



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

*Analisi del flusso bifase nell'elemento terqipavimento  
di una macchina lavasciuga pavimenti*

Relatore: Prof. Francesco Picano

Giulio Vandin 1236007

Anno Accademico 2019/2020





# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Principio di funzionamento di una macchina lavasciuga pavimenti . . . . .	1
1.2	Acqua residua e sistema <i>break washing</i> . . . . .	2
1.3	Misure sperimentali e studio computazionale . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Dinamica dei flussi bifase</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Tergipavimento di una macchina lavasciuga pavimenti</b>	<b>7</b>
3.1	Geometria del terqipavimento . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Apparato sperimentale</b>	<b>11</b>
4.1	Macchina sperimentale . . . . .	12
4.1.1	Telaio . . . . .	13
4.1.2	Gruppo trazione . . . . .	14
4.1.3	Gruppo serbatoi . . . . .	15
4.1.4	Distributore acqua . . . . .	16
4.1.5	Tergipavimento . . . . .	16
4.1.6	Aspiratore . . . . .	17
4.1.7	Impianto elettrico . . . . .	18
4.1.8	Supporto fotocamera . . . . .	20
4.2	Struttura . . . . .	23
4.2.1	Verifica delle lastre di vetro a rottura fragile . . . . .	23
4.2.2	Verifica statica della struttura di supporto . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Procedura sperimentale</b>	<b>29</b>
5.1	Montaggio della struttura . . . . .	29
5.2	Sistema di acquisizione . . . . .	32
5.3	Programma prove . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Risultati delle prove</b>	<b>34</b>
6.1	Dinamiche di flusso bifase nel terqipavimento . . . . .	34
6.1.1	Tergipavimento A.4 . . . . .	36
6.1.2	Tergipavimento B.4 . . . . .	38
6.1.3	Tergipavimento A.3 . . . . .	40
6.1.4	Tergipavimento B.3 . . . . .	43
6.1.5	Tergipavimento C.4 . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Simulazioni</b>	<b>47</b>
7.1	Meshing . . . . .	47
7.2	Modello del fluido . . . . .	48
7.3	Modello numerico . . . . .	48
7.4	Condizioni al contorno . . . . .	49
7.5	Inizializzazione e risoluzione del modello . . . . .	51

7.6	Elaborazione dei risultati . . . . .	52
7.6.1	Tergipavimento A.4 . . . . .	53
7.6.2	Tergipavimento B.4 . . . . .	55
7.6.3	Tergipavimento A.3 . . . . .	57
7.6.4	Tergipavimento B.3 . . . . .	60
7.6.5	Tergipavimento C.4 . . . . .	62
<b>8</b>	<b>Conclusioni e prospettive</b>	<b>64</b>
	<b>Appendici</b>	<b>67</b>
<b>A</b>	<b>Misura dei tempi di lavoro e di aspirazione</b>	<b>67</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>69</b>



# 1 Introduzione

Nel presente lavoro di tesi si vuole caratterizzare con simulazioni numeriche e misure sperimentali il flusso di aria e acqua all'interno dell'elemento tergipavimento di una macchina lavasciuga pavimenti, al fine di individuare strategie di miglioramento del design della macchina per aumentarne l'efficienza. Lo studio è composto da due parti: nella prima, si realizzerà un'apparecchiatura sperimentale per visualizzare la distribuzione dell'acqua nella parte del tergipavimento a contatto con la superficie da pulire; nella seconda, si realizzeranno delle simulazioni numeriche del flusso d'aria attraverso il tergipavimento. Dal confronto tra la distribuzione osservata dell'acqua attraverso il sistema di aspirazione e i campo di pressione e velocità simulati, si svilupperà un modello interpretativo della dinamica osservata per il flusso bifase acqua-aria, allo scopo di una futura ottimizzazione della geometria del tergipavimento.

Lo studio sperimentale è stato realizzato grazie al contributo della ditta *Adiatek S.r.l.* di S. Giovanni Lupatoto (VR), al fine di individuare strategie di ottimizzazione del sistema di aspirazione delle macchine lavasciuga pavimenti.

## 1.1 Principio di funzionamento di una macchina lavasciuga pavimenti

La funzione di una macchina lavasciuga pavimenti è quella di asportare dal pavimento particelle, tipicamente solide, che ne sporcano la superficie, tramite un lavaggio con una soluzione di acqua ed eventuali detergenti, seguito da un'asciugazione tramite un sistema di aspirazione che convoglia la miscela di acqua, detergente e sostanze sporcanti in un serbatoio di recupero. La funzione lavante viene espletata durante lo spostamento della macchina lungo il pavimento, tramite la distribuzione della soluzione detergente sul pavimento attraverso un sistema a gravità o con una pompa volumetrica: la soluzione cede così la sua energia chimica - ed eventualmente termica, nel caso si utilizzi una soluzione riscaldata - per rompere i legami adesivi tra le particelle sporcanti e il pavimento. Si opera quindi un'azione meccanica attraverso un sistema spazzolante rotativo o alternativo per rimuovere lo sporco dal pavimento. La miscela viene quindi raccolta da un elemento tergipavimento, costituito da una camera che mette in comunicazione il pavimento con il tubo di aspirazione, delimitata da un elemento rigido superiore in acciaio, chiusa posteriormente da una racla di gomma e completata da una seconda gomma anteriore, opportunamente forata nel bordo inferiore per permettere l'ingresso dell'acqua sporca. Infine, un tubo di aspirazione convoglia la miscela in un serbatoio di raccolta, in cui un aspiratore produce una depressione sufficiente affinché dopo il passaggio della macchina il pavimento risulti asciutto e pulito. Si riporta di seguito lo schema di una macchina lavasciuga pavimenti con operatore a terra con i principali elementi funzionali: a titolo di esempio consideriamo la macchina *Ruby 48 bh 3SD* prodotta da *Adiatek S.r.l.* (Fig. 1). Nelle realizzazioni pratiche, la quantità di energia impiegata per ogni operazione eseguita dalla macchina deve essere ridotta il più possibile; si cerca perciò continuamente di ottimizzare la combinazione delle azioni necessarie alla pulizia del pavimento per cercare di realizzare una macchina il più possibile economica, in termini di componenti impiegati e consumo energetico nell'unità di tempo durante l'esercizio.

1. GRUPPO BASAMENTO SPAZZOLA
2. SERBATOIO DETERGENTE
3. TAPPO SCARICO SERBATOIO RECUPERO
4. SERBATOIO RECUPERO
5. CRUSCOTTO
6. LEVE PRESENZA UOMO
7. TAPPO CARICO SOLUZIONE DETERGENTE
8. TUBO TERGIPAVIMENTO
9. CARICABATTERIE A BORDO
10. LEVA RUBINETTO

11. LEVA TERGIPAVIMENTO
12. COPERCHIO ASPIRAZIONE
13. SERBATOIO ACQUA
14. RUOTE
15. PEDALE COMANDO BASAMENTO
16. GRUPPO TERGIPAVIMENTO
17. RUOTE PIVOTTANTI
18. TUBO SCARICO ACQUA
19. TUBO SCARICO SERBATOIO SOLUZIONE

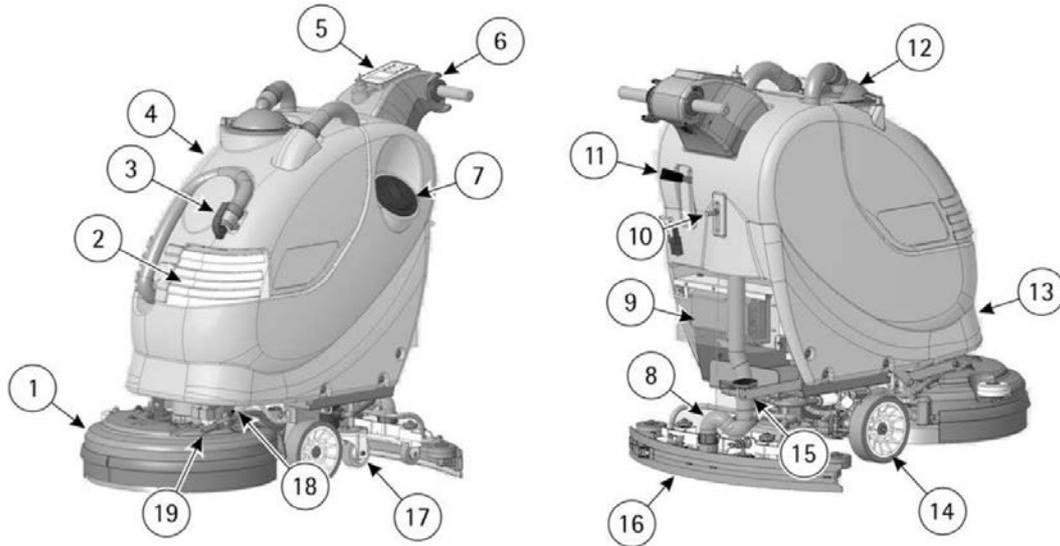


Figura 1: Schema della macchina *Ruby 48 bh 3SD*, per gentile concessione di *Adiatek S.r.l.*

Questo processo di ottimizzazione è particolarmente importante nella fase finale di asciugatura: se da un lato l'aspirazione risulta rapida ed efficace nel caso in cui sia impiegato un aspiratore di prevalenza molto grande, dall'altro si deve contenerne la potenza per ridurre la rumorosità, il peso sul costo finale della macchina, il consumo energetico (con conseguente riduzione dell'autonomia della macchina, nel caso sia alimentata a batteria), e la rigidità dei materiali impiegati per la realizzazione del serbatoio di raccolta, affinché questo possa resistere alla depressione prodotta al suo interno.

## 1.2 Acqua residua e sistema *break washing*

Al termine del ciclo di lavoro, il gruppo tergipavimento si solleva per consentire le manovre di posizionamento della macchina nella zona di rimessaggio. Se il tergipavimento si solleva subito dopo l'interruzione dell'erogazione della soluzione detergente e dell'azione abrasiva del basamento, la depressione presente nel tergipavimento crolla drasticamente, impedendo all'acqua ancora presente al suo interno di risalire verso il serbatoio di raccolta. Questo provoca il rilascio sul pavimento di una certa quantità d'acqua residua, che può essere anche molto consistente nel punto del pavimento in corrispondenza del quale si solleva il tergipavimento.

Per ridurre il volume di questo residuo, *Adiatek* ha brevettato il sistema *break washing*: dopo la fine delle operazioni di lavaggio, il tergilavaggio rimane a contatto con il pavimento per un certo intervallo di tempo durante il quale resta in funzione solo l'aspirazione.

Si osserva tuttavia che un volume di acqua nullo risulta solo impostando l'intervallo di tempo del *break washing* anche di molto superiore al minuto, e solamente su pavimenti con delle parti porose. Si tratta quindi di una soluzione poco praticabile nell'utilizzo quotidiano della macchina. Si considera dunque accettabile al momento un volume residuo non troppo grande alla fine del ciclo di lavoro.

Il presente lavoro di tesi si propone come uno studio del flusso nell'elemento tergilavaggio allo scopo di individuare la geometria che ottimizza il deflusso dell'acqua verso il serbatoio di recupero, riducendo la depressione richiesta all'aspiratore, il volume di acqua residua presente sul pavimento al termine del ciclo di *break washing*, e la durata di quest'ultimo.

### 1.3 Misure sperimentali e studio computazionale

Al fine di determinare qualitativamente il comportamento della miscela bifase acqua-aria nell'elemento tergilavaggio, è stata progettata una macchina lavapavimenti costituita solo dagli elementi legati alla distribuzione e aspirazione dell'acqua. Questa macchina è stata fatta procedere su una piattaforma di vetro trasparente, e sotto alla piattaforma un operatore ha registrato con una telecamera il comportamento dell'acqua, opportunamente illuminata per aumentarne la visibilità.

I risultati dell'indagine sperimentale sono stati quindi confrontati con una simulazione numerica per la sola componente gassosa. Allo stato attuale infatti, non è possibile realizzare una simulazione di un flusso bifase che riproduca realisticamente le dinamiche osservate, anche ricorrendo a DNS con un elevato numero di punti. Si è dunque ritenuto opportuno simulare solo il comportamento della fase aeriforme tramite il pacchetto *ANSYS Fluent* di simulazione fluidodinamica, anche in considerazione della ridotta portata d'acqua rispetto alla portata d'aria.

Dal raffronto tra i campi di pressione e di velocità ottenuti numericamente e la distribuzione dell'acqua osservata sperimentalmente, si è costruito quindi un modello interpretativo della dinamica del flusso bifase.

## 2 Dinamica dei flussi bifase

Le caratteristiche macroscopiche di un flusso bifase gas-liquido sono in generale fortemente influenzate dalla geometria del sistema, dalle proprietà dei fluidi e dalle loro portate [1]. Allo stato attuale, modelli quantitativi predittivi esistono solo nell'ipotesi di flussi in regime permanente e per geometrie non troppo complesse, come condotte chiuse con sezioni di forme semplici, e anche in questi casi le stime ottenute sono attendibili solo come ordini di grandezza, specie in corrispondenza di curve e cambi di sezione [2, 3].

Mantenendo la trattazione il più generale possibile, si definiscono alcune grandezze utili per caratterizzare lo stato fisico dei fluidi [1]. Si definisce il titolo  $x$  in un flusso bifase attraverso un volume di controllo  $V$  come il rapporto tra la portata di massa della fase gassosa e quella totale:

$$x = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}},$$

dove si è indicato con  $\dot{m}_G$  la portata di massa della fase gassosa,  $\dot{m}_L$  quella della fase liquida e  $\dot{m} = \dot{m}_G + \dot{m}_L$  la portata totale.

Si definisce poi la frazione di vuoto  $\varepsilon$  come il valore medio nel tempo della frazione del volume di controllo  $V$  occupato dalla fase gassosa:

$$\varepsilon = \frac{V_G}{V},$$

dove  $V_G$  è il volume medio occupato dalla fase aeriforme. Equivalentemente, il parametro  $\varepsilon$  può essere usato anche per esprimere la frazione di liquido tramite il volume medio  $V_L$  occupato dalla componente liquida:

$$1 - \varepsilon = \frac{V_L}{V}.$$

Per condotti di geometrie semplici, si identificano diversi regimi di flusso al variare delle portate. In particolare, si definiscono i regimi [4]:

- *a bolle*, tipico di basse frazioni di vuoto, caratterizzato da un flusso di bolle gassose di volume piccolo rispetto alle dimensioni del sistema, disperse in una fase liquida continua;
- *a sacche*, che presenta il passaggio alternato di volumi di gas e di liquido separate. Le tasche di gas sono tipicamente allungate nella direzione principale del flusso e di forma convessa;
- *stratificato*, osservabile in condotte orizzontali, presenta le due fasi separate da un pelo libero mediamente orizzontale;
- *intermittente*, dinamica tipica in caso di portate confrontabili di gas e liquido, descrive una situazione caotica, eventualmente pulsante, e con una disposizione imprevedibile delle fasi all'interno del sistema;

- *ondoso*, a seconda dell'orientamento del condotto può essere suddiviso in ondoso separato o ondoso anulare, in cui sono presenti oscillazioni di spessore della fase liquida aderente alla parete;
- “*falling film*”, caratterizzato da uno strato omogeneo di liquido sulle pareti del condotto, caratteristico del flusso verso il basso in pareti verticali;
- *anulare*, tipico di grandi frazioni di vuoto, presenta uno strato di liquido lungo le pareti e uno spray di piccolissime gocce nella parte centrale.

In Fig. 2 si presentano le *mappe di flusso* per alcuni semplici sistemi, date dalla suddivisione in regimi di flusso dell'area del piano avente come assi le portate di massa dei due fluidi.

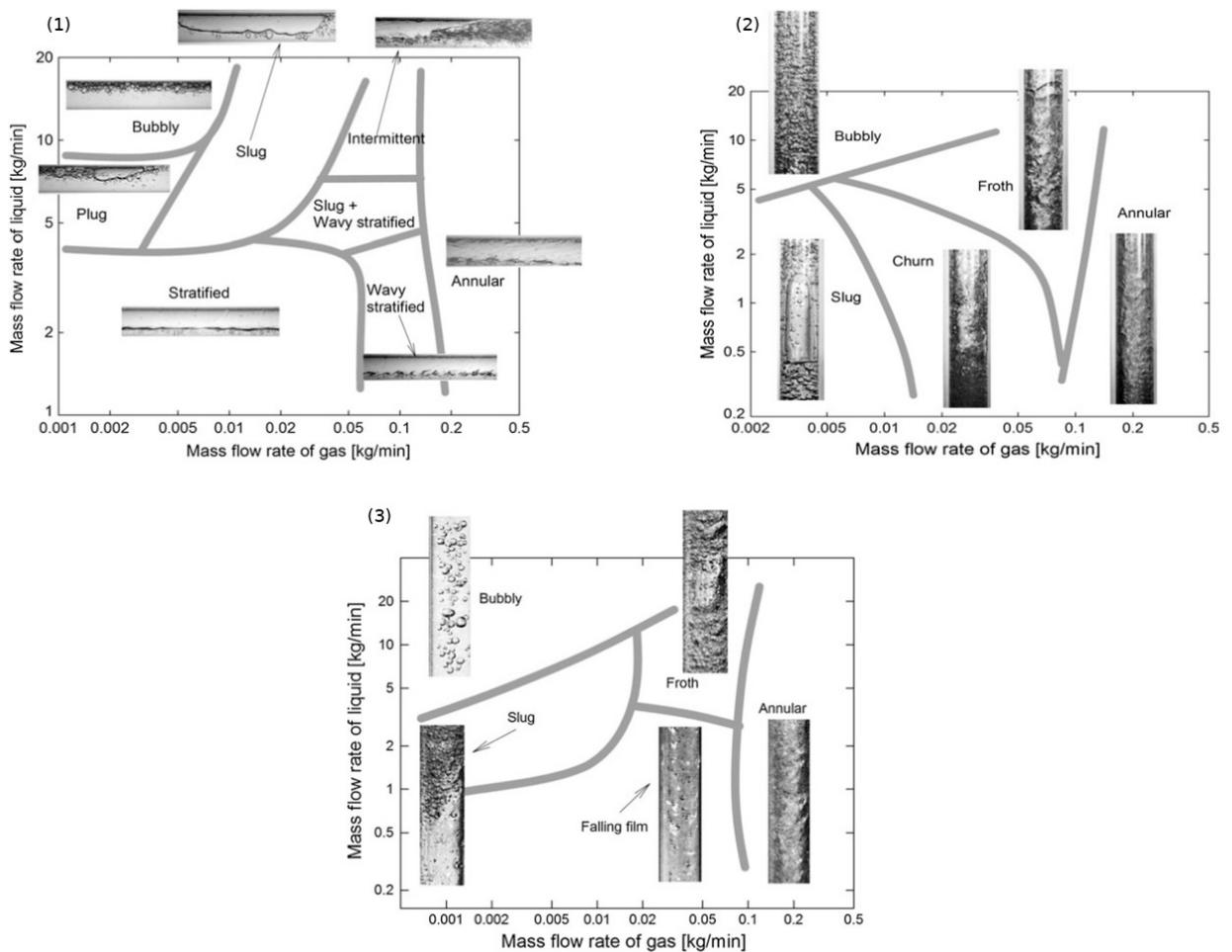


Figura 2: Regimi di flusso in funzione delle portate fluide per condotti cilindrici di sezione costante, rispettivamente (1) orizzontale, (2) verticale verso l'alto e (3) verticale verso il basso (fonte: [4]).

Per condotti chiusi di sezione costante, il regime di flusso può essere determinato a partire dalle mappe di flusso e dalla frazione di vuoto media [5, 6]. Una volta noto il regime di flusso, è possibile stimare le velocità locali e le perdite di carico in corrispondenza di cambiamenti di sezione e curve del condotto tramite una delle numerose correzioni presenti in letteratura ed utilizzate nella pratica tecnica [7, 8, 9, 10, 11].

In un precedente lavoro [12] si è stimato che la perdita di carico totale lungo il tubo di aspirazione che convoglia la miscela multifase dal tergilavaggio al serbatoio di recupero è dell'ordine di 0.4 kPa. Sulla stima incidono la scarsa precisione delle correlazioni numeriche utilizzate, le approssimazioni usate per stimare la scabrezza del condotto e la portata di aria in ingresso. Una misura eseguita sulla macchina scelta per i calcoli – la *Ruby 48 bh 3SD* di Fig. 1 – fornisce una misura di circa 1.0 kPa tra l'imbocco del tubo sul tergilavaggio e il serbatoio di recupero: in differenti condizioni di aspirazione (con e senza acqua a terra, su pavimento liscio o piastrellato con fughe) si osserva sempre la medesima misura. La differenza tra il valore ottenuto analiticamente e quello osservato è piuttosto grande. Se da un lato si può imputare questa discrepanza alle cause di errore già elencate, d'altro canto il gradiente di pressione all'interno del tergilavaggio potrebbe non consentire un decadimento sufficientemente veloce della pressione dalle aperture sulla gomma anteriore all'imbocco del tubo di aspirazione.

Nel caso del tergilavaggio di una macchina lavasciuga pavimenti, la presenza di diverse aperture lungo la parte in contatto col pavimento e la complessità della geometria rendono inapplicabili questi modelli, e la determinazione del regime di flusso deve essere quindi eseguita numericamente e sperimentalmente.

### 3 Tergipavimento di una macchina lavasciuga pavimenti

Il gruppo tergilavaggio di una macchina lavasciugapavimenti è composto da diversi elementi che concorrono alla funzione di convogliamento dell'acqua nel tubo di aspirazione della macchina. Il suo funzionamento viene svolto tramite la realizzazione di una camera di aspirazione a contatto con il pavimento, con delle aperture nella parte anteriore per lasciar entrare l'acqua sporca, e in comunicazione con il tubo di aspirazione.

Nello schema riportato in Figura 3, si distinguono in generale i seguenti componenti:

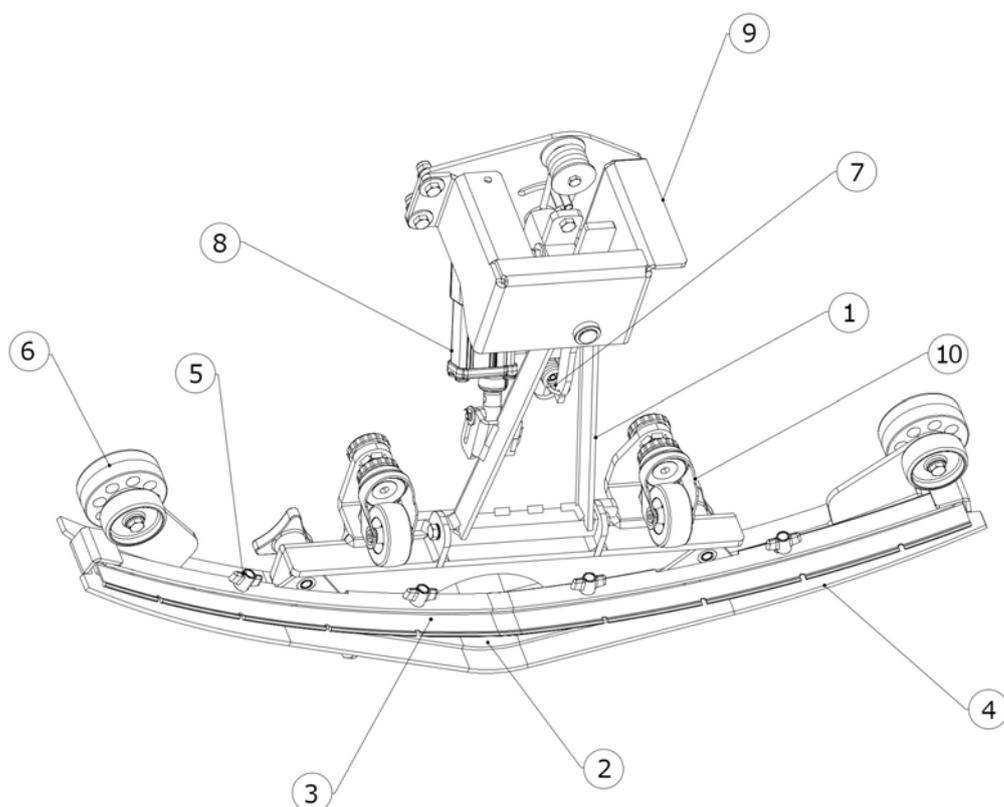


Figura 3: Schema dell'elemento tergilavaggio della macchina *Quartz*, per gentile concessione di *Adiatek S.r.l.*

- (1) *braccio del tergilavaggio* – questo elemento connette tramite due cerniere la parte rigida del tergilavaggio al telaio della macchina, e tramite una molla assicura che sia esercitata una pressione sufficiente sul pavimento in modo da assicurare l'aderenza necessaria per una corretta asciugatura;

- (2) *corpo del tergipavimento* – realizzato in lamiera saldata, è costituito da una parte superiore orizzontale, chiuse anteriormente e posteriormente da due lamiere curve, costituisce la parte rigida del tergipavimento, e forma la parte superiore della camera di aspirazione, nonché l'imbocco cilindrico del tubo di aspirazione;
- (3) *gomma anteriore* – è una racla di materiale elastomerico che chiude la parte anteriore della camera di aspirazione, opportunamente dotata di fori praticati nel bordo inferiore per consentire l'ingresso della miscela di acqua e particelle sporcanti;
- (4) *gomma posteriore* – analoga alla gomma anteriore, non è dotata di fori nella parte a contatto col pavimento, poiché la sua funzione è solo di chiudere posteriormente la camera di aspirazione e realizzare un contatto il più possibile ermetico con la gomma anteriore in corrispondenza delle estremità laterali;
- (5) *elementi di fissaggio delle parti in gomma* – costituiti da piastre premigomma e volantini avvitati su fori passanti attraverso la gomma, servono per fissare le gomme alla parte rigida il più saldamente possibile, consentendo allo stesso tempo la sostituzione delle gomme quando si rendesse necessario;
- (6) *ruote paracolpi* – servono per attutire gli urti che possono risultare dal passaggio in spazi stretti o in prossimità di pareti;
- (7) *molla del tergipavimento* – permette di spingere il tergipavimento verso il basso con una pressione opportuna;
- (8) *attuatore* – è un attuatore idraulico che permette di sollevare il tergipavimento al termine dell'utilizzo della macchina;
- (9) *aggancio tergipavimento* – è la parte che si fissa al telaio della macchina tramite collegamenti bullonati.
- (10) *ruote tergipavimento* – appoggiano a terra, con altezza regolabile, consentendo così la regolazione della pressione del tergipavimento sui due lati rispetto al punto di ancoraggio centrale.

