



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Dispositivo pneumatico
dispiegabile per la messa
in sicurezza di persone
cadute in ambienti angusti**

Relatrice:

Prof.ssa Daniela Maffiodo

Correlatore:

Prof. Terenziano Raparelli

Candidato:

Giorgio Soli

Anno accademico 2025-2026

Sommario

I pozzi artesiani sono una risorsa essenziale per la fornitura idrica a livello globale. Tuttavia, le loro dimensioni ridotte e la profondità elevata sono un pericolo qualora siano privi di adeguati sistemi di chiusura. A livello globale si verificano frequenti cadute accidentali di bambini in pozzi incustoditi, con un tasso di mortalità dell'80%. Anche in Italia la problematica è nota, poiché legata alla tragedia di Vermicino del 1981, dove i tentativi di salvataggio del piccolo Alfredo Rampi furono inefficaci, evidenziando le problematiche connesse alle tecniche di soccorso tradizionali. La metodologia standard di soccorso prevede di scavare un tunnel parallelo al pozzo, ma si dimostra spesso inefficace a causa delle tempistiche prolungate e delle vibrazioni indotte nel terreno, rischiose per la stabilità della vittima. Il presente lavoro si colloca in un progetto di ricerca congiunto tra l'Università dell'Aquila e il DIMEAS del Politecnico di Torino, per sviluppare un robot di salvataggio teleoperato che opera in spazi ridotti affinché la vittima venga messa in sicurezza e portata in superficie. Il presente elaborato verte sulla progettazione, realizzazione e caratterizzazione sperimentale di un dispositivo di sicurezza dispiegabile in tessuto, ad attuazione pneumatica, concepito come barriera fisica atta ad arrestare una ulteriore caduta accidentale della vittima. La fase preliminare ha riguardato la selezione dei materiali tessili adatti alla realizzazione del dispositivo, valutati su criteri di impermeabilità all'aria, grammatura, spessore e resistenza meccanica. Tale selezione ha portato all'individuazione di due principali categorie: il tessuto Medical Windtex (VAGOTEX) e tessuti laminati ottenuti dall'accoppiamento di un supporto in poliestere o nylon, con un film di poliuretano termoplastico (TPU). Successivamente, sono stati analizzati i comportamenti di diverse forme geometriche. Nello specifico, sono state valutate configurazioni prismatiche, sferiche (realizzate sia a fusi che ad anelli concentrici), cilindriche e a soffiello. È stato studiato lo stato tensionale della membrana pressurizzata, con particolare attenzione a potenziali sforzi di cedimento, come lo stress di pelatura. Sono state testate metodologie di impacchettamento, tra cui il semplice avvolgimento (roll), doppio (double roll) e la piegatura a Z, volte a minimizzare l'ingombro, raggiungendo efficienze di impacchettamento nell'ordine dell'80%. Per la validazione sperimentale è stato allestito un banco prova composto da un circuito di alimentazione pneumatica e da un condotto in plexiglass che riproduce la geometria del pozzo. Le prove statiche hanno consentito di determinare la pressione interna minima

necessaria (10-30 mbar) a sostenere una massa di 13 Kg, in relazione ai coefficienti di attrito statico tra plexiglass e tessuto, che variano tra 0,4 e 0,7. Sono stati condotti test dinamici per valutare la risposta alla forza d'impatto della massa in caduta libera sul dispositivo e prove di tenuta in un intervallo temporale prolungato, che simulano una reale operazione di messa in sicurezza all'interno di un pozzo artesiano. In conclusione, le prove eseguite hanno confermato la validità dei dispositivi pneumatici, seppur all'interno di un banco prova semplificato. I risultati ottenuti forniscono una base progettuale per selezionare la geometria e il materiale da integrare nel sistema robotico, orientandone lo sviluppo verso future verifiche sperimentali in banchi prova più fedeli alla realtà.

Indice

Indice delle Figure	8
Indice delle Tabelle	11
Capitolo 1. Individuazione del problema e stato dell'arte	12
1.1 Pozzi artesiani	12
1.2 Il pericolo dei pozzi artesiani	14
1.3 Operazioni di salvataggio	16
1.4 Due casi a confronto: Prince e Alfredino Rampi	18
1.5 Requisiti del sistema di salvataggio in pozzi artesiani	21
1.6 Prototipi di robot di salvataggio esistenti	22
1.7 Prototipi di robot morbidi analoghi al dispositivo dispiegabile	25
Capitolo 2. Robot di salvataggio: progettazione e funzionalità	28
2.1 Progetto di ricerca del robot di salvataggio	28
2.2 Struttura del robot di salvataggio	29
2.2.1 Sottosistema meccanico	30
2.2.2 Sottosistema elettronico	36
2.2.3 Sottosistema di controllo	37
2.3 Procedimento operativo del robot di salvataggio	38
2.4 Obiettivo della tesi	39
Capitolo 3. Materiali e metodi di realizzazione del dispositivo pneumatico dispiegabile	43
3.1 Caratteristiche del materiale	43
3.1.1 Impermeabilità all'aria	43
3.1.2 Grammatura	44
3.1.3 Spessore	45
3.1.4 Resistenza agli urti e agli strappi	45

3.1.5 Elasticità.....	46
3.2 Materiali utilizzati.....	46
3.2.1 Medical Windtex	47
3.2.2 Tessuti spalmati e laminati	48
3.2.3 Tessuti tecnici e sportivi	49
3.2.4 Nylon.....	51
3.2.5 TPU	52
3.3 Metodo di realizzazione del dispositivo dispiegabile	53
3.3.1 Geometria del dispositivo dispiegabile	53
3.3.2 Raccordo pneumatico tra dispositivo e linea di alimentazione	54
3.3.3 Realizzazione del dispositivo dispiegabile.....	57
3.3.4 Realizzazione dei robot morbidi	58
3.3.5 Realizzazione del dispositivo pneumatico con Medical Windtex	59
3.3.6 Combinazione del TPU con nylon e poliestere ripstop	78
3.4 Metodi di impacchettamento.....	81
3.4.1 Roll packaging.....	81
3.4.2 Double roll packaging	82
3.4.3 Z packaging	82
3.4.4 Efficienza di impacchettamento	83
Capitolo 4. Sollecitazioni interne alle strutture gonfiabili in tessuto	84
4.1 Pressione interna al dispositivo dispiegabile non vincolato	85
4.1.1 Equazione di Young-Laplace.....	85
4.1.2 Teoria membranale dei gusci sottili.....	90
4.2 Pressione interna al dispositivo dispiegabile vincolato	96
Capitolo 5. Prove sperimentali	98
5.1 Banco prova sperimentale.....	98

5.1.1 Circuito pneumatico	100
5.1.2 Dispositivo di scorrimento	102
5.2 Impacchettamento ed efficienza di impacchettamento	107
5.2.1 Funzione degli elastici.....	112
5.3 Pressione minima di distacco.....	115
5.4 Coefficiente di attrito tra dispositivo in tessuto e parete in plexiglass	118
5.5 Indeformabilità del dispositivo dispiegabile.....	122
5.6 Forza d'impatto sul dispositivo di sicurezza.....	124
5.7 Test di tenuta dinamica	131
6. Conclusione e sviluppi futuri.....	133
6.1 Risultati conseguiti	133
6.2 Sviluppi futuri.....	134
Bibliografia.....	136

Indice delle Figure

Figura 1.1: Pozzo artesiano	12
Figura 1.2: Morfologia dei pozzi artesiani	13
Figura 1.3: Procedura delle operazioni di salvataggio	16
Figura 1.4: Schema semplificativo del tunnel di salvataggio.....	18
Figura 1.5: Salvataggio di Prince	19
Figura 1.6: Sistema di salvataggio robotico di David William raj et al. [3].....	23
Figura 1.7: Sistema di salvataggio robotico di Dhiyaneswaran et al. [4].....	24
Figura 1.8: Sistema di salvataggio robotico di Prabhavathi et al. [5].....	24
Figura 1.9: Guanto robotico di Connolly et al. [7]	26
Figura 1.10: Attuatore pneumatico a soffiello di Sahin et al. [8]	27
Figura 2.1: Prototipo del robot di salvataggio	29
Figura 2.2: Struttura meccanica principale del robot	31
Figura 2.3: Sistema anti-impuntamento	32
Figura 2.4: Sistema anti-impuntamento reale.....	32
Figura 2.5: Modulo centrale del robot di salvataggio.....	33
Figura 2.6: Modulo inferiore del robot di salvataggio.....	34
Figura 2.7: Pattini e relativa sede	34
Figura 2.8: Dispositivo di sicurezza ad arpionismo	35
Figura 2.9: Sistema di scorrimento asta	36
Figura 3.1: Misurazione della permeabilità all'aria di un tessuto	44
Figura 3.2: Struttura tessuto Medical Windtex	47
Figura 3.3: Trama del tessuto ripstop	50
Figura 3.4: Raccordo pneumatico a occhiello	55
Figura 3.5: Raccordo pneumatico rapido	56
Figura 3.6: Raccordo di gonfiaggio-guarnizione-dado M6	56
Figura 3.7: Raccordo di gonfiaggio-guarnizione-dado M8	57
Figura 3.8: Macchinari utilizzati per la produzione di robot morbidi	58
Figura 3.9: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma prismatica quadrata ...	61

Figura 3.10: Quote provino forma prismatica quadrata	62
Figura 3.11: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma prismatica rettangolare	63
Figura 3.12: Quote provino forma prismatica rettangolare	64
Figura 3.13: Dimensioni cartamodello	65
Figura 3.14: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma sferica a spicchi	67
Figura 3.15: Carico di pelatura	68
Figura 3.16: Metodo di incollaggio per prevenire il carico di pelatura	69
Figura 3.17: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma sferica ad anelli concentrici	71
Figura 3.18: Quote provino forma sferica ad anelli concentrici	72
Figura 3.19: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica	74
Figura 3.20: Quote provino forma cilindrica	74
Figura 3.21: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica con fondi inestensibili	75
Figura 3.22: Quote provino forma cilindrica con fondi inestensibili	76
Figura 3.23: Realizzazione del dispositivo dispiegabile a soffietto	77
Figura 3.24: Quote provino forma a soffietto	78
Figura 3.25: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica in tessuto laminato	80
Figura 3.26: Quote provino forma cilindrica in tessuto laminato	80
Figura 3.27: Procedura di impacchettamento roll packaging	82
Figura 3.28: Procedura di impacchettamento double roll packaging	82
Figura 3.29: Procedura di impacchettamento Z packaging	83
 Figura 4.1: Rappresentazione raggi di curvatura del tratto cilindrico	 87
Figura 4.2: Forze agenti nel tratto cilindrico	88
Figura 4.3: Forze agenti nel tratto semisferico	89
Figura 4.4: Guscio assialsimmetrico	90
Figura 4.5: Angoli azimutale e meridiano	91
Figura 4.6: Raggi di curvatura meridiano e circonferenziale	91
Figura 4.7: Equilibrio dell'elemento anulare	93

Figura 4.8: Analisi dei carichi nel tratto cilindrico del guscio.....	94
Figura 4.9: Analisi dei carichi nel tratto semisferico del guscio	95
Figura 4.10: Sequenza di gonfiaggio del dispositivo dispiegabile	97
Figura 5.1: Condotto in plexiglass.....	99
Figura 5.2: Manichino	100
Figura 5.3: Linea pneumatica di alimentazione.....	101
Figura 5.4: Sistema di scorrimento del dispositivo di sicurezza ad arpionismo	103
Figura 5.5: Modifica dell'asta di scorrimento del sistema di sicurezza	104
Figura 5.6: Progetto del corpo scorrevole e corpo scorrevole reale	105
Figura 5.7: Supporto del dispositivo dispiegabile	106
Figura 5.8: Elastico di chiusura del dispositivo dispiegabile	107
Figura 5.9: Roll packaging	107
Figura 5.10: Double roll packaging.....	108
Figura 5.11: Z packaging	108
Figura 5.12: Dimensioni del prisma che approssimano il dispositivo dispiegabile	109
Figura 5.13: Elastici a confronto	112
Figura 5.14: Sequenza di sgancio elastici con prototipo in Medical Windtex	113
Figura 5.15: Sequenza di sgancio elastici con prototipo in nylon-TPU	114
Figura 5.16: Sequenza di sgancio elastici con prototipo in poliestere-TPU.....	114
Figura 5.17: Posizionamento del dispositivo nel condotto in plexiglass.....	115
Figura 5.18: Manichino appoggiato sulla superficie superiore del dispositivo.....	116
Figura 5.19: Manometro	117
Figura 5.20: Area di contatto dispositivo-tubo semplificata	119
Figura 5.21: Pressione interna agente su un arco $d\theta$	120
Figura 5.22: Iter per il calcolo del coefficiente di attrito di primo distacco	121
Figura 5.23: Andamento forza esterna-forza di attrito	122
Figura 5.24: Test d'impatto.....	125

Indice delle Tabelle

Tabella 1.1: Casi di bambini caduti in pozzi artesiani	14
Tabella 1.2: Permanenza all'interno del pozzo artesiano	15
Tabella 1.3: Esiti delle operazioni di salvataggio in funzione della permanenza all'interno del pozzo.....	16
Tabella 3.1: Caratteristiche principali Medical Windtex	47
Tabella 3.2: Confronto laminazione e spalmatura	49
Tabella 3.3: Caratteristiche principali poliestere ripstop	51
Tabella 3.4: Caratteristiche principali nylon ripstop	51
Tabella 3.5: Caratteristiche principali TPU	52
Tabella 3.6: Dimensioni provino forma prismatica quadrata	62
Tabella 3.7: Dimensioni provino forma prismatica rettangolare	64
Tabella 3.8: Dimensioni provino forma sferica a spicchi	67
Tabella 3.9: Dimensioni provino forma sferica ad anelli concentrici.....	72
Tabella 3.10: Dimensioni provino forma cilindrica.....	74
Tabella 3.11: dimensioni provino forma cilindrica con fondi inestensibili	76
Tabella 3.12: Dimensioni provino forma a soffiutto.....	78
Tabella 3.13: Dimensioni provino forma cilindrica in tessuto laminato	81
Tabella 5.1: Dimensioni dispositivi dispiegabili impacchettati e dispiegati	110
Tabella 5.2: Volume iniziale e finale dei dispositivi dispiegabili	110
Tabella 5.3: Efficienze di impacchettamento.....	111
Tabella 5.4: Caratteristiche manometro	117
Tabella 5.5: Pressioni di distacco ottenute sperimentalmente	118
Tabella 5.6: Iter per il calcolo dei coefficienti di attrito statico.....	121
Tabella 5.7: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,2\text{ m}$ e $\Delta t_1 = 0,05\text{ s}$	128
Tabella 5.8: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,4\text{ m}$ e $\Delta t_1 = 0,05\text{ s}$	129
Tabella 5.9: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,2\text{ m}$ e $\Delta t_2 = 0,1\text{ s}$..	130
Tabella 5.10: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,4\text{ m}$ e $\Delta t_2 = 0,1\text{ s}$	130

Capitolo 1. Individuazione del problema e stato dell'arte

1.1 Pozzi artesiani

L'approvvigionamento idrico è il requisito più importante per garantire la sopravvivenza dell'uomo sulla terra, in quanto risulta fondamentale per la vita e per lo sviluppo della società. Al giorno d'oggi la reperibilità di acqua è data per scontata nella maggior parte delle zone del mondo. Tuttavia, in alcune regioni del pianeta, avere accesso a fonti d'acqua potabile risulta complicato. Tra le aree maggiormente critiche, si possono citare alcune zone dell'Africa subsahariana, l'India, le nazioni del Medio Oriente e qualche area montuosa Asiatica o dell'America Latina. Queste criticità hanno come conseguenza la necessità di sviluppare delle soluzioni sostenibili che permettano di avere disponibilità di acqua in maniera prolungata nel tempo. Per questa ragione, si può fare affidamento, per esempio, alla costruzione di pozzi artesiani.

Analizzando il contesto nazionale, la Puglia presenta un elevato numero di pozzi artesiani, utilizzati negli anni Settanta e Ottanta per l'irrigazione dei campi o a scopo domestico. Anche la Sicilia è caratterizzata dalla presenza di diversi pozzi artesiani, in quanto le condizioni climatiche sono particolarmente estreme nelle stagioni più calde e dunque la disponibilità d'acqua è limitata.

Si definisce pozzo artesiano un pozzo naturalmente effluente, che intercetta una falda confinata, delimitata superiormente e inferiormente da strati geologici impermeabili. La risalita dell'acqua nel pozzo è spontanea in quanto il livello saturo si trova ad una quota superiore rispetto alla bocca del pozzo, da cui avviene l'erogazione dell'acqua.

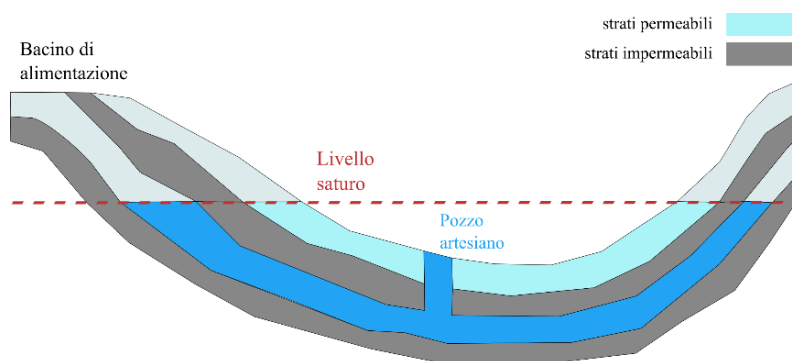


Figura 1.1: Pozzo artesiano

Come evidenziato dalla Figura 1.1, il bacino di alimentazione della falda si trova a una quota maggiore rispetto al punto in cui viene eseguita la perforazione. Tale configurazione morfologica genera un carico idraulico disponibile che garantisce la spontanea ascensione del fluido lungo il pozzo artesiano, rappresentata in Figura 1.2. Tale situazione permette di non utilizzare apparati meccanici di sollevamento. Il principale discrimine tra i pozzi artesiani e i pozzi freatici consiste infatti nella necessità o meno di installare sistemi di pompaggio. Per i pozzi freatici, il sollevamento meccanico risulta una condizione imprescindibile per ottenere l'approvvigionamento idrico.

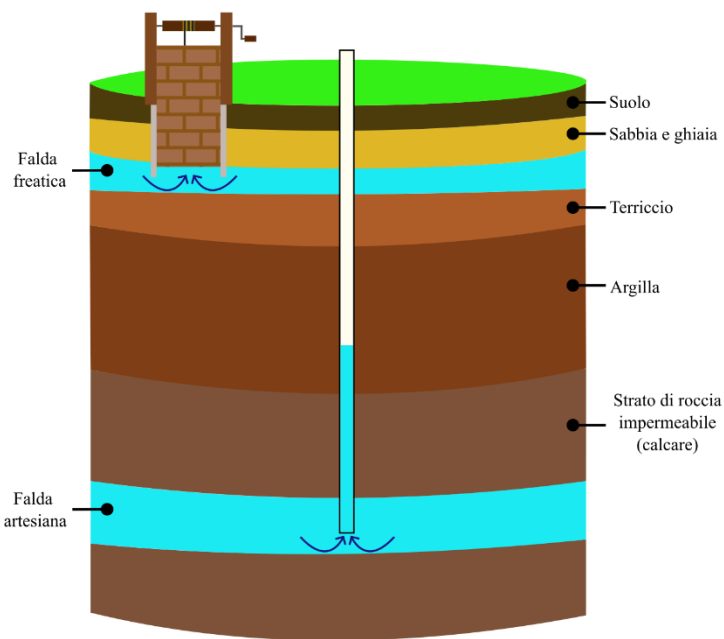


Figura 1.2: Morfologia dei pozzi artesiani

Mettendo a confronto i pozzi artesiani con quelli freatici, si evidenzia che questi ultimi sono caratterizzati da una maggiore spesa in termini energetici, per via dell'utilizzo di sistemi di sollevamento. Inoltre, il costo della manutenzione è maggiore e di conseguenza anche il loro impatto ecologico.

A livello costruttivo, i pozzi artesiani presentano una struttura cilindrica con diametro compreso generalmente tra i 15 e i 33 cm. La profondità di tali pozzi è variabile, e può arrivare in alcuni casi anche a 100 m. Per evitare di incorrere in infiltrazioni o perdite di qualunque tipo, è possibile rendere impermeabile la parete del pozzo in fase di perforazione, per mezzo di materiali specifici. Le operazioni di perforazione si concludono con il raggiungimento della falda artesiana.

I pozzi artesiani, dunque, sono una risorsa idrica economica e soprattutto duratura, tanto che può fungere da fonte d'acqua per decenni, nel caso in cui la sua gestione risulti corretta. Nel caso in cui l'utilizzo dei pozzi artesiani non sia regolamentato, è possibile avere ripercussioni sull'equilibrio idrogeologico della zona in cui si trovano, con successivi problemi riguardanti l'ecosistema. Per questi motivi, risulta necessario avere una corretta gestione delle falde e un costante monitoraggio dell'impatto ambientale ad esse connesso.

1.2 Il pericolo dei pozzi artesiani

Nel paragrafo precedente viene evidenziata l'importanza dei pozzi artesiani in alcune zone del mondo come fonte di approvvigionamento idrico, garantendo un'ottima sostenibilità economica ed energetica nel lungo periodo. A seguito di periodi di siccità prolungati o di uno sfruttamento eccessivo del pozzo artesiano è possibile andare incontro al prosciugamento dell'acqua disponibile. In questa situazione, tali strutture risultano delle vere e proprie trappole a cielo aperto. In assenza di adeguati sistemi di chiusura del pozzo, i principali individui a rischio sono i bambini. In India, sono avvenuti numerosi incidenti riguardanti bambini caduti nei pozzi trivellati. Secondo il lavoro di Tumram [1], tra il 2006 e il 2016 sono stati osservati un totale di 43 casi di bambini caduti all'interno di pozzi artesiani. Tra questi, la maggior parte ha coinvolto bambini di età inferiore ai 4 anni, come si può osservare dalla Tabella 1.1:

Età (anni)	Genere	
	Maschio	Femmina
0-2	8	4
2-4	7	8
4-6	6	3
6-8	2	1
8-10	2	0
10-12	2	0
>12	0	0
Totale	27	16

Tabella 1.1: Casi di bambini caduti in pozzi artesiani

Incidenti di questo tipo accadono quando la vittima è incosciente del pericolo che li circonda. Nella maggior parte dei casi si tratta infatti di bambini piccoli che giocano nei pressi di strutture abbandonate, spinti da una curiosità naturale nell'esplorare situazioni che possono diventare pericolose. Una volta caduta all'interno del pozzo, la vittima non è in grado di districarsi in autonomia per via del poco spazio a disposizione ed è costretta ad attendere l'arrivo degli aiuti.

