due tipologie di armatura discusse, osservando le relative immagini in Figura 4.9 si nota come i clusters siano distribuiti solo in alcune regioni della struttura, secondo dei pattern specifici dettati dalla modalità di intreccio dei filati di ordito e trama.

Nelle armature BW e TW quindi l'innesco è localizzato e meno distribuito, che si traduce in una dinamica di risalita iniziale ritardata o eterogenea, coerentemente a quanto osservato nei grafici dell'evoluzione della frazione volumetrica. In queste strutture, infatti, il liquido viene trasportato preferenzialmente in un numero minore di pori interfilato.

Si comprende quindi come l'armatura abbia una forte influenza sulla distribuzione iniziale dei clusters nelle varie strutture, molto più degli altri fattori.

A seguire, in Tabella 4.4 sono riportati i risultati relativi al tempo $t = 0.0011$ s.

L'analisi in corrispondenza di questo tempo intermedio presenta dei risultati molto eterogenei. Osservando la Tabella 4.4 si può subito notare come, a parità di armatura e di combinazione di densità, al variare delle proprietà di bagnabilità superficiale i valori di CI ed il numero di clusters risultano molto differenti.

Nello specifico, per superfici minormente idrofile ($\theta = 80^\circ$) si osservano un elevato numero di clusters, in particolare nelle due casistiche del BW, a cui corrisponde però un CI ancora basso. Questo indica ancora una volta la presenza di clusters con dimensioni pressoché analoghe fra loro.

Considerando invece le casistiche relative ad una maggiore bagnabilità della superficie ($\theta = 40^\circ$), si osservano dei CI alti e un numero di clusters basso, soprattutto nel caso del PW, o per densità maggiori per i quali i valori di CI sono piuttosto elevati.

Ponendo maggiore attenzione al PW con $\theta = 40^\circ$, i dati indicano che il liquido, una volta risalito il tessuto in modo omogeneo attraverso tutti i pori interfilato, si è ricongiunto sulla superficie superiore, formando un unico cluster di maggiori dimensioni. Questo conferma la rapida dinamica di risalita, in accordo a quanto discusso al tempo $t = 0.0001$ s.

Tabella 4.4: Riassunto dei CI e del numero di clusters per il caso idrofilo ($\theta = 40^\circ$) ed il caso minormente idrofilo ($\theta = 80^\circ$) e per entrambe le combinazioni di densità, in corrispondenza dell'istante temporale in cui l'acqua inizia ad oltrepassare il tessuto ($t = 0.0011$ s)

θ	Struttura	CI	N clusters
40°	BW-22-15-0.4-0.75	0.69	12
	BW-29.3-20-0.4-0.84	0.74	9
80°	BW-22-15-0.4-0.75	0.13	50
	BW-29.3-20-0.4-0.84	0.14	29
40°	PW-22-15-0.4-0.75	1	1
	PW-29.3-15-0.4-0.88	1	1
80°	PW-22-15-0.4-0.75	0.12	15
	PW-29.3-15-0.4-0.88	0.26	4
40°	TW-22-15-0.4-0.90	0.45	15
	TW-29.3-20-0.4-0.93	0.88	3
80°	TW-22-15-0.4-0.90	0.10	31
	TW-29.3-20-0.4-0.93	0.15	31

Al contrario, a bassa bagnabilità ($\theta = 80^\circ$) si evidenzia proprio come, in assenza di una sufficiente spinta capillare, il trasporto risulta più lento a parità di intervallo temporale osservato. Il maggiore numero di clusters individuati è relazionato al fatto che il liquido sta risalendo da più punti, omogeneamente distribuiti sulla superficie. Il trasporto è quindi distribuito su più pori.

Estendendo l'analisi alle armature BW e TW, in condizioni di bassa bagnabilità, si osservano valori di CI bassi (compresi tra 0.10 e 0.15) a fronte di un numero di cluster che si mantiene elevato (raggiungendo 50 clusters per il BW a bassa densità). Questa frammentazione, comprensibile anche in Figura 4.10, è indice di un trasporto localizzato in canali preferenziali, nonché rallentato o con dinamica eterogenea, come anche discusso al tempo iniziale.

Considerando invece le condizioni di elevata bagnabilità, i valori di CI corrispondenti a BW e TW risultano maggiori (posizionandosi tra 0.45 e 0.88), mentre il numero di clusters si riduce a valori compresi tra 3 e 15. Nonostante in queste strutture il trasporto sia rallentato in relazione alla modalità di trasporto appena menzionata, si nota come a tale istante i vari clusters di liquido si siano ricongiunti sulla superficie superiore. Questo si può comprendere, a livello visivo, in Figura 4.10 *a*) e *b*) dove si osservano macchie di liquido di grande estensione e di forme irregolari, accompagnate da un numero minore di adiacenti macchie di dimensione ridotta.

Infine, è interessante notare l'impatto della densità dei fili. Sia per il BW che, in modo ancora più marcato, per il TW, all'aumentare della densità (passando da 22-15 a 29.3-20 fili/cm) si osserva un aumento del CI e una riduzione dei cluster (nel TW si scende da 15 a soli 3 cluster, sfiorando un CI di 0.88).

In Figura 4.10 si riportano alcune delle precedenti menzionate immagini ottenute dall'analisi a $t = 0.0011$ s: queste rappresentazioni permettono di comprendere quanto appena discusso, nonché apprezzare la diversa modalità di risalita in relazione alla geometria, nonché alle condizioni di bagnabilità.