### 3.1 Geometria del tergipavimento

Osservando lo schema riportato nella sezione precedente, si nota che esistono due principali gruppi di aperture che mettono in comunicazione fluida la camera di aspirazione con l'esterno: il primo è costituito dalle aperture a livello del pavimento nella gomma anteriore, e non è eliminabile, pena la compromissione totale della funzione di asciugatura; il secondo consiste delle due aperture laterali esistenti tra la piastra superiore orizzontale del tergipavimento e le due gomme anteriore e posteriore. Queste ultime aperture non svolgono in linea di principio una funzione fluidodinamica ai fini dell'aspirazione: quanto più sono pervie, tanto più avvicinano la depressione all'interno della camera di aspirazione a quella esterna. In fase di progettazione, queste aperture laterali sono dimensionate in modo da avere l'area minima possibile nella

configurazione con le gomme piegate, assunta dal tergipavimento quando questo è premuto contro il pavimento.

Attualmente, esistono due tipi principali di tergipavimento per macchine lavapavimenti: il primo è quello riportato nella Fig. 3, con una lamiera orizzontale superiore delimitata da lamiere curve verticali; il secondo, di più recente sviluppo, è un modello a camera bassa, sempre realizzato in lamiera saldata, ma con la camera di aspirazione delimitata anteriormente e posteriormente dalle sole gomme: l'unica parte rigida della camera di aspirazione è dunque una lamiera orizzontale. Per consentire il collegamento delle gomme, è tuttavia comunque necessario che al di sopra di questa lamiera siano presenti delle facce verticali.

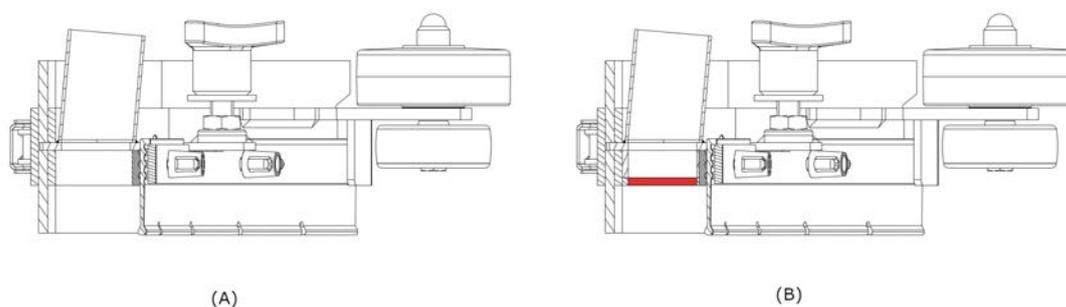


Figura 4: Confronto tra la sezione lungo il piano mediano del tergipavimento alto tradizionale (A) e il tergipavimento basso di più recente sviluppo (B). La lamiera inferiore, evidenziata in rosso nella figura (B), permette di ridurre l'altezza della camera di aspirazione.

Si ritiene che questo modello permetta consenta un'asciugatura più efficace, da osservazioni qualitative precedentemente eseguite. Non è possibile ridurre eccessivamente la distanza tra il soffitto della camera di aspirazione e il pavimento, perché ciò significherebbe ridurre la lunghezza della parte libera delle gomme: questo da un lato impedirebbe alle gomme di piegarsi; dall'altro renderebbe necessario cambiare gomme più spesso, poiché l'uso continuato porta in ogni caso ad una loro erosione, e un'estensione minore equivarrebbe a una vita utile minore.

Una terza alternativa è costituita da un tergipavimento con geometria curvilinea per quanto riguarda la parete posteriore: come mostrato in Figura 5, si tratta di un tergipavimento di maggiore semplicità costruttiva, poiché le pareti della camera di aspirazione consistono di una parte piegata e una posteriore calandrata, ma con raggio di curvatura costante. Proprio per quest'ultima proprietà geometrica, la pressione esercitata sulla gomma posteriore risulta costante lungo tutta la lunghezza del tergipavimento, diversamente dai due già mostrati. Ciò rende più facile il montaggio, che richiede meno regolazioni dopo il montaggio, consentendo un'asciugatura più omogenea. La camera di aspirazione di questa variante curva ha la stessa altezza del tergipavimento a camera alta già descritto.

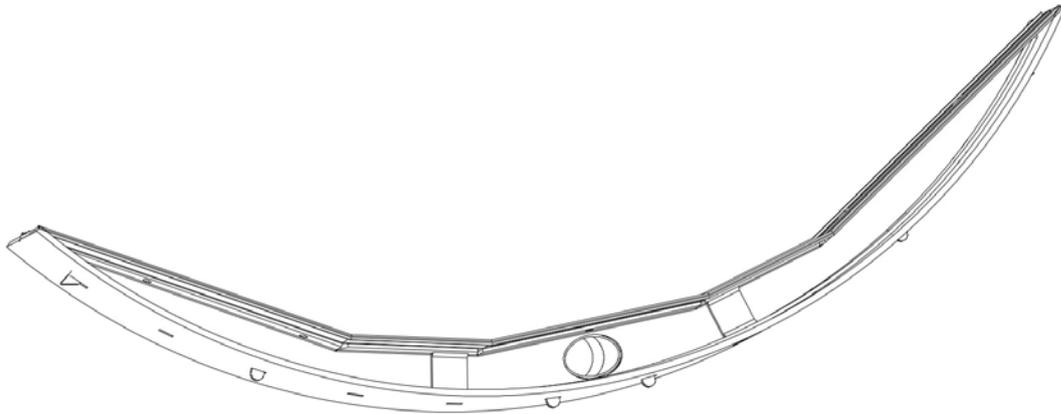


Figura 5: Tergipavimento curvo. Il foro di comunicazione con il tubo di aspirazione è di forma ellittica; l'elemento di raccordo è a sezione variabile, lavorato in modo da terminare con una parte cilindrica per il corretto collegamento del tubo di aspirazione.

Si osserva tuttavia che questa ultima variante della geometria del tergilavaggio presenta dei problemi di asciugatura in corrispondenza di fughe delle piastrelle quando le linee delle fughe sono perpendicolari alla direzione di avanzamento della macchina lavasciuga pavimenti. Ciò è dovuto al fatto che l'ampio raggio di curvatura fa sì che la porzione più arretrata della gomma posteriore sia parallela al bordo della piastrella, provocando una sorta di rimbalzo della gomma che permette la fuoriuscita di una certa quantità di acqua, seppur modesta, visibilmente più consistente di quanto avviene per i tergilavaggio con la geometria a raggio di curvatura variabile già descritti.

## 4 Apparato sperimentale

Si è pianificato un esperimento con lo scopo di filmare da sotto alla pista trasparente il flusso di acqua all'interno del tergipavimento, tramite una telecamera fissata su un sostegno a C solidale alla macchina. Le prove verranno eseguite per diversi regimi di funzionamento, testando le operazioni di asciugatura con la macchina in moto e la funzionalità del ciclo *break washing*. Si andranno a caratterizzare i regimi di deflusso all'interno del tergipavimento dalla loro osservazione qualitativa, e si confronteranno le osservazioni con le simulazioni numeriche corrispondenti, per ogni geometria e per ogni insieme di condizioni al contorno.

Per l'osservazione empirica del flusso bifase all'interno dell'elemento tergipavimento, è stato realizzato un apparato sperimentale costituito da:

- una macchina costruita ad hoc comprendente un telaio adattato da una macchina esistente, il gruppo aspirazione, incluso un tergipavimento, i serbatoi, e un impianto elettrico per controllare le funzioni della macchina;
- una struttura composta di cavalletti di acciaio su cui poggia una pista di lastre di vetro sopra le quali la macchina viene movimentata.

Quando possibile, sono stati utilizzati componenti reperibili nel magazzino di *Adiatek S.r.l.*; le parti in lamiera progettate ad hoc e le versioni modificate dei tergipavimento sono state commissionate alla ditta *F.G.M. Inox S.r.l.* di Brendola (VI). I componenti e gli assiemi sono stati disegnati e messi in tavola tramite il pacchetto *Parametric* di *Creo PTC*.

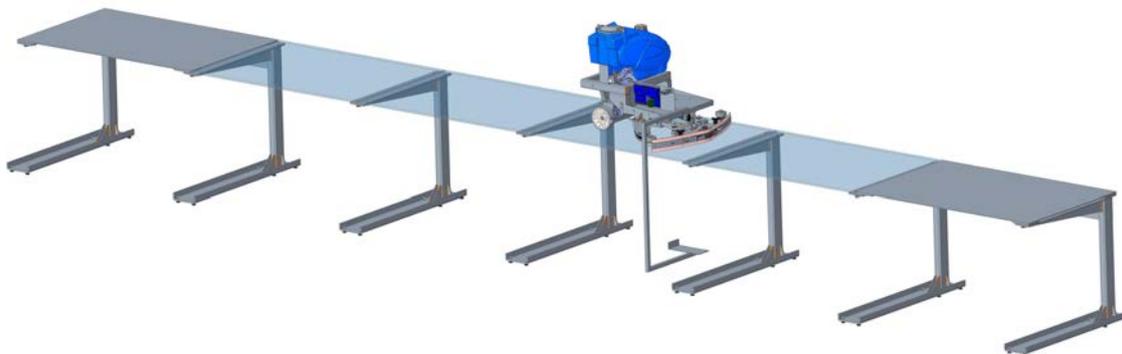


Figura 6: Rendering della macchina posizionata sopra alla pista trasparente con le strutture di sostegno.

## 4.1 Macchina sperimentale

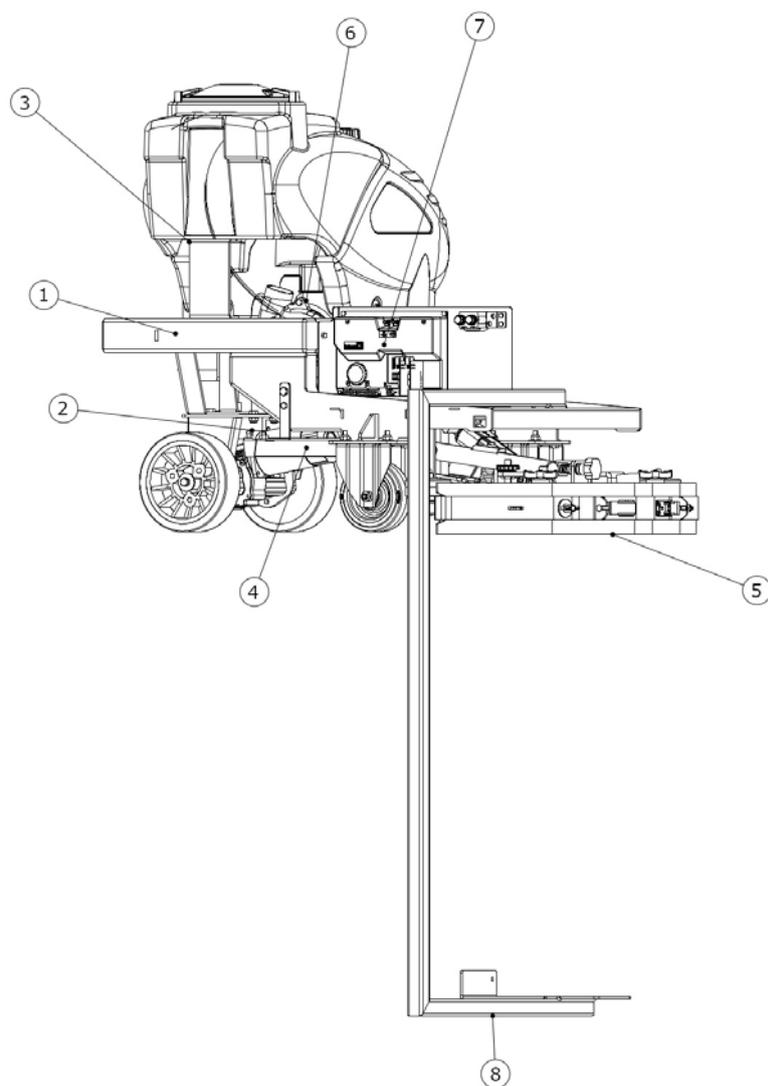


Figura 7: Macchina realizzata per le prove: (1) telaio, (2) gruppo trazione, (3) serbatoi, (4) distributore acqua, (5) gruppo tergipavimento, (6) aspiratore, (7) scheda elettronica funzioni (8) supporto fotocamera.

La macchina è stata realizzata adattando alcuni componenti di macchine esistenti e disegnandone alcuni ad hoc dove richiesto. Con riferimento allo schema riportato in Fig. 7, si individuano i seguenti gruppi funzionali descritti nei seguenti paragrafi. La macchina è alimentata da una batteria al litio da 24 V, con capacità di 110 Ah, del peso di 8 kg.

#### 4.1.1 Telaio

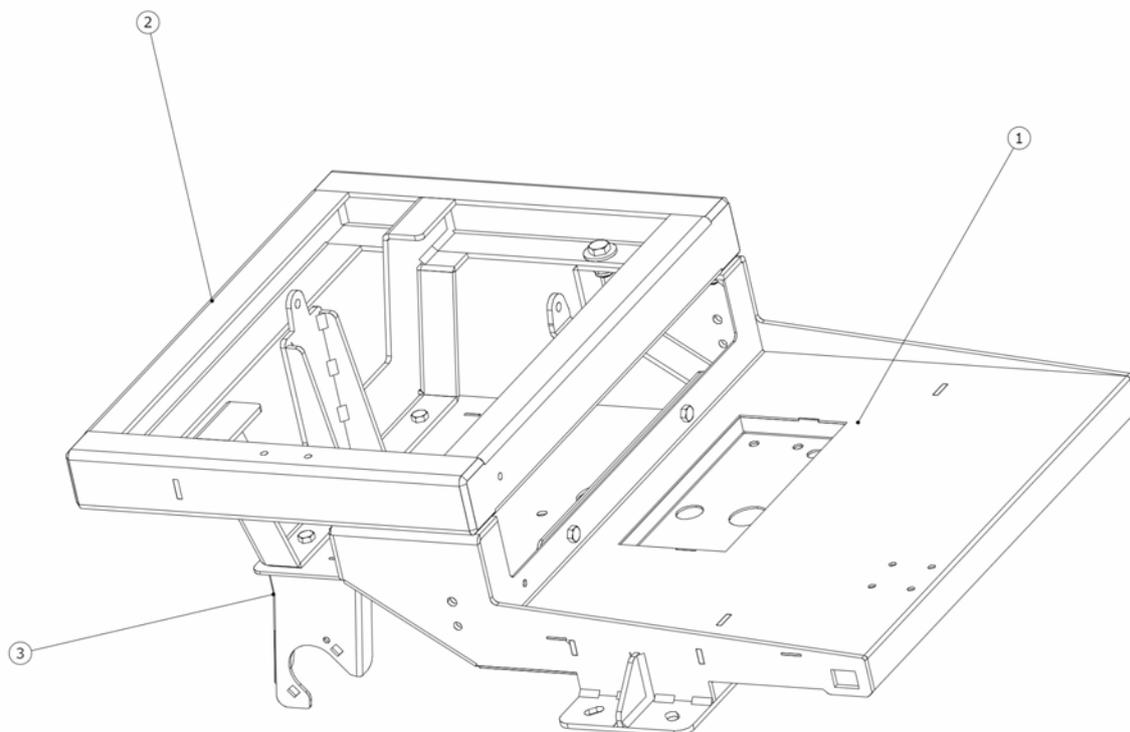


Figura 8: Telaio della macchina per le prove:(1) telaio pedana, (2) telaio serbatoio, (3) telaio trazione.

Il telaio, realizzato in lamiera saldata zincata, è composto da tre parti principali, connesse a due a due da collegamenti bullonati. Con riferimento alla Fig. 8, si individuano, nello specifico,

- (1) telaio pedana – adattato dalla pedana di una macchina esistente, comprende una zona centrale di collegamento con il gruppo tergipavimento, due piastre laterali per il fissaggio delle ruote posteriori, dei fori per il fissaggio del supporto della fotocamera e gli attacchi per il distributore dell'acqua sui lati;
- (2) telaio serbatoio – costituito da una cornice su cui sono saldati dei supporti per il fissaggio dei serbatoi, con dei fori per il collegamento con le altre parti del telaio e della staffa di supporto del serbatoio di recupero;
- (3) telaio trazione – consiste di una piastra collegata alle altre due parti del telaio, saldata ai supporti per il gruppo trazione, e con dei fori su cui va imbullonata la staffa di sostegno dell'aspiratore.

#### 4.1.2 Gruppo trazione

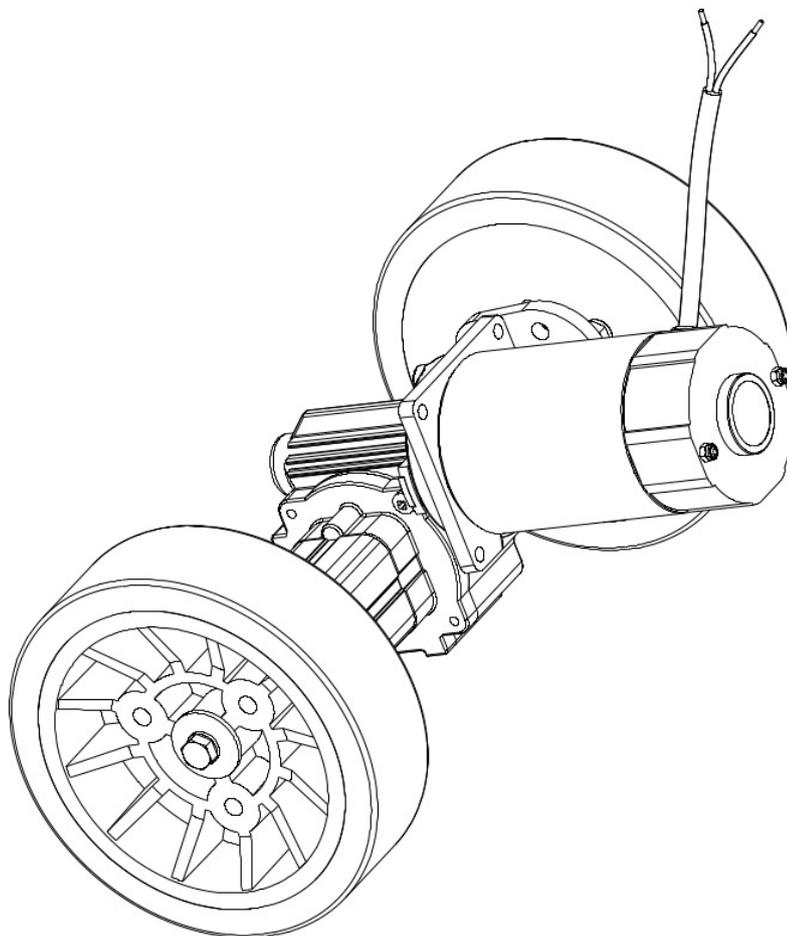


Figura 9: Motoriduttore e ruote.

Vista la massa complessiva della macchina, si è ritenuto necessario prevedere un sistema di trazione per evitare di doverla trainare esternamente tramite corde o catene. Il componente principale del gruppo trazione è un motoriduttore prodotto da *Amer S.p.a.* di Valdagno (VI) con tensione in ingresso di 24 V in corrente continua e potenza nominale di 120 W. Il collegamento con la scheda funzioni permette di impostare una velocità di avanzamento, che influisce sulle condizioni di aspirazione, e di invertire la direzione del moto per riportare la macchina al punto di partenza dopo aver percorso tutta la pista trasparente. Al motoriduttore sono fissate delle ruote di diametro 175 mm, con battistrada scanalato per una migliore aderenza alla superficie di vetro; altre due ruote libere di diametro 125 mm, fornite da *GN ruote s.r.l.* (Paderno Dugnano, MI), sono fissate alla parte posteriore del telaio pedana, a completamento di questo gruppo funzionale (non rappresentate in Fig. 9).

### 4.1.3 Gruppo serbatoi

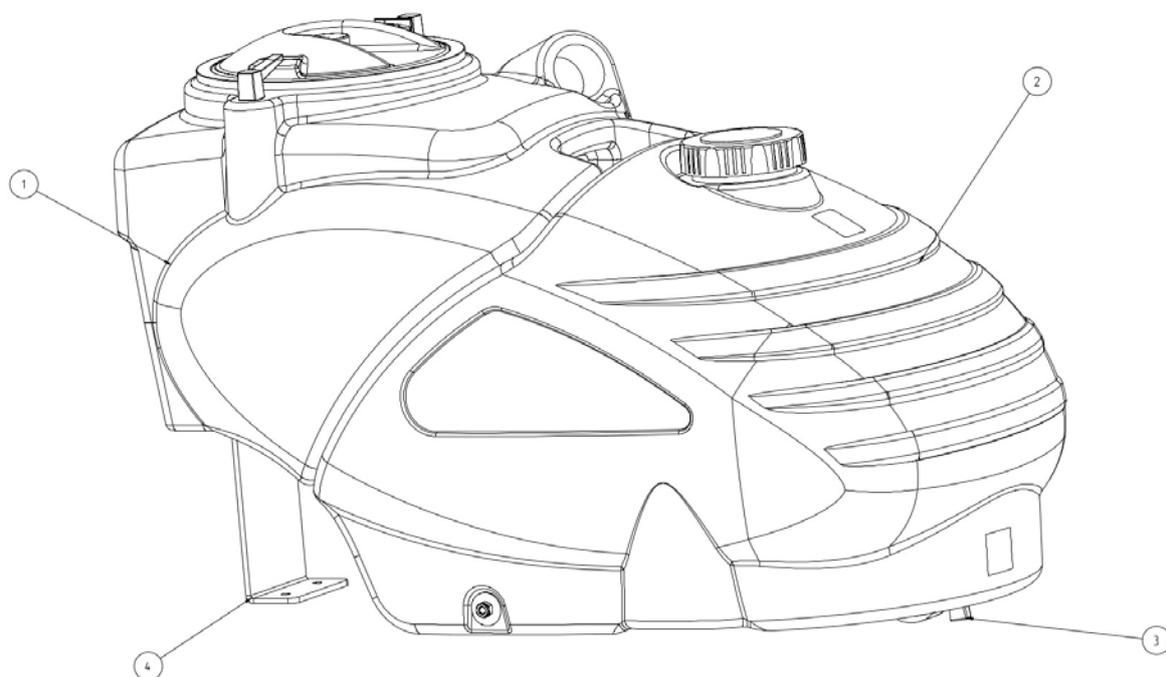


Figura 10: Gruppo serbatoi:(1) Serbatoio di recupero, (2) serbatoio soluzione, (3) rubinetto soluzione, (4) staffa di sostegno.

Il gruppo serbatoi è dato dall'insieme del serbatoio soluzione, contenente l'acqua pulita da distribuire sul pavimento, con il relativo rubinetto di uscita, e da un serbatoio di recupero, in cui viene convogliata l'acqua sporca recuperata attraverso il sistema di aspirazione. La capienza utile di ciascuno dei due serbatoi è di 20 l. Il serbatoio soluzione è fissato all'elemento saldato indicato in Fig. 8 come *telaio serbatoi* tramite dei bulloni; il serbatoio di recupero è incastrato sul serbatoio soluzione sulla parte anteriore, e su una staffa fissata al medesimo telaio sulla parte posteriore. Completano questo gruppo i tratti del tubo di aspirazione tra il tergilavaggio e il serbatoio di recupero, e tra il serbatoio di recupero e l'aspiratore, oltre al tubo di uscita dal rubinetto al distributore – elementi non rappresentati in Fig. 10. Per attivare, interrompere o modulare altrimenti l'erogazione di acqua, si è introdotta a valle del rubinetto, collegata alla scheda funzioni, un'elettrovalvola *Type 301* da 24 V, 6.5 W, prodotta da *ACL* di Cavenago di Brianza (MB).