Nello studio di Tumram [1] viene inoltre osservato che nella maggior parte dei casi la vittima viene soccorsa entro 72 ore. Chiaramente, le possibilità di sopravvivere all'interno del pozzo diminuiscono drasticamente nel caso in cui la durata delle operazioni di salvataggio aumenti. La Tabella 1.2 mette in evidenza le ore di permanenza all'interno del pozzo prima che le operazioni di salvataggio vengano completate con l'estrazione della vittima:

Permanenza nel pozzo (ore)	Genere		
	Maschio	Femmina	Totale
0-6	10	7	17
6-12	4	1	5
12-18	1	0	1
18-24	3	0	3
24-48	1	2	3
48-72	5	5	10
>72	3	1	4
Totale	27	16	43

Tabella 1.2: Permanenza all'interno del pozzo artesiano

La mancanza di ossigeno, le temperature rigide e la possibile presenza di sostanze nocive comporta una diminuzione delle possibilità di sopravvivenza nel pozzo all'aumentare della permanenza al suo interno.

La maggior parte dei casi in cui il bambino è stato portato in salvo è collegato al fatto che le operazioni di salvataggio si sono concluse entro le 6 ore, mentre solo un bambino è stato salvato in un tempo compreso tra le 24 e le 48 ore, come rappresentato nella Tabella 1.3:

Permanenza nel pozzo (ore)	Maschi (n=27)		Femmine (n=16)	
	Sopravvissuti	Morti	Sopravvissute	Morte
0-6	3	7	2	5
6-12	0	4	0	1
12-18	0	1	0	0
18-24	0	3	0	0
24-48	1	0	0	2
48-72	0	5	0	5
>72	0	3	0	1

Tabella 1.3: Esiti delle operazioni di salvataggio in funzione della permanenza all'interno del pozzo

1.3 Operazioni di salvataggio

Quando un bambino cade all'interno di un pozzo artesiano, è necessario fare affidamento a una procedura ben precisa, definita in Figura 1.3, da seguire per quanto riguarda le operazioni di salvataggio, in quanto la tempestività ha un ruolo fondamentale nel decidere le sorti della situazione.

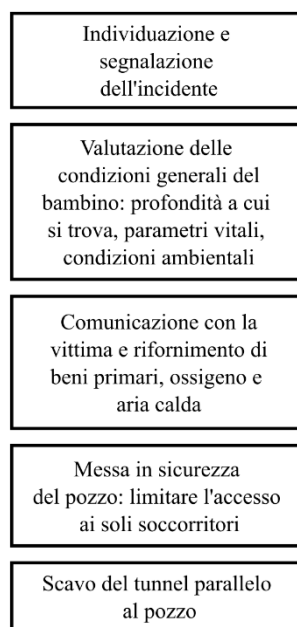


Figura 1.3: Procedura delle operazioni di salvataggio

Nel caso in cui un bambino precipiti all'interno di un pozzo artesiano, il primo step delle operazioni di salvataggio consiste nella rilevazione e segnalazione dell'incidente. Ciò

risulta spesso critico, perché nella maggior parte dei casi i pozzi non sono segnalati e sono di piccole dimensioni, quindi complicati da individuare.

Una volta che la squadra di soccorso ha raggiunto il pozzo artesiano, si procede con l'esecuzione di una valutazione generale della situazione, per cui si cerca di capire quali sono le condizioni della vittima. Si deve valutare la profondità alla quale il bambino è posizionato e si misurano i parametri vitali, tra cui la frequenza cardiaca e respiratoria. Inoltre, è importante riuscire a valutare le condizioni ambientali all'interno del pozzo artesiano, tenendo conto della temperatura, dell'umidità e di eventuali gas nocivi presenti.

Allo stesso tempo si cerca anche di capire se la vittima è cosciente o meno. Per fare questo, è possibile calare una sonda in profondità del pozzo, in modo da comunicare con la vittima e capire se le sue condizioni sono stabili. Successivamente, è necessario fornire supporto alla vittima. In questo senso, è fondamentale fornire ossigeno e aria calda per mezzo di tubi e, nel caso in cui sia possibile, anche cibo e sostanze nutritive.

Un altro aspetto fondamentale per le operazioni di soccorso riguarda la messa in sicurezza del pozzo, il cui accesso deve essere limitato ai soli soccorritori. La presenza di esterni potrebbe infatti compromettere le operazioni di salvataggio, rallentandole e complicandole.

Dopo aver messo in pratica tutti gli step precedenti, è possibile iniziare l'intervento di soccorso. La metodologia di salvataggio consiste nello scavo di un tunnel parallelo al pozzo artesiano in cui la vittima è precipitata accidentalmente, in modo tale da raggiungere la profondità a cui questa si trova, per poi scavare un raccordo orizzontale che permette di portare in salvo il bambino, come rappresentato in Figura 1.4:

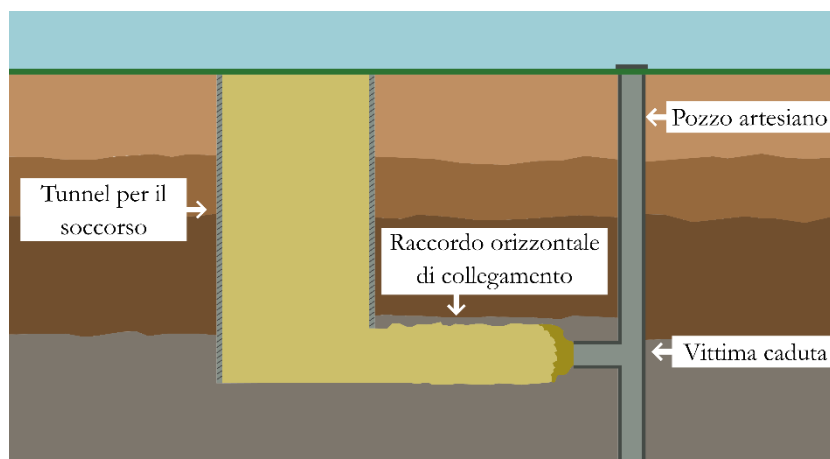


Figura 1.4: Schema semplificato del tunnel di salvataggio

Come verrà poi evidenziato anche nel seguito, tale procedura di salvataggio è caratterizzata da due principali limitazioni. La prima limitazione è legata alla durata delle operazioni, che possono prolungarsi oltre le 48 ore, fino ad arrivare a 72 ore nel caso in cui si debba raggiungere una profondità maggiore. Questo è dovuto al fatto che durante gli scavi è possibile incontrare strati di terreno molto duri e difficili da scalfire, che causano quindi un notevole rallentamento delle operazioni di salvataggio.

La seconda limitazione relativa allo scavo del tunnel parallelo è rappresentata dal fatto che l'utilizzo di trivelle e microcariche comporta la nascita di vibrazioni, con conseguenti sprofondamenti e collassi delle pareti del pozzo che possono far cadere il bambino in profondità.

1.4 Due casi a confronto: Prince e Alfredino Rampi

Con lo scopo di analizzare le variabili ambientali che incorrono durante le operazioni di soccorso in un pozzo artesiano, si confrontano gli avvenimenti di due situazioni reali con esiti diversi. Il primo caso in esame riguarda l'incidente di Prince, un bambino di 5 anni caduto accidentalmente all'interno di un pozzo artesiano nel luglio 2006, in India. Analizzando la vicenda, si evidenzia come l'esito positivo del salvataggio sia stato agevolato dalla presenza di un tunnel parallelo al pozzo artesiano, come rappresentato in Figura 1.5:

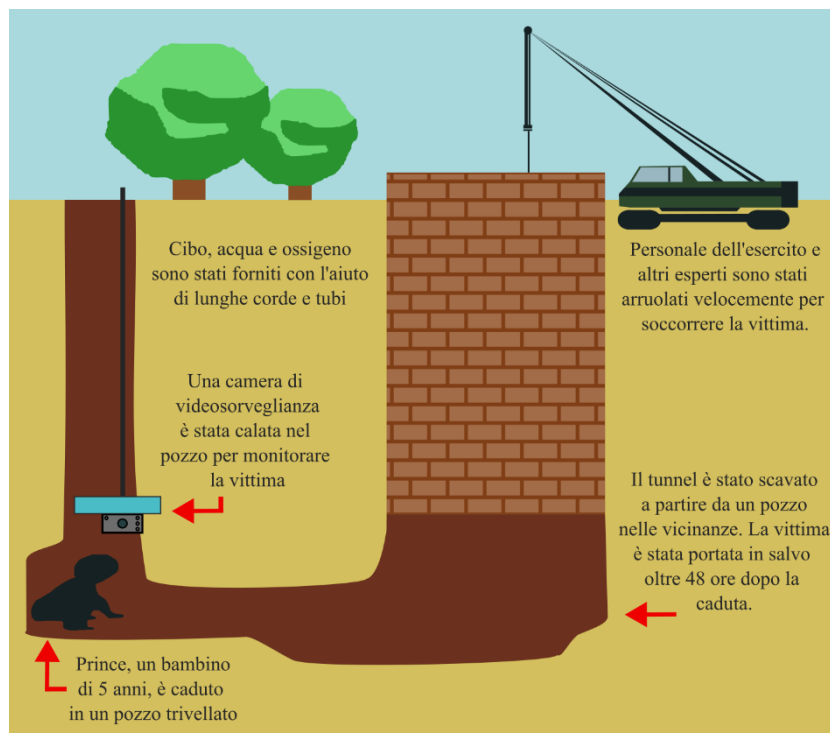


Figura 1.5: Salvataggio di Prince

Le operazioni di salvataggio, nel caso di Prince, iniziarono con una rigorosa gestione logistica, finalizzata ad impedire l'accesso incontrollato dei civili nella zona della vicenda, evitando di dilatare i tempi di manovra. Venne poi calato un condotto nel pozzo, così da fornire aria fresca alla vittima intrappolata nel pozzo. Inoltre, con l'aiuto di lunghe corde, furono calati acqua e cibo. Per poter monitorare il bambino in maniera costante fu utilizzata una telecamera, facendola scendere nel pozzo fino alla profondità desiderata. Il salvataggio vero e proprio del bambino fu effettuato utilizzando il tunnel parallelo al pozzo artesiano, mostrato nella Figura 1.5, e scavando un cunicolo orizzontale in corrispondenza della profondità alla quale si bloccò il bambino. La presenza di questo tunnel permise alla squadra di soccorso di evitare una lunga fase di trivellazione verticale ma, nonostante ciò, le operazioni di salvataggio si conclusero dopo 48 ore alla caduta del bambino nel pozzo.

Nonostante questa tipologia di situazioni sia più frequente in paesi come l'India, si documentano situazioni analoghe anche in Europa. Nel nostro paese fece grande scalpore il caso di Alfredino Rampi, un bambino di 6 anni caduto in un pozzo artesiano l'11 giugno 1981 a Vermicino, in provincia di Roma [2].

Il pozzo presentava un diametro di 28 *cm* e una profondità complessiva di 80 *m*, con pareti irregolari, sporgenze e rientranze. Il primo tentativo di salvataggio consistette nel far scendere nel pozzo una tavoletta per mezzo di una lunga fune, con lo scopo di far aggrappare il bambino e poi tirarlo fuori. Tale soluzione si rivelò molto poco efficace, in quanto la tavoletta si bloccò nel pozzo ad una profondità di 24 *m*, senza alcuna possibilità di rimuoverla, in quanto la corda a cui era collegata si spezzò.

A questo punto si iniziò a scavare un tunnel parallelo, per arrivare alla profondità alla quale il bambino si era bloccato, per poi scavare un tunnel orizzontale per soccorrerlo. Le operazioni di scavo del tunnel parallelo incontrarono parecchi problemi, in particolare per la presenza di strati di roccia granitici molto difficili da scalfire. Il lavoro delle macchine perforatrici permise di arrivare a una profondità di circa 30 *m*, dove era stato ipotizzato ci fosse il bambino. Per questo motivo si decise di iniziare a scavare il raccordo orizzontale fra i due pozzi, prevedendo di sbucare qualche metro al di sopra del bambino. A seguito del completamento del cunicolo orizzontale, si prese atto del fatto che il bambino non era nelle vicinanze del foro appena aperto, in quanto le vibrazioni causate dalla perforazione lo avevano spinto molto più in basso, a una profondità imprecisata.

Furono dunque messi in atto disperati tentativi di salvataggio del bambino, che nel frattempo aveva smesso di rispondere ai soccorritori, i quali tentavano di comunicare per mezzo di un elettro sonda calata nel pozzo. Le operazioni di salvataggio prevedero di far scendere i volontari nel pozzo, con lo scopo di imbracare Alfredino per trascinarlo in superficie. Tuttavia, nessun tentativo di salvataggio si concluse positivamente e verso le 9 del 13 giugno, venne confermata la morte di Alfredino, dopo oltre 48 *ore* di tentativi di salvataggio.

La comparazione dei due scenari mette in luce le limitazioni delle tecniche di salvataggio tradizionali. Infatti, l'assenza di un tunnel preesistente parallelo al pozzo allunga notevolmente le tempistiche di soccorso, diminuendo le possibilità di sopravvivenza della vittima.

Le principali difficoltà operative riguardano la disponibilità di uno spazio ridotto, che non permette la discesa di operatori umani e limita anche la possibilità di fare uso di strumenti meccanici ingombranti dal punto di vista dimensionale. Inoltre, le condizioni ambientali nelle zone più profonde dei pozzi non sono favorevoli alla vita: l'umidità aumenta

notevolmente, le temperature sono più basse ed è possibile che siano presenti gas tossici per la salute umana. Tali condizioni comportano un aumento delle probabilità di incorrere in ipotermia o intossicazioni, riducendo anche le probabilità di sopravvivenza della vittima. Tenendo in considerazione tali aspetti, risulta quindi fondamentale agire tempestivamente per poter portare in salvo la vittima in un tempo limitato.

1.5 Requisiti del sistema di salvataggio in pozzi artesiani

Nei paragrafi precedenti sono state messe in luce le principali difficoltà riscontrate nel salvataggio di un bambino caduto accidentalmente in un pozzo artesiano. Basandosi su tali criticità, l'obiettivo che ci si pone è quello di progettare un sistema robotico di salvataggio in grado di operare in queste condizioni estreme. Il sistema di salvataggio ha lo scopo di raggiungere il bambino, metterlo in condizioni di sicurezza, limitando eventuali peggioramenti della situazione, per poi estrarlo nel minore tempo possibile.

Tenendo in considerazione la procedura delle operazioni all'interno del pozzo, si mettono in luce i principali requisiti necessari per il corretto funzionamento del sistema robotico di salvataggio. La valutazione delle condizioni generali nel pozzo è garantita dalla presenza di sensori, tra cui sensori di temperatura e umidità, sensori che permettono di valutare la qualità dell'aria e l'eventuale presenza di gas tossici. Sul sistema di salvataggio devono essere presenti anche telecamere ad alta risoluzione e sensori di distanza, per eseguire il controllo del robot durante la discesa nel pozzo e per orientarlo correttamente in fase di salvataggio. La presenza dei sensori risulta fondamentale per poter mandare un costante flusso di informazioni ai soccorritori che si trovano in superficie, che possono prendere decisioni basate sullo stato attuale della vittima e sulle condizioni del pozzo in cui stanno operando. La comunicazione con la vittima avviene per mezzo di microfoni posizionati sulla carcassa del robot di salvataggio.

La discesa del robot deve essere rapida ma allo stesso tempo controllata, per cui deve essere presente un sistema di scorrimento verticale che lo stabilizza, che permette la regolazione della velocità di discesa e la centratura rispetto alla struttura del pozzo.

La messa in sicurezza della vittima viene ottenuta grazie alla presenza di braccia robotiche, che interagiscono con il bambino senza infierire danni. Il comando delle braccia robotiche è ottenuto a distanza, per cui si parla di tele-operazione. Più

precisamente, si ha un operatore umano in superficie che ha il compito di comandare un 'master', i cui movimenti vengono riprodotti fedelmente dallo 'slave', ovvero dai bracci robotici montati sul robot. In questa maniera, si ottiene una interazione tra robot e vittima che non dovrebbe recare alcun danno a quest'ultima, se eseguita correttamente da parte dell'operatore in superficie, il cui compito è facilitato dalla presenza delle telecamere.

Un ulteriore elemento fondamentale per il robot consiste in un sistema di sicurezza che evita un ulteriore scivolamento della vittima in profondità durante le operazioni di soccorso. Tale elemento può essere sia di tipo meccanico che di tipo pneumatico, ma la sua funzione rimane sempre la stessa: muoversi a lato della vittima bloccata all'interno del pozzo, raggiungere una profondità maggiore rispetto ad essa e poi aprirsi, in maniera tale da bloccare il passaggio al di sotto della vittima per evitare ulteriori cadute.

Infine, dal punto di vista dell'autonomia energetica, si deve fare in modo di alimentare il robot per mezzo di una batteria integrata ad alta densità energetica, che può essere supportata da un cavo di alimentazione esterno, in maniera tale da garantire continuità operativa e una trasmissione dei dati costante. Chiaramente, la batteria del dispositivo di salvataggio deve essere tale da perdurare durante tutta l'estensione delle operazioni di soccorso.

1.6 Prototipi di robot di salvataggio esistenti

Il paragrafo corrente si pone l'obiettivo di definire le attuali conoscenze riguardanti i robot di salvataggio che operano in ambienti confinati e angusti come i pozzi artesiani. In sintesi, si vogliono riportare tutte le informazioni riguardanti sistemi di salvataggio che operano nei pozzi artesiani e che sono dotati di sistemi di sicurezza pneumatici.

Come si è visto, i sistemi robotici di salvataggio si avvalgono di braccia robotiche per eseguire l'interazione con la vittima, sensori per la valutazione della qualità dell'aria, per il rilevamento di eventuali sostanze tossiche e per la misurazione della temperatura. Inoltre, risulta essenziale la presenza di una o più telecamere che permettono di monitorare istante per istante le condizioni del bambino caduto in profondità.

Negli anni sono stati sviluppati principalmente dispositivi di salvataggio robotici che operano all'interno di pozzi trivellati. Si tratta di dispositivi di sicurezza che permettono

di avvicinarsi alla vittima caduta all'interno del pozzo, supervisionare ciò che li circonda, valutare le condizioni generali del pozzo, afferrare il bambino ed estrarlo in sicurezza.

I sistemi robotici riportati nei paragrafi successivi sono accomunati dalla presenza di un elemento di sicurezza in tessuto dispiegabile, attuato pneumaticamente, posizionato nella zona inferiore del robot. Tale dispositivo si presenta inizialmente in una configurazione di riposo, ovvero completamente sgonfio. In questa configurazione del dispositivo, che permette di limitarne al massimo l'ingombro volumetrico, è necessario farlo scorrere verticalmente lungo la parete del pozzo fino a che non ha oltrepassato la posizione della vittima, raggiungendo quindi una profondità maggiore. Una volta che il modulo di sicurezza è stato posizionato correttamente, viene attivato un circuito pneumatico a bordo del robot che immette aria in pressione all'interno del dispositivo in tessuto. Il gonfiaggio del dispositivo permette di occludere la sezione trasversale del pozzo, fornendo anche un solido appoggio alla vittima durante la fase di estrazione.

Nel 2020 David William Raj et al. [3] hanno sviluppato il sistema di salvataggio robotico rappresentato in Figura 1.6:



Figura 1.6: Sistema di salvataggio robotico di David William raj et al. [3]

Il lavoro di Dhiyaneswaran et al. [4] ha avuto come esito la produzione del sistema robotico riportato nella Figura 1.7:



Figura 1.7: Sistema di salvataggio robotico di Dhiyaneswaran et al. [4]

Infine, Prabhavathi et al. [5] nel 2022 hanno sviluppato un ulteriore dispositivo di salvataggio robotico, mostrato in Figura 1.8:



Figura 1.8: Sistema di salvataggio robotico di Prabhavathi et al. [5]

I tre casi di studio riportati sono tra di loro simili per quanto riguarda l'idea alla base: si tratta infatti di un robot di salvataggio che permette di eseguire le operazioni di risalita del bambino in un tempo minore rispetto a quello necessario per scavare un tunnel parallelo al pozzo, che rappresenta il metodo tradizionale di salvataggio dei bambini caduti nei pozzi artesiani. Nel caso in cui questo tentativo di salvataggio dovesse andare a buon fine, la permanenza del bambino all'interno del pozzo sarebbe decisamente minore, aumentando in maniera considerevole le possibilità di sopravvivenza della vittima.

In tutti e tre i lavori il dispositivo dispiegabile pneumatico ha la funzione di supportare inferiormente il bambino, limitando quindi lo sforzo che deve essere eseguito dalle braccia robotiche nell'afferrare la vittima. Tuttavia, il rischio principale che hanno queste

soluzioni è relativo alla rottura del gonfiabile durante la fase di estrazione, per via di eventuali sporgenze lungo le pareti.

Dall'analisi dei tre studi precedentemente esposti, emerge una carenza nella valutazione dei vincoli dimensionali del dispositivo in configurazione di riposo. È infatti essenziale minimizzare l'ingombro volumetrico iniziale del sistema per garantirne il corretto passaggio nello spazio ridotto disponibile al lato della vittima. Tale criticità progettuale impone un'accurata selezione dei materiali che costituiscono il dispositivo pneumatico.

Un'ulteriore lacuna degli studi analizzati in letteratura riguarda la scelta di un materiale che sia in grado di comportarsi da barriera per la pressione interna in fase di funzionamento. L'impermeabilità all'aria risulta quindi un requisito stringente per limitare il consumo di aria compressa, a causa della limitata disponibilità della stessa.

1.7 Prototipi di robot morbidi analoghi al dispositivo dispiegabile

La scarsità di studi riguardanti dispositivi dispiegabili pneumatici si traduce nell'esigenza di analizzare altri lavori di ricerca, che possono essere ricondotti al caso di dispositivo dispiegabile in tessuto, ad attuazione pneumatica, per il salvataggio in ambienti angusti, ovvero all'interno dei pozzi artesiani.

Si possono citare gli attuatori in tessuto gonfiabile morbido, che stanno guadagnando molta importanza all'interno della robotica grazie alla loro leggerezza e flessibilità strutturale, ma anche per via del fatto che sono in grado di generare movimenti diversi tra di loro, tra cui irrigidimento, contrazione, allungamento, flessione e torsione. Questa tipologia di attuatori, i quali sono prevalentemente alimentati con aria compressa, consente di avere un'interazione sicura con l'utente.

In genere, i robot morbidi vengono fabbricati utilizzando materiali molto deformabili e sono caratterizzati da un design che si ispira al mondo naturale. Come specificato nello studio di Xavier et al. [6] la particolarità di tali robot consiste nel fatto che il loro movimento bio-ispirato gli permette di muoversi laddove i robot rigidi fallirebbero. La grande adattabilità di questi dispositivi robotici è fondamentale soprattutto in ambito biomedico, dove è necessario che gli ausili robotici non causino alcun danno al paziente.