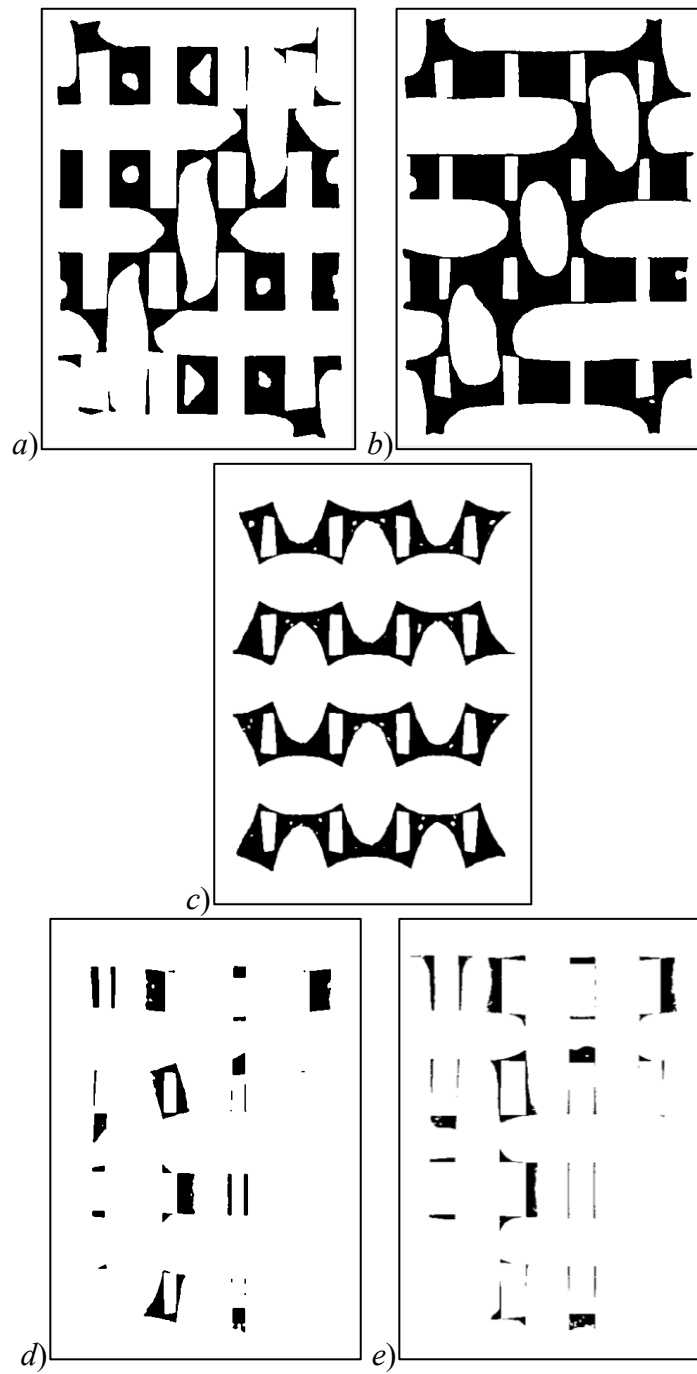


Figura 4.10: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi ad immagini a $t = 0.0011$ s per strutture con $\theta = 40^\circ$ (a, b) e $\theta = 80^\circ$ (c, d, e):

- a) TW-22-15-0.4-0.90, b) TW-29.3-20-0.4-0.93, c) PW-29.3-20-0.4-0.88,
 d) BW-29.3-20-0.4-0.84 ed e) BW-22-15-0.4-0.75

Considerando infine l'analisi ad immagini relativa all'ultimo istante temporale analizzato, $t = 0.0025$ s, i valori di CI e N ricavati sono riportati in Tabella 4.5, a seguire. Si ricorda che questo non rappresenta il tempo in corrispondenza del quale sono state interrotte le prove, ma è un istante temporale scelto arbitrariamente al fine di basare l'analisi sul medesimo livello temporale.

La valutazione a $t = 0.0025$ s permette di ottenere un'analisi ancora più completa, grazie alle maggiori informazioni raccolte a diversi istanti temporali.

Risulta inoltre utile relazionare i risultati raccolti in questa ultima fase con quelli ottenuti dallo studio sulla dinamica di risalita (Figura 4.5 e Figura 4.6), nonché quelli relativi all'analisi condotta su paraview, in corrispondenza del medesimo istante temporale, che ha permesso di raccogliere informazioni sulla distribuzione superficiale del fluido.

Osservando i risultati riportati in Tabella 4.5, salta subito all'attenzione che le strutture con carattere maggiormente idrofilo ($\theta = 40^\circ$) presentano tutte un valore di CI unitario e l'individuazione di un unico cluster, indipendentemente dalla struttura o dalla combinazione di densità.

Visivamente, questo viene mostrato nell'esempio in Figura 4.11 *a*), *b*) e *c*) dove si osserva un'unica macchia che si estende per la quasi totalità del tessuto, e che può corrispondere ad una condizione di parziale o completa bagnatura.

Per la precisione, l'immagine *a*) corrisponde ad una superficie completamente satura di liquido, mentre le immagini *b*) e *c*) ad una superficie bagnata all'82% e al 90%, come riportato in Tabella 4.2. Si può notare inoltre come, nelle condizioni di parziale saturazione è ancora possibile riconoscere la struttura in relazione alla forma del cluster stesso. In Figura 4.11 *b*) il cluster presenta una forma regolare riconducibile al PW, a differenza di quella osservata in *c*) riconducibile al BW.

Considerando invece le strutture con superficie minormente idrofila ($\theta = 80^\circ$), in Tabella 4.5 si osserva l'individuazione di un elevato numero di clusters ed un valore medio-basso del CI, indice della presenza di frammentazione del liquido nella struttura durante la risalita, come visibile negli esempi riportati in Figura 4.11 *d*), *e*) ed *f*). Queste immagini permettono di apprezzare notevolmente le diverse modalità di risalita del fluido, per l'appunto uniforme e distribuito nel caso del PW (*e*) e confinato in canali preferenziali nel caso del TW (*d*) e del BW (*f*).