#### 4.1.4 Distributore acqua

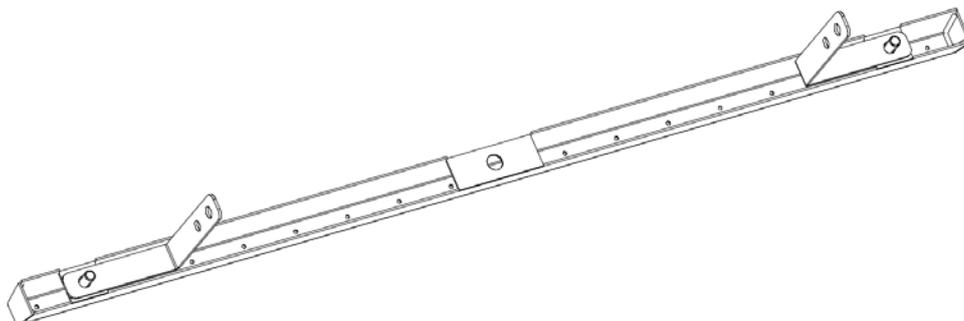


Figura 11: Distributore forato con larghezza uguale a quella del tergipavimento.

In una posizione intermedia tra le due coppie di ruote, si è posizionato un distributore costituito da una vaschetta in lamiera forata disposta trasversalmente alla direzione di moto della macchina. Una flangia superiore permette il collegamento con il tubo di uscita dal rubinetto del serbatoio soluzione, consentendo così di bagnare in modo omogeneo la pista di vetro al passaggio della macchina. Le due lamiere a L vicino alle estremità consentono il fissaggio al telaio.

#### 4.1.5 Tergipavimento

Si sono utilizzati 5 tipi diversi di tergipavimento, corrispondenti a variazioni di specifiche caratteristiche geometriche:

Tabella 1: Varianti del tergipavimento da confrontare

Variante Tergi	Camera Alta	Camera Bassa	Curvo Alto
Tubo $\varnothing 32$	A.3	B.3	–
Tubo $\varnothing 40$	A.4	B.4	C.4

Le prove vertono sul confronto tra diverse forme della camera di aspirazione e i diametri del tubo di aspirazione. Si è utilizzato come modello di base il tergipavimento della macchina *Quartz* prodotta da *Adiatek*, con larghezza della pista pulita di 900 mm, con camera alta e tubo di diametro 40 mm. Introducendo un elemento in lamiera per abbassare la camera e sostituendo l'elemento cilindrico di raccordo col tubo con uno di diametro minore (a cui si collega di conseguenza un tubo di diametro ridotto), si sono realizzate come prototipi le varianti riportate nella Tabella 1: si indica con A il tergipavimento a camera alta e con B quello a camera bassa; la cifra che segue è 4 nel caso di tubo di diametro 40 mm, 3 nel caso si impieghi il tubo di diametro 32 mm.

#### 4.1.6 Aspiratore

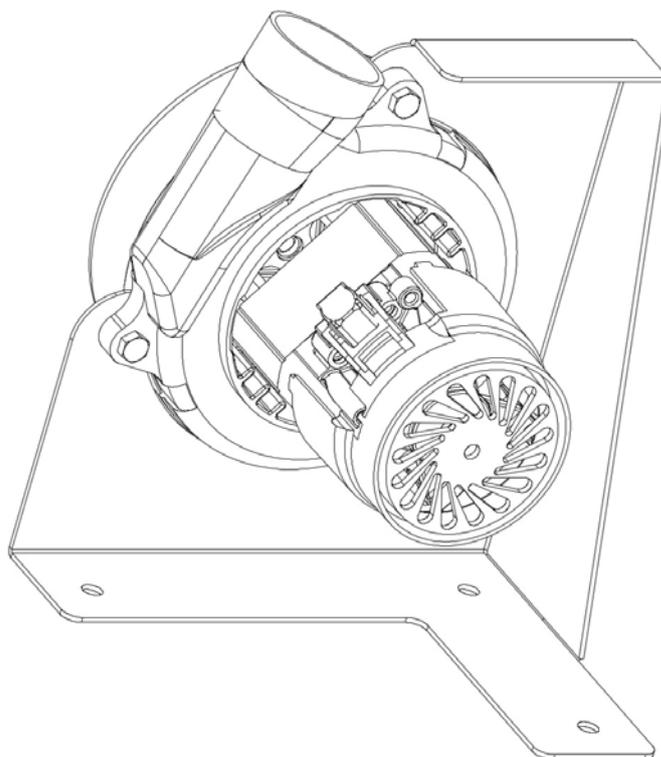


Figura 12: Motore aspirante a scarico tangenziale *EMB* modello 711184VR.

Tabella 2:

Grandezze caratteristiche dell'aspiratore al variare dell'area di ingresso alla mandata

Orifizio [mm]	Corrente [A]	Potenza assorbita[W]	Giri [rpm]	Depressione [kPa]	Portata [l/s]	Efficienza [%]	Pressione Acustica [dB]
48	22.5	540.0	14580	0.43	29.2	2.30	75.6
40	22.5	540.0	14520	0.97	30.5	5.50	75.4
30	22.8	547.2	14350	2.75	29.2	14.7	76.0
23	23.0	552.0	14170	5.63	24.1	24.6	75.1
19	22.9	549.6	14200	7.81	19.4	27.5	74.9
16	22.4	537.6	14380	9.52	15.3	27.1	73.8
13	21.5	516.0	14790	11.3	10.8	23.8	74.1
10	20.1	482.4	15400	13.2	7.20	19.7	76.1
6.5	18.4	441.6	16410	15.4	2.90	10.1	77.9
0	16.8	403.2	17600	18.5	0.00	0.00	76.4

Per produrre nel serbatoio di recupero la depressione richiesta per una efficace asciugatura, si è installato un aspiratore a 3 stadi convogliato, prodotto da *EMB S.r.l.* di Romanengo (Cremona), fissato al telaio trazione tramite la staffa riportata in Fig. 12. Si tratta di un aspiratore centrifugo a scarico tangenziale, azionato da un motore a corrente continua a 24 V. Come mostrato in Tabella 2, questo tipo di aspiratore genera una depressione diversa nel condotto di aspirazione con diversi valori della superficie complessiva dell'orifizio di ingresso nel condotto. Nella pratica tecnica della progettazione di macchine lavasciuga pavimenti, si assume comunemente un orifizio nominale di area equivalente a un foro circolare di diametro 10 mm, corrispondente ad una depressione di 13.2 kPa alla mandata: questo dato andrà verificato in fase di calibrazione del modello numerico da utilizzare nelle simulazioni.

#### 4.1.7 Impianto elettrico

L'impianto elettrico è stato realizzato in modo da permettere all'operatore di manovrare le operazioni della macchina tramite una scatola di comandi esterna, collegata alla macchina tramite un cavo di comunicazione. La macchina può spostarsi lungo la pista in moto rettilineo durante le operazioni di pulizia grazie al motoriduttore, indicato come M1 nello schema. Può sollevare e abbassare il tergipavimento tramite l'attuatore M2, e con il tergipavimento alzato può invertire il verso di marcia tramite il manipolatore a due posizioni SA2. Le funzioni sono gestite dall'operatore con la scheda comandi display AP1 e attraverso la scheda funzioni AP2. L'elettrovalvola Y1 permette di regolare la quantità d'acqua in uscita dal distributore.

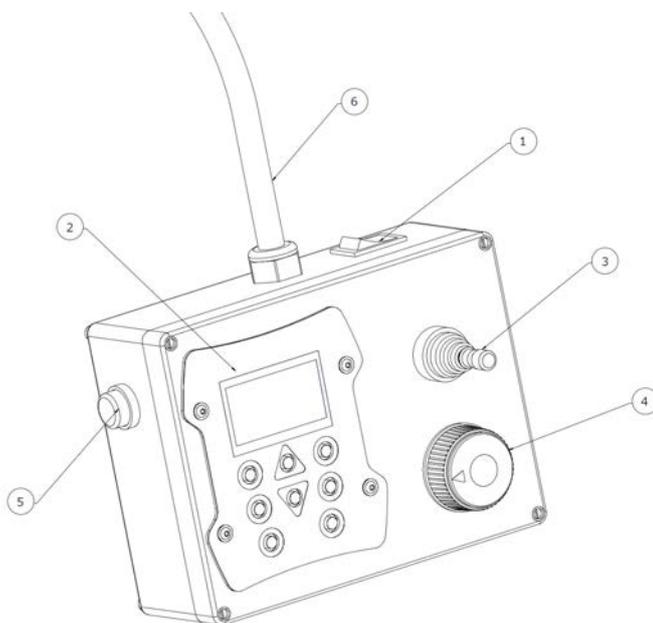


Figura 13: Scatola comandi comandi della macchina: (1) tasto accensione; (2) display comandi e funzioni; (3) leva marcia avanti/indietro/arresto; (4) potenziometro velocità; (5) pulsante apertura/chiusura elettrovalvola erogazione acqua; (6) cavo di comunicazione con la macchina.

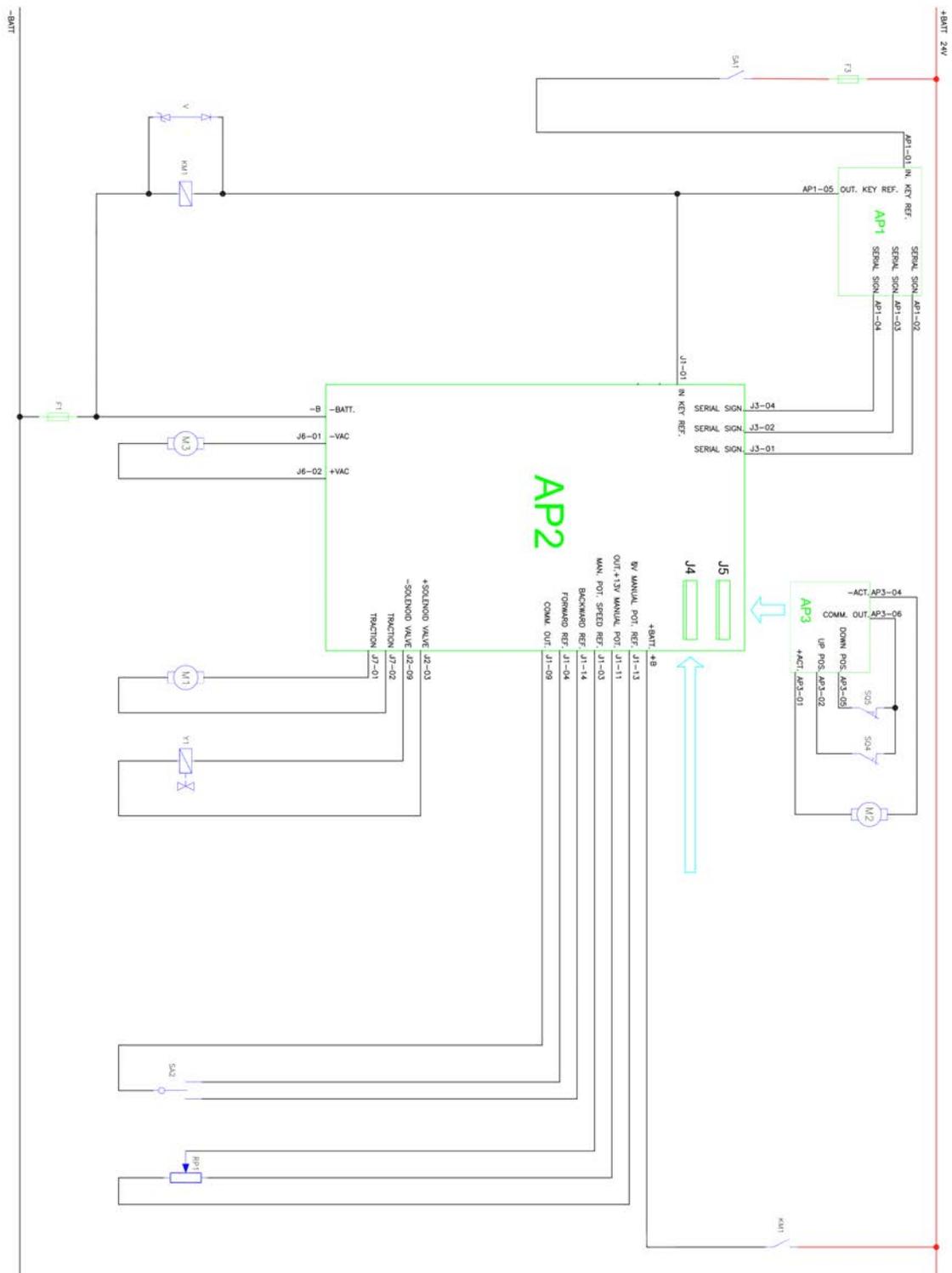


Figura 14: Schema elettrico funzionale della macchina.

Per manovrare la macchina è stata realizzata ad hoc una scatola comandi comprendente il display, i comandi di marcia e l'apertura/chiusura dell'elettrovalvola per l'erogazione dell'acqua. Si riporta in Figura 13 un disegno dell'assieme realizzato.

In Figura 14 si riporta lo schema elettrico funzionale della macchina.

#### 4.1.8 Supporto fotocamera

Per far sì che la fotocamera sia solidale alla macchina, in modo da poter riprendere l'interno del tergipavimento sempre dalla stessa angolazione, si è realizzato un elemento in lamiera saldata da fissare al telaio pedana tramite dei bulloni. Le dimensioni dei profili tubolari utilizzati dipendono da quelle delle lastre di vetro, e dall'angolo di apertura dell'obiettivo della fotocamera.

Il sistema di acquisizione scelto è uno smartphone Samsung Galaxy S10e, la cui fotocamera risulta di qualità confrontabile con telecamere professionali. L'obiettivo principale ha un angolo di apertura di  $64^\circ$ , quindi, per inquadrare l'intera larghezza della lastra di vetro di 1 m, è necessario porre l'obiettivo a 800 mm di distanza. Considerando che ci sono circa 200 mm tra il piano d'appoggio e il piano del telaio pedana, è necessario prevedere un'estensione verticale del supporto della fotocamera di almeno 1 m.

Per quanto riguarda le parti orizzontali, esse devono sporgere oltre il bordo della pista di vetro di una distanza che si è scelta pari a circa 50 mm, per non strisciare contro il bordo delle lastre in caso di piccole deviazioni della traiettoria della macchina o a causa di vibrazioni indotte dal moto. Tenendo conto degli ingombri del pacco batterie e dell'impianto elettrico sul telaio pedana, il punto di attacco del braccio di supporto del sistema di acquisizione può essere posto a circa 50 mm di distanza dalla linea di mezzzeria delle lastre di vetro. Si può dunque considerare un'estensione laterale degli elementi orizzontali del supporto una lunghezza di 0.5 m.

Si è quindi studiata la risposta a piccole oscillazioni nel piano definito dalla cornice a "C". Si sono considerati gli elementi tubolari come travi di sezione quadrata cava, con spessore 3 mm e dimensioni  $30 \times 30$  mm. Si ottengono dunque le grandezze caratteristiche statiche della sezione:

$$A = 3.085 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \quad J = 3.670 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4.$$

Per il materiale (acciaio zincato) si considerano una rigidezza  $E = 210$  GPa e una densità  $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup>. Per ciascun elemento, si considererà la matrice di rigidezza di telaio piano[13]:

$$[K_{tp}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EA}{L^3} & \frac{6EA}{L^2} & 0 & -\frac{12EA}{L^3} & \frac{6EA}{L^2} \\ 0 & \frac{6EA}{L^2} & \frac{4EA}{L} & 0 & -\frac{6EA}{L^2} & \frac{2EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EA}{L^3} & -\frac{6EA}{L^2} & 0 & \frac{12EA}{L^3} & -\frac{6EA}{L^2} \\ 0 & \frac{6EA}{L^2} & \frac{2EA}{L} & 0 & -\frac{6EA}{L^2} & \frac{4EA}{L} \end{bmatrix},$$

dove si userà come lunghezza quella dell'asse baricentrico, pari a 1 m per l'elemento più lungo, e 0.5 m per quelli più corti.

Assemblando le matrici in modo da far coincidere i gradi di libertà degli elementi con i gradi di libertà non bloccati della struttura complessiva, si avrà una matrice di rigidezza complessiva  $9 \times 9$ , con le coordinate nodali rappresentate nello schema di Figura 15.

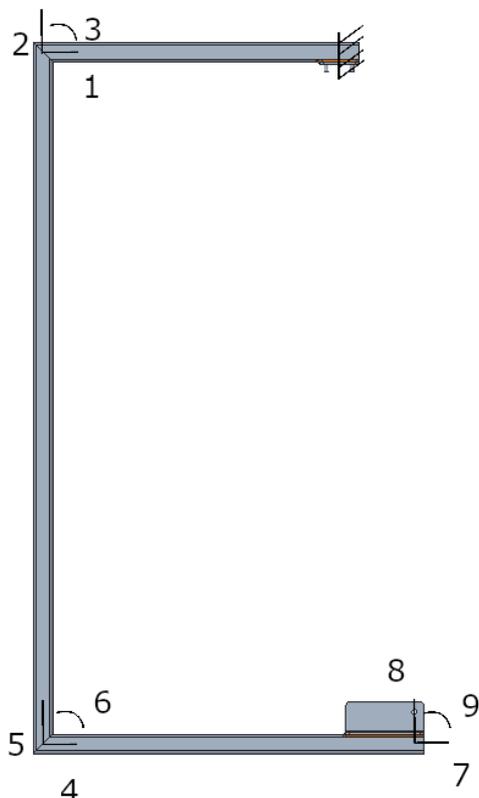


Figura 15: Schema dei gradi di libertà non bloccati della struttura di supporto della telecamera. In corrispondenza della piastra di fissaggio (in alto a destra nel disegno) si è considerato un incastro.

La matrice di massa *consistent* per il telaio piano è data da[13]

$$[M_c] = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}.$$

Dall'assemblaggio delle matrici di massa e rigidezza per la struttura completa, si ottengono delle matrici  $M$  e  $K$  rispettivamente, per cui si risolve il problema agli autovalori

$$[\omega^2 M - K]\{v\} = 0,$$

dove  $\{v\}$  è il vettore a 9 componenti delle ampiezze dei modi di vibrare lungo le coordinate indicate in Fig. 15.

Inserendo i dati, si è risolto il problema agli autovalori utilizzando il software *Mathcad* di PTC. Riportando le pulsazioni naturali  $\omega_i$  alle frequenze proprie  $f_i = \omega_i/2\pi$ , si trova che la frequenza di risonanza più bassa (quella più pericolosa) della struttura, è

$$f_0 = 10.8Hz,$$

corrispondente all'autovettore

$$\{v_0\} = \left\{ \begin{array}{c} 5.5 \cdot 10^{-4} \\ 1 \\ -4.1 \\ 6.4 \\ -7.8 \\ 6.4 \\ -2.8 \\ -7.9 \end{array} \right\}.$$

Si nota che un'oscillazione laterale della macchina con frequenze così basse potrebbe corrispondere ad irregolarità nel profilo delle ruote. Considerando la velocità massima di 1.7 m/s consentita dal motoriduttore, si osserva che le frequenze di rotazione delle ruote posteriori e anteriori sono, rispettivamente,

$$f_{ant} = \frac{1.7}{0.175\pi} = 3.1 \text{ Hz}, \quad e \quad f_{post} = \frac{1.7}{0.125\pi} = 4.3 \text{ Hz},$$

entrambe sufficientemente distanti dalla risonanza  $f_0 = 10.8 \text{ Hz}$ .

## 4.2 Struttura

Come prima cosa si sono decise le dimensioni complessive della pista trasparente su cui eseguire le prove. Si è ritenuta sufficiente una corsa complessiva di 6 m, in modo da poter osservare per diversi secondi la macchina operante anche alla massima velocità di avanzamento. Per permettere agevolmente lo studio di tergipavimento con larghezza fino a 900 mm, si è ritenuta appropriata una larghezza di 1 m. Per avviare la macchina prima di avanzare sulla parte trasparente, e per permettere di sfruttare tutta la corsa disponibile, si è previsto di aggiungere due ulteriori lastre di acciaio alle estremità del percorso, sempre di lunghezza 1.5 m, ottenendo una lunghezza complessiva della pista pari a 9 m.

### 4.2.1 Verifica delle lastre di vetro a rottura fragile

Abbiamo scelto di utilizzare 4 lastre di dimensioni  $1.5\text{m} \times 1\text{m}$  di vetro stratificato *Pilkington Optilam<sup>TM</sup> Clear*, di spessore complessivo di 17.5 mm, composto da due strati di vetro *float* di spessore 8 mm, e uno strato intermedio antisfondamento di PVB di spessore 1.5 mm. Si è scelto di sostenere le lastre incollando in prossimità delle estremità corte, sulla faccia inferiore, delle piastre di acciaio saldate a delle viti, fissabili tramite dei dadi a dei supporti opportunamente forati.

La massa di ciascuna lastra di vetro si può facilmente calcolare a partire dalla densità del vetro *float*  $\rho_V = 2.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ : per ciascuno dei due strati di ogni lastra si ha

$$M_V = \rho_V \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1.5 = 30 \text{ kg},$$

a cui va aggiunta la massa dello strato intermedio in PVB, di densità  $\rho_P = 1.08 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , perciò

$$M_P = \rho_P \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 1.5 = 2.4 \text{ kg}.$$

Complessivamente ogni lastra ha quindi una massa  $M_L = 2M_V + M_P = 62.4 \text{ kg}$  che incide come carico distribuito sulla lastra stessa.

A partire dal modello realizzato in Creo, si è stimata una massa complessiva della macchina pari a  $M_M = 95 \text{ kg}$  che sarà ugualmente ripartito sulle due ruote anteriori e quelle posteriori. A questa si aggiungono 20 l di acqua di capacità dei serbatoi, e 8 kg di peso della batteria, fornendo una massa totale

$$M_T = M_M + 20 + 8 = 123 \text{ kg}.$$

Si esegue una verifica di resistenza a frattura applicando la teoria della meccanica della frattura lineare elastica. Dalla letteratura si ottiene un valore critico dello *stress intensity factor* di circa  $K_{IC} = 0.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  per il vetro *float* [14, 15] – il dato per questo specifico materiale non è stato fornito dal costruttore. Sebbene lo strato intermedio di PVB fornisca una maggiore resistenza allo sfondamento, l'insorgenza di cricche macroscopiche è comunque da evitare, per non compromettere la visibilità attraverso il vetro.

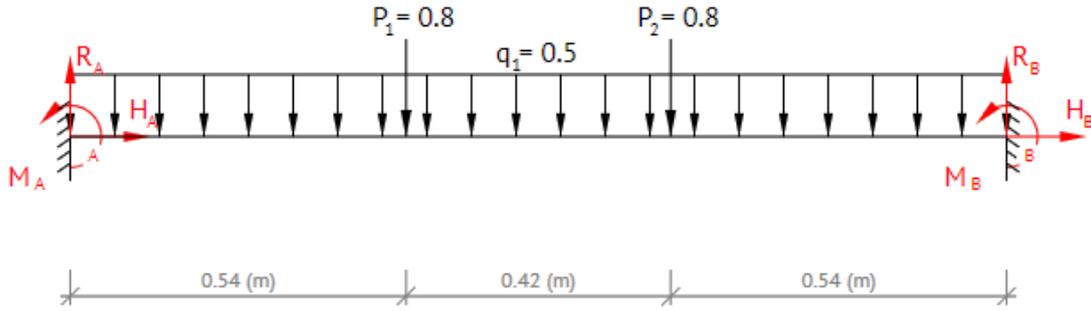


Figura 16: Schema dei vincoli e dei carichi applicati a ciascuna lastra di vetro. I carichi concentrati  $P_1$  e  $P_2$  sono espressi in kN, mentre il carico distribuito è espresso in kN/m.

I carichi applicati sono stati calcolati come segue:

- carico distribuito: la forza peso esercitata dalla lastra  $P_L = 62.4 \cdot 9.81 = 612$  N, diviso l'area della lastra in metri, porge il valore  $0.41$  kN/m, maggiorato a  $q_1 = 0.5$  kN/m in vantaggio di sicurezza;
- carichi concentrati: il peso complessivo esercitato dalla macchina vale  $P_M = 125 \cdot 9.81 = 1206$  N, maggiorato in vantaggio di sicurezza a  $1.5$  kN. Dividendo il peso equamente sulle due coppie di ruote, si ottengono i carichi concentrati  $P_1 = P_2 = 0.75$  kN, applicati nella situazione più svantaggiosa con la macchina in centro alla lastra, e la loro distanza pari all'interasse delle ruote  $I = 424$  mm.