Da questo punto di vista sono stati sviluppati dispositivi medici in grado di favorire la riabilitazione di specifiche parti del corpo.

Tra questi, si citano i guanti robotici per favorire la riabilitazione della mano. Connolly et al. [7] si concentrano sulla progettazione di un guanto robotico, rappresentato in Figura 1.9, in grado di assistere persone con disabilità motorie nelle attività della vita di tutti i giorni.



Figura 1.9: Guanto robotico di Connolly et al. [7]

Il robot morbido in questione risulta efficace nell'assistenza del paziente in quanto è progettato per piegarsi solamente in corrispondenza delle articolazioni delle dita. Inoltre, la leggerezza che caratterizza il tessuto si traduce in un dispositivo robotico trasparente quando non viene pressurizzato, ovvero minimale dal punto di vista dell'ingombro. Esso, infatti, non ostacola i movimenti naturali della mano ed è come se non ci fosse.

Rimanendo in ambito biomedico, sono interessanti le tute che assistono e facilitano il movimento dei gomiti. Sahin et al. [8] si sono concentrati sul progettare attuatori pneumatici morbidi a soffiutto, mostrati in Figura 1.10, realizzati in tessuto, con lo scopo di facilitare la flessione e l'estensione del gomito. Si vuole infatti ottenere un dispositivo che permetta di aiutare i neonati con deficit motori, dovuti ad esempio a una paralisi cerebrale, ad eseguire i movimenti che sono nella quotidianità di tutti, come quelli che permettono di portare qualcosa verso la bocca.

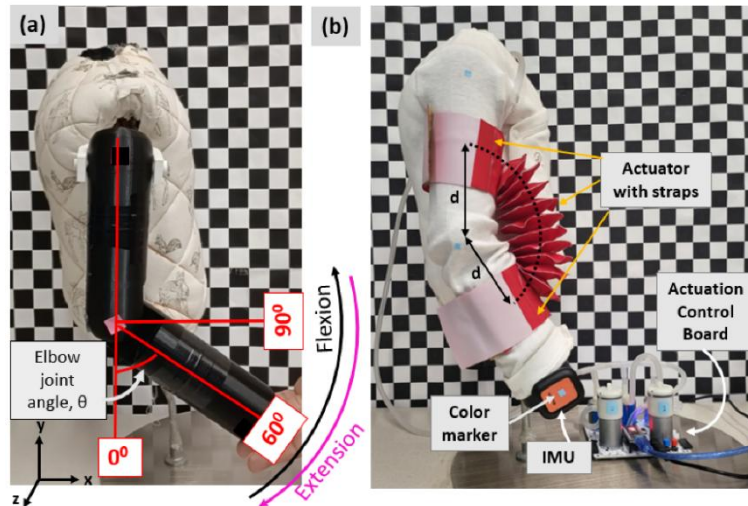


Figura 1.10: Attuatore pneumatico a soffiutto di Sahin et al. [8]

Lo studio mette in evidenza il fatto che i dispositivi robotici a soffiutto risultano scalabili, per via della facilità di fabbricazione e del ridotto costo di produzione, in questa maniera si possono adattare alla crescita del neonato andando a variare il numero di celle che lo compongono.

Gli esempi di soft robotics esposti nei paragrafi precedenti evidenziano la notevole versatilità e adattabilità operativa di tali sistemi. L'utilizzo di attuatori morbidi ha assunto un ruolo chiave in molti settori ingegneristici, trovando la sua massima espressione in ambito biomedico. Come si è visto, i sistemi di assistenza fisica di questo tipo assicurano un'interazione sicura con l'utente.

L'analisi dello stato dell'arte ha permesso di ottenere le basi fondamentali per lo sviluppo concettuale del modulo pneumatico dispiegabile di sicurezza, oggetto del presente lavoro di tesi. Nello specifico, l'analisi di soluzioni dei robot morbidi in tessuto fornisce informazioni fondamentali per lo sviluppo del progetto, tra cui la selezione del materiale da utilizzare, lo studio di geometrie e architetture, ma anche i processi di realizzazione che li caratterizzano.

Capitolo 2. Robot di salvataggio: progettazione e funzionalità

2.1 Progetto di ricerca del robot di salvataggio

L'idea che porta alla progettazione e allo sviluppo di un robot di salvataggio in grado di eseguire operazioni all'interno di pozzi artesiani nasce dal momento che, al giorno d'oggi, esistono poche soluzioni che permettono di portare in salvo bambini caduti accidentalmente all'interno dei pozzi artesiani, e tali soluzioni non sono completamente efficaci ed affidabili. Ciò è dovuto principalmente alla struttura che caratterizza tali pozzi: diametro ristretto, profondità elevate, pareti fragili, scivolose e irregolari. Tale condizione è assolutamente sfavorevole per l'esecuzione di un salvataggio eseguito da parte di operatori umani, per cui è necessario scavare un tunnel parallelo al primo, utilizzando microcariche e macchine scavatrici.

A seguito dell'episodio di Vermicino del 1981, lo speleologo Tullio Bernabei, che cercò in prima persona di salvare il bambino, propose l'idea di un dispositivo meccanico che potesse operare all'interno di pozzi, con lo scopo di mettere in sicurezza la vittima e portarla in salvo nel minore tempo possibile.

Basandosi su questa idea, venne avviato un progetto di ricerca e sviluppo in collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS) del Politecnico di Torino e l'Università dell'Aquila, con l'obiettivo di realizzare un robot di soccorso in grado di operare all'interno dei pozzi artesiani.

Il dispositivo meccanico che si vuole sviluppare deve essere in grado di muoversi verticalmente e garantire una determinata stabilità all'interno del pozzo, inoltre deve essere tale da monitorare le condizioni interne al pozzo, tramite telecamere e sensori, che permettono di avere un flusso continuo di informazioni, utili per gli operatori in superficie. Il robot di salvataggio dovrebbe interagire con la vittima per mezzo di braccia robotiche telecomandate a distanza, che permetterebbero di imbragarla e portarla in superficie in condizioni di sicurezza.

2.2 Struttura del robot di salvataggio

Lo sviluppo del lavoro di tesi corrente ha come base il prototipo [9] rappresentato in Figura 2.1. Tale prototipo rappresenta lo stato più evoluto del robot di salvataggio e a partire da questa soluzione iniziale si svilupperanno modifiche e integrazioni, descritte nei capitoli successivi.

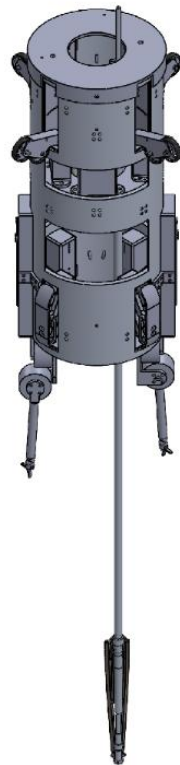


Figura 2.1: Prototipo del robot di salvataggio

Il sistema robotico è stato sviluppato per operare all'interno di pozzi artesiani con diametro nominale di circa 30 cm.

Il progetto del robot deve far coesistere componenti meccaniche, elettroniche e di controllo all'interno dello stesso corpo strutturale. La struttura meccanica ha il compito di fornire stabilità e resistenza al robot, il sistema elettronico permette di gestire l'alimentazione e la comunicazione, la componente di controllo permette di gestire i movimenti e la manipolazione a distanza delle braccia durante le operazioni di soccorso

della vittima. La contemporanea esistenza dei tre sistemi deve permettere una teleoperazione fluida e precisa, in maniera tale da avere un sistema affidabile.

2.2.1 Sottosistema meccanico

Si vuole considerare il sottosistema meccanico, che rappresenta il cuore dal punto di vista strutturale del prototipo analizzato. Il sottosistema corrente risulta essenziale per quanto riguarda l'ottenimento della stabilità e della resistenza meccaniche, caratteristiche obbligatorie per il sistema robotico di salvataggio.

La progettazione del sottosistema meccanico è vincolata principalmente dalle dimensioni del pozzo in cui il sistema robotico deve operare. Inoltre, si vuole ottenere un dispositivo che sia facile da assemblare e con un peso non eccessivo per facilitare i movimenti in fase di funzionamento.

Il robot di salvataggio è caratterizzato da una struttura cilindrica, rappresentata in Figura 2.2. Il diametro esterno del cilindro è pari a 200 mm e l'altezza complessiva è di 600 mm . Il sottosistema meccanico è diviso in moduli, uno sovrapposto all'altro, collegati per mezzo di distanziali e viti. Tali moduli sono interconnessi da una colonna centrale in metallo, la cui rotazione permette l'orientamento del robot e degli strumenti di bordo. Si è optato per questa soluzione in quanto permette di ottenere una buona distribuzione dei pesi all'interno del robot, che risulta in questo modo più stabile.

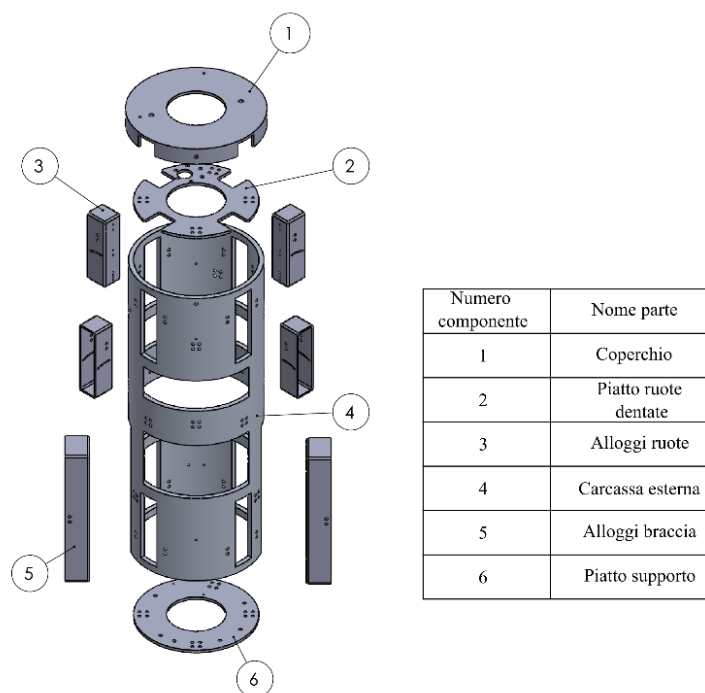


Figura 2.2: Struttura meccanica principale del robot

Nella zona superiore del robot è stato realizzato il sistema che permette di collegarsi alla fune di calata, la quale viene sostenuta da un paranco posizionato sopra al pozzo. Per ottenere un centraggio del robot all'interno del pozzo si fa uso di ruote folli, alloggiate nelle relative sedi disposte nella parte superiore della carcassa e disposte perpendicolarmente l'una dall'altra. Essendo che la parete del pozzo può risultare sconnessa in certi punti, è possibile che le ruote folli si impuntino, con la conseguente impossibilità di movimento del robot. La soluzione a tale problema consiste nell'utilizzare un sistema anti-impuntamento, che si basa su un cavo passante lungo le staffe delle ruote, andando a formare una sorta di percorso circolare chiuso, come si vede in Figura 2.3 e Figura 2.4. Tirando l'estremità libera del filo, le ruote folli vengono avvicinate alle relative sedi, diminuendo quindi l'ingombro radiale del robot, che può quindi proseguire la discesa.

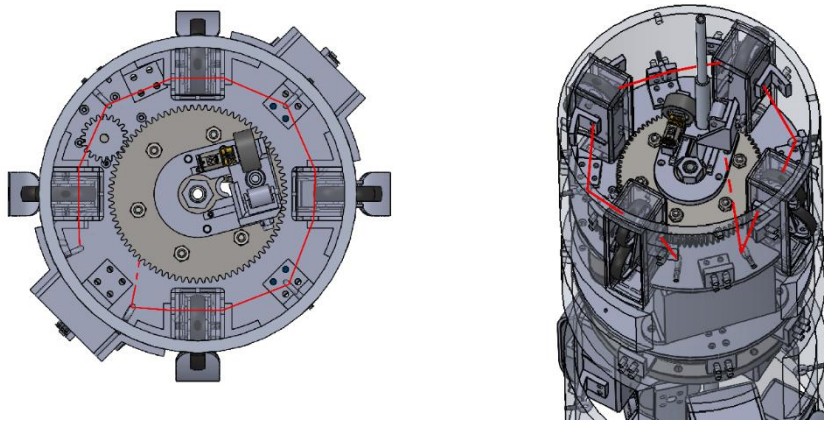


Figura 2.3: Sistema anti-impuntamento

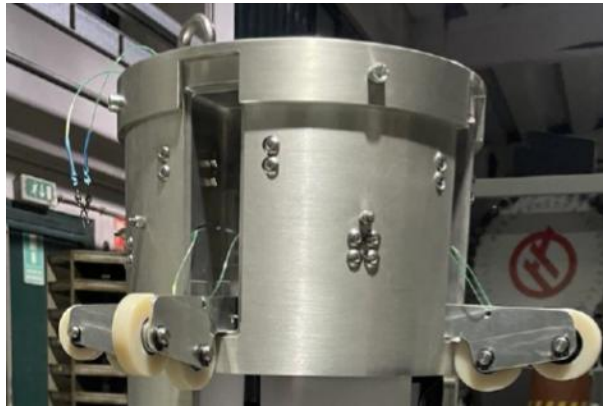


Figura 2.4: Sistema anti-impuntamento reale

La parte centrale della struttura portante è invece adibita alla trasmissione del moto. Contiene infatti un pignone, la cui rotazione viene azionata da un motore brushless, e la ruota condotta che ingrana con il primo. Tale rotismo garantisce la rotazione della colonna centrale e di conseguenza si ottengono i movimenti elementari del sistema robotico: rotazione oraria, antioraria e arresto. La struttura centrale contiene anche l'asta del dispositivo di sicurezza che, essendo solidale alla ruota condotta, ruota con essa. Si sottolinea poi la possibilità di avere un movimento radiale dell'asta all'interno di un'asola, grazie alla presenza di apposite guide lineari montate sulla piastra di sostegno.

Nella struttura centrale sono contenuti anche dei componenti elettronici, tra cui il microcontrollore Raspberry Pi Pico, i driver, la batteria e i relativi supporti.

Il modulo centrale del robot, mostrato in Figura 2.5 dovrebbe contenere anche il piatto sensori [10] che è già stato progettato ma deve ancora essere inserito all'interno del

prototipo realizzato. Chiaramente, il piatto sensori dovrà contenere tutta la sensoristica necessaria al monitoraggio delle condizioni all'interno del pozzo artesiano.

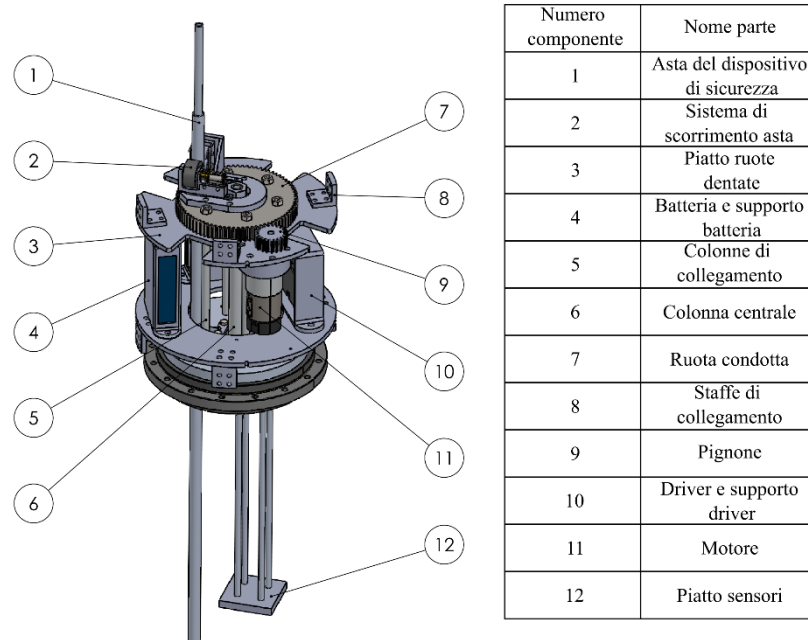


Figura 2.5: Modulo centrale del robot di salvataggio

Si passa poi alla parte inferiore del dispositivo di salvataggio, mostrato in Figura 2.6 composta da un sistema di pattini disposti a 90° l'uno con l'altro, Figura 2.7, che permettono di avere un buon scivolamento del robot lungo le pareti irregolari del pozzo.

La progettazione della parte inferiore della struttura portante prevede lo spazio per l'implementazione di braccia robotiche tele operate [11], le quali non devono interferire con le altre componenti del robot e allo stesso tempo non devono aumentare le dimensioni radiali del robot di salvataggio.

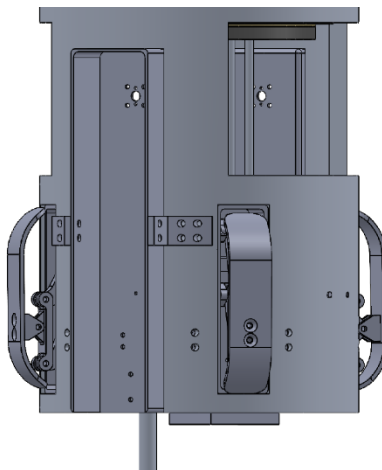


Figura 2.6: Modulo inferiore del robot di salvataggio

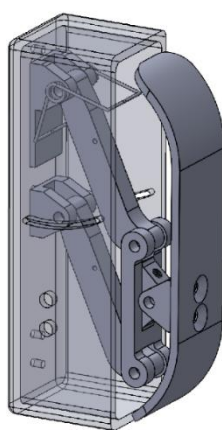


Figura 2.7: Pattini e relativa sede

Il componente finale che costituisce il sottosistema meccanico è il dispositivo di sicurezza, disposto verticalmente e rappresentato in Figura 2.8. Si tratta di un sistema meccanico ad arpionismo, il quale è inizialmente chiuso e una volta che deve essere messo in funzione si dispiega occupando la sezione trasversale del pozzo. La funzione del sistema di sicurezza è di grande importanza nel corso delle operazioni di soccorso, in quanto impedisce lo scivolamento della vittima e stabilisce un punto di ancoraggio sicuro. Per questo motivo è importante che tale sistema meccanico sia affidabile sotto ogni punto di vista. Il sistema deve essere gestito a distanza in maniera affidabile e l'operatore in superficie deve monitorare in tempo reale sia posizione che velocità del dispositivo così da poterle regolare di conseguenza in funzione delle condizioni che si incontrano all'interno del pozzo.

Il funzionamento del dispositivo di sicurezza si basa su un semplice meccanismo articolato. Si ha un'asta principale, all'interno della quale si muove un'asta di attuazione. L'apertura del sistema è comandata dal movimento assiale dell'asta di attuazione, che trasmette il moto all'anello scorrevole, il quale può traslare verticalmente. Il movimento dell'anello scorrevole genera l'apertura dell'arpionismo, agendo sul cinematismo a leve composto dall'asta di supporto, da quella di collegamento e da quella esterna, che viene fatta ruotare attorno al perno inferiore, in modo tale da ottenere la configurazione dispiegata.

Si genera una compressione della molla quando si ha un movimento di avvicinamento tra l'anello scorrevole e il corpo scorrevole. Per questo motivo, è necessario avere una forza sull'asta di attuazione maggiore a quella generata dalla resistenza della molla, che tende a riportare l'arpionismo nella configurazione iniziale, chiusa.

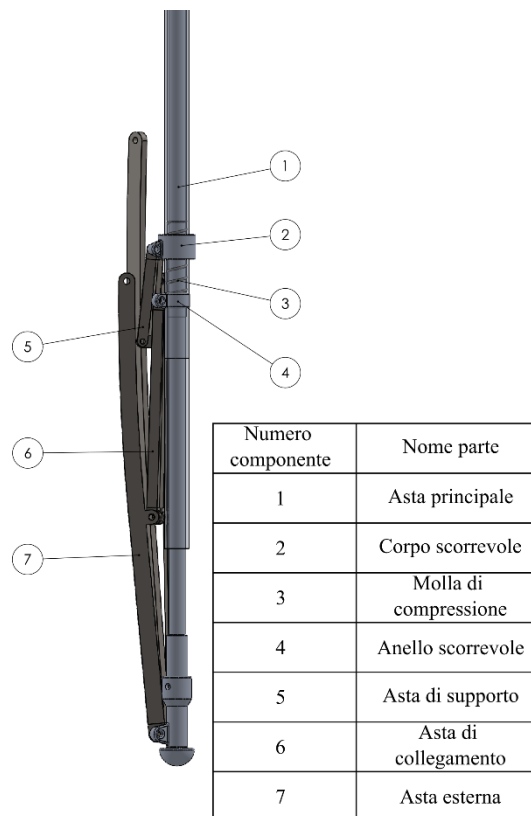


Figura 2.8: Dispositivo di sicurezza ad arpionismo

La movimentazione dell'asta è permessa da un sistema di scorrimento che ne controlla la discesa, riportato in Figura 2.9. Il sistema di scorrimento che si considera è formato da una piastra di sostegno, sopra la quale sono posizionate una ruota motorizzata di controllo

(ruota gommata) e dei rulli di scorrimento. La base presenta un'asola che permette il passaggio dell'asta ed è fissata su un sistema a guida lineare che consente un movimento radiale controllato.

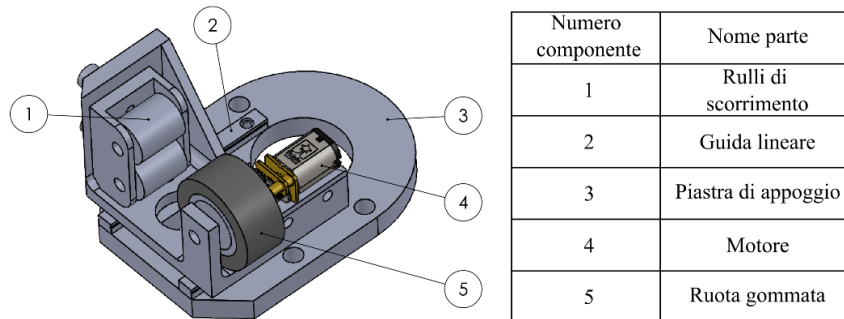


Figura 2.9: Sistema di scorrimento asta

Il motore è collegato alla ruota gommata, che gestisce il movimento verticale dell'asta per ottenere un corretto posizionamento del dispositivo di sicurezza al di sotto della vittima. La coppia di rulli scorrevoli è posizionata in maniera tale da andare a contatto con l'asta. Tale posizione viene gestita da un sistema di viti. Lo scopo è quello di generare una forza di attrito statico per ottenere una presa stabile dell'asta.