In particolare, nel TW si osserva che la risalita del liquido avviene preferenzialmente in corrispondenza della spina diagonale, in corrispondenza dei punti in cui i fili di trama e di ordito si intrecciano. Similarmente, nel BW si osserva un trasporto che si verifica principalmente attraverso canali preferenziali.

Dalle rappresentazioni si osserva come i clusters di liquido lungo la spina diagonale del TW sono di dimensioni più grandi rispetto gli altri, numerosi, nell'intorno, mentre quelli del BW presentano sempre varie dimensioni, ma la loro distribuzione non segue un pattern ordinato.

Tabella 4.5: Riassunto dei CI e del numero di clusters per il caso idrofilo ($\theta = 40^\circ$) ed il caso minormente idrofilo ($\theta = 80^\circ$) e per entrambe le combinazioni di densità, in corrispondenza del tempo di interruzione $t_{\text{end}} = 0.0025$ s

θ	Struttura	CI	N clusters
40°	BW-22-15-0.4-0.75	1	1
	BW-29.3-20-0.4-0.84	1	1
80°	BW-22-15-0.4-0.75	0.28	32
	BW-29.3-20-0.4-0.84	0.18	31
40°	PW-22-15-0.4-0.75	1	1
	PW-29.3-15-0.4-0.88	1	1
80°	PW-22-15-0.4-0.75	0.15	51
	PW-29.3-15-0.4-0.88	0.04	65
40°	TW-22-15-0.4-0.90	1	1
	TW-29.3-20-0.4-0.93	1	1
80°	TW-22-15-0.4-0.90	0.21	32
	TW-29.3-20-0.4-0.93	0.10	31

Ciò che si può notare ulteriormente dalla Tabella 4.5 è che a bassa bagnabilità, fissata la struttura, il numero di clusters risulta circa analogo, mentre il valore di CI è maggiore nei casi di combinazione di densità minore, fatta eccezione per il PW per il quale le differenze sono maggiori. Per questa struttura, ancora una volta, il numero elevato di clusters in combinazione con un CI basso è indice della presenza di clusters omogeneamente distribuiti e di dimensioni confrontabili.

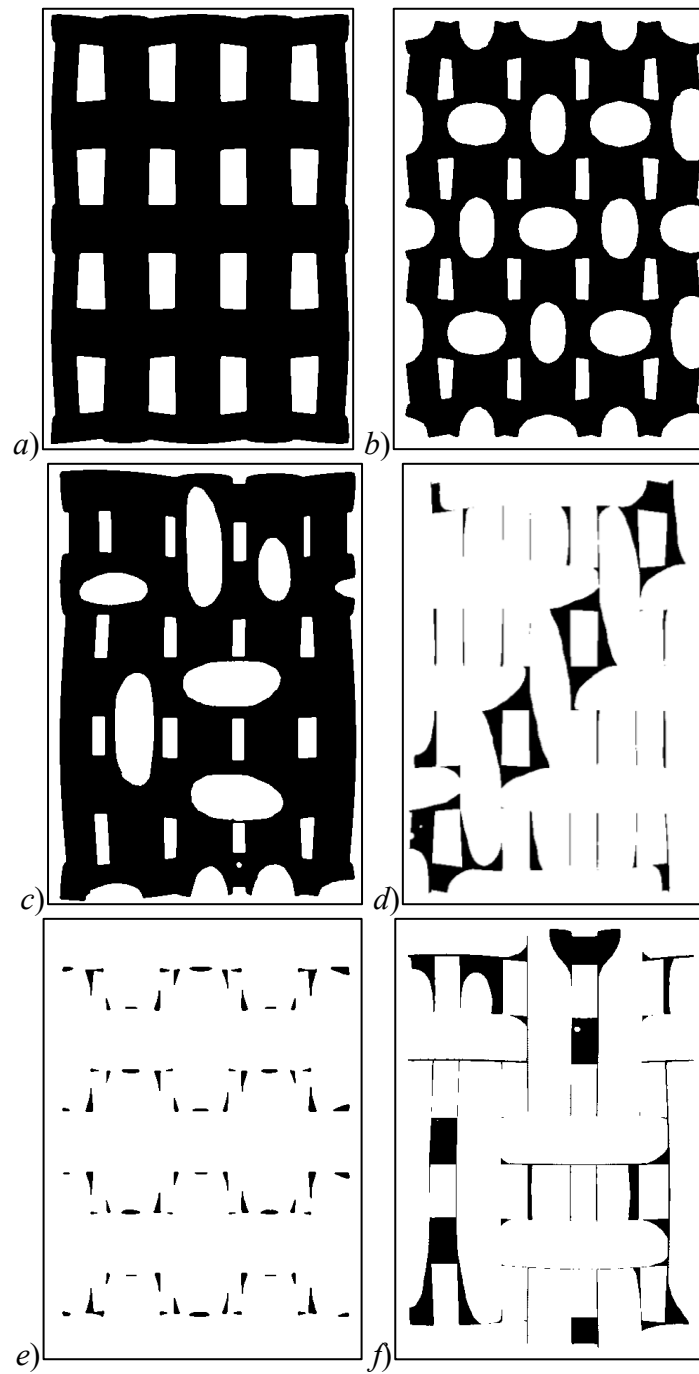


Figura 4.11: Esempi di rappresentazioni ottenute dall'analisi ad immagini a $t = 0.0025$ s per geometrie con $\theta = 40^\circ$ (a, b) e $\theta = 80^\circ$ (c, d, e):

a) PW-22-15-0.4-0.75, b) PW-29.3-20-0.4-0.88, c) BW-29.3-20-0.4-0.93, d) TW-22-15-0.4-0.90, e) PW-29.3-20-0.4-0.88 ed f) BW-22-15-0.4-0.75

Dall'analisi congiunta di queste modalità di elaborazione di dati si può definire che, isolando il fattore bagnabilità, si riesce a studiare il ruolo dell'architettura tessile. A parità di angolo di contatto, le differenze nel trasporto di acqua possono essere attribuite alla connettività dei pori, al diametro idraulico locale e alla tortuosità.