Dalla sovrapposizione delle condizioni di carico (carico distribuito e ciascun carico concentrato considerati separatamente), si ottiene il momento massimo in mezzzeria, pari a

$$M_{max} = 193 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}.$$

Consideriamo per il calcolo l'approssimazione di un monostrato di vetro di spessore  $16$  mm: questo rappresenterebbe un caso più svantaggioso, essendo più facile la propagazione delle cricche in un volume continuo di vetro; la verifica è quindi in vantaggio di sicurezza. Se quindi  $t = 16$  mm è lo spessore della lastra,  $E = 70$  GPa è il modulo elastico del vetro laminato, e il momento d'inerzia statico della lastra è pari a

$$J = \frac{1}{12}tb^3 = 341333 \text{ mm}^4,$$

con  $b = 1000$  mm la larghezza della lastra.

Utilizzando la formula di Navier per le sollecitazioni flessionali, la tensione di trazione nella sezione mediana della lastra assume un valore massimo pari a

$$\sigma = \frac{M}{J} \cdot \frac{t}{2} = \frac{193 \cdot 10^6}{341333} \frac{16}{2} = 4.52 \text{ MPa}.$$

Data ora una condizione di carico come quella rappresentata in Fig. 17, si può applicare la seguente correlazione per il calcolo dello *stress intensity factor* all'apice della cricca (punti A e B in Figura 14) [16]:

$$K_{I1} = \sigma \sqrt{\pi a} \left[ \frac{1 - \frac{a}{2b} + 0.326 \left(\frac{a}{b}\right)^2}{\sqrt{1 - \frac{a}{b}}} \right].$$

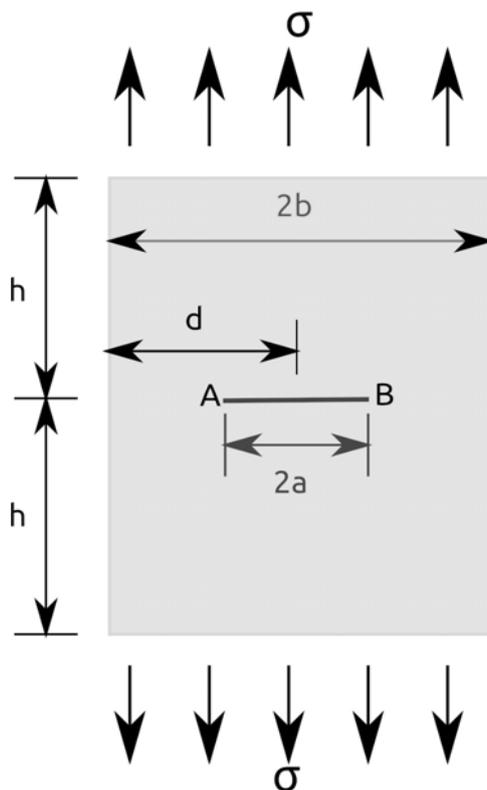


Figura 17: Condizione di carico monoassiale con cricca centrale.

Con i valori riportati, il valore  $K_{Ic} = 0.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  viene raggiunto per cricche di lunghezza  $a_1 = 7 \text{ mm}$ .

Considerando invece cricche laterali, nella condizione di Fig. 18, si può applicare la seguente correlazione [17]:

$$K_{I2} = \sigma \sqrt{\pi a} \left[ 1.122 - 0.231 \left(\frac{a}{b}\right) + 10.55 \left(\frac{a}{b}\right)^2 - 21.71 \left(\frac{a}{b}\right)^4 + 30.382 \left(\frac{a}{b}\right)^4 \right].$$

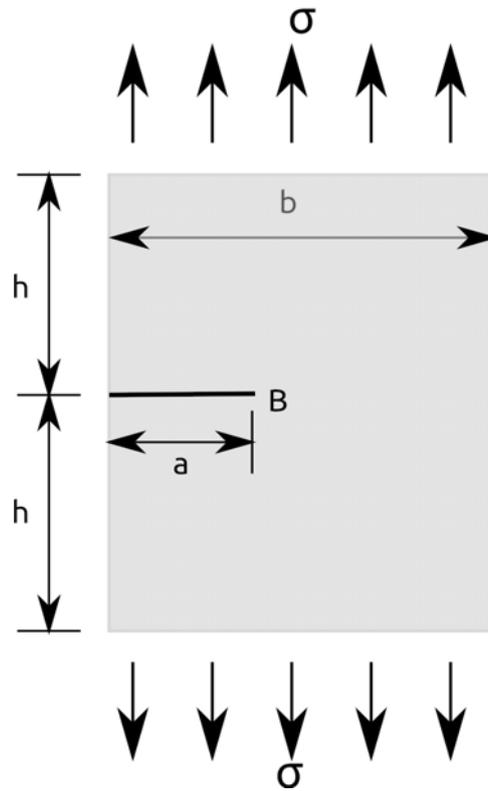


Figura 18: Condizione di carico monoassiale con cricca laterale.

Inserendo i valori, con questa seconda correlazione raggiunge il valore critico  $K_{Ic}$  con cricche di lunghezza  $a_2 = 9 \text{ mm} > a_1$ . Da un'ispezione visiva, si verifica che non sono presenti cricche visibili di dimensioni comparabili a quelle critiche, e le lastre sono quindi sufficientemente tenaci alla rottura. In effetti, non sono state riscontrate cricche visibili a occhio nudo: considerando una risoluzione dell'occhio nudo di  $0.3 \text{ mm}$  a una distanza di  $40 \text{ cm}$  (stima in vantaggio di sicurezza, da [18]), si ottengono, tramite le correlazioni utilizzate sopra, i valori  $K_{I1} = 0.16 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  e  $K_{I2} = 0.14 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , per cricche di  $0.3 \text{ mm}$  – ben al di sotto del limite di fatica per il vetro sodico-calcico in presenza di acqua  $K_{th} = 0.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  [19, 20]. Le lastre di vetro sono quindi sicure anche all'applicazione ripetuta dei carichi richiesti dall'esperimento.

#### 4.2.2 Verifica statica della struttura di supporto

Per il fissaggio alla struttura di supporto, sulla faccia inferiore di ogni lastra, in prossimità del lato corto lungo in corrispondenza del quale avviene il fissaggio, è stata incollata una lamiera di acciaio con delle viti saldate sporgenti verso il basso. L'appoggio delle lastre è stato realizzato costruendo delle strutture a C in acciaio, per permettere il passaggio del supporto della telecamera utilizzata per la ripresa del flusso di acqua. Tali strutture sono state ottenute saldando una piastra orizzontale di lamiera di spessore  $10 \text{ mm}$  per l'appoggio sul pavimento

e la stabilizzazione della struttura, con una colonna verticale tubolare, e sopra a questa una piastra superiore su cui sono appoggiate le lastre. Sulla piastra superiore sono stati praticati dei fori nei quali vanno inserite le viti saldate alle piastre incollate alle lastre di vetro, e quindi fissate con dei dadi (cfr. Fig. 6). Nella lastra di appoggio inferiore sono praticati dei fori per l'inserimento di piedini regolabili per correggere eventuali dislivelli del pavimento e flessioni della struttura. Si riporta in Figura 19 una vista schematica della struttura di sostegno.

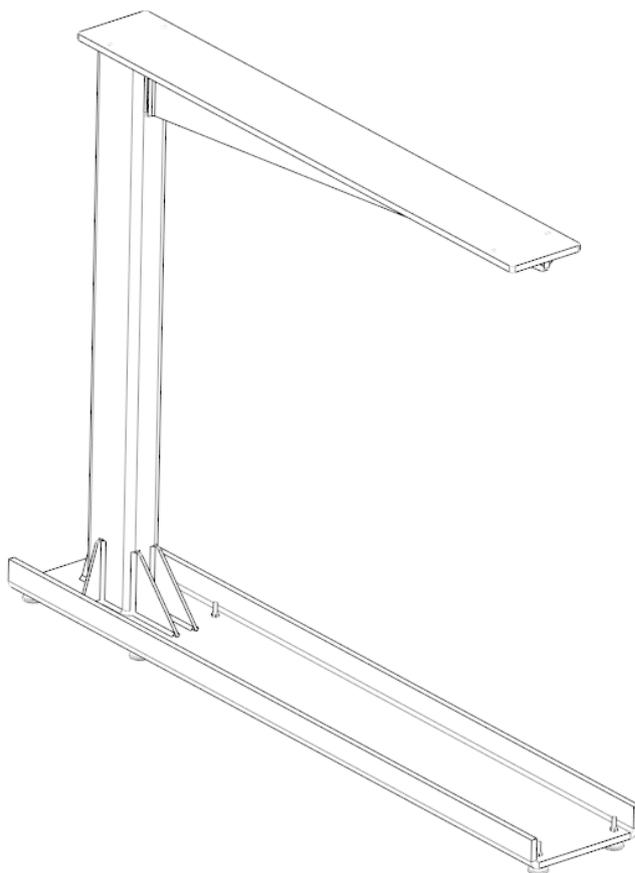


Figura 19: Vista di una delle strutture di sostegno delle lastre di vetro.

Sulla piastra superiore di ciascuna delle strutture di sostegno sono fissate le due estremità adiacenti di una coppia di lastre di vetro, e insiste quindi il peso di una lastra singola. La condizione più svantaggiosa tuttavia si verifica nei punti di giunzione tra una lastra di vetro e una delle due piastre d'acciaio poste agli estremi della struttura. Poiché ciascuna delle lastre d'acciaio ha una massa  $M_A = 80$  kg, si avrà una massa complessiva  $M_C = M_A/2 + M_L/2 = 71.2$  kg. Si aggiunge quindi la massa della macchina  $M_T = 123$  kg; si noti che in realtà su ciascun supporto insiste al massimo metà del peso della macchina, perché ciascuno di essi sostiene

due lastre contigue. Sommando la massa totale della macchina, ci poniamo in considerevole vantaggio di sicurezza. Si calcola quindi un carico totale  $P_{tot} = g \cdot (M_C + M_T) = 1905$  N, che approssimiamo con  $P = 2$  kN. Considerando questa condizione di carico, e applicando anche il peso proprio della struttura, si è stimata la freccia verticale all'estremità della piastra superiore della struttura su cui appoggiano le lastre. Tale calcolo è stato eseguito tramite il software di calcolo agli elementi finiti fornito con il pacchetto *Simulate* di *Creo PTC*. Considerando fisso l'appoggio sulla lamiera inferiore, si è applicata la condizione di carico descritta sopra, e si è avviato il risolutore. In Fig. 20.A si riporta la deformata (con la freccia amplificata per una migliore visualizzazione) in falsi colori riferiti alla freccia sotto carico. Si osserva che nel tratto più lontano dall'incastro, la piastra superiore subisce un abbassamento  $f_y = 2.63$  mm all'estremità libera: è dunque necessario compensare questa deformazione con una regolazione opportuna dei piedini, per assicurare l'orizzontalità del piano su cui si muoverà la macchina durante le prove.

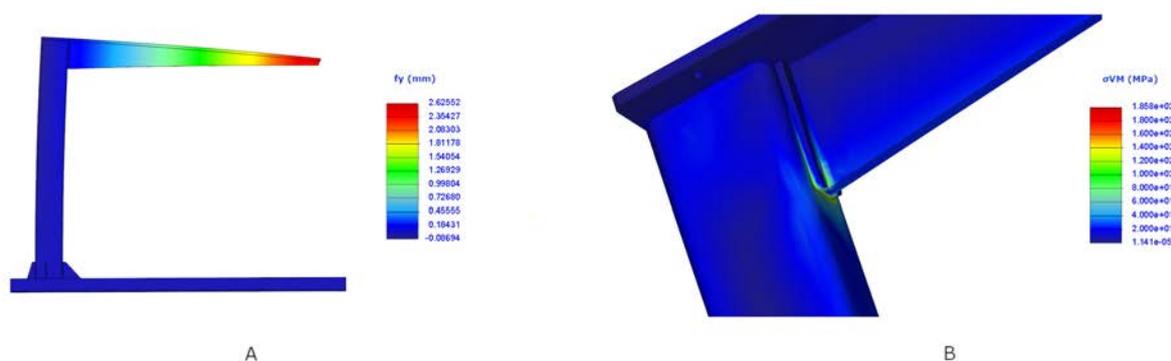


Figura 20: Deformata della struttura di sostegno sotto il carico massimo a cui è sottoposta durante le prove: A) freccia verticale lungo la trave superiore, con valore massimo all'estremo libero  $f_y = 2.63$  mm; B) particolare della giunzione in cui si osserva la massima concentrazione di tensione, col valore  $\sigma_{VM} = 186$  MPa.

Osservando il dettaglio in Fig. 20.B, si nota che la zona con la massima tensione equivalente di Von Mises  $\sigma_{VM}$  è la giunzione saldata tra l'irrigidimento della piastra superiore e l'elemento tubolare verticale, in corrispondenza della quale si rileva il valore  $\sigma_{VM} = 186$  MPa. L'elemento tubolare è realizzato in Fe360B, che presenta un carico di snervamento minimo  $\sigma_y = 235$  MPa, ben al di sopra della tensione massima calcolata. Poiché il carico considerato è grande 1.46 volte quello effettivo, e la tensione di snervamento è 1.27 volte quella massima sotto carico, si ottiene complessivamente un coefficiente di sicurezza per la struttura  $\nu = 1.85$ .

## 5 Procedura sperimentale

Per prima cosa abbiamo montato la macchina; successivamente abbiamo assemblato la struttura nella sala prove di *Adiatek*. Le operazioni di assemblaggio hanno richiesto un totale di 4 giorni - il laureando ha montato autonomamente la parte meccanica della macchina, e si è servito dell'aiuto di due tecnici per l'assemblaggio dell'impianto elettrico e della struttura. Le ruote folli della macchina sono due ruote a direzione fissa, poiché si prevede che la macchina si muova solamente di moto rettilineo; per rendere più agevole l'operazione di riportare la macchina alla posizione iniziale, si è rimosso dalla scheda funzioni (indicata come AP2 in Fig. 14) il cicalino di avvertimento per la retromarcia.

### 5.1 Montaggio della struttura

Il montaggio della struttura è stato eseguito posizionando per prima cosa i piedini regolabili nei fori di ciascuno dei cavalletti di supporto alla struttura come mostrato in Figura 21. Si sono poi disposti i primi due supporti alla distanza richiesta dalle dimensioni della piastra d'acciaio iniziale, e si è fissato sul lato esterno delle colonne dei supporti una piastra di irrigidimento per garantire la stabilità della struttura.

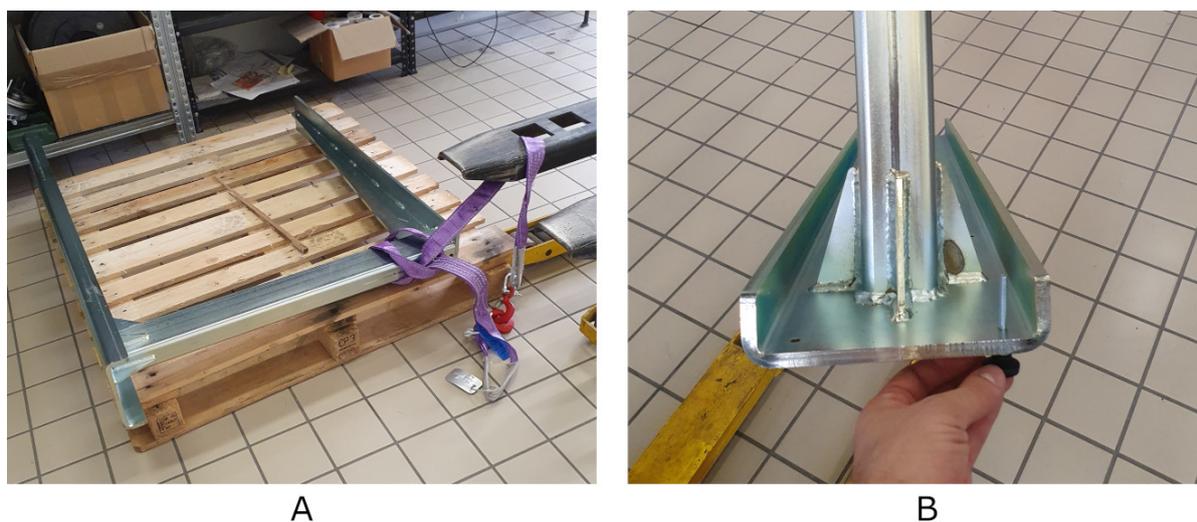


Figura 21: Operazioni di movimentazione dei cavalletti di sostegno: A) prelievo con una cinghia collegata alle forche di un carrello elevatore; B) inserimento e fissaggio dei piedini regolabili.

Si è quindi posizionato il supporto successivo, su cui sono state appoggiate le piastre di collegamento con la lastra di vetro, e su di esse sono state applicate delle strisce di nastro biadesivo. Si è appoggiata la lastra di vetro tramite un carrello elevatore, aggiustandone poi la posizione per assicurarne il contatto con la piastra iniziale, quindi si sono rimosse le pellicole protettive dalle strisce di biadesivo e si è riappoggiata la lastra di vetro, incollandola.



Figura 22: Aggiustamento della posizione dei cavalletti: A) applicazione delle strisce di nastro biadesivo sulla faccia superiore; B) appoggio della lastra di vetro per assicurare il contatto con la lastra successiva.



Figura 23: Collegamento del vetro ai supporti tramite l'adesivo: A) rimozione della protezione alle strisce biadesive; B) lastra incollata.

Procedendo allo stesso modo, sono state posizionate in sequenza tutte le lastre di vetro costituenti la pista trasparente, e quindi la piastra d'acciaio finale. Si è infine proceduto alla

regolazione dei piedini per correggere piccole deviazioni dall'orizzontalità di ciascuna lastra. Un'immagine dell'apparato completo con la macchina in posizione iniziale è riportata in Figura 24.



Figura 24: Macchina posizionata sulla struttura in posizione iniziale.

## 5.2 Sistema di acquisizione

Per l'acquisizione delle immagini, si è utilizzato uno smartphone *Samsung Galaxy S10e*, sia per motivi economici (il dispositivo era già in nostro possesso), sia perché la qualità dei video, in seguito a un confronto con una fotocamera professionale *Nikon* in dotazione di *Adiatek*, è risultata superiore. Alla massima risoluzione possibile, possono essere registrati video in formato  $3840 \times 2160$ , con frequenza di campionamento di 60 immagini al secondo. Il software della fotocamera è dotata di una funzione di stabilizzazione virtuale del video per compensarne le oscillazioni in un piano perpendicolare alla linea di vista; per compensare invece le oscillazioni rotazionali, si è utilizzato un supporto con stabilizzatore giroscopico *gimbal Cinepeer C11* prodotto da *Zhiyun*. Questo tipo di supporto permette di impostare un angolo di osservazione variabile, potenzialmente utile nel caso in cui si volesse osservare l'interno del tergipavimento da diverse angolazioni. L'insieme costituito dallo smartphone montato sul supporto si fissa al foro filettato M6 presente sull'elemento di sostegno del sistema di acquisizione descritto in 4.1.8 tramite una barra filettata avvitata su un galletto.

## 5.3 Programma prove

Nella fase di preparazione, si è fissato al supporto lo stabilizzatore descritto al paragrafo precedente, e successivamente si è posizionato il dispositivo di acquisizione sullo stabilizzatore, con l'obiettivo diretto verso il tergipavimento. Le prove relative a ciascun tergipavimento sono state eseguite con una specifica sequenza di operazioni.

Prima di iniziare ciascuna prova, la macchina è posizionata sulla piastra di acciaio posta all'inizio della pista, e si avvia l'acquisizione del filmato, con un'opportuna illuminazione dal basso per visualizzare meglio il flusso di acqua. Si dà quindi il comando di abbassare il tergipavimento a terra, attivando l'aspirazione, e si avvia l'erogazione d'acqua assieme alla trazione. Al passaggio sulla parte di vetro, la macchina si trova quindi già avviata.

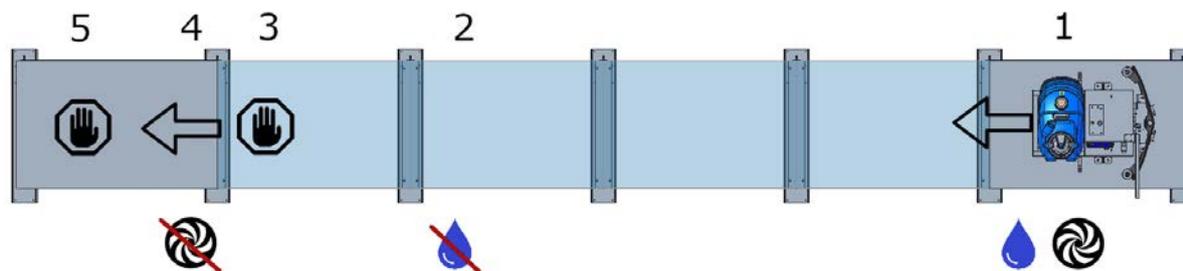


Figura 25: Sequenza delle operazioni durante le prove: 1) Avvio dell'aspirazione e dell'erogazione di acqua, inizio della movimentazione della macchina (la telecamera è già operativa); 2) arresto dell'erogazione dell'acqua; 3) la macchina resta ferma con il tergipavimento nell'ultimo tratto di vetro visibile fino alla fine dell'asciugatura; 4) la macchina solleva il tergipavimento, interrompe l'asciugatura e si porta nella posizione finale, indicata con (5).

L'erogazione dell'acqua si interrompe quando la macchina si trova nella zona centrale della terza lastra di vetro, quindi la macchina prosegue, fermandosi quando il tergipavimento si trova nell'ultima parte visibile della quarta lastra di vetro. In questa posizione la macchina continua ad aspirare mentre il tergipavimento è abbassato; l'acquisizione video prosegue fino al raggiungimento del livello massimo di asciugatura ottenibile date le condizioni di portata d'aria e forma del tergipavimento. Al termine di ciascuna prova, la macchina si porta in retromarcia fino alla posizione iniziale.

In Fig. 25 si riporta uno schema del percorso della macchina con le operazioni eseguite.

Le operazioni descritte sopra sono ripetute per ciascuna macchina con 4 diversi livelli di portata. La portata massima erogabile dall'elettrovalvola corrisponde alla portata massima attraverso il rubinetto, pari a  $H_7 = 3.69 \cdot 10^{-2}$  l/s, misurata cronometrando in 190 s il tempo di erogazione di 7 l di acqua. Si hanno poi i seguenti livelli di portata, dati come percentuale della portata massima:

- $H_1 = 16\%$
- $H_2 = 30\%$
- $H_3 = 44\%$
- $H_4 = 58\%$
- $H_5 = 72\%$
- $H_6 = 86\%$

Per confrontare l'effetto dei diversi livelli di portata, si sono eseguite prove con la procedura sopra indicata con le portate  $H_1$ ,  $H_3$ ,  $H_5$  e  $H_7$ . Inoltre, con la portata  $H_7$ , è stata eseguita per ciascuna versione del tergipavimento una prova con la medesima procedura, con le parti terminali delle gomme anteriore e posteriore del tergipavimento unite assieme in modo da chiudere le aperture laterali.

## 6 Risultati delle prove

Si sono acquisiti 20 video, corrispondenti ai 4 livelli di portata di acqua, più la versione coi bordi chiusi alla portata massima, per ogni modello di tergipavimento. La prima analisi che è stata eseguita sui video è stata la misurazione dei tempi  $t_0$  di inizio dell'asciugatura,  $t_1$  di arresto nella posizione (3) di Fig. 25, e  $t_2$  di raggiungimento di una condizione stazionaria in cui è stata raggiunta la massima asciugatura possibile e l'acqua presente nel tergipavimento non viene più trasferita al serbatoio di raccolta. Si sono definiti quindi gli intervalli di tempo  $\Delta t_{op} = t_1 - t_0$ , corrispondente al tempo totale di asciugatura con la macchina in movimento, e  $\Delta t_{bw} = t_2 - t_1$  un tempo ottimale di "break washing", ovvero il tempo totale che la macchina impiega per completare l'aspiratura una volta interrotta l'erogazione di acqua e il movimento lineare della macchina, mantenendo in funzione l'aspirazione con il tergipavimento a terra.

Durante le prove si è cercato di mantenere la macchina in movimento con una velocità sostenuta ma non eccessiva in modo da poter controllare e correggere eventuali deviazioni dalla traiettoria rettilinea; si è mantenuto il potenziometro di regolazione della velocità in una posizione intermedia, ottenendo un tempo di percorrenza  $\Delta t_{op} = (20 \pm 2)$  s. Si ottiene dunque una velocità media di marcia  $v = (0.46 \pm 0.05)$  m/s.