2.2.2 Sottosistema elettronico

Il sottosistema elettronico ha un ruolo fondamentale per il funzionamento del robot. La progettazione di tale sottosistema è caratterizzata dalla necessità di avere un'architettura compatta e su cui si possa eseguire facilmente la manutenzione nel caso in cui qualcosa non funzioni. Lo scopo finale è di ottenere una componente elettronica affidabile e che possa operare in maniera efficace in un ambiente angusto, come un pozzo artesiano.

La componente elettronica contenuta nel sistema permette di andare a muovere i motori in maniera coordinata e favorisce la comunicazione con gli operatori in superficie.

Le batterie e il motore brushless sono posizionati all'interno della struttura portante in maniera tale da distribuire nel miglior modo possibile i pesi e per ridurre al minimo le vibrazioni.

I segnali presenti nel robot di salvataggio vengono elaborati e coordinati da un microcontrollore Raspberry Pi Pico, che ha la funzione di unire la componente di potenza

e quella di controllo, coordinando i flussi informativi che si muovono dall'interno del pozzo fino alla superficie, dove operano i soccorritori.

Un'ulteriore componente fondamentale per il sottosistema elettronico consiste nel piatto sensori, pensato per essere il supporto di alcuni fondamentali sensori che permettono di eseguire le operazioni di soccorso in completa sicurezza. Sul piatto dovrebbero essere montati un sensore ad ultrasuoni, che misura la distanza con la vittima, sensori di temperatura, umidità, ossigeno e gas nocivi, necessari a valutare le condizioni generali all'interno del pozzo in cui si trova il bambino. Inoltre, dovrebbe essere presente una telecamera digitale ad alta risoluzione, che restituisce un feedback di tipo visivo agli operatori in superficie.

2.2.3 Sottosistema di controllo

Si considera ora il sottosistema di controllo, che assume un'importanza fondamentale per quanto riguarda il coordinamento dei dispositivi elettronici descritti in precedenza e per la comunicazione tra la componente hardware e i soccorritori all'esterno del pozzo, che deve essere affidabile e precisa, con un tempo di risposta che sia il più piccolo possibile.

Il microcontrollore Raspberry Pi Pico ha il compito di gestire il motore brushless con un controllo in coppia retro azionato basato su un controllore di tipo proporzionale integrativo derivativo (PID), i cui parametri sono stati determinati dal punto di vista sperimentale in maniera tale da avere un comportamento del sistema robotico stabile in ogni condizione operativa.

Il sottosistema di controllo è stato studiato in maniera tale da inviare dati in tempo reale che tengono conto dello stato dei motori, della profondità a cui il robot si trova e delle condizioni operative all'interno del pozzo.

Il sistema robotico di salvataggio include ulteriori caratteristiche, pensate per la sicurezza. Tra queste, si ha l'arresto automatico nel caso in cui si incontrino situazioni di corrente eccessivamente elevata o perdita di segnale. Inoltre, è stata implementata la funzione di soft start per i movimenti del motore brushless BLDC, in maniera tale da avere un sistema stabile in ogni condizione e per diminuire al minimo le vibrazioni.

2.3 Procedimento operativo del robot di salvataggio

La logica alla base della sequenza operativa del robot di salvataggio ha lo scopo di garantire la coesistenza dei sottosistemi meccanico, elettronico e di controllo che lo compongono. Il procedimento operativo garantisce un intervento veloce e in sicurezza all'interno di un ambiente molto ristretto, motivo per cui non è possibile fare affidamento a un intervento di tipo umano e lo spazio di manovra risulta molto limitato.

La logica generale del sistema di salvataggio robotico è composta generalmente da quattro fasi principali:

1. **Discesa e posizionamento del robot:** in questa prima fase è necessario fare uso di un argano o di un sistema a carrucola, posizionato in superficie sopra al pozzo artesiano in cui è necessario eseguire il salvataggio. Il robot viene collegato a tale sistema di sollevamento esterno e viene poi calato all'interno del pozzo in maniera verticale. La fase di discesa del dispositivo è gestita da un operatore esterno che la controlla manualmente per mezzo di una fune. Quando verrà implementato il piatto sensori, l'idea è quella di recuperare informazioni riguardanti le condizioni all'interno del pozzo durante la discesa per mezzo dell'elettronica montata sul robot. La fase di discesa termina una volta che si raggiunge la profondità desiderata, in prossimità della vittima.
2. **Rotazione e allineamento:** dopo aver raggiunto la profondità desiderata, quello che si vuole fare è ruotare il robot in maniera tale da permettere la conseguente discesa del dispositivo di sicurezza al di sotto della vittima. Per fare questo è necessario individuare, tramite le telecamere presenti sulla struttura del sistema di soccorso, un piccolo spazio lasciato libero dalla vittima che permette lo scorrimento verticale del dispositivo di sicurezza impacchettato. A questo punto entra in gioco il motore brushless che fa ruotare la colonna centrale e di conseguenza anche la struttura portante del robot, in maniera tale da allinearsi con il punto più libero lasciato a disposizione per il suo scorrimento al di sotto del bambino.
3. **Scorrimento del dispositivo di sicurezza:** la terza fase del funzionamento consiste nello scorrimento verticale del dispositivo di sicurezza, per cui entra in gioco il

sistema di scorrimento lineare posizionato nella parte superiore della struttura portante. Si vuole sottolineare il fatto che lo scorrimento verticale del dispositivo di sicurezza è permesso da un lavoro combinato del sistema di scorrimento e delle braccia robotiche, che possono operare in maniera tale da indirizzare il dispositivo nella giusta posizione. Chiaramente, il tutto è permesso dalla presenza di telecamere ad alta definizione. Una volta che il dispositivo è stato fatto scorrere al di sotto della vittima, si aziona il meccanismo di rilascio che apre il dispositivo ad arpionismo per ottenere una base di supporto meccanica affidabile.

4. Recupero della vittima: l'ultima fase del procedimento operativo prevede l'estrazione della vittima dal pozzo artesiano. L'idea è quella di avere un sistema di salvataggio che permetta di imbragare la vittima utilizzando le braccia robotiche teleoperate e, mediante l'utilizzo di un sistema di sollevamento esterno, riportare la vittima in superficie in completa sicurezza. Tuttavia, si tratta di una soluzione molto complicata da raggiungere. Al giorno d'oggi il robot di salvataggio lavora come ausilio alla procedura di soccorso, che consiste nello scavo di un tunnel parallelo fino alla profondità alla quale si trova la vittima. In contemporanea con i lavori di scavo del tunnel, il robot metterebbe in completa sicurezza la vittima grazie all'uso del dispositivo di sicurezza, evitando che questa si ritrovi a profondità maggiori a causa delle vibrazioni create dalle macchine scavatrici.

2.4 Obiettivo della tesi

Il presente lavoro di tesi si pone l'obiettivo di proseguire e migliorare il progetto del robot di salvataggio mobile introdotto nel paragrafo 2.2, in maniera tale da contribuire alla realizzazione di un sistema meccanico in grado di operare in ambienti ristretti e angusti, capace di mettere in condizioni di sicurezza la vittima e di consentire un'estrazione rapida, aumentando le possibilità di sopravvivenza.

La sostanziale novità consiste nella progettazione e nello sviluppo di un sistema di sicurezza alternativo rispetto a quello presente nel prototipo analizzato [12]. Mentre il dispositivo precedente si basava su un meccanismo meccanico ad arpionismo, il presente lavoro di tesi propone l'utilizzo di un dispositivo dispiegabile in tessuto, ad attuazione

pneumatica, concepito come barriera fisica atta ad arrestare un'ulteriore caduta accidentale della vittima.

L'utilizzo del sistema di sicurezza meccanico risulta affidabile dal punto di vista della tenuta strutturale ed ha una buona adattabilità in funzione delle diverse dimensioni del pozzo artesiano in cui si opera. Tuttavia, può comportare dei rischi durante la fase di posizionamento e scorrimento verticale. Nel caso in cui lo spazio a disposizione per il movimento verticale del sistema di sicurezza non sia sufficiente, è necessario forzarne il movimento, rischiando di ferire la vittima. Nel caso in cui si decidesse di non forzarne il movimento, il meccanismo di sicurezza meccanico risulterebbe addirittura inutilizzabile.

Lo sviluppo di un sistema di sicurezza pneumatico dispiegabile in tessuto ha un grande vantaggio dal punto di vista della sicurezza, in quanto difficilmente può andare a ferire la vittima, anche nel caso in cui sia necessario forzarne il movimento verso il basso a causa del limitato spazio lasciato a disposizione.

Un ulteriore vantaggio che emerge dal confronto tra il meccanismo ad arpionismo e il dispositivo pneumatico consiste in un minore ingombro di quest'ultimo, favorendone la discesa al di sotto della vittima.

La procedura operativa del robot di salvataggio ricalca le fasi proposte per il modello precedente:

1. Il robot raggiunge la profondità desiderata, a questo punto si mette in azione un motore brushless che posiziona l'asta del sistema di sicurezza nel punto ottimale per eseguire il successivo scorrimento al di sotto della vittima.
2. Una volta che l'asta è passata a lato della vittima, il dispositivo dispiegabile viene gonfiato per mezzo di aria in pressione, passando dalla configurazione compatta a quella dispiegata.

Tale configurazione finale ha lo scopo di fungere da tappo strutturale e impedire alla vittima di scivolare a profondità maggiori durante le manovre di recupero.

Data la scarsità di letteratura preliminare specifica per questo dispositivo di salvataggio pneumatico, il lavoro ha richiesto un'estesa fase di ricerca e sperimentazione, articolata come segue:

- **Analisi dei materiali:** la prima parte del lavoro di tesi si è focalizzata sull'approfondimento di tessuti impermeabili o con bassa permeabilità all'aria. La selezione di tali materiali è avvenuta facendo una comparazione tra gli studi trovati in letteratura e valutandone le proprietà meccaniche.
- **Progettazione geometrica e strutturale:** si è proceduto all'analisi geometrica e dimensionale dei dispositivi, per poter selezionare quella con la migliore efficienza operativa. In questa fase sono stati analizzati gli stati tensionali sulla membrana causati dalla pressione interna, con particolare attenzione allo stress di pelatura. Sono stati poi studiati alcuni metodi di fabbricazione, che si differenziano per metodologie di incollaggio. In alcuni casi, si è fatto uso di tecniche di rinforzo strutturale.
- **Prototipazione e test funzionali:** è stato realizzato un semplice banco prova costituito da un circuito pneumatico per il controllo del ciclo di gonfiaggio e sgonfiaggio del dispositivo pneumatico, da un condotto in plexiglass che simula il pozzo artesiano, e da una massa che simula la vittima all'interno del pozzo. Sono poi stati realizzati diversi prototipi di dispositivo di sicurezza in tessuto e ciascun prototipo è stato sottoposto a test di tenuta al di fuori del tubo di plexiglass, in maniera tale da identificare eventuali perdite e per verificare l'effettiva validità dei metodi di fabbricazione utilizzati.
- **Modifiche dell'asta di scorrimento:** il prototipo di robot di salvataggio è composto da un sistema di sicurezza meccanico. Nel presente lavoro di tesi tale sistema viene sostituito da un dispositivo ad attuazione pneumatica, il quale deve essere collegato all'asta di scorrimento per permetterne la discesa nel pozzo e il conseguente posizionamento. L'adattamento dell'asta di scorrimento al dispositivo pneumatico richiede qualche modifica rispetto alla versione proposta nel prototipo di robot di salvataggio, per evitare l'impuntamento delle componenti e per garantire il supporto dell'elemento in tessuto durante le operazioni di soccorso.

- Validazione sperimentale: i prototipi funzionanti sono stati poi testati all'interno del condotto in plexiglass che simula il pozzo artesiano. I test hanno previsto sia prove statiche che di impatto, facendo uso della massa che simula la vittima. Le prove statiche hanno consentito di determinare la pressione interna minima necessaria a sostenere la massa, in relazione ai coefficienti di attrito statico tra plexiglass e tessuto. I test dinamici hanno valutato la risposta alla forza d'impatto della massa in caduta libera sul dispositivo, mentre le prove di tenuta simulano una reale operazione di messa in sicurezza all'interno di un pozzo artesiano, in un intervallo di tempo prolungato.
- Ottimizzazione finale: il lavoro si è concluso con l'analisi del comportamento di tessuti alternativi, con l'obiettivo di migliorare la tenuta pneumatica e per ridurre l'ingombro volumetrico nella configurazione iniziale. Inoltre, sono stati studiati anche diversi metodi di impacchettamento del dispositivo di sicurezza.

Capitolo 3. Materiali e metodi di realizzazione del dispositivo pneumatico dispiegabile

3.1 Caratteristiche del materiale

Il presente capitolo si dedica all'analisi e alla selezione dei materiali più adatti alla realizzazione del dispositivo dispiegabile in tessuto, ad attuazione pneumatica. Lo scopo è ottenere la migliore affidabilità operativa e il soddisfacimento di determinate proprietà, che vengono definite nel seguito. Sulla base di tali caratteristiche, si eseguiranno delle comparazioni tra diverse tipologie di materiali.

L'ottenimento di un dispositivo dispiegabile di sicurezza in grado di operare all'interno di un pozzo artesiano è fondamentale scegliere un materiale adatto. La fase di valutazione e la scelta del materiale devono tenere conto delle seguenti caratteristiche:

- Impermeabilità all'aria completa (o quasi completa);
- Grammatura;
- Spessore;
- Resistenza agli urti e agli strappi;
- Elasticità.

3.1.1 Impermeabilità all'aria

L'impermeabilità all'aria è una caratteristica essenziale per il materiale atto a realizzare il dispositivo di sicurezza. Avere un materiale impermeabile significa avere poche perdite di aria e quindi una pressione interna praticamente costante.

Da un punto di vista teorico, avere un materiale completamente impermeabile all'aria consentirebbe di gonfiare il dispositivo di sicurezza fino alla configurazione di funzionamento, per poi isolare l'alimentazione pneumatica, mantenendo comunque invariata la pressione interna al dispositivo, a meno che non si decida di scaricare in atmosfera.

Come affermato da Ding [13], la permeabilità dei tessuti è intesa come una proprietà del tessuto che valuta la capacità di consentire a un agente penetrante, che può essere un gas, un liquido o un materiale solido, di attraversare il tessuto stesso.

Nel caso in cui si voglia misurare la permeabilità all'aria di un tessuto, si deve definire la velocità del flusso d'aria che attraversa perpendicolarmente la superficie di un campione di prova, in determinate condizioni di caduta di pressione da una parte all'altra del tessuto e in un determinato periodo di tempo, come mostrato in Figura 3.1. Per eseguire tale test di misurazione della permeabilità all'aria di un tessuto si possono seguire diverse normative, in funzione del tipo di materiale che si vuole analizzare. In generale, per i materiali tessili la normativa ISO 9237:1995 'Textiles - Determination of the permeability of fabrics to air' è quella maggiormente utilizzata.

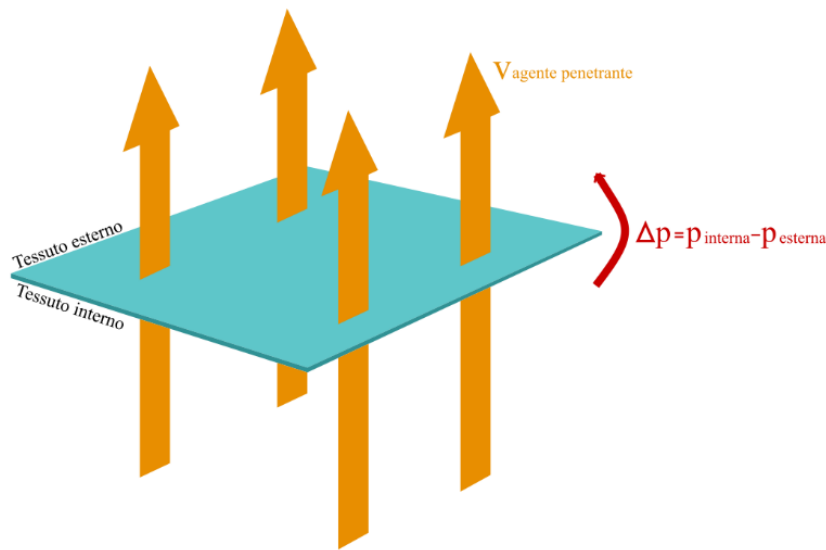


Figura 3.1: Misurazione della permeabilità all'aria di un tessuto

Nel caso di studio corrente, si vuole scegliere un materiale poco permeabile all'aria, per cui il test di attraversamento dovrebbe restituire un valore di velocità da una parte all'altra del materiale che tende a zero. Ciò risulta fondamentale per avere una buona ermeticità del dispositivo dispiegabile e per avere una piccola richiesta di aria compressa da parte del dispositivo in fase di funzionamento.

3.1.2 Grammatatura

La grammatura del tessuto è una caratteristica necessaria da analizzare per effettuare una scelta corretta del materiale con cui verrà realizzato il dispositivo. Tale proprietà è definita dal rapporto tra la massa in grammi e la superficie del tessuto:

$$grammatatura = \frac{massa}{area} \left[\frac{g}{m^2} \right] \quad (3.1)$$

In generale, aumentare la grammatura del tessuto comporta un aumento dello spessore dello stesso. Si sottolinea inoltre che, avere una maggiore grammatura vuole dire avere un materiale più resistente e di qualità superiore rispetto ad un tessuto di grammatura minore.

La grammatura richiesta per la realizzazione del dispositivo dispiegabile nasce da un compromesso tra la necessità di avere un dispositivo resistente e in grado di sopportare eventuali sollecitazioni esterne, quindi con grammatura elevata, ma che sia anche facilmente realizzabile e di poco ingombro, esigenze che richiedono invece una bassa grammatura.

Nello specifico, si opterà per l'utilizzo di materiali caratterizzati da una grammatura inferiore ai $200 \frac{g}{m^2}$.

3.1.3 Spessore

Il tessuto utilizzato per la fabbricazione dell'elemento di sicurezza gonfiabile deve essere tale da avere il minore ingombro volumetrico possibile, così da favorire il passaggio a lato della vittima caduta nel pozzo. A tale scopo, si deve scegliere un materiale di spessore limitato, così che il dispositivo impacchettato occupi il minore volume possibile.

Facendo riferimento a quanto detto nel paragrafo 3.1.2, si vuole avere allo stesso tempo un dispositivo resistente e poco ingombrante nella configurazione iniziale. Per questo motivo è necessario trovare un compromesso anche per la scelta dello spessore. Infatti, avere uno spessore troppo piccolo vuol dire rischiare che il dispositivo di sicurezza si rompa nel caso in cui urti contro una sporgenza del pozzo. Al contrario, avere uno spessore elevato si traduce in un ingombro eccessivo della configurazione iniziale, per cui si rischia di non avere abbastanza spazio per passare a lato della vittima, rendendo inutile la presenza del sistema di sicurezza all'interno del robot di salvataggio.

Nello specifico, i tessuti scelti per la realizzazione del dispositivo pneumatico di sicurezza devono avere uno spessore inferiore di $0,5 \text{ mm}$.

3.1.4 Resistenza agli urti e agli strappi

Una delle caratteristiche fondamentali su cui si basa la scelta del tessuto riguarda la resistenza agli urti e agli strappi. Si vuole che il materiale abbia delle buone caratteristiche

meccaniche, per essere in grado di sopportare eventuali sollecitazioni esterne durante le operazioni di soccorso, che potrebbero provocarne la rottura e il conseguente sgonfiaggio.

Con resistenza agli urti si intende che il materiale deve essere in grado di sopportare l'interazione con le sporgenze e le variazioni di diametro incontrate nel pozzo artesiano, il quale chiaramente non sarà caratterizzato da una superficie perfettamente liscia.

Per quanto riguarda la resistenza agli strappi, si deve considerare di avere una situazione in cui il tessuto presenta già un piccolo foro o intaglio. Avere una buona resistenza agli strappi significa che la forza necessaria a creare uno strappo a partire dal piccolo foro o intaglio è alta. Tale caratteristica risulta importante in quanto limita le perdite di pressione, nel caso in cui il dispositivo venga danneggiato da fattori esterni.

3.1.5 Elasticità

Un'altra caratteristica che va presa in considerazione è l'elasticità, che assume un ruolo importante in fase di gonfiaggio del dispositivo. L'elasticità del materiale favorisce l'occupazione della sezione trasversale del pozzo e in questa maniera è più facile ottenere il bloccaggio del dispositivo lungo le pareti. I dispositivi realizzati con materiali deformabili possono avere quindi dimensioni iniziali minori rispetto a quelli ottenuti con tessuti che non si deformano. Ciò può essere un vantaggio perché permette di avere un dispositivo con dimensioni iniziali meno voluminose e quindi meno ingombranti.

Tuttavia, l'elasticità non è una caratteristica che il tessuto deve avere obbligatoriamente. I materiali utilizzati nel presente lavoro di tesi sono sia elastici che inestensibili, per poter eseguire un confronto e valutare le prestazioni di entrambe le tipologie.

3.2 Materiali utilizzati

Lo scopo di questo sottocapitolo è di classificare le diverse tipologie di materiali utilizzati per la realizzazione del dispositivo pneumatico dispiegabile. Nella fase preliminare del lavoro di tesi è stata eseguita una ricerca dei materiali adatti, che soddisfacessero le caratteristiche descritte in precedenza, con particolare attenzione all'impermeabilità all'aria.

Nel seguito vengono quindi descritte le varie tipologie di materiali presi in considerazione per la fabbricazione del dispositivo dispiegabile.

3.2.1 Medical Windtex

Uno dei tessuti utilizzati per la realizzazione del dispositivo dispiegabile è il Medical Windtex della ditta VAGOTEX. Tale tessuto è composto da tre strati di materiale, raffigurati in Figura 3.2, dei quali i due più esterni sono in un materiale biocompatibile simile al cotone. Lo strato interno è invece impermeabile all'aria, ma non completamente, per garantire perdite limitate durante il funzionamento.

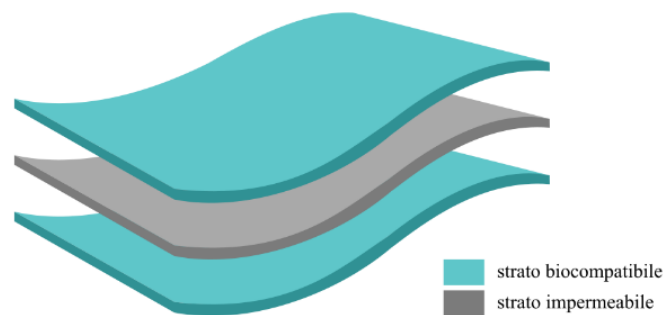


Figura 3.2: Struttura tessuto Medical Windtex

Per il corrente lavoro di tesi, sarebbe sufficiente lo strato interno dei tre che formano il Medical Windtex. La presenza dei due strati esterni provoca un aumento dello spessore totale, che ha un'influenza sul dispositivo finale, peggiorandone l'ingombro volumetrico nella configurazione iniziale, cioè da sgonfio.