Infatti, anche a pari condizione di bagnabilità, il liquido segue percorsi completamente diversi a seconda dell'architettura del tessuto. La geometria determina la connettività dei pori interfilato, che a sua volta determina se il trasporto del fluido attraverso il tessuto avviene in modo uniforme (PW) o se attraverso canali preferenziali (BW, TW). Architetture diverse favoriscono meccanismi di trasporto diversi, piuttosto che prestazioni migliori, ed i percorsi capillari attraverso i quali il liquido viene trasportato corrispondono a spazi porosi connessi che consentono l'avanzamento continuo del liquido.

Infatti, il PW è caratterizzato da un intreccio regolare dei fili, ed in relazione a ciò offre un trasporto uniforme del fluido attraverso tutti i canali (pori interfilato) e una distribuzione superficiale omogenea. Questa modalità di trasporto garantisce velocità iniziali di imbibizione maggiori rispetto agli altri intrecci, grazie al trasporto distribuito del liquido nei numerosi canali.

Nel caso del BW, il trasporto del liquido è localizzato in aree specifiche della struttura e avviene attraverso dei canali preferenziali. Conseguentemente, la distribuzione risulta, nel complesso, rallentata.

Il TW, invece, è caratterizzato da una struttura diagonale in relazione alla modalità di intreccio dei fili e la scarsa connettività va ad accentuare maggiormente il fenomeno della canalizzazione (*channelling*), che comporta il trasporto del liquido preferenzialmente lungo questa spina centrale (flusso anisotropo) e si traduce in una dinamica di trasporto del fluido di tipo eterogenea.

Si osserva una chiara correlazione tra la velocità di risalita capillare e i risultati dell'analisi ad immagini con ImageJ: le strutture che favoriscono percorsi continui del liquido mostrano dinamiche di invasione più rapide.

La connettività, che per l'appunto è influenzata dalla struttura, influenza la velocità del fenomeno e, mentre la velocità di risalita caratterizza l'invasione capillare interna, la diffusione superficiale del liquido rivela l'efficienza con cui il liquido si ridistribuisce attraverso la struttura.

5 Conclusioni

L'obiettivo del presente lavoro di Tesi si è basato sullo sviluppo di un modello CFD, in ambiente OpenFOAM, volto alla descrizione e predizione del trasporto multifase attraverso tessuti, i cui fili sono stati modellati come impermeabili.

L'interesse è stato posto sul fenomeno della risalita capillare attraverso i pori interfilato, definiti dall'interlacciamento dei fili stessi, e sulla valutazione dell'influenza combinata della bagnabilità superficiale e delle caratteristiche geometriche del tessuto.

A tale scopo, il *workflow* è stato strutturato nel seguente modo:

- Grid independence al fine di rendere la soluzione numerica indipendente dal numero di celle in cui il dominio computazionale viene suddiviso, nonché una griglia di calcolo che rappresenti il miglior trade-off tra affidabilità dei risultati e costo computazionale. La velocità media in uscita è stata scelta come parametro di riferimento da monitorare;
- Definizione in OpenFOAM di un setup del caso studio che permettesse di descrivere un fenomeno di trasporto capillare, in assenza di gravità e di differenze di pressione imposte ai confini del dominio e considerando costante l'angolo di contatto alla superficie;
- Verifica preliminare del modello per valutare la bontà del solver multifase interFoam nella descrizione del fenomeno di trasporto capillare studiato. Questa fase si è basata sul confronto del risultato numerico (CFD) con una soluzione teorica disponibile in letteratura per un problema semplificato di risalita capillare in un condotto rettangolare con diametro idraulico rappresentativo del poro interfilato di uno dei tessuti studiati. Le simulazioni sono state svolte per due condizioni di bagnabilità (40° , superficie idrofila, e 80° , superficie minormente idrofila) e variando l'altezza iniziale della colonna di liquido nel condotto;
- Generazione delle geometrie. stl dei tessuti intrecciati di interesse in TexGen, variando tipologia di armatura, combinazione di densità dei fili di trama e ordito e proprietà di bagnabilità superficiale. Le armature

selezionate sono state il Plain Weave (PW), il Basket Weave (BW) e il Twill Weave (TW), con combinazioni di densità 22-15 fili/cm e 29.3-20 fili/cm. Il poisson ratio, ν , è stato mantenuto pari a 0.4 per tutte le strutture, mentre il valore del reduction factor, r_f , è stato definito in modo indipendente per ogni struttura in modo da far corrispondere lo spessore del tessuto generato con quello misurato in precedenti studi sperimentali sulla permeabilità all'aria;

- Campagna di simulazioni in OpenFOAM per lo studio del trasporto multifase estesa ai REV dei tessuti generati, per due condizioni di bagnabilità (40° e 80°);
- Elaborazione dei risultati ottenuti tramite la valutazione dell'evoluzione temporale della frazione volumetrica nella regione del tessuto e della porzione di superficie superiore del tessuto bagnata (in paraview) e tramite un'analisi ad immagini (in ImageJ).

La prima fase dell'analisi si è quindi basata sulla verifica del modello. I risultati numerici raccolti durante questa fase sono risultati in accordo con le leggi teoriche analizzate, permettendo di verificare la bontà predittiva del modello CFD nel descrivere il fenomeno della risalita capillare, specialmente in condizioni di bassa bagnabilità ($\theta = 80^\circ$).

A seguire, nella seconda fase, la campagna di simulazioni sui tessuti ha permesso in primo luogo di mappare quantitativamente l'evoluzione temporale della frazione volumetrica del liquido nel sistema. Questo ha consentito l'identificazione di due dinamiche: saturazione completa della superficie del tessuto con *breakthrough*, limitata alle strutture idrofile a bassa densità di fili, e saturazione parziale senza *breakthrough*, riscontrata per le restanti casistiche.