Si è poi valutato il tempo  $\Delta t_{bw}$  di completamento dell'asciugatura. Non è stata individuata una correlazione significativa tra la portata di acqua e  $\Delta t_{bw}$  (vedi Appendice A per le tabelle complete di dati). Si ottengono quindi i seguenti tempi, ottenuti come media sulle misure eseguite, tranne nel caso dei tergipavimenti a bordi chiusi, relativamente ai quali è stata eseguita solamente una misura per ogni tipo di tergipavimento:

Tabella 3: tempi di completamento asciugatura a diversi livelli di portata

$\Delta t_{bw}$ [s]	A.4	A.3	B.4	B.3	C.4
bordi aperti	$93 \pm 19$	$90 \pm 18$	$30 \pm 6$	$72 \pm 22$	$45 \pm 8$
bordi chiusi	120	187	62	35	—

A commento dei valori riportati in Tab. 3, si osserva che ai tempi misurati si associa una considerevole incertezza; ciò si spiega facilmente tenendo conto, da un lato, della non stazionarietà del processo di completamento dell'asciugatura, che comporta un moto turbolento bifase, e può richiedere più tempo per ridurre l'accidentale presenza di consistenti masse d'acqua in zone di ristagno del flusso d'aria; d'altro canto, trattandosi di una valutazione qualitativa, esiste un certo grado di arbitrarietà nel valutare il preciso istante in cui la distribuzione di acqua osservata si stabilizza. Si noti che il dato  $\Delta t_{bw}$  non esprime il tempo impiegato per ottenere una asciugatura ottimale in senso assoluto, ma solamente per ottenere *la migliore asciugatura possibile con il tergipavimento dato*. Come verrà mostrato più avanti, questa condizione di asciugatura può anche corrispondere a una considerevole quantità d'acqua lasciata sul pavimento.

### 6.1 Dinamiche di flusso bifase nel tergipavimento

In questa sezione descriviamo le dinamiche osservate all'interno del tergipavimento durante le operazioni di asciugatura. Distinguiamo qui 4 fasi del processo di asciugatura:

1. *riempimento* – in questa fase iniziale, il tergipavimento, inizialmente vuoto, si riempie gradualmente di acqua, nell'arco di  $1 \div 2$  s. L'acqua, entrando dai diversi fori posti lungo la gomma anteriore, viene convogliata percorrendo il bordo interno della gomma posteriore, sfruttando la depressione creata nella camera di aspirazione e il moto della macchina.
2. *moto stazionario* – una volta che il tergipavimento è pieno, mantenendo la macchina in condizioni di moto rettilineo uniforme, con portata di acqua costante e livello di aspirazione costante, si realizza un sistema con condizioni al contorno stazionarie. Il moto del fluido aspirato non è tuttavia stazionario, essendo, come già detto, turbolento. Si possono tuttavia osservare delle zone ben definite all'interno della camera di aspirazione, ciascuna con uno specifico regime di flusso. Nelle prove eseguite, questa fase dura circa 20 s.
3. *completamento asciugatura* – all'arresto del moto della macchina, l'aspirazione prosegue senza che ci sia ulteriore immissione di acqua. Si osserva quindi un transiente in cui si modifica la distribuzione dell'acqua nella camera di aspirazione, durante un arco di tempo variabile, indicato come  $\Delta t_{bw}$  nel paragrafo precedente.
4. *condizione finale* – una condizione di moto del fluido nuovamente stazionaria, in cui l'acqua presente nel tergipavimento non viene più aspirata nel serbatoio di raccolta e rimane sul pavimento. Al termine di questa fase, sollevando il tergipavimento, una certa quantità di *acqua residua* rimane sul pavimento, anche mantenendo in azione l'aspiratore durante e dopo il sollevamento del tergipavimento.

La fase di riempimento non presenta particolari problemi, e se sono presenti fori d'ingresso in numero e dimensione sufficienti per garantire l'ingresso dell'acqua nel tergipavimento, si completa in pochi secondi.

Per quanto riguarda il moto stazionario, si ha un'asciugatura corretta se la gomma posteriore tocca il pavimento con lo spigolo anteriore: una pressione eccessiva potrebbe portare la faccia anteriore della gomma a essere tangente al pavimento, permettendo la fuga dell'acqua, mentre una pressione troppo lieve determinerebbe un sollevamento della gomma dal pavimento, specialmente nelle parti più laterali, con il medesimo effetto. Si osserva che l'aspirazione avviene quando l'acqua raggiunge la zona centrale, in cui viene convogliata dal gradiente di pressione e dal moto della macchina, grazie alla forma concava del profilo del tergipavimento. In questa zona si osservano moti turbolenti, con lo sviluppo di una struttura vorticoso macroscopica a spirale che convoglia l'aria da una traiettoria prevalentemente orizzontale a un moto verticale di risalita verso il tubo di aspirazione.

La parte di completamento dell'asciugatura è importante per le prestazioni della macchina. La durata  $\Delta t_{bw}$  di questa fase corrisponde al tempo ottimale di *break washing* con la condizione di voler garantire la migliore asciugatura. È quindi desiderabile che questa transizione di regime avvenga il più rapidamente possibile.

La condizione finale è di cruciale interesse tecnico, perché, al sollevamento del tergipavimento, l'acqua presente in esso rimane sul pavimento, generalmente con la stessa distribuzione che si osserva in questa fase. La superficie del volume di acqua residua viene tipicamente increspato dal movimento dell'aria, insufficiente per trascinarla verso l'alto nel tubo di aspirazione.

Presentiamo ora i diversi regimi osservati con i modelli di tergipavimento studiati, mostrando per ogni variante dei fotogrammi rappresentativi della fase di moto stazionario, del completamento dell'asciugatura e dell'acqua residua. Nelle ultime due, si sono evidenziati in rosso le zone bagnate del vetro, escludendo le parti bagnate antistanti il tergipavimento – e che quindi non sono state interessate dal processo di asciugatura – e le gocce di diametro inferiore a 5 mm. Per il loro carattere intrinsecamente transitorio, non si mostreranno immagini corrispondenti alle fasi di riempimento e di completamento asciugatura.

### 6.1.1 Tergipavimento A.4



Figura 26: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento A.4 (il modello attualmente utilizzato sulle macchine *Quartz* di *Adiatek*): in alto a destra si mostra la fase di moto stazionario, a sinistra la condizione finale, e in basso l'acqua residua sul vetro dopo il sollevamento del tergipavimento.

Nella fase di moto stazionario (in alto a sinistra in Fig. 26) si osservano chiaramente i getti in ingresso dai fori presenti nella gomma anteriore. Si noti la deviazione piuttosto pronunciata dei getti in ingresso che piegano verso la zona centrale al di sotto del tubo di aspirazione. L'acqua viene dapprima spinta contro la gomma posteriore, poi da questa, per azione combinata della depressione generata dall'aspiratore e dal moto della macchina, si convoglia verso la zona centrale del tergipavimento. Questo flusso verso il centro avviene principalmente a ridosso della gomma posteriore, con un'interfaccia tra l'acqua e l'aria (essendo prevalente la presenza quest'ultima nella zona più avanzata della camera di aspirazione) increspata da onde di lunghezza

caratteristica  $l \simeq 20 \div 30$  mm e con ampiezza  $a \simeq 5$  mm. Lo spessore medio del tubo di flusso d'acqua in questa zona aumenta gradualmente da  $s_l \simeq 8$  mm nella parte più laterale, fino a  $s_c \simeq 20$  mm nella zona più centrale.

Nella parte centrale in cui l'acqua si trova convogliata, delimitata dai tratti verdi in Figura 26, si realizza un regime di flusso assimilabile a quello indicato in 2 come *ondoso separato*, ovvero *intermittente* (ma limitatamente alla regione della camera di aspirazione più vicina al pavimento). Questa strutturazione del flusso deriva dall'accumulo di una significativa quantità di acqua in questa zona e dall'interazione con il flusso d'aria vorticoso che cambia direzione in questa zona per risalire lungo il tubo di aspirazione. I due fori centrali della gomma anteriore sono inclusi in questa regione: si notano in effetti meno chiaramente i getti in ingresso attraverso di essi, e una loro integrazione con il flusso intermittente, che contribuiscono a strutturare.

Dalla visione del video si osserva che durante la fase di completamento dell'aspirazione (non mostrata dalle immagini) sacche di acqua casualmente disposte (ma generalmente in prossimità dei fori e della gomma posteriore) vengono lentamente, progressivamente, e in momenti non chiaramente prevedibili, deformate dal flusso d'aria ed eventualmente trasportate verso la zona centrale.



Figura 27: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento A.4 con le fessure laterali chiuse.

Passando alla condizione finale (in alto a destra in Fig. 26), si nota la permanenza di una quantità significativa di acqua nella zona centrale del tergipavimento; si osservano inoltre dei ristagni di acqua nelle vicinanze dei fori di ingresso presenti nella gomma anteriore, e in

prossimità della gomma posteriore. Questa disposizione dell'acqua trova una corrispondenza nella distribuzione dell'acqua residua al sollevamento del tergipavimento (in basso in Fig. 26): si osserva in particolare nella zona centrale una quantità di acqua consistente con quella presente tra le due gomme nella condizione finale di aspirazione, e una traccia allungata di acqua secondo il profilo della gomma posteriore. Queste zone si caratterizzano quindi effettivamente come delle zone di ristagno – o, comunque, domini di moto fluido chiusi, da cui l'acqua non riesce a risalire verso il tubo di aspirazione.

Chiudendo le fessure laterali con del nastro isolante, non si osservano significative differenze per quanto riguarda la strutturazione del flusso durante il moto stazionario. Non si nota in effetti una differenza significativa neanche nelle altre fasi del processo di aspirazione.

### 6.1.2 Tergipavimento B.4



Figura 28: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento B.4, realizzato saldando una piastra di chiusura sotto alla camera di aspirazione di un tergipavimento del tipo A.4 già esistente. Si mostrano, in senso orario, partendo da in alto a destra, la fase di moto stazionario, la condizione finale, e l'acqua residua sul vetro dopo il sollevamento del tergipavimento.

Per il tergipavimento indicato con la sigla B.4 si nota una sostanziale differenza a partire dalla fase di moto stazionario: qui si osservano ancora una volta i getti in ingresso dai fori di entrata significativamente deviati in direzione della zona centrale, ma una diversa organizzazione del flusso per quanto riguarda la zona vicina alla gomma posteriore e la parte centrale.

Si osserva innanzitutto che il flusso d'acqua, aderendo alla gomma posteriore, assume una disposizione meno regolare, con uno spessore medio simile a quello osservato nella variante A.4, ma con un'interfaccia con l'aria più frastagliata. Si evidenzia inoltre che nella parte centrale si struttura molto più chiaramente un vortice ascendente con movimento antiorario (nel riferimento con il piano asciugato visto dall'alto), che convoglia l'acqua rapidamente nel tubo di aspirazione, con la creazione di una zona a deflusso caratterizzabile come *intermittente* nei termini usati in 2, ma con una disposizione delle linee di corrente della fase acquosa tridimensionale più stabile e chiaramente direzionata lungo traiettorie spiraliformi verso l'alto.

Nella fase di completamento aspirazione si osserva un riassorbimento del vortice centrale nel tubo di aspirazione, e un'esaurimento progressivo dell'acqua nelle zone bagnate del pavimento, che risalgono lungo la superficie della gomma posteriore e si dispongono in tubi di flusso di acqua sulla superficie superiore della camera di aspirazione. Si ritiene di poter assimilare questo comportamento ad un regime *anulare*, nel senso di una distribuzione dell'acqua concentrata principalmente lungo le pareti del condotto (in questo caso, della camera di aspirazione).



Figura 29: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento B.4 con le fessure laterali chiuse.

Questa situazione produce una situazione finale molto più desiderabile di quella osservata con il tergipavimento A.4 dal punto di vista dell'efficienza dell'asciugatura: l'acqua presente sul vetro in questa fase è infatti disposta unicamente lungo il bordo di contatto della gomma posteriore con il pavimento. Si notano altresì con una certa chiarezza gli ultimi rivoli d'acqua che portano al tubo di aspirazione, rimanendo aderenti alla superficie superiore della camera

di aspirazione.

L'acqua residua al termine delle operazioni risulta coerente con quest'ultima situazione: nella zona centrale sono presenti solo tre gocce cadute dal gruppo tergipavimento al suo sollevamento, indicando un'ottima asciugatura in questa zona. Anche in questo caso, tuttavia, rimane bagnata una zona corrispondente alla gomma posteriore, non significativamente diversa da quella osservata al termine dell'asciugatura.

Si sottolinea la particolare efficienza di questa configurazione, anche in riferimento al ridotto tempo di *break washing* richiesto, riportato in Tabella 3 come  $\Delta t_{bw} = 30 \pm 6$  s, il minimo tra i tempi misurati per le varie tipologie di tergipavimento.

Eseguendo la prova con le fessure laterali chiuse, si osservano (vedi Fig. 29) più ampie zone bagnate nella zona sottostante al tubo di aspirazione, che sono assenti quando l'aspirazione avviene con i bordi aperti. La riduzione della portata del flusso d'aria dalle fessure laterali alla zona centrale provoca quindi una destrutturazione del vortice centrale, causando una peggiore asciugatura. In effetti, osservando la distribuzione dell'acqua residua al termine dell'asciugatura, si nota una superficie bagnata più ampia nella zona centrale: per la sua ampiezza significativamente maggiore a quella osservata nella condizione finale, si ritiene che sia provocata almeno in parte anche da un riflusso di acqua dall'area intorno all'imbocco del tubo di aspirazione. Tale configurazione risulta quindi peggiorativa rispetto al caso con le fessure laterali aperte.

### 6.1.3 Tergipavimento A.3

Nel caso del tergipavimento A.3, riportato in Figura 30, il moto stazionario appare qualitativamente analogo a quello del tergipavimento A.4: si ripropongono anche in questo caso getti in ingresso dai fori sulla gomma anteriore, significativamente deviati verso la parte centrale del tergipavimento, con un convogliamento dell'acqua a ridosso della gomma posteriore. Anche qui si osserva vicino alla gomma posteriore un flusso d'acqua piuttosto compatto, con un'interfaccia percorsa da onde di lunghezza  $l \simeq 20 \div 30$  mm e ampiezza  $a \simeq 5$  mm, con uno spessore medio del tubo di flusso approssimativamente costante, col valore  $s \simeq 20$  mm. È presente anche in questo caso una zona centrale con moto più caotico, delimitata dai contorni verdi nella figura in alto a destra in Fig. 30. In generale si osserva una maggior permanenza di acqua all'interno della camera di aspirazione.

Nella condizione finale si osserva un regime separato, con la parte inferiore della camera di aspirazione coperta da uno strato di acqua specialmente nella parte centrale; questa massa d'acqua è perturbata da un flusso d'aria entrante dai fori di ingresso e dalle aperture laterali, ma, oltre a generare delle onde sulla superficie, il flusso d'aria non modifica sostanzialmente la distribuzione dell'acqua, che non risale lungo il tubo di aspirazione. Il moto dell'aria, comunque, agisce concentrando l'acqua nella parte centrale del tergipavimento, come si nota osservando i bordi della zona bagnata evidenziati in rosso nella figura in alto a destra in Fig. 30.



Figura 30: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento in configurazione A.3, ottenuta inserendo nella parte cilindrica di raccordo con il tubo di aspirazione una riduzione in PVC costruita in modo da arrivare fino all'apertura sulla camera di aspirazione. Si riportano in alto un'istantanea del moto stazionario (a sinistra) e della condizione finale (a sinistra), e in basso l'acqua residua a fine operazione.

L'acqua residua rispecchia perfettamente la condizione finale dell'asciugatura appena descritta: nella zona centrale si allarga una cospicua quantità di acqua, che, non essendo più contenuta tra le due gomme delimitanti la camera di aspirazione, va ad occupare una superficie più ampia (la più ampia tra quelle osservate con le diverse varianti di tergipavimento analizzate in questo studio). Coerentemente con quanto detto, non è presente acqua in altre zone, con la significativa eccezione di una piccola zona bagnata in corrispondenza del profilo della gomma posteriore nella parte sinistra, e un'altra, circa della stessa dimensione, in prossimità di un foro sulla parte destra.

Si tratta complessivamente della configurazione che fornisce la peggiore qualità dell'asciugatura, a fronte, per altro, di un tempo di completamento dell'asciugatura molto alto ( $\Delta t_{bw} = 90 \pm 18$  s, come riportato in Tab. 3).



Figura 31: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento A.3 con le fessure laterali chiuse.

Per quanto riguarda la configurazione con le fessure laterali chiuse, non si notano differenze sostanziali per quanto riguarda la fase di moto stazionario, ma risulta migliorata l'asciugatura, come si nota dalla condizione finale (in alto a sinistra in Fig. 31), in cui è evidente che è presente meno acqua nella camera di aspirazione rispetto a quanto osservato nel caso con i lati aperti. Si noti però che questa condizione si raggiunge dopo un tempo molto lungo di completamento dell'aspirazione: il tempo complessivo è il più lungo osservato tra tutte le configurazioni studiate, e ammonta a  $\Delta t_{bw} = 187$  s, risultato decisamente inutilizzabile nell'operatività professionale di una macchina lavapavimenti.

Si registra comunque una minore quantità di acqua residua rispetto al caso precedente, verosimilmente in virtù di una depressione maggiore all'interno della camera di aspirazione; tuttavia, se confrontata con la prestazione di altri tergipavimento esaminati, è comunque sovrabbondante. Si nota anche in questo caso una maggiore concentrazione al centro e lungo il profilo della gomma posteriore.

#### 6.1.4 Tergipavimento B.3



Figura 32: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergilavaggio B.3, realizzato come variante di B.4 con un elemento di raccordo col tubo di aspirazione di diametro minore. Partendo da in alto a sinistra, sono riportate immagini di moto stazionario, condizione finale, acqua residua.

Nel caso del tergilavaggio B.3 si osserva – vedi Fig. 32 – una dinamica che si può considerare intermedia tra quella presentata dai modelli A.4 e B.4. Si notano i consueti getti in ingresso provenienti dai fori sulla gomma anteriore, deviati in direzione della linea di mezzzeria. Anche in questo caso l'acqua viene convogliata dal moto della macchina e dal flusso d'aria nella parte della camera di aspirazione più vicina alla gomma posteriore. Come in A4, si osservano delle onde di lunghezza caratteristica  $l \simeq 20 \div 30$  mm, ma con un'interfaccia meno liscia e molto più increspata, con protrusioni pronunciate. In effetti, risulta piuttosto difficile distinguere nettamente questo flusso contiguo alla gomma posteriore dalla zona centrale più caotica e vorticoso. In quest'ultima, peraltro, non è nettamente delineato un singolo vortice macroscopico come quello visto in B.4, ma un'andamento tendenzialmente vorticoso, con un generale incresparsi dell'acqua. L'acqua non viene infatti convogliata efficacemente attraverso il tubo di aspirazione più stretto, trovandosi quindi a permanere maggiormente sul pavimento.

All'arresto della trazione, il completamento dell'aspirazione avviene attraverso successivi spostamenti di masse d'acqua dalle regioni periferiche e vicine alla gomma posteriore, a quella centrale, dove viene parzialmente convogliata verso il tubo di aspirazione.

Nella condizione finale, dunque, si osservano delle consistenti sacche di acqua lungo la gomma posteriore, e una più grande nella zona centrale. Sono presenti anche delle quantità d'acqua più ridotte a ridosso dei fori.

L'acqua residua sul vetro al sollevamento del tergipavimento ha una distribuzione del tutto analoga a quella presente al suo interno durante nella condizione finale del processo di asciugatura. Non si verifica quindi alcun reflusso di acqua, e quella già presente sul vetro rimane nella propria posizione.



Figura 33: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento B.3 con le fessure laterali chiuse.

Similmente a quanto visto con il tergipavimento A.3, anche in questo caso la chiusura delle aperture laterali produce un miglioramento nella condizione finale (immagine in alto a destra in Fig. 33), con una minore quantità d'acqua presente nella camera di aspirazione. La modifica sembrerebbe migliorativa anche in riferimento al minore tempo di completamento dell'asciugatura.

Tuttavia, al sollevamento del tergipavimento si assiste al rilascio di una quantità non piccola di acqua dal tubo di aspirazione e dalla parte superiore della camera di aspirazione. L'apparente vantaggio ottenuto con l'aumento del gradiente di pressione non è quindi sufficiente a convogliare l'acqua residua fino al serbatoio di recupero, e si limita a produrre un equilibrio dinamico con l'acqua concentrata nella parte alta mentre l'aspiratore è in funzione, seguito però dal rilascio di quest'acqua una volta che l'aspiratore viene spento.

### 6.1.5 Tergipavimento C.4



Figura 34: Immagine della successione delle fasi del processo di asciugatura per il tergipavimento C.4, montato sulla macchina *Jade* prodotta da *Adiatek*. In alto a destra si mostra la fase di moto stazionario, a sinistra la condizione finale, e in basso l'acqua residua sul vetro dopo il sollevamento del tergipavimento.

Questo tergipavimento di forma differente, inizialmente progettato per una macchina diversa dalla *Quartz* su cui è montato il modello qui indicato come A.4, è stato adattato alla macchina realizzata tramite una piastra di collegamento bullonata, visibile in Fig. 34 – si tratta della piastra di acciaio inox presente tra il tergipavimento, e l'attacco a cui sono fissate anche le ruote.

La distribuzione di acqua e aria durante il moto stazionario è qui significativamente differente rispetto a quella osservata negli altri tergipavimento: si può apprezzare nella figura in alto a destra in Figura 34 la traiettoria dei getti dai fori di ingresso della gomma anteriore, che non appare deviata in direzione della parte centrale del tergipavimento, come accadeva invece per le altre varianti. Ne risulta un flusso lungo la gomma posteriore nettamente più frastagliato e di spessore ridotto  $s \simeq 10 \div 15$  mm. Nella parte centrale si sviluppano due vortici simmetrici, nello spazio ristretto delimitato dai getti entranti dai due fori più vicini al tubo di aspirazione – vedi i limiti evidenziati in verde in Fig. 34. Si vede inoltre che sono presenti zone sostanzialmente asciutte piuttosto ampie tra i getti corrispondenti agli altri fori, dovute probabilmente alla distanza media tra le due gomme maggiore rispetto all'altra geometria.

Nella fase di completamento dell'asciugatura si osserva un rapido deflusso delle zone bagnate lungo la gomma posteriore verso la regione centrale; rimangono tuttavia delle aree bagnate di dimensioni medio-piccole nelle regioni comprese tra i fori. Si osserva quindi che il getto più rettilineo in ingresso dai fori incontra frontalmente la gomma posteriore, andandola ad asciugare più efficacemente, e portando l'acqua verso la regione centrale; rimane però ferma la parte di acqua che si trava nelle regioni riparate da questi getti nella parte intermedia tra due fori, a ridosso della gomma anteriore.

L'acqua residua rispetta la distribuzione costituitasi al completamento dell'asciugatura, senza sostanziali reflussi d'acqua dall'apparato di aspirazione al pavimento. La traccia bagnata della gomma posteriore è molto piccola rispetto a quella osservata negli altri casi, e trascurabile se non nella regione centrale, in cui si osserva un ristagno di acqua comparabile con quello complessivamente osservato nel caso del terqipavimento B.4.

## 7 Simulazioni

Per eseguire le simulazioni si è utilizzato il pacchetto *Fluent* incluso nel software *ANSYS Workbench 2020 R1*, ottenuto nella versione *Academic* disponibile per docenti e studenti universitari. Si è utilizzata una geometria semplificata per il tergipavimento, costituita semplicemente dal profilo delle lamiere del tergipavimento e dalle gomme (non sagomate). I modelli semplificati sono stati creati tramite *PTC Creo Parametric*, e la forma è stata sottratta da un volume di controllo comprendente la zona anteriore al tergipavimento, l'interno del tergipavimento, compresi i fori d'ingresso attraverso la gomma anteriore, e l'elemento tubolare nella parte alta, di raccordo con il tubo di aspirazione. Si è quindi considerata solo una metà del volume di controllo così sagomato, in virtù della simmetria speculare del tergipavimento rispetto al piano di mezzeria (vedi Fig. 35).

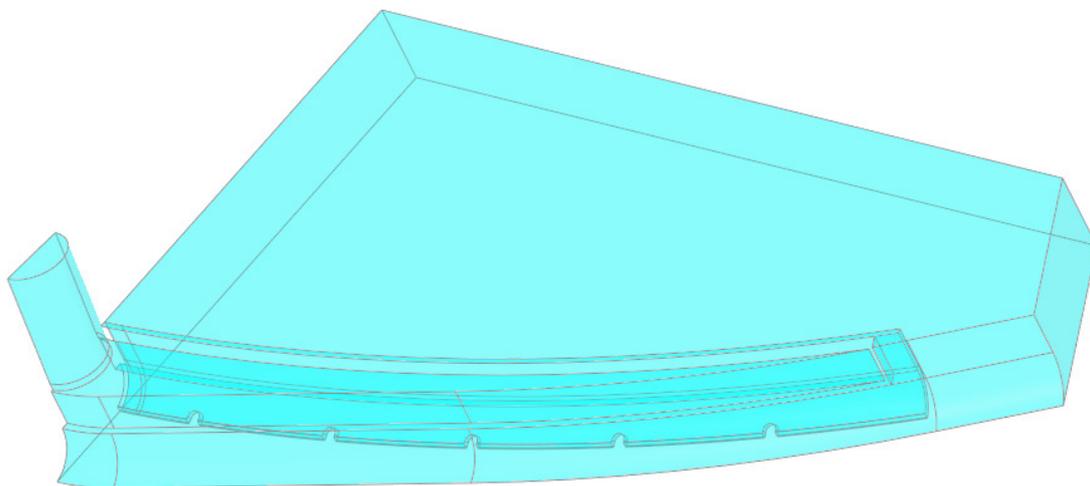


Figura 35: Volume di controllo utilizzato per le simulazioni. Si notino la forma in negativo delle pareti del tergipavimento, e il piano mediano di simmetria.