Il Medical Windtex è un tessuto che si deforma lungo un'unica direzione, mentre la direzione perpendicolare alla prima risulta molto meno deformabile. La realizzazione dei dispositivi pneumatici di sicurezza deve quindi tenere conto di questa proprietà del tessuto, che diventa importante in fase di gonfiaggio del dispositivo. Nella Tabella 3.1 vengono inserite le principali caratteristiche del materiale:

	Grammatura	Spessore	Permeabilità all'aria	Elasticità
Medical Windtex	$\approx 200 \frac{g}{mq}$	0.5 mm	Molto bassa	Unidirezionale

Tabella 3.1: Caratteristiche principali Medical Windtex

3.2.2 Tessuti spalmati e laminati

In alternativa al Medical Windtex, è possibile fare uso di tessuti spalmati o laminati per la realizzazione del dispositivo gonfiabile. Con tessuto spalmato si intende un tessuto di supporto al quale è stata applicata una patina di materiale plastico, in maniera da ottenere determinate caratteristiche, come l'impermeabilità all'aria. Il tessuto che viene utilizzato come base può essere di diverse tipologie, a seconda del risultato che si vuole ottenere. La spalmatura viene realizzata combinando il tessuto di supporto con delle resine, in genere di tipo polimerico. Nella maggior parte dei casi, la spalmatura viene eseguita con due tipologie di resine:

- Polivinilcloruro (PVC): è estremamente duraturo, ma poco sostenibile dal punto di vista produttivo e dello smaltimento.
- Poliuretano (PU): ha caratteristiche meccaniche e fisiche superiori rispetto al primo ed è più sostenibile.

I tessuti laminati invece, sono realizzati incollando uno strato separato di materiale, in genere di tipo plastico, utilizzando adesivi, calore o pressione. Lo strato laminato ha il compito di andare a formare una barriera fisica su uno o entrambi i lati del tessuto di supporto, al quale vengono conferite nuove proprietà come la resistenza al passaggio dell'aria o dell'acqua, maggiore durata o isolamento termico, mantenendo le caratteristiche del tessuto di base.

In genere, lo strato plastico che viene utilizzato per ottenere il tessuto laminato è in polivinilcloruro (PVC), polietilene (PE) o poliuretano (PU). Quello che si ottiene è un tessuto multistrato, in cui la pellicola è un'entità separata che viene fatta aderire al tessuto di base.

Confrontando laminazione e spalmatura si evidenzia che in entrambi i casi lo strato di rivestimento viene applicato affinché venga fornita una protezione contro gli agenti esterni. Inoltre, il rivestimento può conferire al tessuto di base una migliore resistenza in termini di durata, di resistenza all'abrasione e agli urti. La spalmatura crea un prodotto finale integrato rispetto alla laminazione, in quanto lo strato di polimero penetra nei pori del tessuto di supporto. Con la laminazione il prodotto che si ottiene è più eterogeneo, composto da strati di supporto e rinforzo separati.

La Tabella 3.2 mette a confronto le principali caratteristiche dei tessuti spalmati e laminati:

	Laminazione	Spalmatura
Metodo di fabbricazione	Il tessuto di supporto e quello di rinforzo sono eterogenei	Il tessuto di rinforzo entra nei pori del tessuto di supporto
Struttura finale	Struttura multistrato	Monostrato con superficie rivestita
Protezione	Elevata protezione agli agenti esterni	Elevata protezione agli agenti esterni
Flessibilità	Meno flessibile per via della pellicola esterna	Generalmente più flessibile, a seconda del materiale utilizzato per la spalmatura
Traspirabilità	Meno traspirante per via della pellicola esterna	Generalmente più traspirante, a seconda del materiale utilizzato per la spalmatura e dello spessore del rivestimento

Tabella 3.2: Confronto laminazione e spalmatura

3.2.3 Tessuti tecnici e sportivi

I tessuti da abbigliamento e da strumentazione sportivi sono adatti alla realizzazione del dispositivo ad attuazione pneumatica, essendo materiali che operano in situazioni estreme dal punto di vista atmosferico. Tra i tessuti tecnici, si cita il ripstop, la cui creazione è un processo che conferisce al tessuto una resistenza eccezionale allo strappo e alla lacerazione. La tecnica di rinforzo che caratterizza tale tessuto fa uso di fili più robusti, di dimensione maggiore rispetto a quelli utilizzati nella restante parte della trama, come visibile in Figura 3.3. Tali fili di rinforzo vengono inseriti nella struttura del tessuto a intervalli regolari, generalmente ogni 5 mm, creando una rete di supporto per il materiale.

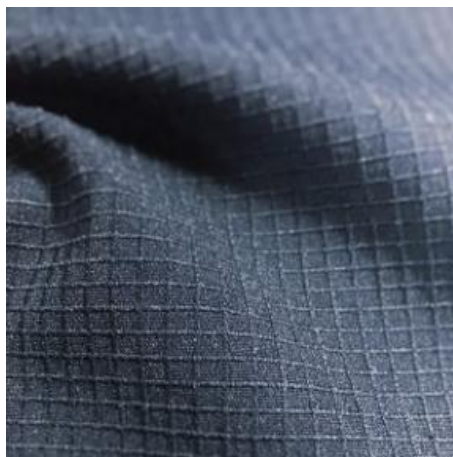


Figura 3.3: Trama del tessuto ripstop

La struttura caratteristica del ripstop permette di prevenire la propagazione di piccoli strappi, proprio grazie alla sua trama intrecciata. Tale proprietà migliora la durabilità del tessuto, poiché l'estensione del danno viene limitata. L'utilizzo di tale materiale risulta favorevole per la realizzazione del dispositivo di sicurezza in quanto limita eventuali fori che si creano a seguito dell'interazione con fattori esterni. Avere un foro nel dispositivo dispiegabile è sempre un problema perché riduce notevolmente la pressione interna, rischiando di limitare la funzione di supporto alla vittima. Prevenire la propagazione del foro è un aspetto fondamentale in quanto è più difficile che il dispositivo venga messo completamente fuori servizio.

Per quanto riguarda l'impermeabilità all'aria dei tessuti tecnici, si considera uno studio di Islam MA et al. [14], i quali si concentrano sulle prestazioni di diverse tipologie di tessuto e in particolare si esegue un confronto tra i tessuti semplici e i tessuti ripstop. Il materiale analizzato è il Nomex IIIA, una particolare tipologia di poliestere puro. Lo studio eseguito evidenzia che il tessuto ripstop ha valori di permeabilità all'aria poco più alti rispetto al tessuto semplice. Questo è legato alla struttura del materiale, per cui più la trama del tessuto è densa e più la permeabilità all'aria sarà bassa. Viene risaltato il fatto che i tessuti tecnici sono ottimi come barriera all'acqua e al vento, quindi all'aria, ma in realtà non sono perfettamente impermeabili all'aria. Ciò è dovuto al fatto che i tessuti tecnici sono spesso microporosi e quindi nel tempo rilasciano aria sotto pressione. Per ottenere un tessuto perfettamente impermeabile all'aria è necessario eseguire un trattamento di spalmatura o di laminazione.

Nella Tabella 3.3 sono riportate le principali caratteristiche del tessuto in poliestere ripstop selezionato per la realizzazione dell'elemento di sicurezza.

	Grammatura	Spessore	Permeabilità all'aria	Elasticità
Tessuto impermeabile ripstop poliestere	$\approx 80 \frac{g}{mq}$	0.1 mm	Bassa	Non elastico

Tabella 3.3: Caratteristiche principali poliestere ripstop

3.2.4 Nylon

In alternativa ai materiali analizzati in precedenza, si propone anche l'utilizzo del nylon, che appartiene a una famiglia delle poliammidi sintetiche. Tra le varie tipologie di nylon esistenti, la più interessante per la realizzazione del dispositivo dispiegabile è il nylon 6, che può essere facilmente modellato in varie forme e per questo motivo è largamente utilizzato per la produzione di tessuti e per l'abbigliamento.

Il nylon è un materiale caratterizzato da una buona resistenza agli sforzi di trazione, allo strappo e all'abrasione. Inoltre, è un tessuto flessibile, per cui è in grado di piegarsi senza perdere la propria forma.

Nonostante il nylon sia caratterizzato dalla proprietà di resistenza all'aria e all'acqua, bisogna sottolineare che tale materiale non è intrinsecamente impermeabile. Ciò significa che un tessuto di questo tipo offre una buona resistenza al vento, ma nel caso in cui sia sottoposto a pressione interna, l'aria è in grado di attraversare il materiale da una parte all'altra.

Il tessuto in nylon scelto per la realizzazione del dispositivo di sicurezza è ripstop, più resistente agli urti e agli strappi di un semplice tessuto in nylon. Le caratteristiche principali sono riportate nella Tabella 3.4:

	Grammatura	Spessore	Permeabilità all'aria	Elasticità
Tessuto in nylon ripstop	$\approx 50 \frac{g}{mq}$	0.1 mm	Bassa	Non elastico

Tabella 3.4: Caratteristiche principali nylon ripstop

3.2.5 TPU

L'ultimo materiale considerato per la realizzazione del dispositivo di sicurezza è il TPU, o poliuretano termoplastico, un tipo di materiale sintetico caratterizzato da proprietà di estrema resistenza e durevolezza nel tempo. Una delle più importanti caratteristiche del TPU è l'impermeabilità, per questo motivo risulta ottimale per soddisfare le richieste operative del dispositivo pneumatico dispiegabile. Inoltre, la sua resistenza gli permette di sopportare il logoramento dovuto a fattori esterni. Ciò è essenziale per il dispositivo di sicurezza che deve lavorare all'interno del pozzo artesiano in un contesto complicato, per via dell'irregolarità che caratterizza le pareti del pozzo.

Il TPU è anche termoplastico, termine con cui si intende la proprietà di alcuni materiali di ammorbidirsi e fondere quando vengono riscaldati, per poi solidificare nuovamente una volta che si raffreddano. Come si vedrà nel seguito, tale proprietà risulterà fondamentale per la realizzazione di dispositivi dispiegabili per mezzo della combinazione con altri tessuti.

Un vantaggio della sigillatura a caldo consiste nella mancata necessità di utilizzare colle o cuciture. Ciò risulta favorevole dal punto di vista produttivo, in quanto il processo di realizzazione del dispositivo richiede un minore impiego temporale. Eseguire una sigillatura a caldo comporta anche un miglioramento della resistenza del materiale, in quanto le trame dei due tessuti si fondono insieme e creano una connessione resistente.

Si sottolinea il fatto che il TPU può essere utilizzato per rinforzare un tessuto di supporto per mezzo di una laminazione, ottenendo un tessuto multistrato completamente impermeabile. Questa è infatti la soluzione adottata da Nguyen et al. [15], che utilizzano un tessuto di nylon rivestito in poliuretano termoplastico per ottenere attuatori pneumatici morbidi in tessuto.

Le principali caratteristiche del TPU scelto sono riportate nella Tabella 3.5:

	Grammatura	Spessore	Permeabilità all'aria	Elasticità
Tessuto TPU impermeabile traslucido	$\approx 130 \frac{g}{mq}$	0.1 mm	Nulla (impermeabile)	Omnidirezionale

Tabella 3.5: Caratteristiche principali TPU

3.3 Metodo di realizzazione del dispositivo dispiegabile

In questo paragrafo si definisce la procedura operativa che porta alla realizzazione del dispositivo dispiegabile in tessuto. Per via del fatto che sono state prese in considerazione diverse tipologie di materiale, è possibile che la stessa metodologia di realizzazione non sia adatta a tutti i tessuti. Per questo motivo vengono descritte tutte le metodologie di fabbricazione utilizzate nel lavoro di tesi.

In primo luogo, è stato eseguito un lavoro di analisi delle possibili geometrie e dimensioni in grado di soddisfare i requisiti operativi del dispositivo di sicurezza del robot di salvataggio. Successivamente, si riporta una descrizione, specifica per ciascun materiale, che analizza i passaggi produttivi che portano alla realizzazione del dispositivo pneumatico dispiegabile.

3.3.1 Geometria del dispositivo dispiegabile

La fase iniziale di progettazione del dispositivo di sicurezza coincide con la definizione della geometria e delle dimensioni. La scelta della geometria deve tenere in considerazione alcuni fattori fondamentali.

In primis, si deve optare per una geometria che massimizza l'area di contatto con la parete del pozzo. Avere un'ampia superficie di contatto significa avere un ancoraggio stabile e affidabile, in grado di fungere da barriera fisica per una eventuale caduta della vittima. Inoltre, aumentare la superficie di appoggio tra il dispositivo e la parete vuole dire lavorare con una minore pressione interna al dispositivo. Tale pressione deve generare una forza resistente che sia in grado di opporsi alla forza d'impatto della vittima in caso di caduta.

Si deve poi tenere conto del fatto che il dispositivo dispiegabile deve essere impacchettato nella configurazione iniziale sgonfia e tale configurazione deve avere un ingombro volumetrico limitato, per poter passare attraverso il poco spazio lasciato a disposizione dalla vittima incastrata nel pozzo, in maniera tale da posizionare l'elemento di sicurezza al di sotto di essa. Il metodo di impacchettamento deve essere tale da garantire un transitorio di espansione fluido e rapido, privo di occlusioni.

Nel corso del lavoro di tesi, le diverse forme di cui si è fatto uso sono elencate nel seguito:

- Prismatica quadrata: le prime prove vengono effettuate su piccoli provini di forma prismatica quadrata, per valutare il comportamento del tessuto soggetto a pressione interna.
- Prismatica rettangolare: si tratta di due strati di tessuto rettangolari, uniti l'uno con l'altro, in maniera tale da andare a creare una forma simile a quella di un cuscino.
- Sferica a fusi: tale forma viene realizzata a partire da un certo numero di spicchi bidimensionali, i quali vengono uniti tra di loro a formare una geometria che si avvicina allo sferico quando il numero di spicchi è alto.
- Sferica ad anelli concentrici: l'unione di anelli concentrici di dimensioni crescenti permette di evitare l'insorgenza del carico di pelatura, che può causare la messa fuori servizio del dispositivo.
- Cilindrica: vengono messi insieme due elementi circolari di tessuto, che fungono da fondi del cilindro, per mezzo di una striscia di materiale intermedia. L'idea di base è quella di aumentare la superficie di contatto con la parete rispetto al caso in cui il dispositivo ha forma sferica.
- Soffietto: si tratta di un'evoluzione della forma prismatica rettangolare. Il dispositivo di sicurezza a soffietto è composto infatti da un certo numero di elementi prismatici rettangolari disposti in serie in modo tale da occupare più efficacemente lo spazio all'interno del pozzo artesiano.

3.3.2 Raccordo pneumatico tra dispositivo e linea di alimentazione

Prima di analizzare il metodo di realizzazione dei dispositivi di sicurezza è necessario descrivere le tipologie di raccordo pneumatico utilizzate. Le possibilità che permettono di ottenere la connessione tra il dispositivo dispiegabile e il tubo della linea pneumatica di alimentazione sono elencate nel seguito.

Le possibili soluzioni di collegamento sono le seguenti:

- Occhiello: viene utilizzato nelle prime prove di realizzazione del dispositivo dispiegabile. L'occhiello, raffigurato in Figura 3.4, viene inserito all'interno del foro eseguito con la fustellatrice e successivamente è necessario fissarlo al tessuto.

La tenuta di questo raccordo non è ottimale e infatti si hanno delle perdite non trascurabili quando viene azionata la linea di alimentazione. Il rischio che si corre utilizzando tale tipologia di raccordo è che il tubo collegato ad esso, nel caso in cui non sia stato fissato adeguatamente, si stacchi in fase di funzionamento.



Figura 3.4: Raccordo pneumatico a occhiello

- Raccordo rapido: i raccordi di questo tipo, mostrati in Figura 3.5 sono utilizzati in pneumatica per via della loro semplicità e affidabilità.

Per montare il raccordo rapido sul dispositivo dispiegabile si fora il tessuto nella zona in corrispondenza del rinforzo e si inserisce il raccordo. La parte meno ingombrante del raccordo rapido (maschio) deve stare nella parte interna del dispositivo dispiegabile. Le due parti del raccordo rapido vengono poi avvitate l'una con l'altra aiutandosi con una pinza o con una chiave. Come si vedrà nel seguito, è possibile fare uso di una guarnizione intermedia per migliorare la tenuta.

Questa tipologia di raccordo è più ingombrante rispetto alla precedente e rischia di compromettere la fabbricazione del dispositivo dispiegabile. Infatti, l'ingombro della parte interna del raccordo può causare la nascita di grinze in fase di incollaggio del dispositivo, che si traducono in perdite non trascurabili durante il funzionamento.



Figura 3.5: Raccordo pneumatico rapido

- Raccordo di gonfiaggio – guarnizione – dado di fissaggio [16]: in Figura 3.6 e in Figura 3.7 vengono riportate le tavole dei raccordi pneumatici che sono stati fatti produrre su misura. Si hanno due diverse tipologie, una più ingombrante con filettatura M8 e l'altra meno ingombrante con filettatura M6. Per ottenere il fissaggio di tale raccordo con il dispositivo ad attuazione pneumatica viene utilizzato il dado corrispondente alla filettatura del raccordo. Tra il dado e il raccordo viene inserita una guarnizione che limita le perdite di aria grazie alla sua funzione di tenuta.

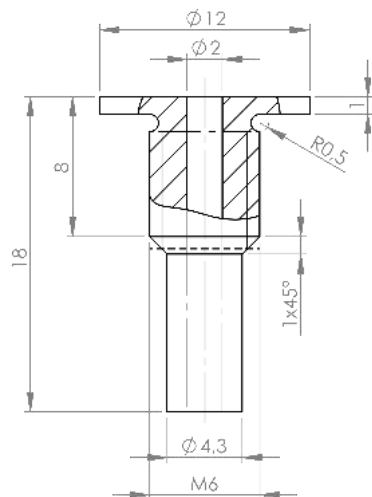


Figura 3.6: Raccordo di gonfiaggio-guarnizione-dado M6

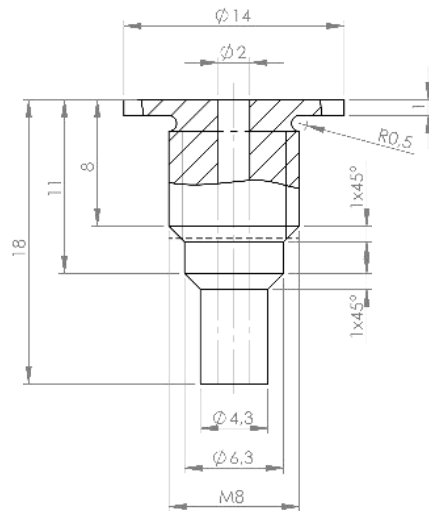


Figura 3.7: Raccordo di gonfiaggio-guarnizione-dado M8

Questo metodo di connessione tra linea pneumatica e dispositivo dispiegabile è una valida soluzione, per via del fatto che si ha un buon fissaggio del raccordo e dunque le perdite sono limitate, se non tendenti a zero. Inoltre, l'ingombro interno è in questo caso nullo e la fabbricazione del dispositivo non incontra problemi legati alla formazione di grinze.

Il principale problema che si incontra in questo caso è il rischio che il tubo si stacchi dal raccordo quando l'aria viene mandata con una pressione eccessivamente alta.

3.3.3 Realizzazione del dispositivo dispiegabile

In questo paragrafo si descrive la metodologia di fabbricazione seguita per realizzare il dispositivo pneumatico, che dipende principalmente dalla geometria e dal materiale utilizzato.

La linea guida che si segue è quella di realizzare dispositivi di diverse geometrie con il tessuto Medical Windtex. Successivamente, i prototipi ottenuti vengono messi in funzione, collegandoli alla linea pneumatica di alimentazione tramite i raccordi descritti precedentemente, per analizzarne le prestazioni. In particolare, vengono valutate le perdite, viene valutato il processo di gonfiaggio del dispositivo, poiché si vuole capire come occuperà la sezione trasversale del pozzo artesiano una volta messo in funzione. Tra le geometrie realizzate, quella con le perdite minori e con la migliore occupazione

della sezione trasversale del condotto in plexiglass viene riprodotta con altri tessuti, con lo scopo di eseguire un confronto e valutare la combinazione geometria-tessuto ottimale.

3.3.4 Realizzazione dei robot morbidi

La metodologia di fabbricazione dei soft robot può essere studiata in maniera tale da prendere spunti validi alla realizzazione del dispositivo dispiegabile di sicurezza in tessuto.

Il lavoro di Nguyen et al. [15] definisce le linee guida da seguire per la corretta fabbricazione dei robot morbidi in tessuto, che sfruttano le caratteristiche di rigidità iniziale nulla ed elevata elasticità. Analizzando tale lavoro si evidenzia che per ottenere i pezzi di tessuto delle dimensioni desiderate viene utilizzato un macchinario a taglio laser e l'incollaggio delle varie componenti del robot morbido viene eseguito per mezzo di una termosaldatrice CNC. Si fa inoltre uso della macchina da cucire per rinforzare il dispositivo o per ottenere delle zone inestensibili che ne limitano la deformazione.

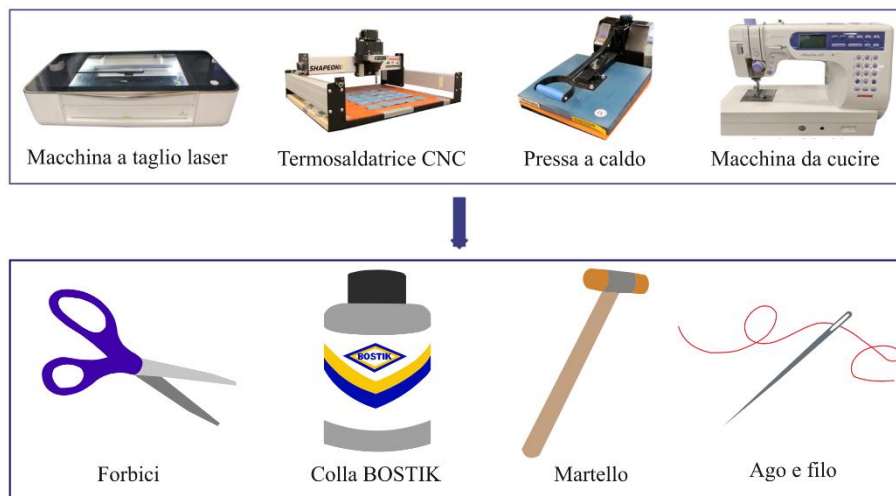


Figura 3.8: Macchinari utilizzati per la produzione di robot morbidi

Nel caso in cui si possa fare uso dei macchinari citati, la realizzazione dei robot morbidi non risulta particolarmente complicata. Tuttavia, nel presente lavoro di tesi, non si è potuto usufruire di tali macchinari per cui si è cercato di adattare ogni singolo passaggio alle possibilità offerte dal laboratorio, come si vede in Figura 3.8. Più precisamente, al posto di utilizzare il taglio laser si utilizza un paio di forbici o un taglierino, per mettere insieme i vari fogli di tessuto si fa uso di colla invece che utilizzare la saldatrice. Per favorire l'incollaggio tra le parti viene utilizzato un martello, che sostituisce la pressa a

caldo. Inoltre, il rinforzo conferito dalla cucitura a macchina viene sostituito da una cucitura a mano con ago e filo.