Questa mappatura della frazione volumetrica, ristretta poi alla sola regione del tessuto (fabricZone), ha permesso di comprendere le differenti dinamiche di risalita del liquido attraverso i pori interfilato osservate e quindi valutare l'influenza sinergica dell'armatura, delle proprietà superficiali e della combinazione di densità dei filati.

La valutazione della porzione bagnata di superficie superiore del tessuto, in paraview, ha permesso di fornire informazioni, qualitative e quantitative, sull'influenza di questi fattori sulla modalità di distribuzione superficiale del liquido.

Congiuntamente, la definizione del Connectivity Index (CI), tramite l'analisi ad immagini in ImageJ, ha completato il quadro fornendo informazioni aggiuntive riguardo la definizione del ruolo della geometria rispetto alla modalità di trasporto del liquido.

Nel complesso è stato possibile comprendere che, in sinergia con le proprietà di bagnabilità superficiale, anche fattori quali geometria e armatura ricoprono un ruolo chiave nel trasporto del liquido attraverso i tessuti.

Infatti, l'architettura del tessuto è determinante sia sulla risalita capillare che sulla distribuzione superficiale, e strutture diverse determinano regimi di trasporto distinti (distribuito o localizzato).

Inoltre, la velocità di risalita da sola non è sufficiente a descrivere il fenomeno, nel momento in cui sono la connettività e la diffusione superficiale a determinare le prestazioni;

I risultati ottenuti sono ampiamente utili e forniscono molte informazioni riguardo il fenomeno, nonché ne permettono una maggiore comprensione.

Va altresì considerato che il modello presenta delle limitazioni in relazione alle semplificazioni adottate. In particolare, avendo modellato i fili come impermeabili, è stata trascurata la microporosità dei filati stessi e quindi non è stato possibile investigare il trasporto e l'adsorbimento del liquido tra le fibre costituenti i filati.

Per quanto riguarda possibili sviluppi futuri, sarebbe quindi interessante sviluppare un approccio multiscala, incorporando la porosità a livello delle fibre per cogliere i meccanismi di adsorbimento anche nelle regioni intrafilato.

Un altro aspetto da sviluppare riguarda lo sviluppo di modelli surrogati per ottenere previsioni rapide sul comportamento capillare dei diversi tessuti, ed infine anche lo sviluppo di un modello che accoppi il trasferimento di calore e di materia al fine di caratterizzare in modo completo i tessuti.

Appendice A

Codice Python: generazione dei tessuti con TexGen

Si riporta il codice Python utilizzato su TexGen per la generazione dei tessuti.

Listing A.1: Script TexGen

```
import TexGen.Core as TG
from TexGen.Core import *
#import numpy as np
import os
import csv

# 1) Setting geometrical parameters
# NB @1 always refers to warp yarns and @2 refer to weft yarns

# Setting yarns density, expressed in [picks/cm]
D1_values = [22, 29.3]
D2_values = [15, 20]

#[cm]
d1 = 0.0263
d2 = 0.0282

# Parametri variabili
v_values = [0.4, 0.4] # Poisson's Ratio variabile
r_f_values = [0.75, 0.84, 0.88, 0.90, 0.93, 0.94, 0.96] #Reduction Factor variabile
weave_type = ["BW", "TW", "PW", "FR"]

# Directory di output per salvare i file generati
output_dir = "Textiles"
os.makedirs(output_dir, exist_ok=True) # Ensure the output directory exists
```

Funzione per generare e salvare la geometria

def generate_and_save_textile(v, r_f, D1, D2, weave):

 s1 = 1 / D1

 s2 = 1 / D2

 t1 = r_f * d1

 t2 = r_f * d2

 w1 = d1 + v * (d1 - t1)

 w2 = d2 + v * (d2 - t2)

Textile = TG.CTextile()

Creazione e definizione delle caratteristiche dei filati

Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]

if weave == "PW":

 Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, -s2, t1)))

 Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, 0)))

 Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, t1)))

 Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2 * s2, 0)))

 Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3 * s2, t1)))

 Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4 * s2, 0)))

 Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 5 * s2, t1)))

 Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, -s2, 0)))

 Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, t1)))

 Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, 0)))

 Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2 * s2, t1)))

 Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3 * s2, 0)))

 Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4 * s2, t1)))

 Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 5 * s2, 0)))

 Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, -s2, t1)))

 Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 0, 0)))

 Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, s2, t1)))

 Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 2 * s2, 0)))

 Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 3 * s2, t1)))

 Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 4 * s2, 0)))

 Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 5 * s2, t1)))

 Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, -s2, 0)))

 Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 0, t1)))

 Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, s2, 0)))

```
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 2 * s2, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 4 * s2, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 5 * s2, 0)))

Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, -s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 0, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 2 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 3 * s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 5 * s2, t1)))

for Yarn in Yarns:
    Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())
    Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w1,
t1)))
    Yarn.SetResolution(20)
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(7*s1, 0, 0))
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 7*s2, 0))
    Textile.AddYarn(Yarn)

Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 0, 0)))

Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, s2, t2)))

Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 2 * s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2 * s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2 * s2, 0)))
```

```
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 2 * s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 2 * s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 2 * s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 2 * s2, 0)))

Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 3 * s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3 * s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 3 * s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 3 * s2, t2)))

Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4 * s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 4 * s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 4 * s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 4 * s2, 0)))

for Yarn in Yarns:
    Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())
    Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w2,
t2)))
    Yarn.SetResolution(20)
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(6 * s1, 0, 0))
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 6 * s2, 0))
    Textile.AddYarn(Yarn)

if weave == "BW":
    Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]

    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, -s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, t1)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2 * s2, t1)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3 * s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4 * s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 5 * s2, t1)))

    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, -s2, 0)))
```

```
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, t1)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2 * s2, t1)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 5 * s2, t1)))

Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, -s2, t1)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 0, t1)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 2 * s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 3 * s2, t1)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 4 * s2, t1)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 5 * s2, 0)))

Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, -s2, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 0, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 2 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 3 * s2, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 4 * s2, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 5 * s2, 0)))

Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, -s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 0, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 2 * s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 5 * s2, t1)))

for Yarn in Yarns:
    Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())
    Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w1,
t1)))
    Yarn.SetResolution(20)
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(5 * s1, 0, 0))
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 5 * s2, 0))
    Textile.AddYarn(Yarn)

Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]
```

```
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 0, t2)))

Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, s2, 0)))

Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 2 * s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2 * s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2 * s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 2 * s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 2 * s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 2 * s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 2 * s2, 0)))

Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3 * s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3 * s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 3 * s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 3 * s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 3 * s2, t2)))

Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4 * s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4 * s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2 * s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3 * s1, 4 * s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4 * s1, 4 * s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5 * s1, 4 * s2, t2)))
```

for Yarn in Yarns:

 Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())

```
Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w2,
t2)))
Yarn.SetResolution(20)
Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(5 * s1, 0, 0))
Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 5 * s2, 0))
Textile.AddYarn(Yarn)

if weave == "FR":
    Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]

    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, -s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, t1)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, t1)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2 * s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3 * s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4 * s2, t1)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 5 * s2, t1)))

    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, -s2, t1)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, 0)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, 0)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2*s2, t1)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3*s2, t1)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4*s2, 0)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 5*s2, 0)))

    Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, -s2, 0)))
    Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 0, t1)))
    Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, s2, t1)))
    Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 2*s2, 0)))
    Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 3*s2, 0)))
    Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 4*s2, t1)))
    Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 5*s2, t1)))

    Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, -s2, t1)))
    Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 0, 0)))
    Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, s2, 0)))
    Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 2*s2, t1)))
    Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 3*s2, t1)))
    Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 4*s2, 0)))
    Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 5*s2, 0)))
```

```
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, -s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 0, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 2*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 3*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 4*s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 5*s2, t1)))

for Yarn in Yarns:
    Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())
    Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w1,
t1)))
    Yarn.SetResolution(20)
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(5 * s1, 0, 0))
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 5 * s2, 0))
    Textile.AddYarn(Yarn)

Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]

Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 0, t2)))

Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, s2, t2)))

Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 2*s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2*s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 2*s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 2*s2, 0)))
```

```
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 3*s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3*s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3*s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 3*s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 3*s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 3*s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 3*s2, 0)))

Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 4*s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4*s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 4*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 4*s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 4*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 4*s2, t2)))

for Yarn in Yarns:
    Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())
    Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w2,
t2)))
    Yarn.SetResolution(20)
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(5 * s1, 0, 0))
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 5 * s2, 0))
    Textile.AddYarn(Yarn)

if weave_type == "TW":
    Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]

    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, -s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, t1)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2*s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3*s2, 0)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4*s2, t1)))
    Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 5*s2, 0)))

    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, -s2, 0)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, 0)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, t1)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2*s2, 0)))
    Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3*s2, 0)))
```

```
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4*s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 5*s2, t1)))

Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, -s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 0, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 2*s2, t1)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 3*s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 4*s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 5*s2, 0)))

Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, -s2, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 0, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 2*s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 3*s2, t1)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 4*s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 5*s2, 0)))

Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, -s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 0, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 2*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 3*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 4*s2, t1)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 5*s2, 0)))

for Yarn in Yarns:
    Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())
    Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w1,
t1)))
    Yarn.SetResolution(20)
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(5 * s1, 0, 0))
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 5 * s2, 0))
    Textile.AddYarn(Yarn)

Yarns = [TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn(), TG.CYarn()]

Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 0, t2)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 0, t2)))
```

```
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 0, t2 )))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 0, 0)))
Yarns[0].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 0, t2)))

Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, s2, 0)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, s2, t2)))
Yarns[1].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, s2, 0)))

Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 2*s2, 0)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 2*s2, t2)))
Yarns[2].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 2*s2, t2)))

Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 3*s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 3*s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 3*s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 3*s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 3*s2, 0)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 3*s2, t2)))
Yarns[3].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 3*s2, t2)))

Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(-s1, 4*s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(0, 4*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(s1, 4*s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(2*s1, 4*s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(3*s1, 4*s2, t2)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(4*s1, 4*s2, 0)))
Yarns[4].AddNode(TG.CNode(TG.XYZ(5*s1, 4*s2, t2)))

for Yarn in Yarns:
    Yarn.AssignInterpolation(TG.CInterpolationCubic())
    Yarn.AssignSection(TG.CYarnSectionConstant(TG.CSectionEllipse(w2,
t2)))
    Yarn.SetResolution(20)
    Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(5 * s1, 0, 0))
```

```
Yarn.AddRepeat(TG.XYZ(0, 5 * s2, 0))
Textile.AddYarn(Yarn)

Textile.AssignDomain(TG.CDomainPlanes(TG.XYZ(0, 0, -1.5*t1),
TG.XYZ(4*s1, 4*s2, 1.5*t2)))
textile_name = f"{weave_type}-{D1}-{D2}-{v}-{r_f}"
TG.AddTextile(textile_name, Textile)

mesh = TG.CMesh()
TrimDomain = False
Textile.AddSurfaceToMesh(mesh, TrimDomain)
mesh.SaveToSTL(os.path.join(output_dir, textile_name + ".stl"))

csv_path = os.path.join(output_dir, "features.csv")
file_exists = os.path.isfile(csv_path)

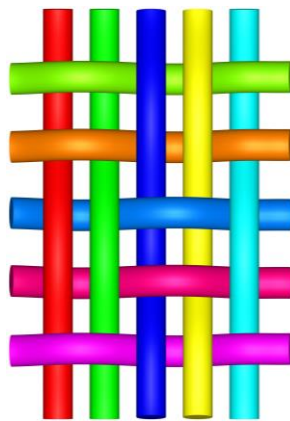
with open(csv_path, mode='a', newline='') as csv_file:
    writer = csv.writer(csv_file)
    if not file_exists:
        writer.writerow(['struct', 'D1', 'D2', 'v', 'rf'])
        writer.writerow([weave_type, D1, D2, v, r_f])

# Loop through all combinations of v and r_f to generate textiles
for weave_type in weave_type:
    for D1 in D1_values:
        for D2 in D2_values:
            for v in v_values:
                for r_f in r_f_values:
                    generate_and_save_textile(v, r_f, D1, D2, weave_type)
```