### 7.1 Meshing

Si è utilizzata una mesh tetraedrica con elementi di dimensione  $l_e = 29.92$  mm (impostata di default dal software di meshing), con raffinamento automatico proporzionale alla curvatura locale, con lunghezza massima dei segmenti pari a  $l_{e,M} = 59.84$  mm. La lunghezza minima dei segmenti risulta quindi  $l_{e,m} = 0.41$  mm, e l'area media delle facce  $S_e = 5323.7$  mm<sup>2</sup>.

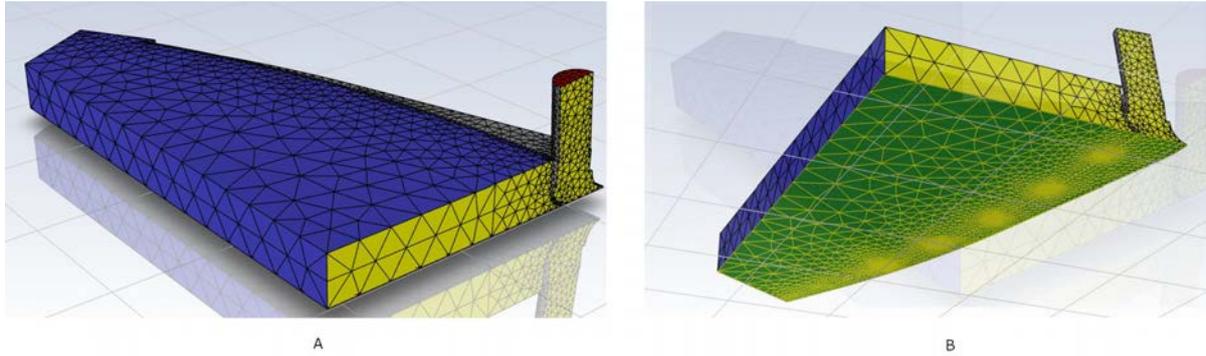


Figura 36: Viste isometriche del volume di controllo discretizzato: la superficie blu, che indicheremo come *pressure-inlet*, rappresenta la superficie esterna del volume di controllo, in condizioni standard di pressione e temperatura, mentre la superficie rossa, che denoteremo come *pressure-outlet*, è la sezione di ingresso nel tubo di aspirazione, alla depressione misurata in seguito a prove sperimentali; la superficie verde, che verrà qui chiamata *floor*, è la parte del volume di controllo a contatto con il pavimento, mentre la superficie gialla è il piano di simmetria, qui detto *symmetry*. Le zone a contatto con il tergipavimento sono rappresentate in grigio. Si noti la dimensione maggiore degli elementi sulle facce piatte del volume di controllo, in particolare in figura A, e il raffinamento in prossimità delle interfacce, in particolare attorno ai fori d'ingresso nella parte bassa della gomma anteriore del tergipavimento, in figura B.

## 7.2 Modello del fluido

Il fluido considerato per le simulazioni è aria, modellizzata come un gas ideale, con le seguenti proprietà[21]:

- densità  $\rho$  variabile secondo la legge dei gas perfetti  $p = \rho RT$ ;
- $R = 287$  è la costante specifica dell'aria considerata come gas ideale biatomico;
- $c_p = 1004.5$  il calore specifico a pressione costante;
- $\lambda = 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  la conducibilità termica;
- $\mu = 1.86 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$  la viscosità dinamica.

La simulazione è stata eseguita considerando una temperatura esterna  $T = 300 \text{ K}$ , per cui si ottengono i valori di  $c_p$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$  sopra elencati.

## 7.3 Modello numerico

Per la soluzione è stato utilizzato un metodo *SST* (*Shear Stress Transport*)  $k - \omega$ , basato sulle equazioni *RANS* (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*). Queste sono una versione delle equazioni di Navier-Stokes trasformate tramite la *media di Reynolds*, ovvero mediate su un ensemble

di realizzazioni di uno stesso esperimento (reale o numerico), a partire dalle stesse condizioni iniziali macroscopiche, che permettono di trascurare le strutture turbolente instabili, nonché la non stazionarietà e rottura di simmetria tipiche del moto turbolento pienamente sviluppato. In particolare, con il modello di gas ideale compressibile da noi utilizzato, oltre a una media di Reynolds delle grandezze fisiche rappresentate nel modello, queste vengono anche pesate in base alla densità – un’operazione chiamata *media di Favre*[22].

Le equazioni così ottenute necessitano di una chiusura tramite la formulazione di un modello di *eddy viscosity*, che introduce una viscosità efficace derivante dagli effetti turbolenti di correlazione tra le fluttuazioni di velocità in direzioni differenti [23]. Il metodo *SST* combina due metodi molto utilizzati, ovvero il modello  $k - \omega$ , più affidabile nell’intorno delle interfacce, e il modello  $k - \varepsilon$ , meno sensibile alle proprietà turbolente al contorno [24]. I parametri del modello  $k - \omega$ , con parametri  $\alpha_\infty^* = 1$ ,  $\alpha_\infty = 0.52$ ,  $\beta_\infty^* = 0.09$ ,  $a_1 = 0.31$ ,  $\beta_i = 0.075$ , come appaiono nelle equazioni per l’energia cinetica turbolenta  $k$  e il tasso di dissipazione viscosa specifico  $\omega$  del modello considerato:

$$\begin{cases} \frac{Dk}{Dt} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \\ \frac{D\omega}{Dt} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, \end{cases}$$

dove  $S$  è il modulo del tasso di deformazione medio,  $P_k$  è il termine di produzione di energia cinetica turbolenta,  $\nu_T$  è la *eddy viscosity*. Queste quantità sono rappresentate nel programma da delle funzioni predefinite corrispondenti al modello usato, così come la funzione  $F_1$  che definisce la transizione tra i modelli  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$  a seconda delle condizioni locali. Ai restanti parametri dell’equazione non dichiarati esplicitamente in questa sezione sono assegnati valori predefiniti da parte del programma.

## 7.4 Condizioni al contorno

Sono state imposte delle condizioni al contorno di pressione, con il vincolo di conservazione della portata attraverso la sezione di imbocco del tubo di aspirazione. Per calibrare il modello, si sono eseguite delle misure di depressione con l’aspiratore descritto in 4.1.6, per verificare l’accordo tra i valori nominali ed effettivi di depressione e portata. Per eseguire le misure è stato utilizzato un vacuometro capacitivo con precisione di 0.1 kPa, con una sonda formata da un raccordo cilindrico compatibile con il tubo di aspirazione. Le misure sono state eseguite a macchina operante, in corrispondenza della sezione d’imbocco dal tergilavaggio al tubo di aspirazione, e alla sezione di ingresso dell’aspiratore: in corrispondenza di quest’ultima si è eseguita un’ulteriore misura tappando il foro d’ingresso e misurando la depressione totale.

I valori misurati per il tergilavaggio indicato con la sigla A.4 nella sezione 4.1.5 sono i seguenti:

- depressione alla sezione tra il tergilavaggio e tubo di aspirazione:  $\Delta P_t = -2.6$  kPa;
- depressione alla sezione d’ingresso dell’aspiratore (aperto):  $\Delta P_a = -7.1$  kPa;

- depressione totale all'aspiratore (chiuso):  $\Delta P_{tot} = -18.0$  kPa.

Il valore rilevato di  $\Delta P_{tot}$  risulta inferiore al valore nominale fornito in Tabella 2, essendo più basso del 2.7%. Considerando questa riduzione, nell'ipotesi che questa riduzione sia identica per tutte le pressioni, estrapolando linearmente dai valori di portata si trova che il valore misurato di  $\Delta P_a$  corrisponde a una portata d'aria pari a  $Q_4 = 20.6$  l/s, con una superficie totale dell'orifizio d'ingresso uguale all'area di un cerchio di diametro  $\varnothing_4 = 20$  mm.

Il valore misurato di  $\Delta P_t$  per il tergilpavimento B.4 risulta uguale a quello corrispondente alla misura ottenuta per A.4, e si applicheranno quindi per entrambi i tergilpavimento le medesime condizioni al contorno.

I valori misurati per il tergilpavimento indicato con la sigla A.3 nella sezione 4.1.5 sono:

- $\Delta P_t = -2.3$  kPa
- $\Delta P_a = -10.0$  kPa
- $\Delta P_{tot} = -18.1$  kPa

Il valore di  $\Delta P_a$  ottenuto in questo caso corrisponde a una portata d'aria  $Q_3 = 13.9$  l/s, e un orifizio di diametro  $\varnothing_3 = 15$  mm.

Il valore misurato di  $\Delta P_t$  per il tergilpavimento B.3 corrisponde a quello ottenuto per A.3, e quindi si applicano le stesse condizioni al contorno.

In corrispondenza della sezione *pressure-outlet* si imporrà dunque una pressione relativa uguale a  $\Delta P_t = -2.6$  kPa per A.4 e B.4, con il vincolo di mantenere la portata di massa pari a  $\dot{m}_4 = 2.52 \cdot 10^{-2}$  kg/s, e  $\Delta P_t = -2.3$  kPa per A.3 e B.3, con una portata di massa  $\dot{m}_3 = 1.70 \cdot 10^{-2}$  kg/s, dove le portate di massa sono state ricavate a partire dalle rispettive portate volumetriche, considerando una densità media dell'aria  $\rho = 1.225$  kg/m<sup>3</sup>.

Si osserva a questo proposito che con la portata di massa considerata, e considerando un raggio idraulico del tergilpavimento  $R_h \simeq 20$  mm, si ottiene un numero di Reynolds

$$Re = \frac{\dot{m}}{\pi R_h \mu} = \frac{4.252 \cdot 10^{-2}}{\pi 2 \cdot 10^{-2} \cdot 1.81 \cdot 10^{-5}} = 3.74 \cdot 10^4,$$

ampiamente compatibile con un moto turbolento, come correttamente assunto nella descrizione dei risultati delle prove sperimentali.

Si è dunque imposta la pressione atmosferica sulla superficie esterna *pressure-inlet*, ovvero una pressione relativa nulla.

Per quanto riguarda il pavimento, si è considerata una rugosità omogenea della superficie con altezza pari a 0.1 mm, imponendo una condizione di *no-slip*. Si è tenuto conto del moto relativo della macchina rispetto al pavimento alla velocità  $v = 0.46$  m/s misurata durante le prove, imponendo quest'ultima come velocità relativa della superficie del pavimento. Si osserva tuttavia che le dinamiche macroscopiche e le variabili dinamiche osservate al termine della simulazione non sono influenzate significativamente da questa condizione di moto relativo. Si presenteranno quindi i risultati corrispondenti a una condizione statica ( $v = 0$  m/s), per maggior chiarezza di visualizzazione; imponendo il moto relativo si osservano infatti delle linee

di corrente a velocità molto basse ( $v \leq 1$  m/s) tangenti alla superficie del pavimento, che ostacolano la visuale in direzione di strutture più significative.

L'interfaccia tra il fluido e le parti solide è stata considerata perfettamente liscia, con condizioni *no-slip*. Si è inoltre imposta la condizione di impedire il reflusso attraverso le sezioni di ingresso e di uscita, necessaria per garantire la continuità di massa e la convergenza della simulazione.

In tutte queste regioni è stata assunta una temperatura  $T = 300$  K.

## 7.5 Inizializzazione e risoluzione del modello

Il software opera su un Laptop con processore *Intel Core i7-770HQ CPU* con 4 core e un totale di 8 *thread* virtuali. Si sono assegnati 4 *thread* al risolutore e la *GPU* della scheda video *Nvidia GeForce MX150*, con metodo *ms-mpi*. L'inizializzazione è stata eseguita con metodo ibrido, che esegue una interpolazione dei valori al contorno tramite soluzione alle interfacce dell'equazione di Laplace per velocità e pressione. Si è utilizzato un fattore di rilassamento 0.5, operando l'algoritmo per 60 iterazioni, in modo da portarlo a convergenza. La soluzione è stata impostata con uno schema accoppiato di pressione e velocità, con discretizzazione di pressione, densità, quantità di moto ed energia al secondo ordine, e al primo ordine per quanto riguarda l'energia cinetica turbolenta  $k$  e il tasso di dissipazione specifico  $\omega$ .

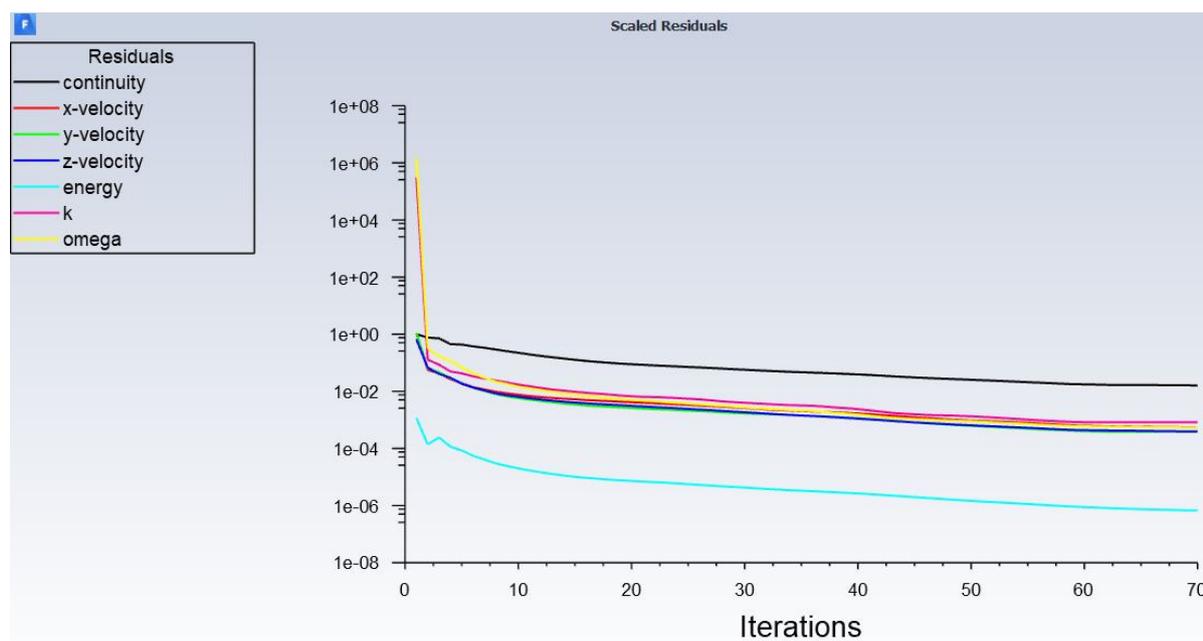


Figura 37: Andamento dell'ampiezza delle fluttuazioni delle grandezze principali. Si osserva che la convergenza è raggiunta dopo 70 iterazioni.

L'algoritmo di risoluzione è stato operato per 70 iterazioni, fino al raggiungimento della convergenza delle grandezze di controllo (vedi Fig. 37), senza significative differenze nella velocità di convergenza per i diversi modelli di tergipavimento.

## 7.6 Elaborazione dei risultati

Per ogni tipo di tergipavimento studiato, si sono elaborate le mappe di pressione e velocità: per quest'ultima si sono considerati gli andamenti delle linee di corrente e la distribuzione dei moduli delle velocità all'interno del tergipavimento. Si sono osservate in generale le seguenti strutture di flusso:

- getti dai fori d'ingresso della gomma anteriore del tergipavimento, con flusso ad alta velocità;
- getto laterale, caratterizzato anch'esso da velocità elevate, attraverso la fessura laterale tra la gomma anteriore e quella posteriore;
- tubi di flusso convogliati verso il centro a partire dai getti, interagenti tra loro, eventualmente producendo strutture vorticosi<sup>1</sup>;
- vortice centrale, sviluppato a partire dai getti in ingresso dai due fori in posizione più centrale, simmetrici rispetto all'asse di mezzzeria, e dai tubi di flusso convergenti verso questa zona centrale;
- flusso all'interno del tubo di aspirazione, a partire dalla zona vorticosi centrale.

Si presentano ora i risultati delle simulazioni per i diversi modelli di tergipavimento. Sono state tracciate 10000 linee di corrente che terminano sulla sezione di uscita dall'imbocco cilindrico del tergipavimento, e altrettante che partono dalle superfici del volume di controllo in condizioni atmosferiche. Le pressioni rilevate si riferiscono a misure a quota di 1 mm dal livello del pavimento, salvo diversa indicazione.

---

<sup>1</sup>Si parla di tubo di flusso riferendosi alle velocità sottoposte a media di Reynolds – più precisamente, a media di Favre. Per moti turbolenti, infatti, non è in generale possibile definire linee di corrente lisce, e, di conseguenza, nemmeno tubi di flusso

### 7.6.1 Tergipavimento A.4

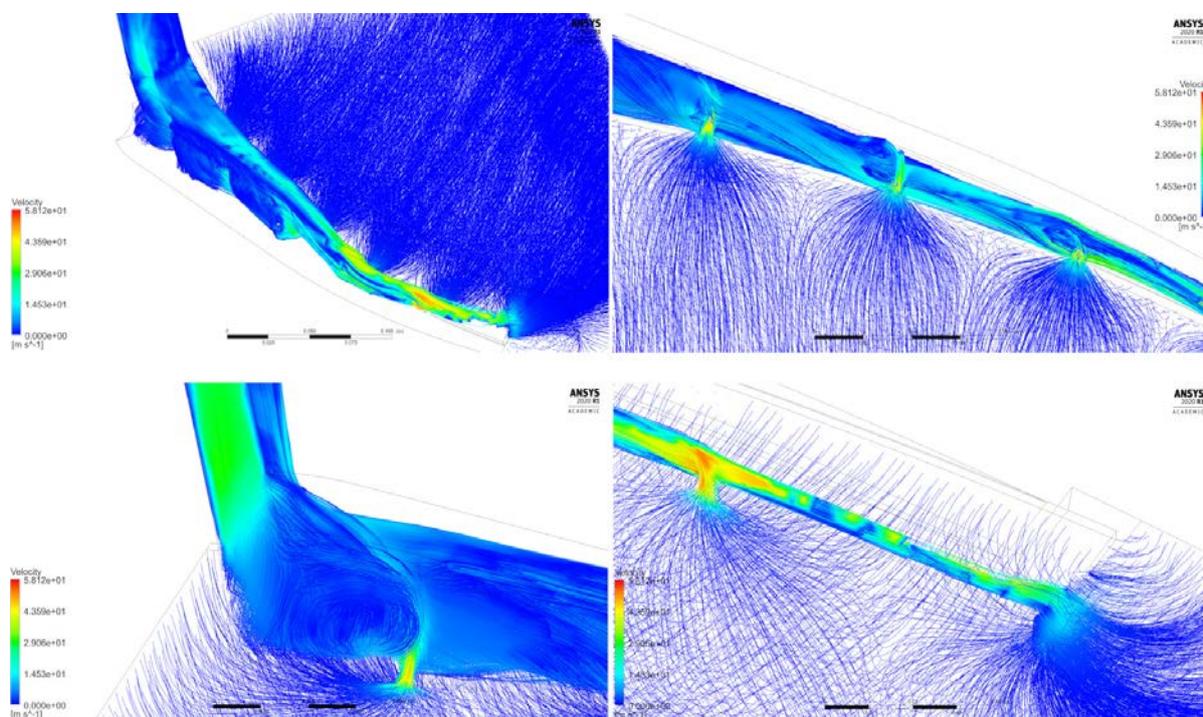


Figura 38: Linee di corrente nel tergipavimento A.4. In senso orario, partendo da in alto a sinistra: vista dall'alto delle linee di corrente nel tergipavimento; getti in ingresso dai fori nella gomma anteriore; getti in ingresso dalla fessura laterale tra le due gomme e dal foro ad essa più vicino; vortice centrale e risalita verso il tubo di aspirazione, e getto in ingresso dal foro più vicino al piano mediano.

Nel tergipavimento qui indicato con la sigla A.4, le simulazioni producono risultati qualitativamente comparabili con la strutturazione del flusso osservata nelle prove sperimentali: si osserva un andamento generale delle linee di corrente dai lati verso il centro, come risulta chiaro dalla vista complessiva in Fig. 38. Il getto in ingresso dalla fessura laterale, subendo una repentina contrazione di sezione, si trova accelerato a velocità fino a punte di circa 58 m/s. Tale getto laterale interagisce subito con i getti entranti dai fori, deviandoli verso il centro del tergipavimento, coerentemente con quanto osservato empiricamente, e generando delle strutture vorticosi nella parte del foro più vicina alla parte centrale del tergipavimento. Queste strutture di ricircolo locale danno una spiegazione alla formazione di sacche di acqua ristagnante a ridosso dei fori; si nota inoltre che in queste zone di ricircolo si hanno delle velocità medie contenute, il che è confermato dall'osservazione che queste sacche di acqua non mostrano un significativo moto interno, al di là di un'increspatura della superficie – compatibile con velocità locali di circa 5 m/s rilevate a 1 mm dal livello del pavimento.

Si ritiene che il movimento di convogliamento nel tubo di aspirazione sia guidato principalmente dal moto verso la parte alta della camera di aspirazione dei tubi di flusso, e dal vortice centrale osservato tra il foro più vicino al tubo e il piano di simmetria. Si nota che il foro aiuta a strutturare il vortice centrale, delimitando la zona in cui le velocità deviano piuttosto rapidamente verso l'alto in un movimento a spirale.

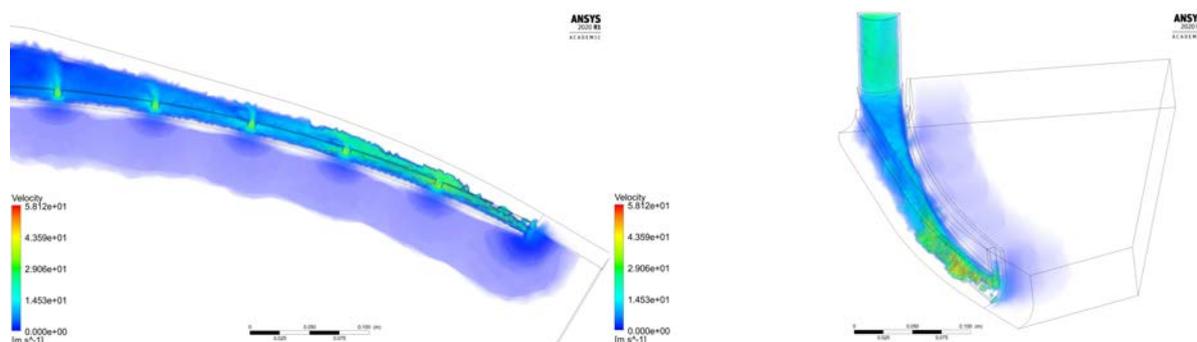


Figura 39: Mappa volumetrica del modulo delle velocità: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assonometrica.

La mappa di densità dei moduli delle velocità di Figura 39 fornisce ulteriori chiarimenti riguardo l'influenza delle grandezze dinamiche del sistema sulla distribuzione di acqua. Si nota infatti una riduzione repentina di velocità avvicinandosi alla gomma posteriore, nei pressi della quale non si osservano linee di corrente. Questa zona costituisce dunque una zona di ristagno, consistente con l'osservazione di acqua residua in corrispondenza del profilo della gomma posteriore.

Si nota anche una velocità sostenuta maggiore di 10 m/s in tutta la parte tubolare di raccordo con il tubo di aspirazione; questo corrobora l'assunzione che non ci sia reflusso di acqua da questa zona al pavimento al sollevamento del tergipavimento.

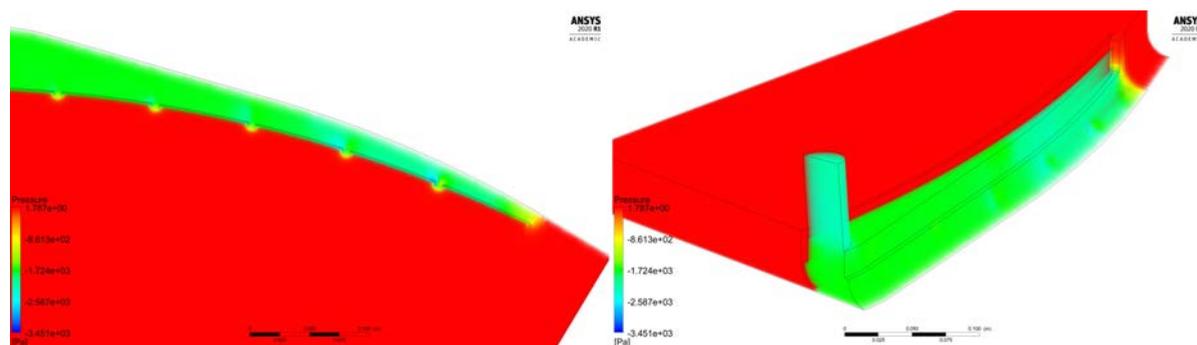


Figura 40: Distribuzione delle pressioni all'interno del tergipavimento: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assonometrica.