3.3.5 Realizzazione del dispositivo pneumatico con Medical Windtex

Si analizza la procedura operativa che porta alla realizzazione dei dispositivi di sicurezza ad attuazione pneumatica con il tessuto Medical Windtex della ditta VAGOTEX.

Nelle fasi preliminari del lavoro di tesi è stato fatto riferimento a geometrie di piccole dimensioni, affinché fosse possibile analizzare il comportamento del prototipo, e quindi del materiale, una volta gonfiato e messo in una condizione tale da riprodurre quella in cui dovrà operare. La decisione di utilizzare provini di piccole dimensioni permette di limitare il tempo legato alla realizzazione del dispositivo dispiegabile e di risparmiare materiale, evitando di realizzare provini di grandi dimensioni che poi si rivelano di poca importanza per quanto riguarda lo sviluppo della tesi. Questo è favorevole in quanto la disponibilità di materiale non è illimitata.

3.3.5.1 Medical Windtex: forma prismatica quadrata

Si considera la descrizione del procedimento che porta alla fabbricazione del dispositivo di sicurezza di forma prismatica quadrata, in quanto l'idea di base sarà poi la stessa anche per altre forme utilizzate.

Il procedimento che si segue per la fabbricazione del dispositivo pneumatico di sicurezza ha inizio con il taglio del tessuto delle dimensioni desiderate. In questo specifico caso la direzione elastica del tessuto non comporta limitazioni durante il taglio del materiale in quanto la geometria che si utilizza è quadrata. Nei casi che verranno descritti in seguito, sarà fondamentale prestare attenzione a come viene eseguito il taglio del tessuto. Successivamente è necessario inserire il rinforzo in corrispondenza del punto in cui viene posizionato il raccordo pneumatico. Si ricava un piccolo pezzo di tessuto e lo si incolla nella posizione voluta, facendo attenzione che la direzione elastica dei due tessuti sia la stessa.

La colla che si utilizza è la BOSTIK super chiaro, che deve essere stesa, lasciata asciugare fin tanto che non risulta secca e a questo punto è possibile procedere con l'incollaggio delle parti. Per favorire l'incollaggio è possibile aiutarsi con un rullo o con un martello in maniera tale da esercitare una pressione che unisce le due parti. Più è forte la pressione

esercitata e migliore sarà l'incollaggio dei tessuti. Inoltre, per ottenere una migliore tenuta della colla è necessario attendere una giornata intera prima di mettere il dispositivo pneumatico sotto stress di pressione interna.

A questo punto è possibile forare la zona rinforzata del tessuto per inserire il raccordo che collega il dispositivo alla relativa linea di alimentazione. Si hanno ora due pezzi di tessuto, di cui uno contiene il raccordo pneumatico. Per eseguire il collegamento delle due parti, si procede con l'incollaggio dei bordi del tessuto, considerando una striscia di circa 1,5 cm. Lungo i bordi è dove si concentrano le principali perdite del dispositivo, laddove è stato eseguito un incollaggio non perfettamente ermetico. Ottenere piccole perdite non è così difficile, soprattutto per via dell'ingombro interno del raccordo rapido che si utilizza in alcuni prototipi, che è la causa della nascita di increspature e pieghe nel pezzo di tessuto. Tali pieghe rendono complicata la corretta aderenza tra le due parti. In alcune prove, infatti, sono stati utilizzati due pezzi di tessuto di dimensioni diverse tra di loro, uno più grande e uno più piccolo, in maniera tale da avere un incollaggio semplificato e prevenire la comparsa delle increspature. Per limitare le perdite lungo i bordi del dispositivo, si decide di eseguire un'ulteriore piegatura del tessuto, ottenendo così un primo prototipo finito di dispositivo dispiegabile.

Per alcuni provini prismatici quadrati è stata utilizzata una guarnizione siliconica, il Motorsil D, lungo i bordi. Tale guarnizione viene spalmata dove le perdite sono più consistenti, con lo scopo di limitarle. Tuttavia, si tratta di una soluzione poco affidabile e inefficace.

In alternativa, si applica del nastro termosaldante lungo i bordi, basandosi sugli indumenti sportivi tecnici, che hanno cuciture termonastrate o termosaldate per favorire l'impermeabilità del capo. Questa soluzione si rivela più efficace dal punto di vista prestazionale rispetto all'utilizzo della guarnizione siliconica.

Terminata la fabbricazione del dispositivo pneumatico è possibile eseguire il gonfiaggio dello stesso, per analizzarne il comportamento quando sottoposto a pressione interna. Si evidenzia che il comportamento di deformazione elastico monodirezionale causa una diminuzione delle dimensioni nella direzione perpendicolare alla prima. In sintesi, la deformazione elastica in una direzione è la causa della contrazione nella direzione perpendicolare, per via della proprietà di elasticità monodirezionale del tessuto.

Considerando per esempio un prototipo di forma prismatica quadrata, caratterizzato da lati di 15 cm nella configurazione sgonfia, quando lo si gonfia ad una pressione di circa 30 mbar, la deformazione elastica monodirezionale comporta una diminuzione della dimensione di un lato fino a 10 cm circa. L'altro lato mantiene inalterata la propria lunghezza, poiché la deformazione avviene nella direzione verticale.

In maniera qualitativa si può quindi dire che la deformazione elastica monodirezionale causa una diminuzione del 30% circa della dimensione nella direzione perpendicolare alla prima.

In Figura 3.9 sono rappresentati i passaggi che portano alla realizzazione del primo prototipo:

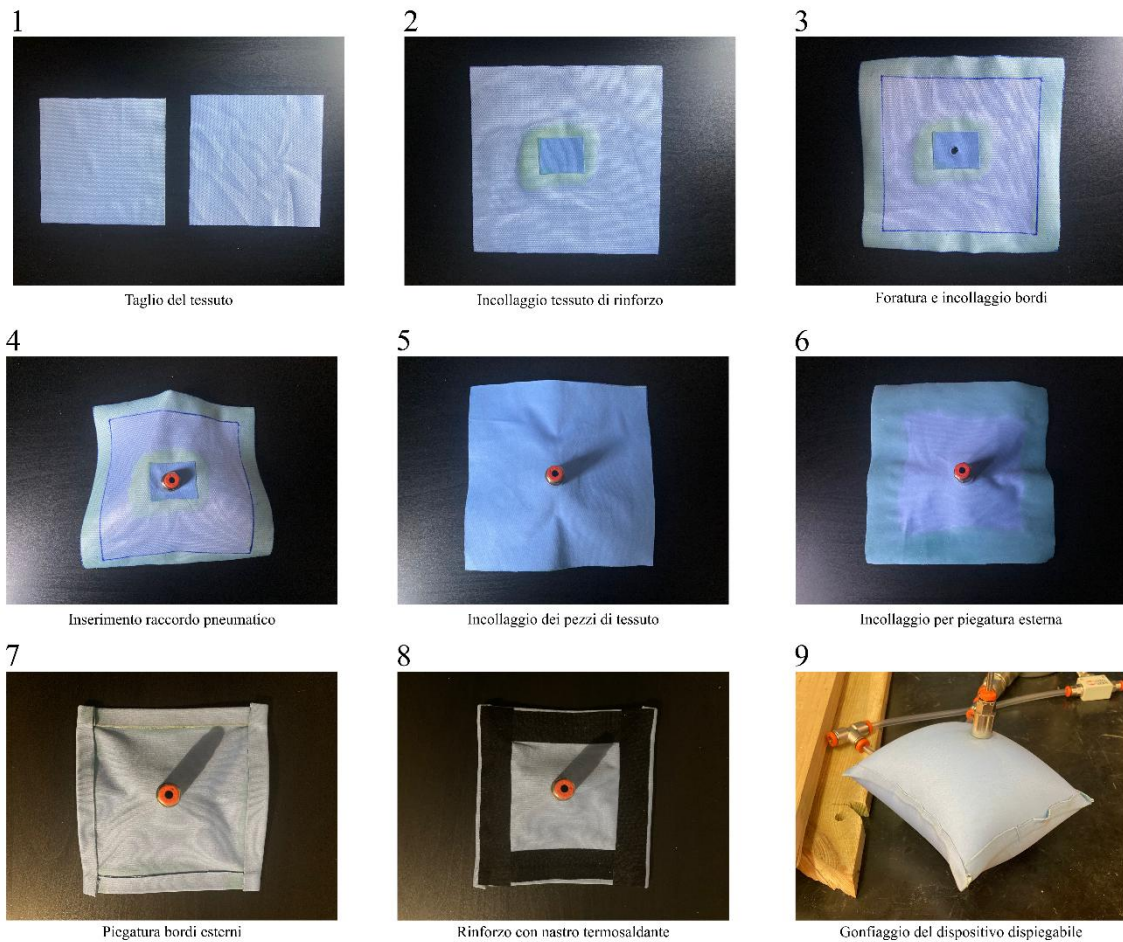


Figura 3.9: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma prismatica quadrata

In Figura 3.10 e in Tabella 3.6 si riportano le quote e le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma prismatica quadrata.

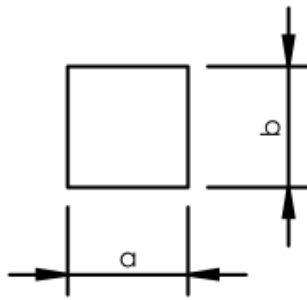


Figura 3.10: Quote provino
forma prismatica quadrata

Dimensioni taglio [cm]	
a	12
b	12

Tabella 3.6: Dimensioni provino
forma prismatica quadrata

3.3.5.2 Medical Windtex: forma prismatica rettangolare

Il procedimento operativo che porta alla realizzazione del dispositivo prismatico rettangolare segue l'idea di base descritta in precedenza. L'unica vera differenza è che, avendo un dispositivo prismatico rettangolare, si tagliano due pezzi di tessuto di forma rettangolare e non più quadrata.

Il primo passaggio consiste nel tagliare i pezzi di tessuto necessari alla realizzazione del dispositivo, delle dimensioni che si desiderano. L'idea è quella di ottenere un dispositivo dispiegabile che si gonfia come se fosse una sorta di cuscino.

A differenza del caso precedente, si sottolinea la necessità di decidere in un momento precedente al taglio quale deve essere la direzione elastica, per via delle proprietà del materiale che si sta utilizzando. In questo caso, la direzione di allungamento deve coincidere con il lato lungo del rettangolo, in modo da ottenere una deformazione del dispositivo che permette di riempire con efficacia la sezione trasversale del pozzo artesiano in cui deve operare.

Si rinforza il materiale nel punto in cui si va a inserire il raccordo, si incollano i bordi delle due parti di tessuto che devono essere unite e infine si esegue un'ulteriore piegatura per limitare al massimo le perdite lungo i bordi. Dopo aver realizzato il dispositivo lo si sottopone ad una pressione interna che ne permette il gonfiaggio.

Come nel caso di forma prismatica quadrata, la presenza di aria in pressione nel dispositivo genera una deformazione elastica lungo la direzione di allungamento del tessuto, che si traduce in una forza di contrazione nella direzione perpendicolare alla prima.

Considerando un provino di lati pari a 17 cm e 24 cm nella configurazione iniziale, il gonfiaggio del dispositivo ad una pressione di circa 30 mbar comporta una diminuzione del lato corto fino ad 11 cm, mentre il lato lungo non subisce alterazioni di dimensione poiché la deformazione avviene lungo la direzione verticale. La diminuzione dimensionale è in questo caso pari al 35% rispetto alla condizione iniziale.

Nella Figura 3.11 si riportano i passaggi necessari alla realizzazione di un dispositivo dispiegabile pneumatico di forma prismatica rettangolare:

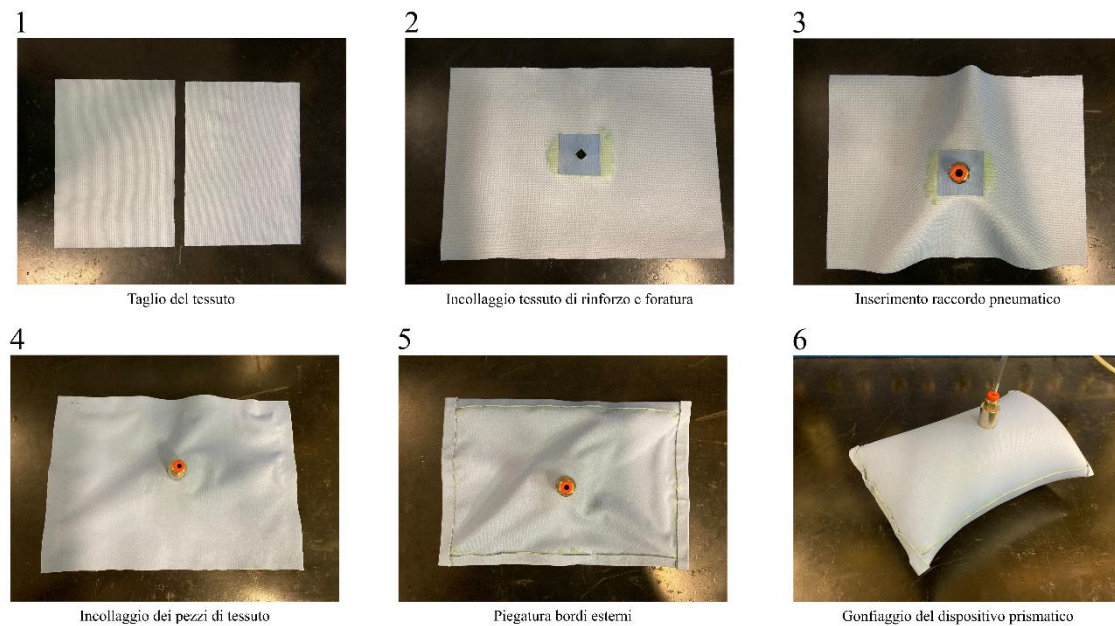


Figura 3.11: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma prismatica rettangolare

In Figura 3.12 e in Tabella 3.7 si riportano le quote e le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma prismatica rettangolare.

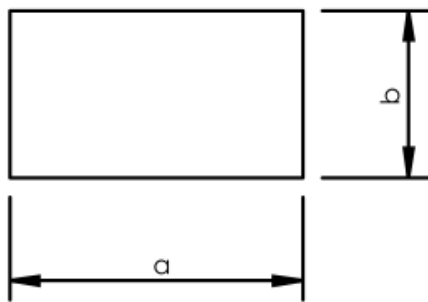


Figura 3.12: Quote provino
forma prismatica rettangolare

Dimensioni taglio [cm]	
a	30
b	17

Tabella 3.7: Dimensioni provino
forma prismatica rettangolare

3.3.5.3 Medical Windtex: forma sferica a spicchi

A questo punto si considera la realizzazione di un dispositivo gonfiabile di forma sferica, che richiede un procedimento operativo più complicato rispetto alle tipologie trattate precedentemente.

Il primo passaggio, di fondamentale importanza, consiste nella creazione di un cartamodello. Ciò permette di facilitare la realizzazione del dispositivo dispiegabile ed è fondamentale nel caso in cui si voglia riprodurre un dispositivo analogo. Se non si avesse il cartamodello, infatti, sarebbe complicato riprodurre fedelmente lo stesso dispositivo.

A partire da un foglio di carta o da un cartoncino, si disegnano gli spicchi che compongono la sfera, uno di fianco all'altro, seguendo determinate relazioni geometriche. Conoscendo il raggio della sfera che si vuole creare e il numero di spicchi che questa deve avere, si ricavano tutte le dimensioni degli spicchi della sfera. Si considerano le seguenti dimensioni:

- n : numero di spicchi;
- r : raggio della sfera;
- $2b$: altezza spicchio;
- c : larghezza spicchio;
- d : circonferenza della sfera;
- α : angolo al vertice dello spicchio.

Tali dimensioni fanno riferimento alla Figura 3.13, che tiene in considerazione una sfera formata da $n = 6$ spicchi:

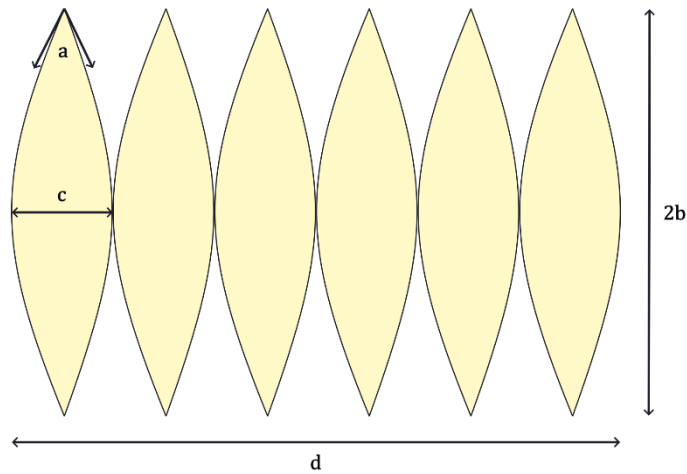


Figura 3.13: Dimensioni cartamodello

I dati di partenza utilizzati per creare il cartamodello sono il raggio, che fa riferimento alla dimensione del pozzo artesiano all'interno del quale opera il dispositivo di salvataggio, e il numero di spicchi che la sfera deve avere.

Per via del fatto che il presente lavoro di tesi si basa su un robot di salvataggio che opera all'interno di un pozzo artesiano di circa 30 cm di diametro, il raggio che si considera deve essere tale da ottenere un dispositivo dispiegabile con un diametro di circa 35 cm, così da avere una parte di esso a contatto con la parete del pozzo.

A partire da r e da n , si può calcolare la semi-altezza di uno spicchio:

$$b = \frac{(2\pi r)}{4} \quad (3.2)$$

Si calcola poi la larghezza circonferenziale di ciascuno spicchio, che dipende da quanti spicchi si hanno nella sfera:

$$c = \frac{(2\pi r)}{n} \quad (3.3)$$

La circonferenza totale della sfera è invece restituita dalla seguente relazione:

$$d = 2\pi r \quad (3.4)$$

Si calcola anche l'angolo al vertice di ogni spicchio, che dipende anch'esso dal numero di spicchi:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{n} \quad (3.5)$$

Con queste relazioni si crea il cartamodello per realizzare il dispositivo pneumatico di forma sferica. Si evidenzia il fatto che le relazioni definite in precedenza fanno riferimento alle dimensioni reali della sfera, che necessitano di essere incrementate per avere dei bordi che permettono l'incollaggio delle parti.

Una volta creato il cartamodello, è possibile passare alla realizzazione della corrispettiva forma sul tessuto. Si segue il contorno del cartamodello in maniera tale da avere la linea guida per la creazione della sfera. A questo punto è possibile tagliare il pezzo di tessuto della forma creata e si procede con l'incollaggio del rinforzo, in corrispondenza del punto in cui si andrà a inserire il raccordo di collegamento con l'alimentazione pneumatica.

Si procede poi con l'incollaggio degli spicchi, che risulta complicato in quanto le superfici da incollare non sono più lineari come nei casi precedenti, ma si tratta di superfici curve che tendono a formare facilmente delle grinze, le quali possono dare origine a perdite in fase di funzionamento del sistema. L'incollaggio degli spicchi per ottenere la geometria sferica avviene in due modi differenti. Il primo mantiene i bordi incollati tra di loro nella zona esterna al dispositivo mentre il secondo metodo si pone come obiettivo quello di portare all'interno del sistema pneumatico i bordi incollati. L'ottenimento di quest'ultima geometria segue lo stesso procedimento della soluzione in cui i bordi incollati sono all'esterno, con la differenza che verso la fine del processo di incollaggio dei bordi è necessario rigirare il tessuto, così da invertire l'interno con l'esterno e viceversa. Operando in questa maniera, l'incollaggio dell'ultimo bordo deve essere eseguito quando il dispositivo è già stato girato su sé stesso.

La difficoltà principale che si riscontra in queste soluzioni riguarda l'incollaggio dei punti in corrispondenza dei quali si incontrano tutti gli spicchi, per entrambe le metodologie di incollaggio dei bordi. In questa posizione è infatti complicato incollare correttamente tra di loro tutti gli spicchi e quindi è facile avere un dispositivo che presenta due piccoli fori, dalla quale l'aria in pressione esce con facilità generando delle perdite non trascurabili.

Nella Figura 3.14 sono riportati i passaggi che portano alla creazione dei dispositivi di forma sferica a spicchi, con bordi sia all'interno che all'esterno:

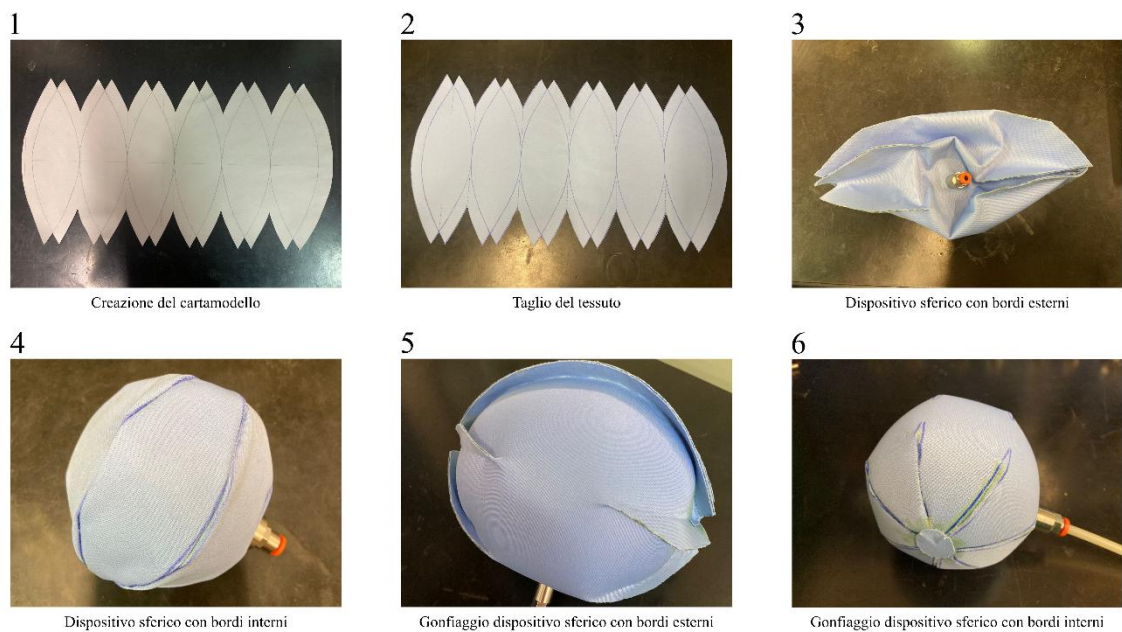


Figura 3.14: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma sferica a spicchi

Nella Tabella 3.8 si riportano le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma sferica a spicchi.