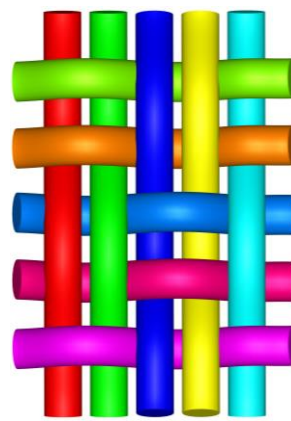
Appendice B

Geometrie dei tessuti generati con TexGen

B.1 BW



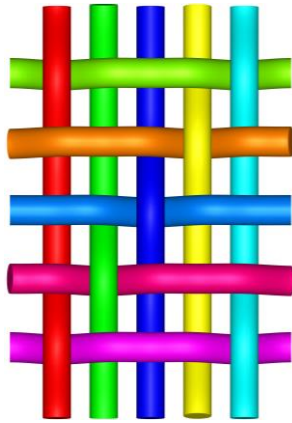
BW-22-15-0.4-0.75



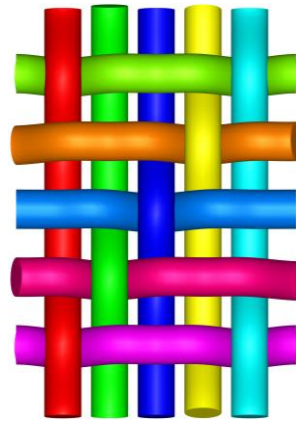
BW-29.3-20-0.4-0.84

Figura B. 1: Immagini dei tessuti BW con r_f ottimale per ciascuna combinazione di densità di fili

B.2 TW



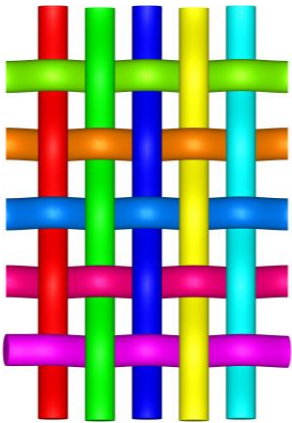
TW-22-15-0.4-0.90



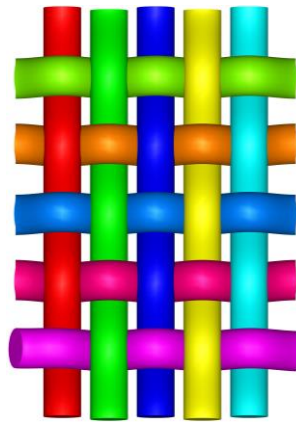
TW-29.3-20-0.4-0.93

Figura B. 2: Immagini dei tessuti TW con r_f ottimale per ciascuna combinazione di densità di fili

B.3 PW



PW-22-15-0.4-0.75



PW-29.3-20-0.4-0.88

Figura B. 3: Immagini dei tessuti PW con r_f ottimale per ciascuna combinazione di densità di fili

Bibliografia

- [1] M. Karahan, M. Ahrari, e N. Karahan, «Technical Textiles Market Research and Added Value Analysis: A Regio-Global Case Study», *RECENT - Rezult. Cercet. Noastre Teh.*, vol. 24, fasc. 3, pp. 162–180, 2023, doi: 10.31926/RECENT.2023.71.162.
- [2] É. Fontana, R. Donca, E. Mancusi, A. A. Ulson De Souza, e S. M. A. Guelli Ulson De Souza, «Mathematical modeling and numerical simulation of heat and moisture transfer in a porous textile medium», *J. Text. Inst.*, vol. 107, fasc. 5, pp. 672–682, mag. 2016, doi: 10.1080/00405000.2015.1061324.
- [3] E. Bianca, F. Dotti, A. Ferri, e G. Havenith, «Heat and mass transfer in footwear: Exploring the moisture evaporation and condensation cycle», *J. Ind. Text.*, vol. 55, p. 15280837251325783, mag. 2025, doi: 10.1177/15280837251325783.
- [4] M. P. Morrissey e R. M. Rossi, «Clothing systems for outdoor activities», *Text. Prog.*, vol. 45, fasc. 2–3, pp. 145–181, set. 2013, doi: 10.1080/00405167.2013.845540.
- [5] H. Kim, S. Michielsen, e E. DenHartog, «Wicking in textiles at rates comparable to human sweating», *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 622, p. 126726, ago. 2021, doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.126726.
- [6] B. Das, A. Das, V. K. Kothari, R. Fanguiero, e M. de Araújo, «Moisture transmission through textiles Part I: Processes involved in moisture transmission and the factors at play», *AUTEX Res. J.*, vol. 7, fasc. 2, pp. 100–110, 2007.
- [7] C. Duprat, «Moisture in Textiles», *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 54, fasc. Volume 54, 2022, pp. 443–467, gen. 2022, doi: 10.1146/annurev-fluid-030121-034728.
- [8] Y. E. El-Mogahzy, «8. Structure, characteristics and types of fiber for textile product design», in *Engineering textiles: integrating the design and manufacture of textile products*, in Woodhead publishing in textiles, no. 81. , Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2009.
- [9] Y. E. El-Mogahzy, «9. Structure and types of yarn for textile product design», in *Engineering textiles: integrating the design and manufacture of textile*