Dall'analisi delle pressioni riportata in Fig. 40 si notano zone di depressione a valle di ciascun foro in direzione del centro del tergipavimento: questo è ancora una volta coerente con la presenza di zone di ristagno in prossimità dei fori; le zone di sovrappressione presenti tra i fori danno conto delle zone asciutte che si osservano tra nelle zone tra i fori nella condizione finale (cfr. Fig. 26). Risulta inoltre che le aperture laterali, controintuitivamente, non producono un incremento di pressione e quindi una perdita della depressione necessaria all'aspirazione, ma anzi, provocano una depressione nella parte più laterale del tergipavimento, dovuto alla contrazione e conseguente accelerazione del flusso d'aria in ingresso. La variazione di pressione tra monte e valle di ciascun foro si attesta, con modeste variazioni, sul valore  $\Delta P = 0.6 \div 0.7$  kPa.

Complessivamente, si ottiene un dato per la pressione che varia da  $p_1 = -1.7$  kPa nella zona più esterna, a  $p_2 = -1.8$  kPa in un punto intermedio, fino a  $p_3 = -2.0$  kPa nella regione centrale.

### 7.6.2 Tergipavimento B.4

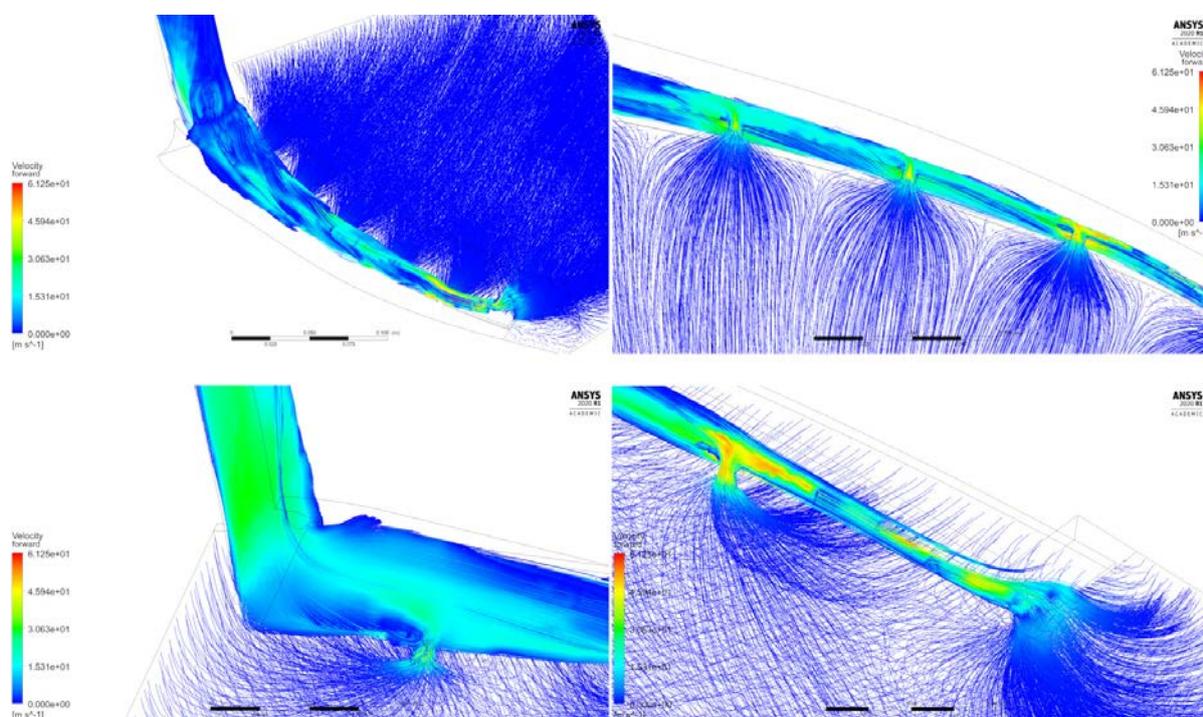


Figura 41: Linee di corrente nel tergipavimento B.4. In senso orario, partendo da in alto a sinistra: vista dall'alto delle linee di corrente nel tergipavimento; getti in ingresso dai fori nella gomma anteriore; getti in ingresso dalla fessura laterale tra le due gomme e dal foro ad essa più vicino; vortice centrale e risalita verso il tubo di aspirazione, e getto in ingresso dal foro più vicino al piano mediano.

Come si può vedere in Figura 41, la riduzione dell'altezza del tergipavimento non provoca un aumento rilevante della velocità massima nel sistema, che risulta pari a 61 m/s, contro i 58 m/s ottenuti per la variante A.4. Queste alte velocità si osservano anche in questo caso in corrispondenza del getto laterale, a valle del quale si assiste alla fusione con il getto entrante dal foro più laterale. Si noti come in generale in questo caso i vortici a valle dei fori siano meno estesi e con velocità maggiori, con l'eccezione del foro più vicino al tubo di aspirazione. In corrispondenza di quest'ultimo foro si osserva un vortice a valle del flusso dai lati al centro; in effetti, si possono vedere dei modesti accumuli di acqua in corrispondenza dei fori centrali in Fig. 28 (foto di destra). Questa struttura vorticoso è costituita in ogni caso da traiettorie che incrementano progressivamente la loro quota verticale, conducendo in definitiva l'acqua nel flusso centrale. Anche in questo caso si assiste a una deviazione dei getti entranti dai fori in direzione del centro del tergipavimento, consistente con le osservazioni sperimentali.

È interessante notare che in questa variante non si assiste alla formazione di un vortice centrale come quello che si sviluppa nel tergipavimento A.4: escludendo la struttura vorticoso a ridosso del foro centrale descritta sopra, il flusso nella regione centrale segue delle traiettorie lisce che procedono direttamente verso il piano di simmetria e qui curvano a gomito verso l'alto attraverso il tubo di aspirazione. In effetti, le prove sperimentali sul modello B.4 non mostrano due vortici controrotanti, ma un unico vortice, che non può essere rappresentato nella simulazione in conseguenza dell'imposizione di una simmetria rispetto al piano mediano.

Osserviamo lo sviluppo di un vortice nel tubo a valle del bordo d'ingresso: la formazione di questa contenuta zona di ricircolo potrebbe dare conto delle poche gocce d'acqua che ricadono sul vetro al sollevamento del tergipavimento.

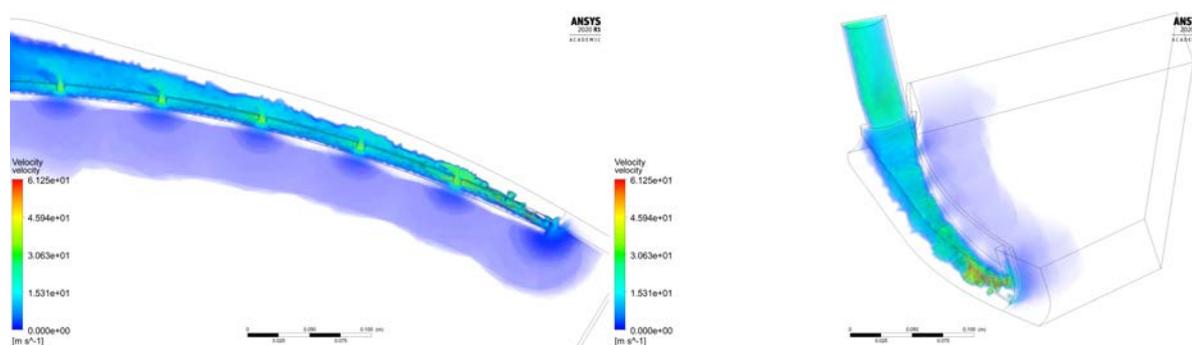


Figura 42: Mappa volumetrica del modulo delle velocità: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assonometrica.

Studiando la distribuzione volumetrica dei moduli delle velocità di Fig. 42, si rileva che le velocità nella regione centrale in prossimità del tubo di aspirazione sono mediamente più alte, con regioni a bassa velocità di minore estensione e concentrate maggiormente in prossimità della gomma posteriore. In effetti, questo dato è in accordo con le osservazioni relative alla Fig. 28, da cui risulta una condizione finale con una superficie ben asciugata nella parte centrale – diversamente da quanto accade per A.4, che in questa fase presenta una significativa quantità di acqua in questa regione, coerentemente con le velocità rilevate più modeste – ma una

distribuzione di acqua lungo il profilo della gomma posteriore comparabile con quella trovata in A.4.

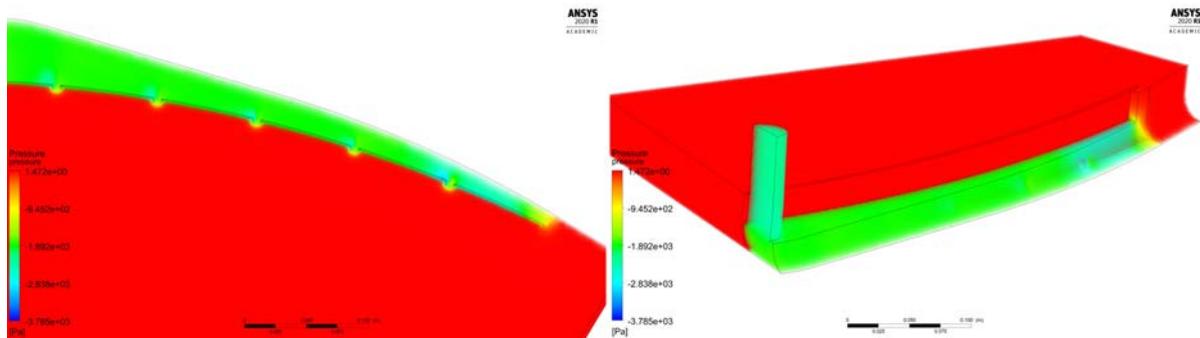


Figura 43: Distribuzione delle pressioni all'interno del tergipavimento: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assometrica.

Non risultano significativi cambiamenti qualitativi nella distribuzione delle pressioni (v. Fig. 43) rispetto al caso A.4. Quantitativamente, si segnala un incremento della depressione misurata in tutta la camera di aspirazione: in questo caso si passa da  $p_1 = -1.8$  kPa vicino all'apertura laterale, a  $p_2 = -1.9$  kPa nella regione intermedia, e  $p_3 = -2.4$  kPa nella parte centrale. La differenza di pressione tra la zona a monte e a valle dei fori è ora  $\Delta P = 0.4 \div 0.7$  kPa, con valori maggiori nei fori più periferici, e più ridotti nella parte centrale (a riprova della minor entità delle zone di ristagno a ridosso dei fori centrali trovata sperimentalmente).

### 7.6.3 Tergipavimento A.3

Nel caso della variante A.3, i risultati delle simulazioni, come si vede in Fig. 44, mostrano una generale diminuzione delle velocità in tutte le regioni. Si osserva in effetti una velocità massima di 46 m/s, significativamente minore a quella di circa 60 m/s osservata in A.4 e B.4. I tubi di flusso nella zona centrale risultano più allargati e con velocità basse anche al loro centro (valori compresi tra 3 ÷ 8 m/s). Le zone di ristagno e ricircolo a valle dei fori risultano in questo caso piuttosto accentuate, e le uniche zone ad alta velocità sono quelle del getto laterale e all'interno del tubo di aspirazione. Si rileva di nuovo la deviazione dei getti dai fori, in linea con quanto visto in Fig. 30. È significativa la bassa velocità in tutte le parti del vortice centrale che dovrebbe convogliare l'acqua nel tubo di aspirazione: l'efficacia di questo convogliamento risulta decisamente compromessa, come si nota dall'acqua residua in Fig. 30.

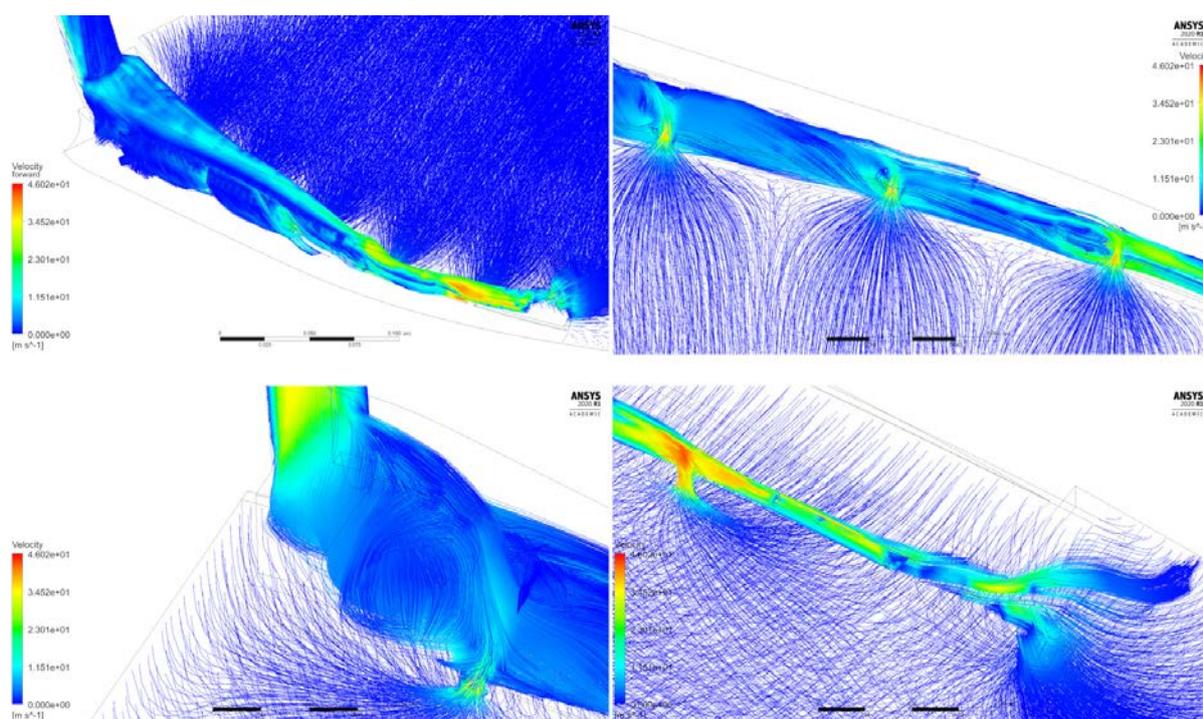


Figura 44: Linee di corrente nel terqipavimento A.3. In senso orario, partendo da in alto a sinistra: vista dall'alto delle linee di corrente nel terqipavimento; getti in ingresso dai fori nella gomma anteriore; getti in ingresso dalla fessura laterale tra le due gomme e dal foro ad essa più vicino; vortice centrale e risalita verso il tubo di aspirazione, e getto in ingresso dal foro più vicino al piano mediano.

A conferma di queste valutazioni, si considera la mappa volumetrica dei moduli delle velocità riportata in Fig. 45: la densità di linee di corrente risulta ridotta, con delle velocità basse specialmente nella zona centrale. Il convogliamento dell'acqua in questa regione è favorito dalla presenza di velocità maggiori dei getti laterali, ma da qui non si riesce a trasportare efficacemente l'acqua nel tubo di aspirazione. Si puntualizza che, sebbene l'immagine in falsi colori ricordi da vicino quella vista per A.4, si deve tenere conto della diversa scala delle velocità, che risultano qui in ogni caso significativamente minori.

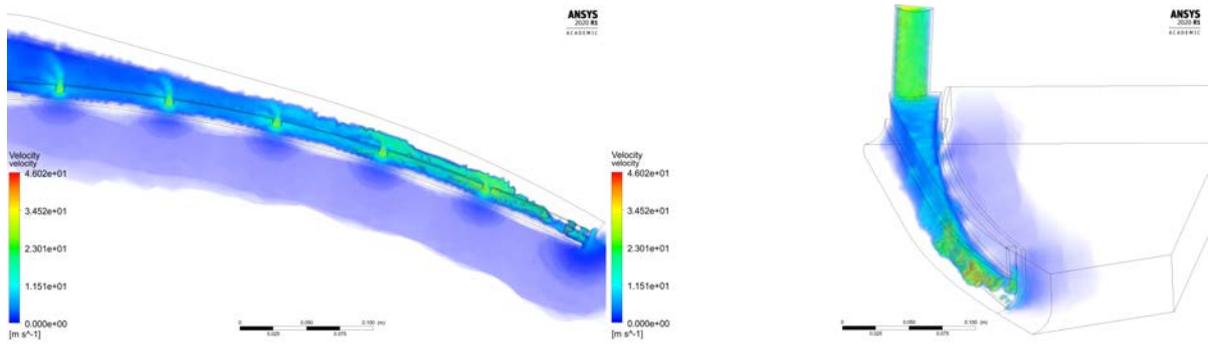


Figura 45: Mappa volumetrica del modulo delle velocità: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assometrica.

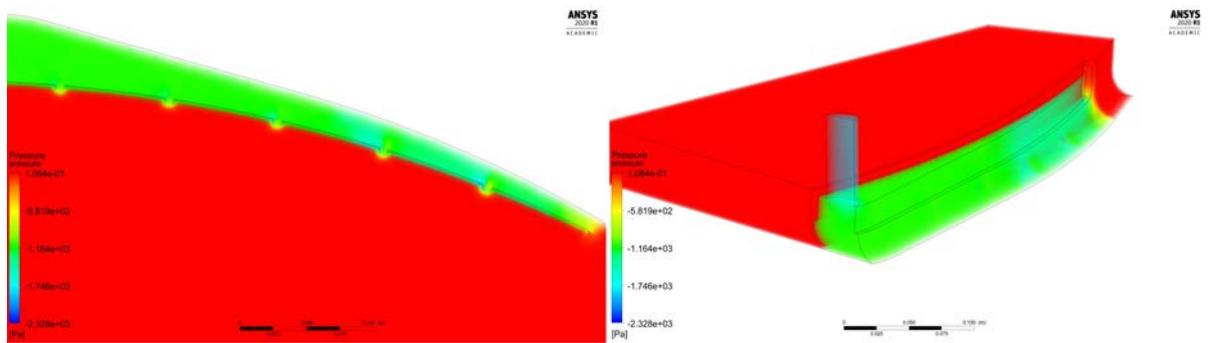


Figura 46: Distribuzione delle pressioni all'interno del tergilavaggio: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assometrica.

La mappa volumetrica delle pressioni di Fig. 46 mostra una spiccata riduzione della depressione su tutta la lunghezza del tergilavaggio: si misura una pressione  $p_1 = -1.1$  kPa nella zona più periferica, seguita da  $p = -1.2$  kPa nella regione intermedia, e nella regione centrale il modesto valore  $p_3 = -1.2$  kPa. Non risulta dunque un gradiente di pressione lungo la superficie da asciugare, tale da poter guidare un flusso di aria sufficiente a trasportare l'acqua verso il tubo di aspirazione. Ne rappresenta una palese conferma la drammatica consistenza della quantità di acqua rilasciata sul pavimento al sollevamento del sistema di aspirazione (cfr. Fig. 30). A tal proposito, si segnala che la chiusura delle fessure laterali produce risultati migliori, come risulta da Fig. 31: una chiara conseguenza della maggiore depressione così prodotta nel tergilavaggio, che aumenta quindi la propria efficacia del processo di asciugatura, quantunque questo risulti comunque molto lento.

### 7.6.4 Tergipavimento B.3

Anche nel tergilavaggio B.3 si osserva un calo delle velocità comparabile con quello osservato in A.3. Come si evince dalla Figura 47, la velocità massima raggiunta dall'aria in questa geometria è di circa 50 m/s. Questo dato massimo si osserva in corrispondenza del getto laterale e del getto in ingresso dal foro più vicino all'apertura laterale del tergilavaggio. Nella zona periferica si osserva in effetti un tubo di flusso piuttosto denso e ad alta velocità, che va poi ad espandersi interagendo con i getti dei fori, definendo zone con velocità medie diverse a valle di ciascun foro incontrato, dopo aver deviato il getto in ingresso di ciascun foro come negli altri tergilavaggio. Si notano per altro dei vortici a valle di tutti i fori (ad eccezione di quello più periferico) molto più sviluppati di quanto visto nelle altre varianti. Questo combacia con la presenza di notevoli zone di ristagno di acqua in corrispondenza di quasi tutti i fori in Fig. 32.

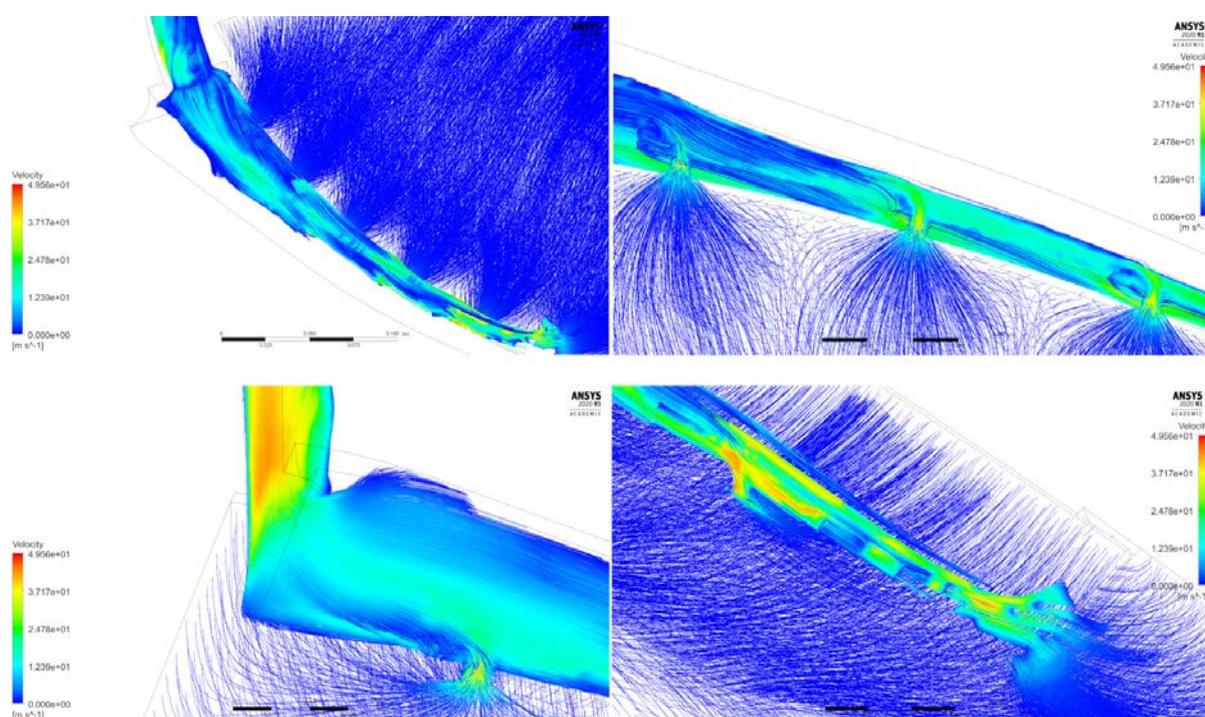


Figura 47: Linee di corrente nel tergilavaggio B.3. In senso orario, partendo da in alto a sinistra: vista dall'alto delle linee di corrente nel tergilavaggio; getti in ingresso dai fori nella gomma anteriore; getti in ingresso dalla fessura laterale tra le due gomme e dal foro ad essa più vicino; vortice centrale e risalita verso il tubo di aspirazione, e getto in ingresso dal foro più vicino al piano mediano.

Come nell'altro tergilavaggio basso, B.4, è assente la struttura vorticoso centrale che nel modello A.4 contribuisce alla risalita del flusso verso il tubo di aspirazione, per le medesime ragioni spiegate nel paragrafo relativo al tergilavaggio B.4, con riferimento alla rottura della simmetria rispetto al piano mediano. Si nota una deviazione delle linee di corrente all'ingresso

del tubo, ma non un rallentamento e la formazione di un vortice come in B.4. In effetti ciò è coerente con il fatto che l'acqua residua al sollevamento del tergipavimento non è maggiore della quantità di acqua presente nella condizione finale in Fig. 32.

In Fig. 48 si può vedere la mappa volumetrica delle velocità (in modulo) nel volume di controllo. Si nota una concentrazione delle linee di corrente in una regione addossata alla gomma anteriore, lasciando praticamente immobile l'aria in prossimità della gomma posteriore. Questa è in effetti la zona in cui si trova la maggior concentrazione di acqua, particolarmente nella parte più centrale, dove le velocità vanno a diminuire all'approssimarsi del piano mediano del tergipavimento – questa è in effetti la zona in cui si accumula più acqua, come visto dalle riprese in Fig. 32.

La distribuzione delle pressioni riportata in Fig. 49 mostra una significativa riduzione della depressione nel tergipavimento: si ha un valore periferico  $p_1 = -1.5$  kPa nella zona a pressione ridotta in corrispondenza del getto laterale accelerato, e uno stesso valore  $p_2 = p_3 = -1.3$  kPa nelle parti centrali e intermedie.