Dimensioni taglio [cm]	
α	60°
b	27,5
c	18,3
d	110

Tabella 3.8: Dimensioni provino forma sferica a spicchi

3.3.5.3.1 Peel stress: carico di pelatura

L'incollaggio ha il grande vantaggio di permettere l'unione di materiali diversi tra loro, ma allo stesso tempo comporta delle problematiche. In questo paragrafo si vuole analizzare lo stress più critico che agisce sul dispositivo dispiegabile e che, nella maggior parte dei casi, rischia di portare il materiale a cedimento. Questo tipo di stress, noto come stress di pelatura, nasce quando la pressione interna agisce in maniera perpendicolare rispetto ai tessuti incollati, come rappresentato in Figura 3.15. Si differenzia dallo sforzo di taglio perché quest'ultimo è distribuito su un'area distesa, mentre lo stress di pelatura si concentra sull'interfaccia di incollaggio, creando un picco di sollecitazione in questa zona.

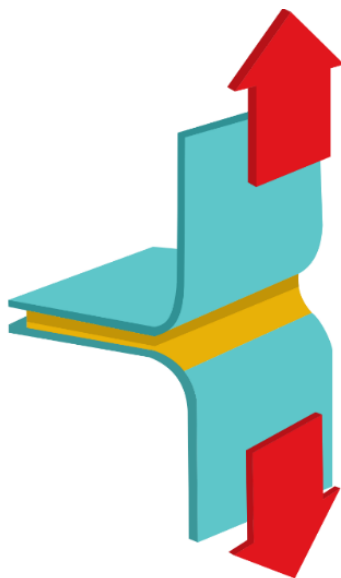


Figura 3.15: Carico di pelatura

La resistenza degli strati incollati evidenzia un comportamento altamente anisotropo, in quanto la resistenza del materiale è molto alta lungo la direzione delle fibre mentre le proprietà di resistenza trasversale e di taglio sono decisamente inferiori.

Per analizzare più nel dettaglio questo comportamento, sono state studiate diverse casistiche di giunti, ottenuti dall'incollaggio delle due componenti che lo vanno a formare. In particolare, nel caso di studio analizzato da Yang et al. [17], si indagano le caratteristiche di resistenza e i meccanismi di rottura dello strato adesivo nelle strutture di connessione ibrida, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), incollate e imbullonate con interferenza, sottoposte a carico di trazione. Tale caso di studio è analogo al caso in cui si ha un dispositivo gonfiabile ad aria sottoposto ad una pressione interna, che funge da carico di trazione e quindi tende ad aprire lo strato incollato.

Quando viene applicato il carico di trazione, ha inizio la propagazione del debonding, o scollamento interfacciale, per via dello stress di pelatura che agisce su un piano diverso rispetto al piano di incollaggio. Il debonding interfacciale ha inizio in corrispondenza della zona di sovrapposizione dei due strati di materiale e si propaga verso l'interno della zona di incollaggio. La propagazione dello scollamento comporta una diminuzione della rigidità della struttura nel suo complesso, che ha una maggiore probabilità di collassare.

3.3.5.3.2 Metodi di realizzazione che prevengono il carico di pelatura

Il carico di pelatura è il fattore determinante che innesca il debonding in corrispondenza dell'estremità dell'adesivo e che può portare ad un danneggiamento e alla conseguente rottura della membrana gonfiabile.

Si vogliono analizzare i metodi che permettono di prevenire questa situazione, pericolosa dal punto di vista operativo. Una prima soluzione che previene l'insorgenza del carico di pelatura è rappresentata in Figura 3.16 e consiste nell'utilizzare una metodologia di realizzazione del dispositivo tale da incollare la parte esterna del tessuto con la parte interna del pezzo a cui si deve congiungere, come evidenziato dalla figura seguente:

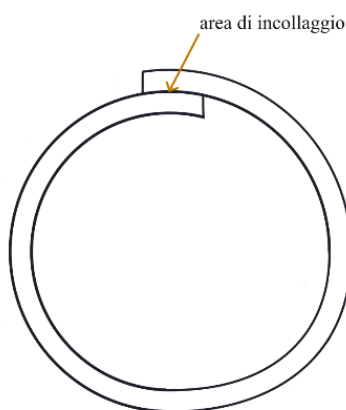


Figura 3.16: Metodo di incollaggio per prevenire il carico di pelatura

Ipotizzando di avere una determinata pressione all'interno del tessuto, lo strato di colla che unisce le due parti di materiale non è sottoposto ad alcun tipo di tensione trasversale, dove la sua resistenza è decisamente minore. Questa soluzione evita la nascita dello stress di pelatura e le probabilità di collasso del dispositivo sono decisamente minori.

In alternativa, è possibile fare affidamento alla combinazione tra incollaggio e cucitura del tessuto, nel caso in cui non sia possibile utilizzare la metodologia di incollaggio descritta precedentemente. L'incollaggio crea una barriera ermetica all'aria che garantisce isolamento mantenendo i due pezzi di tessuto uniti tra di loro. Come si è visto, in determinate situazioni il solo incollaggio non è in grado di evitare la nascita dello stress di pelatura, per cui è necessario rinforzarlo per mezzo della cucitura. Lo scopo della cucitura è quello di fornire resistenza strutturale e meccanica nei confronti degli sforzi di trazione. Il compito della cucitura è quindi quello di assorbire gli stress meccanici, come

lo stress di pelatura, limitando il debonding interfacciale. In questa maniera il peel stress non agisce solo sullo strato adesivo ma si scarica in parte anche sulla cucitura. Lo svantaggio della cucitura è che, per quanto fitta può essere, crea inevitabilmente dei fori nel tessuto attraverso i quali il gas sotto pressione può fuoriuscire. Per limitare la perdita di pressione attraverso i buchi risulta quindi necessario utilizzare nastri termosaldanti che annullano la fuoriuscita di aria in pressione.

3.3.5.4 Medical Windtex: forma sferica ad anelli concentrici

Per evitare l'insorgere dello stress di pelatura, si decide di rivisitare il metodo di realizzazione del dispositivo pneumatico dispiegabile di forma sferica a spicchi. La nuova metodologia si pone l'obiettivo di creare un sistema a partire da anelli concentrici incollati l'uno con l'altro in sovrapposizione. Tale metodo di incollaggio evita che la pressione interna generi una tensione di pelatura.

Per fabbricare questa tipologia di dispositivo, è necessario tagliare dei pezzi di tessuto di forma circolare e anulare, che siano concentrici tra loro. Come in precedenza, è necessario che i pezzi di tessuto abbiano dei bordi per permetterne l'incollaggio. Si sottolinea il fatto che la direzione elastica deve combaciare per ciascuno dei pezzi incollati.

Dopo aver incollato le forme anulari si ottengono i due dischi che devono essere uniti. A questo punto, la difficoltà principale consiste nell'unire due bordi circolari. Per evitare la formazione di grinze, si devono eseguire tagli radiali lungo il bordo, così da formare delle alette, le quali aderiscono al bordo circolare con molta più efficacia e permettono di limitare le perdite di aria in pressione.

Rispetto al metodo di fabbricazione che utilizzava gli spicchi per ottenere una geometria sferica del dispositivo, quest'ultimo risulta più efficace in quanto non è caratterizzato dalle perdite in corrispondenza dei vertici degli spicchi e inoltre non è soggetto a stress di pelatura, che danneggia il materiale rischiando di portarlo al collasso.

Il gonfiaggio del prototipo realizzato mette in evidenza un difetto legato al fatto che il tessuto è elastico lungo un'unica direzione. La deformazione elastica unidirezionale del tessuto permette di ottenere una forma gonfiata che si avvicina più a un ellissoide piuttosto che a una sfera. La forma che si ottiene non è soddisfacente, perché non sarebbe in grado di ricoprire con efficacia lo spazio all'interno del pozzo artesiano. Per questo

motivo, nel prototipo successivo si decide di aggirare la proprietà di elasticità monodirezionale del tessuto andando a dividere gli anelli concentrici in un determinato numero di parti. In questo modo è possibile orientare le diverse parti in una direzione preferenziale, evitando che il dispositivo gonfiato abbia una sola direzione di deformazione.

Nella Figura 3.17 sono mostrati gli step che portano alla realizzazione del dispositivo sferico ad anelli concentrici:

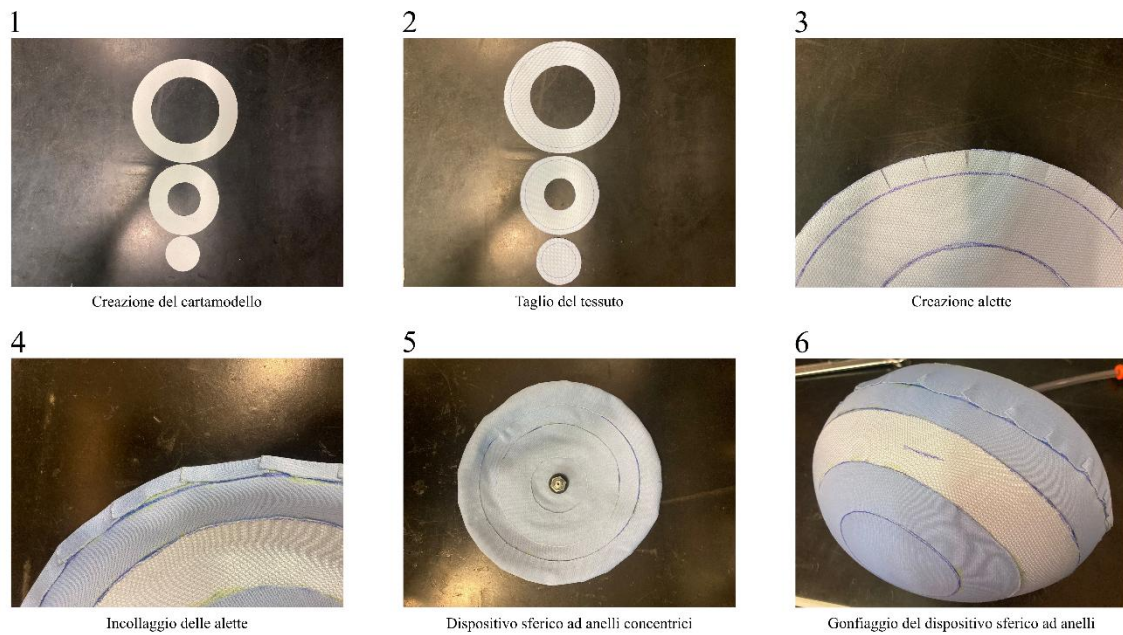


Figura 3.17: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma sferica ad anelli concentrici

In Figura 3.18 e in Tabella 3.9 si riportano le quote e le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma sferica ad anelli concentrici.

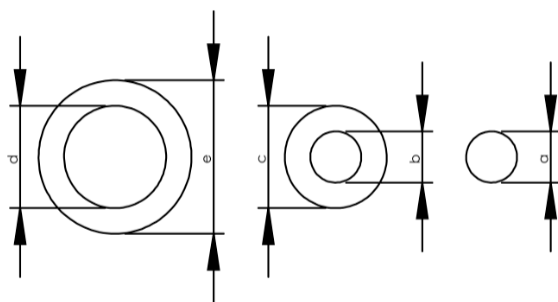


Figura 3.18: Quote provino forma sferica ad anelli concentrici

Dimensioni taglio [cm]	
a	12
b	12
c	23
d	23
e	34

Tabella 3.9: Dimensioni provino forma sferica ad anelli concentrici

3.3.5.5 Medical Windtex: forma cilindrica

Un'ulteriore forma da considerare per la produzione del dispositivo dispiegabile con il tessuto Medical Windtex della ditta VAGOTEX è quella cilindrica, caratterizzata da un'altezza piccola rispetto al diametro dei due fondi circolari. L'idea di base ha come obiettivo il miglioramento dell'ultimo prototipo descritto, e cioè quello sferico formato da anelli concentrici.

La metodologia di fabbricazione in questo caso consiste nel creare due dischi, che vengono poi uniti per mezzo di una lunga striscia incollata lungo le circonferenze. Tale situazione dovrebbe permettere di ottenere una superficie di contatto tra la parete del pozzo artesiano e il dispositivo dispiegabile più ampia rispetto ai casi precedenti.

La procedura di fabbricazione ha come scopo quello di ottenere delle forme anulari concentriche l'una con l'altra, ma essendo che la direzione elastica caratteristica del materiale Medical Windtex è una sola, le forme anulari vengono divise in quattro sotto parti con un angolo di 90° al centro del disco. Si vuole sottolineare il fatto che all'aumentare del numero di sezioni che creano i dischi si ottiene un comportamento che tende a quello di una geometria circolare ed elastica in tutte le direzioni. Tuttavia, aumentare il numero di sezioni vuole dire aumentare notevolmente il rischio di ottenere perdite di aria legate alla realizzazione del provino, in quanto risulterebbe molto più complicato produrlo. Bisogna quindi optare per il migliore compromesso che permette di ottenere un comportamento abbastanza simile a quello desiderato, ma che sia ottenibile per mezzo di un numero di passaggi costruttivi limitati, così da avere un procedimento operativo di fabbricazione semplice.

La realizzazione dei due dischi del cilindro può essere effettuata secondo diverse metodologie, che dipendono da come viene disposta la direzione elastica del materiale. In un caso la direzione elastica viene disposta in maniera tale da essere circonferenziale. Tuttavia, si decide anche di fabbricare un provino analogo dal punto di vista strutturale, che dispone la direzione elastica del tessuto in maniera radiale.

L'incollaggio della striscia di connessione tra i due dischi prevede di eseguire dei tagli lungo i bordi della striscia, nella direzione parallela al lato più corto, affinché si ottengano delle alette che favoriscono l'adesione con il bordo del disco, che invece non è rettilineo. La striscia di connessione contiene anche il raccordo pneumatico per collegare il dispositivo alla linea di alimentazione.

Ciò che si evidenzia dal gonfiaggio del prototipo realizzato è che la suddivisione degli anelli concentrici in quattro sotto parti conferisce al dispositivo una forma tendente a un prisma a base quadrata con un rapporto piccolo tra l'altezza, rappresentata dalla striscia di connessione, e il diametro. Come detto in precedenza, per raggiungere una situazione in cui il gonfiaggio del dispositivo si avvicini ad una forma cilindrica, è necessario aumentare il numero di sotto parti che formano gli anelli concentrici. Si sottolinea anche il fatto che i due fondi circolari sono soggetti ad una deformazione lungo la direzione verticale. Il comportamento che si ha permette quindi di ottenere una struttura simile ad una calotta sferica.

Nella Figura 3.19 è riportata la sequenza operativa che permette di ottenere il dispositivo cilindrico ad anelli, formato da quattro sotto parti:

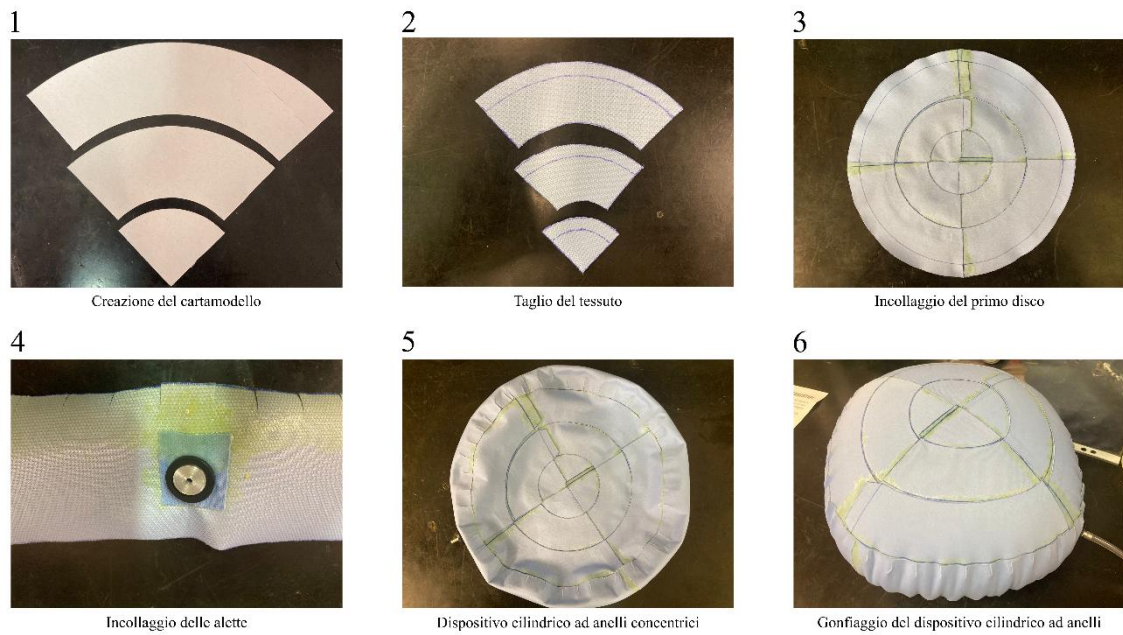


Figura 3.19: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica

In Figura 3.20 e in Tabella 3.10 si riportano le quote e le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma cilindrica.

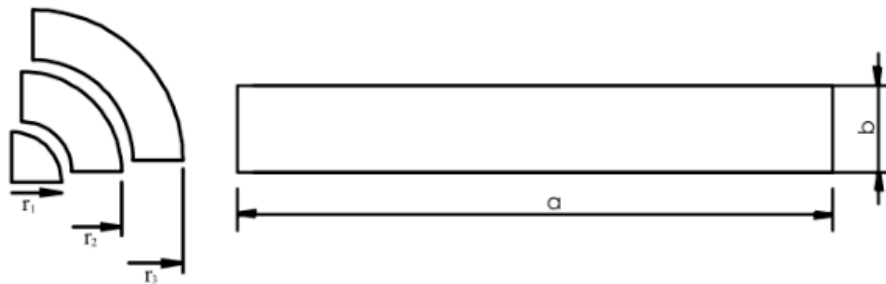


Figura 3.20: Quote provino forma cilindrica

Dimensioni taglio [cm]	
r_1	6
r_2	11,5
r_3	17
a	110
b	15

Tabella 3.10: Dimensioni provino forma cilindrica

In alternativa, si opta per una geometria cilindrica caratterizzata da dischi inestensibili. Per ottenere tale situazione si sfrutta la proprietà di elasticità monodirezionale del tessuto

che si sta utilizzando. L'idea di base è quella di ottenere i due fondi del cilindro per mezzo dell'incollaggio di due pezzi di tessuto circolari, la cui direzione elastica è disposta perpendicolarmente l'una con l'altra, così che la deformazione elastica venga eliminata vicendevolmente. Si procede poi con l'incollaggio della striscia di collegamento tra i due dischi. Il prototipo che si realizza in questo modo è più ingombrante rispetto a quelli precedentemente descritti, perché i fondi del cilindro hanno due strati di tessuto invece che uno solo.

In Figura 3.21 sono riportati gli step per la creazione del dispositivo cilindrico con fondi inestensibili. Rispetto al caso precedente, nella configurazione dispiegata si ottiene una forma più circolare perché i due dischi circolari non sono ottenuti dall'unione di quattro sotto parti con direzioni di deformazione perpendicolari. Il comportamento dei fondi circolari del cilindro è analogo al caso precedente. Infatti, si evidenzia una deformata simile ad una calotta sferica.

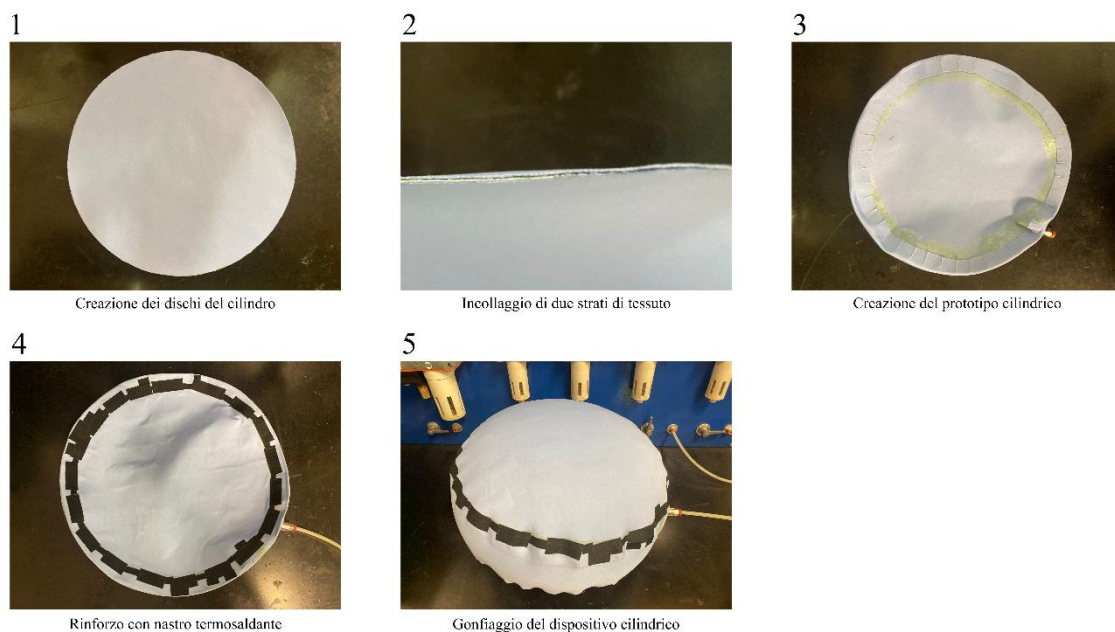


Figura 3.21: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica con fondi inestensibili

In Figura 3.22 e in Tabella 3.11 si riportano le quote e le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma cilindrica con fondi inestensibili.

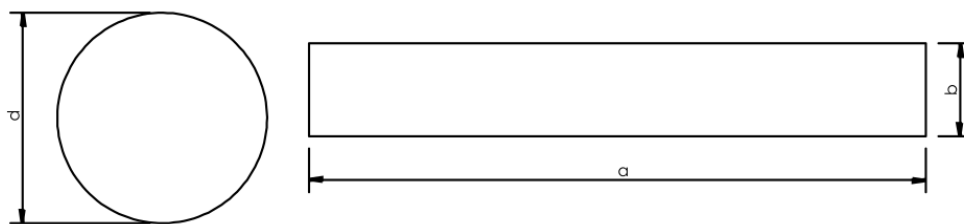


Figura 3.22: Quote provino forma cilindrica con fondi inestensibili

Dimensioni taglio [cm]	
a	110
b	15
d	34

Tabella 3.11: dimensioni provino forma cilindrica con fondi inestensibili

3.3.5.6 Medical Windtex: forma a soffietto

Uno degli obiettivi principali della fabbricazione del dispositivo pneumatico di sicurezza è di avere il minore ingombro possibile nella configurazione iniziale. Essendo il diametro del pozzo piccolo e per via del fatto che il bambino probabilmente occuperà quasi tutta la sezione trasversale del cunicolo, gli spazi a disposizione per permettere il passaggio del dispositivo di sicurezza sono limitati. Risulta dunque fondamentale che il dispositivo pneumatico abbia una tecnica di impacchettamento che permette di occupare uno spazio molto circoscritto. A questo proposito, per favorire l'impacchettamento e diminuire l'ingombro nella configurazione iniziale, si produce un provino a forma di fisarmonica, formato da un determinato numero di elementi di forma prismatica rettangolare. Il prototipo che si vuole realizzare è caratterizzato da quattro elementi prismatici rettangolari, di cui i due esterni hanno dimensioni inferiori rispetto ai due interni, che devono occupare la zona interna del pozzo artesiano.