- products*, in Woodhead publishing in textiles, no. 81. , Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2009.
- [10] Y. E. El-Mogahzy, «10. Types of fabric for textile product design», in *Engineering textiles: integrating the design and manufacture of textile products*, in Woodhead publishing in textiles, no. 81. , Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2009.
- [11] Ž. Zupin, A. Hladnik, e K. Dimitrovski, «Prediction of one-layer woven fabrics air permeability using porosity parameters», *Text. Res. J.*, vol. 82, fasc. 2, pp. 117–128, gen. 2012, doi: 10.1177/0040517511424529.
- [12] *Textiles — Determination of thickness of textiles and textile products*, BS EN ISO 5084:1997, 1997.
- [13] «TexGen Main Page». [Online]. Disponibile su: https://texgen.sourceforge.io/index.php/Main_Page
- [14] «TexGen User Guide». [Online]. Disponibile su: https://texgen.sourceforge.io/index.php/User_Guide
- [15] L. P. Brown, «TexGen», in *Advanced Weaving Technology*, 2022, pp. 253–291. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91515-5_6.
- [16] «TexGen Scripting Guide».
- [17] M. Liprandi, E. Bianca, G. Boccardo, e A. Ferri, «Simulazioni CFD e Machine Learning sull’impatto della struttura dei tessuti sulla loro permeabilità all’aria», Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2025.
- [18] F. Moukalled, L. Mangani, e M. Darwish, «5. The Finite Volume Method», in *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*, vol. 113, in Fluid Mechanics and Its Applications, vol. 113. , Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-16874-6.
- [19] J. H. Ferziger, M. Perić, e R. L. Street, *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer Cham. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99693-6>.
- [20] F. Moukalled, L. Mangani, e M. Darwish, «12.4 The TVD Framework», in *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*, vol. 113, in Fluid Mechanics and Its Applications, vol. 113. , Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-16874-6.
- [21] H. Derijani, L. A. James, e R. D. Haynes, «Evaluation of a Numerical Solver (interFoam) to Predict Imbibition and Drainage in a Pore-Doublet System», in *The 35th International Symposium of the Society of Core Analysts*, 2021.
- [22] J. A. Heyns e O. F. Oxtoby, «Modelling surface tension dominated multiphase flow using the VOF approach».
- [23] C. Greenshields e H. Weller, «OpenFOAM Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles - 5.21 The PIMPLE algorithm». 2022. [Online]. Disponibile su: <https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/the-pimple-algorithm>

- [24] E. Syerko, C. Binetruy, S. Comas-Cardona, e A. Leygue, «A numerical approach to design dual-scale porosity composite reinforcements with enhanced permeability», *Mater. Des.*, vol. 131, pp. 307–322, ott. 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.06.035.
- [25] N. Fries e M. Dreyer, «The transition from inertial to viscous flow in capillary rise», *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 327, fasc. 1, pp. 125–128, nov. 2008, doi: 10.1016/j.jcis.2008.08.018.
- [26] D. Quéré, «Inertial capillarity», *Europhys. Lett. EPL*, vol. 39, fasc. 5, pp. 533–538, set. 1997, doi: 10.1209/epl/i1997-00389-2.
- [27] G. Kumar, D. Zhang, e G. Nagayama, «OpenFOAM-based Numerical Simulation on Capillary Flow in Closed Hierarchical Microchannels», *Proc. Int. Exch. Innov. Conf. Eng. Sci. IEICES*, vol. 9, pp. 343–348, ott. 2023, doi: 10.5109/7157999.
- [28] É. Ruiz-Gutiérrez *et al.*, «The long cross-over dynamics of capillary imbibition», *J. Fluid Mech.*, vol. 939, p. A39, mag. 2022, doi: 10.1017/jfm.2022.248.
- [29] C. Greenshields, «OpenFOAM v9 User Guide - 5.3 Mesh generation with the blockMesh utility». 2021. [Online]. Disponibile su: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9/blockmesh#x26-1850005.3>
- [30] C. Greenshields, «OpenFOAM v9 User Guide - 5.4 Mesh generation with the snappyHexMesh utility». 2021. [Online]. Disponibile su: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9/snappyhexmesh#x27-1970005.4>
- [31] C. Greenshields, «OpenFOAM v9 User Guide - 2.3.3 Setting initial field». 2021. [Online]. Disponibile su: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9/dambreak>
- [32] C. Greenshields, «OpenFOAM v9 User Guide - 3.6.4 Mesh manipulation». 2021. [Online]. Disponibile su: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9/standard-utilities>
- [33] C. Greenshields, «OpenFOAM v9 User Guide - 3.5.4 Multiphase flow». 2021. [Online]. Disponibile su: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9/standard-solvers>
- [34] C. Greenshields, «OpenFOAM v9 User Guide - 5.2 Boundaries». 2021. [Online]. Disponibile su: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9/boundaries#x25-1780005.2.1>
- [35] E. Bianca, «CFD and Machine Learning Approaches for Predicting Air Permeability in Technical Textiles», *Textiles*, vol. 6, fasc. 1, p. 9, gen. 2026, doi: 10.3390/textiles6010009.
- [36] «ImageJ Documentation». [Online]. Disponibile su: <https://imagej.net/ij/docs/index.html>

Ringraziamenti

Al termine di questo progetto di tesi, vorrei ringraziare i Professori Gianluca Boccardo e Daniele Marchisio e la Professoressa Ada Ferri per avermi proposto questo argomento, permettendomi non solo di mettermi alla prova con la CFD ma di avvicinarmi anche al mondo dei tessuti e dell'ingegneria del prodotto. Grazie per avermi accompagnata nello sviluppo di questo lavoro, che ho trovato estremamente stimolante ed arricchente. Un ringraziamento speciale va alla Dott.ssa Eleonora Bianca per avermi affiancato in questi mesi con preparazione, costanza e disponibilità. Grazie per avermi trasmesso il tuo interesse per l'ambito della ricerca. Il tuo approccio al lavoro e la tua dedizione sono stati per me un grande esempio e una guida preziosa.