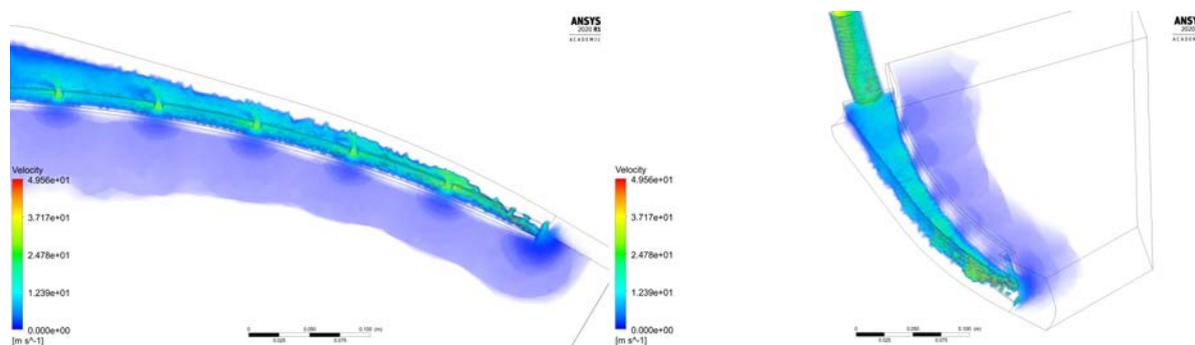


Figura 48: Mappa volumetrica del modulo delle velocità: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assonometrica.

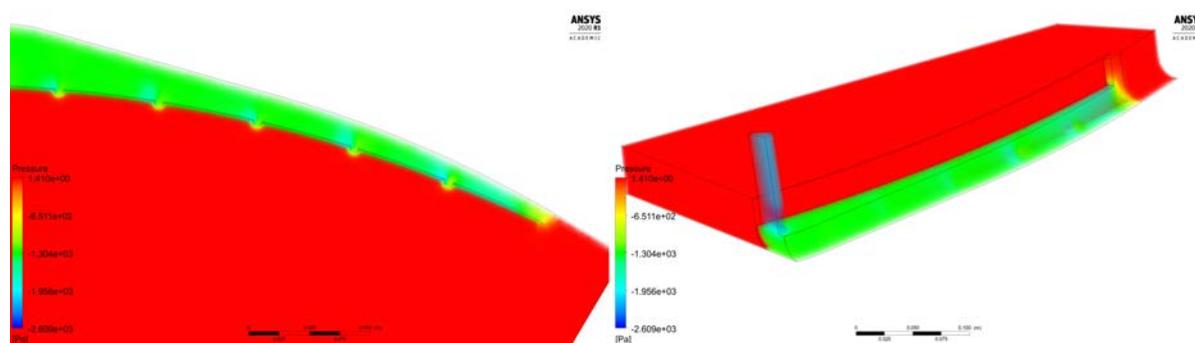


Figura 49: Distribuzione delle pressioni all'interno del tergipavimento: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assonometrica.

### 7.6.5 Tergipavimento C.4

Il modello di tergilavaggio curvo mostra in Fig. 50 delle velocità maggiori, con dei tubi di flusso a spirale che procedono dai getti dei fori d'ingresso verso il tubo di aspirazione. È significativa la sostanziale assenza del getto laterale, in conseguenza di un'area della sezione dell'apertura laterale molto ridotta. Si osservano inoltre delle velocità notevolmente più elevate in corrispondenza dei getti dei fori, che arrivano fino a 79 m/s. Si conferma l'andamento approssimativamente rettilineo di tali getti, come visibile in Fig. 34; l'assenza di deviazione, dovuta anche alla mancanza dei getti laterali, permette ai getti di avvicinarsi molto di più alla gomma posteriore. Si nota comunque che nelle zone tra due fori le velocità sono molto basse ( $2 \div 4$  m/s) in vicinanza del pavimento, pur avendo valori più sostenuti ( $\sim 10 \div 15$  m/s) al centro del tubo di flusso.

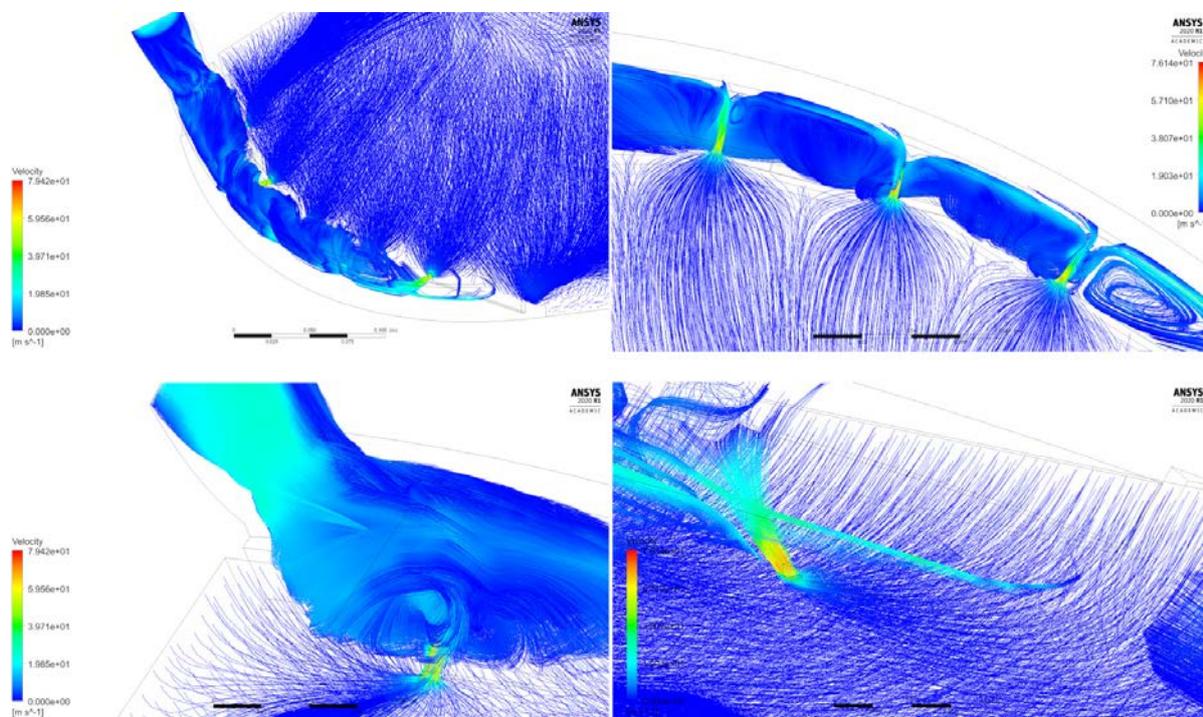


Figura 50: Linee di corrente nel tergilavaggio C.4. In senso orario, partendo da in alto a sinistra: vista dall'alto delle linee di corrente nel tergilavaggio; getti in ingresso dai fori nella gomma anteriore; getti in ingresso dalla fessura laterale tra le due gomme e dal foro ad essa più vicino; vortice centrale e risalita verso il tubo di aspirazione, e getto in ingresso dal foro più vicino al piano mediano.

Dallo studio della distribuzione dei moduli delle velocità di Fig. 51 si conferma l'approssimarsi delle linee di corrente alla gomma posteriore, con la conseguenza che l'asciugatura in tale zona è decisamente migliore di quella osservata negli altri modelli di tergilavaggio testati (cfr. immagine in basso in Figura 34). Le velocità molto ridotte nelle zone intermedie tra i

getti, però, determinano delle zone da cui l'acqua non viene trasportata efficacemente verso la zona centrale e quindi verso il tubo di aspirazione, come attestano le numerose parti bagnate all'interno della camera di aspirazione nella condizione finale di Fig. 34.

La mappa delle pressioni di Fig. 52 non mostra particolari rilevanti; si nota la mancanza dei pronunciati gradienti di pressione tra la parte a monte e a valle dei fori che erano presenti negli altri modelli di tergilpavimento studiati: sebbene ci sia una variazione di pressione, questa si attesta su valori comunque minori di 0.1 kPa. Si osserva invece che la depressione rimane sostenuta, ma mostra un lieve calo procedendo dalla periferia verso il centro: riportiamo, partendo dalla parte più laterale e procedendo verso il centro, i valori  $p_1 = -3.8$  kPa,  $p_2 = -3.7$  kPa e  $p_3 = -3.6$  kPa. La depressione risulta molto più pronunciata che negli altri casi, e in effetti nelle prove sperimentali produce un effetto di aderenza del tergilpavimento al pavimento molto maggiore. D'altra parte, i valori sono coerenti con la condizione al contorno (ottenuta da misurazioni dirette, come spiegato al paragrafo 7.4) che impone  $\Delta P_t = -4.1$  kPa come depressione alla sezione d'imbocco del tubo di aspirazione.

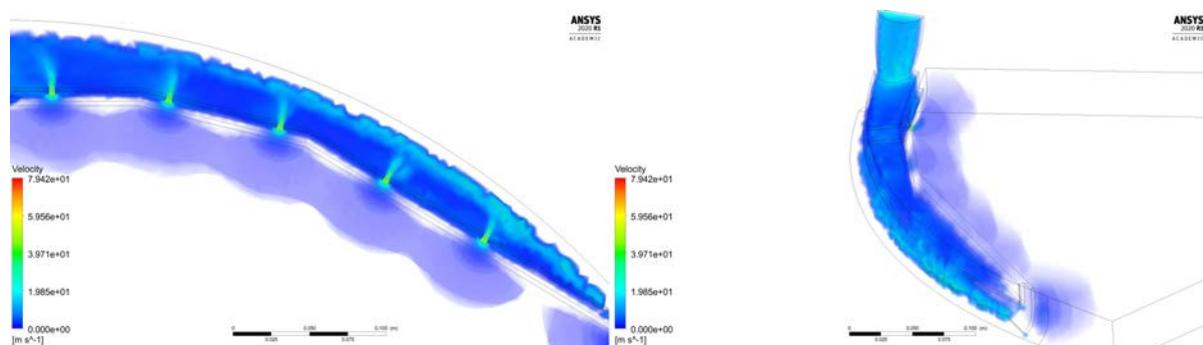


Figura 51: Mappa volumetrica del modulo delle velocità: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assonometrica.

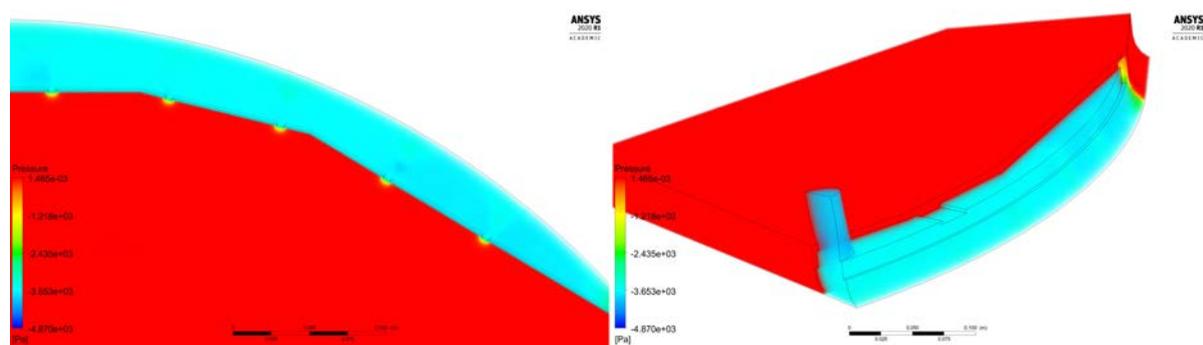


Figura 52: Distribuzione delle pressioni all'interno del tergilpavimento: a sinistra la vista dal basso, a destra una vista complessiva assonometrica.

## 8 Conclusioni e prospettive

In questo lavoro di tesi si è realizzata un'apparecchiatura per poter filmare il flusso d'acqua in ingresso nel tergipavimento di una macchina lavasciuga pavimenti attraverso una pista di vetro. L'attrezzatura è stata progettata e montata in modo da essere adatta al montaggio di diversi tipi di tergipavimento, di larghezza fino a 1 m, e permette, tramite un braccio di collegamento, il movimento solidale del sistema di acquisizione. Questo apparato ha permesso di caratterizzare la strutturazione dei flussi di acqua all'interno del tergipavimento durante le varie fasi del processo di aspirazione, permettendo di stimare la durata di queste fasi e di ottenere informazioni che non sarebbero state accessibili dalla sola osservazione dell'acqua residua sul pavimento alla fine dell'operazione di asciugatura. Si è potuto, in particolare, ottenere informazioni dirette sulla configurazione dei getti in ingresso dai fori presenti sulla gomma anteriore, e sulla loro relazione con i flussi d'acqua a ridosso della gomma posteriore; inoltre, si è potuta confrontare la quantità di acqua presente nella camera di aspirazione nella condizione finale del processo di asciugatura con quella lasciata sul pavimento al sollevamento del tergipavimento.

Parallelamente alle prove sperimentali, si è costruito un modello geometrico del tergipavimento da processare tramite un software di simulazioni fluidodinamiche, applicando un modello di flusso monofase della sola aria attraverso il sistema, da confrontarsi con le dinamiche filmate direttamente. Tramite i filmati ottenuti dalle prove sperimentali, si sono potuti confermare i risultati degli esperimenti numerici, che risultano compatibili con le dinamiche reali, avendo imposto come condizioni al contorno i valori di pressione e portata ottenuti da misure dirette. Questo risultato ha consentito da un lato di arricchire la descrizione dei campi di velocità e pressione all'interno del tergipavimento e del loro effetto sulla distribuzione dell'acqua e della sua aspirazione, ma ha permesso anche di validare un modello numerico per le geometrie e i regimi di interesse in questo campo. Tale modello potrà essere usato, in prospettiva, per l'eventuale riprogettazione di un tergipavimento, con un'indagine delle sue prestazioni tramite simulazioni fluidodinamiche, metodo molto più economico e rapido rispetto al modo classico di procedere, basato sull'iterazione della sequenza costituita dalla progettazione di un prototipo, la sua realizzazione, il test sul prototipo e quindi il ritorno alla fase di progettazione in base ai dati sperimentali ottenuti dal test.

Sintetizzando i risultati degli studi eseguiti, le principali informazioni ottenute sono le seguenti:

- La presenza di velocità maggiori in prossimità del pavimento indica zone dove l'asciugatura è più efficace. In particolare, si è osservato nel tergipavimento a camera alta (contrassegnati dalla lettera A) una velocità minore specialmente nella regione centrale, dove si trova la maggiore quantità di acqua residua al termine del processo di asciugatura.
- Nei tergipavimento a raggio di curvatura variabile (indicati con le lettere A e B), i getti dai fori in ingresso subiscono una deviazione pronunciata in direzione della zona centrale sottostante al tubo di aspirazione. Questo non avviene nel tergipavimento curvo (C.4), e si ritiene che questo fattore sia responsabile della migliore asciugatura presentata da questo modello in prossimità della gomma posteriore, poiché le traiettorie approssimativamente rettilinee dei getti colpiscono direttamente il bordo della gomma, senza venire

deviati. Si ritiene che questo diverso comportamento dipenda dal maggiore spazio presente tra la gomma anteriore e posteriore nel modello a raggio di curvatura costante. Si tenderebbe a escludere che ciò possa dipendere dalla sostanziale assenza di un getto laterale in questo modello, perché le prove eseguite chiudendo le fessure laterali degli altri tergipavimento non hanno dato come risultato una migliore asciugatura in prossimità della gomma posteriore.

- Un tubo di aspirazione con diametro minore *non* migliora la qualità dell'aspirazione. Si osserva anzi in questo caso una minore velocità del flusso d'aria in prossimità del pavimento, che impedisce un'efficace trasferimento dell'acqua verso la parte centrale, e da questa al tubo di aspirazione. La maggiore contrazione del flusso nel caso di un tubo più stretto, inoltre, produce un'importante perdita di carico al passaggio dalla camera di aspirazione al tubo, riducendo notevolmente la depressione nel tergipavimento. L'effetto desiderato di aumento delle velocità non è raggiunto; al contrario, con tubi di diametro più piccolo si assiste a una diminuzione delle velocità dei flussi all'interno della camera di aspirazione.
- La posizione dei fori determina la presenza di eventuali zone di ristagno addossate alla gomma anteriore, e la forma assunta della parte centrale del flusso. Dallo studio dei risultati ottenuti, sembra ragionevole considerare l'opzione di cambiare le posizioni dei fori, in modo da ridurre i gradienti di pressione tra la regione a monte e a valle dei getti in ingresso, e per influenzare il flusso nella regione centrale in modo da ottimizzare il convogliamento dell'acqua nel tubo di aspirazione.

I risultati così ottenuti consentono di scartare le soluzioni con il tubo di aspirazione di diametro ridotto A.3 e B.3. Confrontando i tergipavimento A.4 e B.4, risulta chiaramente preferibile quest'ultimo, privilegiando quindi le soluzioni a camera bassa – scelta corroborata anche dal confronto tra A.3 e B.3, che mostra un notevole miglioramento dell'asciugatura nel caso del secondo. Rimane interessante il confronto tra il tergipavimento B.4 e C.4: se il primo fornisce una migliore asciugatura nella parte centrale, grazie a velocità medie del flusso d'aria più sostenute, nel secondo si assiste a una migliore prestazione per quanto riguarda l'asciugatura della parte adiacente al bordo della gomma posteriore a contatto col pavimento. Per combinare queste due caratteristiche, si potrebbe valutare lo studio di un tergipavimento a curvatura costante ma a camera bassa, con il tubo di aspirazione di 40 mm di diametro. Questo potrebbe forse consentire una migliore asciugatura in tutte le regioni della porzione di pavimento delimitata dalla camera di aspirazione. In alternativa, o in aggiunta, si potrebbe considerare una diversa forma della chiusura anteriore della camera di aspirazione, sostituendo la lamiera piegata con una calandrata. Infine, si potrebbe considerare la possibilità di modificare la geometria del tergipavimento B.4, allontanando la parete posteriore da quella anteriore per permettere ai getti in ingresso dai fori di raggiungere più agevolmente la regione a ridosso della gomma posteriore. Quest'ultima possibilità è forse preferibile, poiché questo modello non presenta il problema di discontinuità di asciugatura in corrispondenza delle fughe tra le piastrelle che invece si osserva nel modello C.4. Le prestazioni delle geometrie così ottenute si potranno quindi studiare a priori tramite studi numerici, deducendole in base ai criteri individuati a partire dalle proprietà dei campi di velocità e pressione dell'aria nel tergipavimento.

Un ulteriore sviluppo del modello numerico, che qui non è stato considerato, potrebbe considerare l'intero sistema di aspirazione, costituito dall'insieme del tubo di aspirazione e del tergipavimento. Non si è infatti ricavata la pressione alla sezione d'imbocco del tubo di aspirazione da studi numerici, ma da misure sperimentali. Uno studio di questo tipo dovrebbe tenere conto della lunghezza e della rugosità del tubo, generalmente un tubo in PVC spiralato. In prospettiva di un simile studio, si dovrebbe simulare anche l'intero tergipavimento, senza sfruttare la simmetria rispetto al piano mediano, e ciò potrebbe permettere di ottenere il vortice singolo osservato sperimentalmente nei tergipavimento a camera bassa.

Infine, ci si riserva per futuri studi la possibilità di simulare l'intero sistema bifase acqua-aria, il cui comportamento si è qui studiato deducendolo qualitativamente dalle caratteristiche del flusso monofase della sola componente aeriforme.

# Appendici

## A Misura dei tempi di lavoro e di aspirazione

A4	H1	H3	H5	H7	bordi chiusi	
T0		6	13	12	13	7
T1		32	33	30	32	30
T2		152	120	105	120	150
$\Delta T1$		26	20	18	19	23
$\Delta T2$		120	87	75	88	120
NOTA: RESTA DELL'ACQUA SU TUTTA LA LUNGHEZZA						

A3	H1	H3	H5	H7	bordi chiusi	
T0		21	16	17	20	11
T1		40	34	38	38	31
T2		116	150	126	116	218
$\Delta T1$		19	18	21	18	20
$\Delta T2$		76	116	88	78	187
NOTA: RESTA MOLTO BAGNATO IN TUTTI I CASI						

B4	H1	H3	H5	H7	bordi chiusi	
T0		16	12	10	13	22
T1		35	31	29	32	45
T2		60	57	58	70	107
$\Delta T1$		19	19	19	19	23
$\Delta T2$		25	26	29	38	62

B3	H1	H3	H5	H7	bordi chiusi	
T0		13	15	18	18	14
T1		30	31	38	34	34
T2		90	135	100	95	69
$\Delta T1$		17	16	20	16	20
$\Delta T2$		60	104	62	61	35

CURVO	H1	H3	H5	H7	
T0		12	11	11	13
T1		34	33	30	33
T2		90	78	72	69
$\Delta T1$		22	22	19	20
$\Delta T2$		56	45	42	36
NOTA: RESTA BAGNATO NELLA ZONA CENTRALE					



## Riferimenti bibliografici

- [1] L.Cheng, G. Ribatski, J. R. Thome, *Two-phase flow patterns and flow-pattern maps: fundamentals and applications*, Appl. Mech. Rev. 61 (2008) 50802;
- [2] G. F. Frederick, G. Yadigaroglu, *Zurich Lectures on Multiphase Flow - Introduction to Multiphase Flow*, Springer (2018);
- [3] M. Efstathios, C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, *Multiphase Flow Handbook, 2nd ed.*, CRC Press (2016);
- [4] L. Cheng, *Frontiers and progress in multiphase flow I*, Springer (2014);
- [5] Hewitt, G. F., and D. N. Roberts, *Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous Xray and Flash Photography*, United Kingdom Atomic Energy Authority Report AERE-M 2159 (1969);
- [6] G. Costigan, P. B. Whalley, *Slug flow regime identification from dynamic void fraction measurements in vertical air-water flows*, Int. J. Multiph. Flow 23, 2 (1997) 263;
- [7] L. Friedel, *Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical twophase pipe flow*, European Two-Phase Flow Group Meeting, Paper E2, Ispra, Italy, 1979;
- [8] D. R. H. Beattie, *A note on the calculation of two-phase pressure losses*, Nucl. Eng. Des. 25 (1973) 395;
- [9] D. Chisholm, *Two-phase flow in bends*, Int. J. Multiph. Flow 6 (1979) 363;
- [10] A. Azzi, L. Friedel, S. Belaadi, *Two-phase gas/liquid flow pressure loss in bends*, Forsch. Ing. Wes. 65 (2000) 309;
- [11] K. H. Beij, *Pressure losses for fluid flow in 90° pipe bends*, J. Res. Natl. Bur. Stand. 21, 1 (1938) 1;
- [12] G. Vandin, *Studio del flusso bifase acqua-aria in un condotto di aspirazione per una macchina lavapavimenti*, Relazione per la prova finale (2019) Università di Padova;
- [13] B. Atzori, *Moderni metodi e procedimenti di calcolo nella progettazione meccanica*, Laterza (1999);
- [14] P. D. Warren, *Determining the fracture toughness of brittle materials by Hertzian indentation*, J. Eur. Ceram. Soc. 15 (1995) 201;
- [15] G. Geandier, S. Denis, A. Mocellin, *Float glass fracture toughness determination by Hertzian contact: experiments and analysis*, J. J. Non-Cryst. Solids 318 (2003) 284;
- [16] D. P. Rooke, D. J. Cartwright, *Compendium of stress intensity factors* (1976) HMSO Ministry of Defence, Procurement Executive;

- [17] M. Liu, G. Yixiang, D. A. H. Hanaor, B. Liu, C. Chen, *An improved semi-analytical solution for stress at round-tip notches*, Eng. Fract. Mech. 149 (2015) 134;
- [18] M. Yanoff, J. S. Duker, S. Jay, *Ophthalmology 3ed Edition*, Elsevier (2009);
- [19] S. M. Wiederhorn, L. H. Bolz, *Stress corrosion and static fatigue of glass*, J. Am. Ceram. Soc. 53, 10 (1970) 543;
- [20] V. M. Sglavo, M. Bertoldi, *Vickers Indentation: a powerful tool for the analysis of fatigue behaviour on glass*, Ceramic Transactions 156 (2004) 13;
- [21] E. W. Lemmon, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, *Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon and Oxygen from 60 to 2000 K at pressures to 2000 MPa*, J. Phys. Chem. Ref. 29 (2000) 331;
- [22] A. J. A. Favre, *Formulation of the Statistical Equations of Turbulent Flows with Variable Density*, in: T. B. Gatski, C. G. Speziale, Sarkar S. (eds) *Studies in Turbulence* Springer (1992);
- [23] H. Tennekes, J. L. Lumley, *A first course in turbulence, 14th ed.*, MIT Press (1992);
- [24] F. R. Menter, *Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications*, AIAA Journal 32, 8 (1994) 1598;

*Le figure la cui fonte non è espressamente indicata sono state prodotte dal laureando.*