Il metodo di realizzazione segue la linea guida utilizzata per i dispositivi di forma prismatica rettangolare, per cui si taglia il tessuto necessario, si incolla in maniera tale da creare un elemento prismatico rettangolare. In questo specifico caso, oltre che inserire il raccordo rapido che permette il collegamento con la linea pneumatica, è necessario realizzare dei buchi sul tessuto in corrispondenza dei punti in cui le camere sono in collegamento, per permettere il passaggio dell'aria in pressione.

Ciascuno degli elementi prismatici viene cucito lungo i bordi e termosaldato con un nastro in corrispondenza delle cuciture, che creano dei buchi nel tessuto attraverso cui l'aria in pressione può fuoriuscire. L'applicazione del nastro termosaldante è fondamentale per garantire il buon funzionamento della combinazione di incollaggio e cucitura, che sostituisce il ruolo dell'ulteriore piegatura, come veniva fatto nelle prime prove per i provini prismatici. La presenza della cucitura permette di compensare la bassa resistenza a trazione trasversale dell'incollaggio e limita l'insorgere dello stress di pelatura, che può causare il malfunzionamento del dispositivo.

Una volta realizzati tutti e quattro gli elementi prismatici è possibile unirli, per ottenere il dispositivo a soffietto, riportato in Figura 3.23:

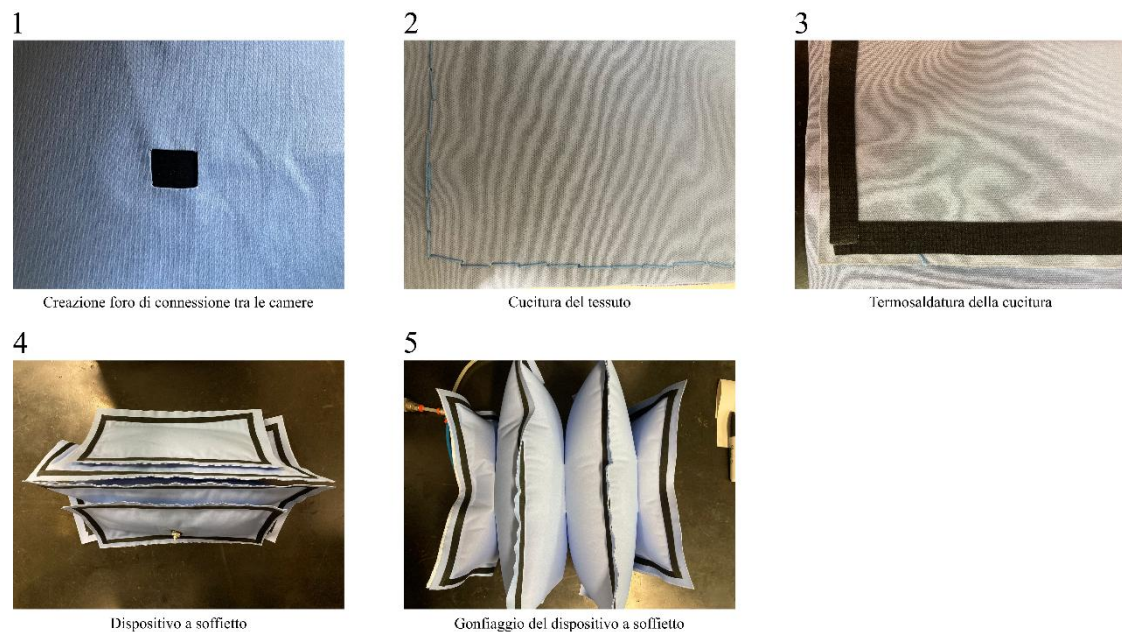


Figura 3.23: Realizzazione del dispositivo dispiegabile a soffietto

In Figura 3.24 e in Tabella 3.12 si riportano le quote e le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma a soffietto.

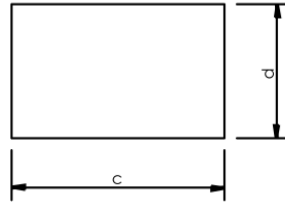
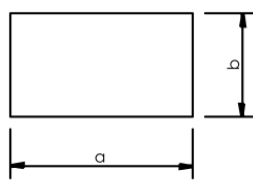


Figura 3.24: Quote provino forma a soffietto

Dimensioni taglio [cm]	
a	30
b	17
c	35
d	22

Tabella 3.12: Dimensioni provino forma a soffietto

3.3.6 Combinazione del TPU con nylon e poliestere ripstop

In questo paragrafo si analizza la combinazione di diversi materiali, con lo scopo di combinare le proprietà principali che li caratterizzano e ottenere un tessuto più adatto alla realizzazione del dispositivo dispiegabile di sicurezza.

Si considera il fatto che sia il nylon ripstop sia il poliestere ripstop hanno una grande resistenza alle sollecitazioni esterne, ma tali materiali sono anche caratterizzati da una certa traspirabilità, in quanto tessuti tecnici sportivi, adatti quindi alla fabbricazione di abbigliamento che non richiede di essere completamente impermeabile all'aria. Per compensare tale caratteristica e ottenere un materiale ideale per la produzione del dispositivo dispiegabile pneumatico, si combinano i tessuti di supporto in ripstop con il TPU, che funge da strato di rivestimento.

L'idea di base è quella di ottenere un materiale simile a un tessuto laminato, cioè un tessuto realizzato incollando uno strato separato di materiale, in genere di tipo plastico, utilizzando adesivi, calore o pressione. Tale strato laminato ha il compito di formare una barriera su un lato del tessuto di supporto, conferendogli nuove proprietà, tra cui l'impermeabilità all'aria. Si evidenzia che le proprietà del tessuto di base vengono mantenute costanti nonostante l'applicazione dello strato laminato.

Per entrambi i tessuti di supporto l'incollaggio dello strato laminato di TPU avviene utilizzando il calore. Più nel dettaglio, si decide di fare uso del ferro da stiro per ottenere un tessuto multistrato che sia il più uniforme possibile.

La scelta del TPU come strato di rivestimento è dovuta alle sue caratteristiche di impermeabilità all'aria, resistenza, durevolezza nel tempo e di termoplasticità, termine con cui si intende la proprietà di alcuni materiali di ammorbidirsi e fondere quando vengono riscaldati, per poi solidificare nuovamente una volta raffreddati.

3.3.6.1 Tessuti laminati con TPU: forma cilindrica

Per evitare di incorrere in ripetizioni si analizza il processo di realizzazione del dispositivo dispiegabile con uno solo dei tessuti laminati a disposizione. Per entrambi i tessuti laminati si creano dispositivi di forma cilindrica, caratterizzati da un piccolo rapporto tra l'altezza e il diametro, riprendendo quindi una delle forme create con il primo tessuto utilizzato, il Medical Windtex.

L'iter operativo che porta all'ottenimento del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica con tessuti laminati è analogo a quello descritto per il tessuto Medical Windtex nel paragrafo 3.3.5.5, a meno di alcuni passaggi preliminari, che prevedono la combinazione dei materiali per realizzare il tessuto laminato multistrato. Si considerano gli step necessari alla realizzazione del dispositivo in tessuto utilizzando la combinazione di poliestere ripstop e poliuretano termoplastico, ma gli stessi identici passaggi sono validi anche per il tessuto laminato ottenuto da nylon ripstop e TPU.

Il primo passaggio da eseguire è il taglio del tessuto necessario alla realizzazione del dispositivo dispiegabile. In questo caso specifico, sono richiesti due dischi e una striscia di connessione, che devono essere ricavati sia per il materiale tecnico sia per il TPU. Una volta eseguito il taglio del tessuto, si combinano tra di loro lo strato di supporto e quello di rinforzo. Utilizzando il ferro da stiro, si scalda il TPU che si scioglie e aderisce al poliestere. Dopo una breve fase di raffreddamento, si ottiene il tessuto multistrato desiderato, dove lo strato impermeabile di TPU è perfettamente aderente al tessuto di supporto in poliestere. Prima di eseguire l'incollaggio dei dischi con la striscia di collegamento è necessario inserire il raccordo rapido che connette il dispositivo pneumatico alla linea dell'alimentazione. A questo punto si può procedere con l'incollaggio del primo disco con la striscia di connessione. Dato che si deve incollare un profilo rettilineo con un profilo curvo è necessario creare delle alette sul bordo della striscia di connessione che favoriscono l'incollaggio delle parti in questione. Tale procedura era stata già utilizzata anche nel caso del Medical Windtex e serve per limitare la creazione di pieghe tra i tessuti incollati, che si traducono in perdite di aria in fase di funzionamento. Infine, si procede con l'incollaggio del secondo disco con il lato libero della striscia di connessione.

I bordi incollati rappresentano la principale fonte di perdita di pressione del dispositivo dispiegabile e per questo motivo è necessario applicare una tecnica di rinforzo lungo il contorno del dispositivo. Utilizzando il ferro da stiro si applica uno strato di nastro termosaldante lungo i bordi, per favorire la coesione delle parti coinvolte e limitare le perdite.

La Figura 3.25 mostra la sequenza che porta alla realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica, caratterizzata da un materiale laminato ottenuto dalla combinazione di poliestere ripstop e TPU:

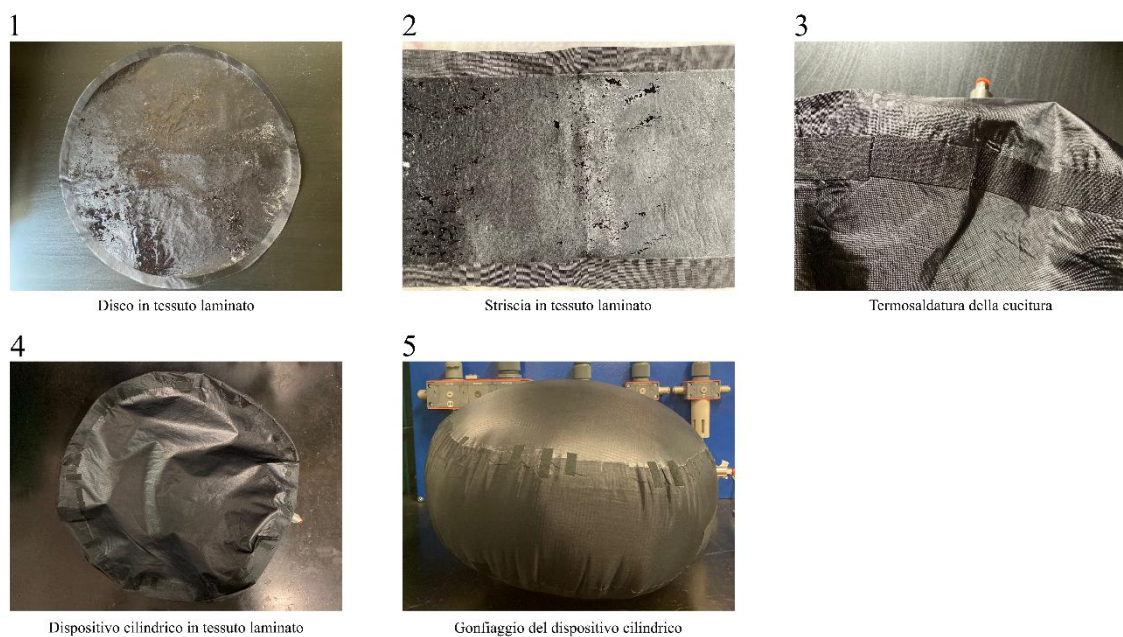


Figura 3.25: Realizzazione del dispositivo dispiegabile di forma cilindrica in tessuto laminato

In Figura 3.26 e in Tabella 3.13 si riportano le quote e le dimensioni degli elementi in tessuto che portano alla realizzazione del provino di forma cilindrica in tessuto laminato.

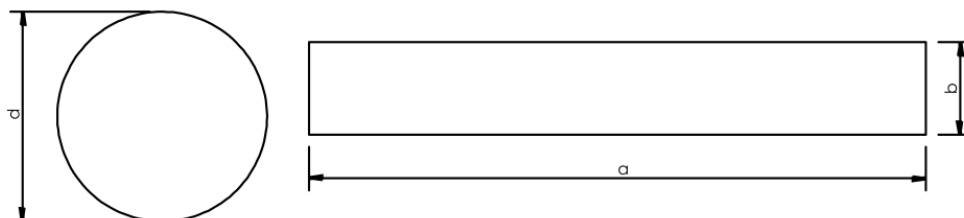


Figura 3.26: Quote provino forma cilindrica in tessuto laminato

Dimensioni taglio [cm]	
a	110
b	15
d	34

*Tabella 3.13: Dimensioni provino
forma cilindrica in tessuto laminato*

3.4 Metodi di impacchettamento

Nel presente paragrafo vengono descritte le tipologie di impacchettamento per il dispositivo dispiegabile. Con metodo di impacchettamento si intende la sequenza delle fasi procedurali necessaria a piegare il dispositivo di sicurezza a partire dalla configurazione iniziale sgonfia, con lo scopo di avere il minore ingombro possibile una volta che tale dispositivo viene montato sull'asta scorrevole del robot di salvataggio.

Il metodo di impacchettamento deve tenere conto principalmente del fatto che lo scorrimento verticale dell'asta avviene, durante le fasi di recupero della vittima, in prossimità della parete del pozzo. Ciò significa che il dispiegamento del dispositivo di sicurezza è asimmetrico e a sbalzo. La situazione in cui si opera richiede un dispiegamento del dispositivo lungo un'unica direzione, il che è più complicato rispetto al caso in cui l'asta sia centrata rispetto al pozzo e il dispiegamento sia simmetrico.

3.4.1 Roll packaging

Il metodo di impacchettamento a rotolo, o roll packaging, è uno dei metodi esistenti più semplici e il relativo dispiegamento del dispositivo risulta caotico e poco preciso. Per piegare il dispositivo con questo metodo è necessario che sia steso su una superficie e da questa posizione si inizia ad arrotolare un'estremità, come si vede in Figura 3.27. In genere si cerca di piegare il dispositivo in maniera tale da alimentarlo dall'ultima estremità piegata. In questa maniera l'aria che entra riesce facilmente a riempire il dispositivo, ottenendo un dispiegamento dello stesso relativamente controllato. Nel caso in cui il raccordo di connessione tra la linea pneumatica e il dispositivo di sicurezza non si trovi in corrispondenza della seconda estremità di impacchettamento, la fase di gonfiaggio risulterà meno strutturata e più casuale.

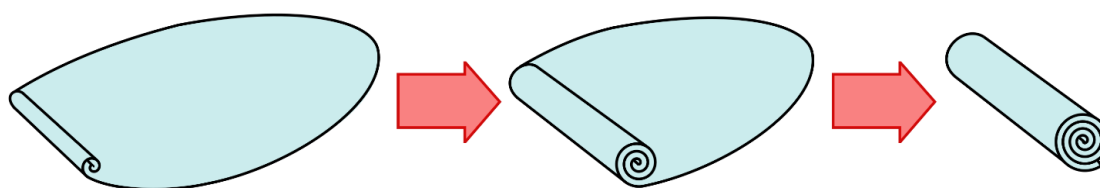


Figura 3.27: Procedura di impacchettamento roll packaging

3.4.2 Double roll packaging

In alternativa al primo metodo di impacchettamento, è possibile utilizzare una tecnica che ha lo scopo di migliorare il passaggio dell'aria nel dispositivo. Analogamente a quanto mostrato in Figura 3.28, partendo da due estremità opposte si devono eseguire due diversi rotoli, che si incontrano nella parte centrale del dispositivo, in corrispondenza del raccordo con il circuito pneumatico.

Tale metodologia di impacchettamento, nota come double roll packaging, permette di avere un migliore dispiegamento del dispositivo pneumatico, per via della simmetria che caratterizza la configurazione iniziale. I due rotoli, dal punto di vista teorico, dovrebbero dispiegarsi allo stesso modo. Tuttavia, nel prototipo ci sono differenze legate al fatto che i due rotoli non sono perfettamente identici e il percorso che l'aria segue durante la fase di gonfiaggio è diverso da una parte all'altra.

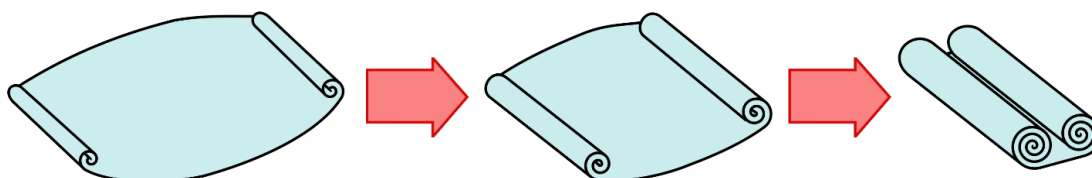


Figura 3.28: Procedura di impacchettamento double roll packaging

3.4.3 Z packaging

Il terzo metodo di impacchettamento utilizzabile è definito piegatura a Z, o Z packaging, mostrato in Figura 3.29. Partendo dal dispositivo sgonfio e steso su una superficie piana, si eseguono delle piccole pieghe a partire da una estremità, ripetendo la stessa operazione per tutta la lunghezza del dispositivo di sicurezza, in maniera tale da ottenere un impacchettamento formato da tante pieghe successive, alternando la direzione di piegatura. Tale metodologia dovrebbe permettere di ottenere un'ottima efficienza di

impacchettamento, PE, comprimendo le pieghe una con l'altra. Tuttavia, è un metodo più complicato rispetto ai precedenti dal punto di vista realizzativo.

In questo caso, il flusso di aria in ingresso al dispositivo segue il percorso imposto da ogni piega eseguita. Ciò rende più lenta la fase di gonfiaggio del dispositivo, in quanto ogni camera creata deve riempirsi prima di poter riempire quella successiva, ma il flusso risulta meno caotico rispetto ai casi precedenti.

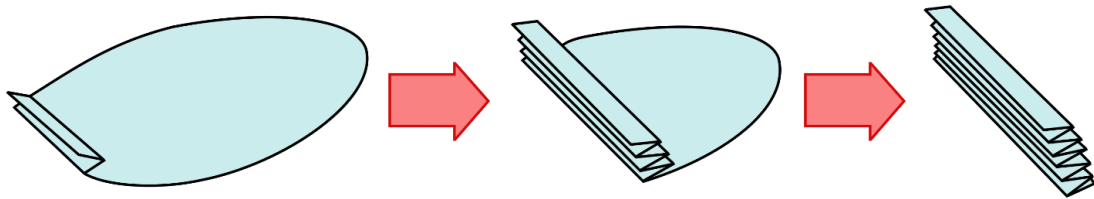


Figura 3.29: Procedura di impacchettamento Z packaging

3.4.4 Efficienza di impacchettamento

La classificazione dei metodi di impacchettamento fa riferimento all'efficienza di impacchettamento, o Packaging Efficiency (PE), definita nel lavoro di Secheli [18] dalla Eq. (3.6):

$$PE = \frac{\text{volume finale}}{\text{volume iniziale} \cdot 100} \quad (3.6)$$

Il valore dell'efficienza di impacchettamento descrive, in percentuale, la capacità del dispositivo dispiegabile di aumentare di dimensioni rispetto alla configurazione iniziale a minore ingombro volumetrico.

Capitolo 4. Sollecitazioni interne alle strutture gonfiabili in tessuto

Le strutture in tessuto gonfiate ad aria rientrano nella categoria di strutture sottoposte a tensione. La tipologia di strutture in tessuto ha dei vantaggi rispetto al caso delle classiche strutture meccaniche. Tra questi vantaggi, i principali sono la leggerezza, la rapidità di installazione, una migliore mobilità, soprattutto negli spazi stretti, un elevato rapporto di impacchettamento e la possibilità di avere un collasso sicuro della struttura. Tali caratteristiche, accoppiate con l'avvento di fibre ad alte prestazioni e processi di produzione tessile sempre più avanzati, hanno suscitato un crescente interesse nei confronti delle strutture gonfiabili, che possono essere progettate come valide alternative alle strutture convenzionali.

La pressione dell'aria all'interno della struttura gonfiabile sviluppa uno stato tensionale in tutto il tessuto che consente di modellare il dispositivo secondo una forma desiderata, di fornire la rigidità necessaria per resistere alle deformazioni e di garantire stabilità contro il collasso dovuto a carichi esterni. La rigidità del dispositivo gonfiabile dipende principalmente dalla pressione di gonfiaggio. Infatti, all'aumentare della pressione di gonfiaggio aumentano le sollecitazioni di pretensionamento in tutto il tessuto e quindi aumenta la rigidità della struttura. Se venisse applicato un carico esterno, le sollecitazioni che derivano da tale carico si sovrappongono a quelle già presenti nel tessuto, causando una completa ridistribuzione delle tensioni nel materiale. In generale, la ridistribuzione dei carichi è tale da ottenere un bilanciamento degli stessi e permette il mantenimento della struttura in uno stato di equilibrio statico.

Una peculiarità delle strutture in tessuto gonfiate ad aria consiste nel fatto che, in caso di sovraccarico, il collasso del sistema pneumatico ad aria non danneggia necessariamente la membrana in tessuto e, una volta che il sovraccarico viene eliminato, la struttura è in grado di ripristinare la sua configurazione di carico prevista. Una seconda proprietà distintiva dei dispositivi gonfiabili è quella di mettere in evidenza, in fase di gonfiaggio, eventuali grinze che si presentano sulla superficie del materiale per via del metodo di realizzazione non perfetto o a causa di un gonfiaggio non completo. La presenza di tali grinze comporta una diminuzione della capacità del dispositivo di sopportare il carico,

per cui l'individuazione di tali elementi può essere un indicatore di avvertimento prima che avvenga il collasso della struttura.

4.1 Pressione interna al dispositivo dispiegabile non vincolato

In questo sottocapitolo si analizza la pressione presente all'interno del dispositivo dispiegabile di sicurezza, quando si trova in condizioni libere, per cui il suo movimento non è limitato da alcun tipo di vincolo.

Dopo aver realizzato prototipi di dispositivi dispiegabili in tessuto caratterizzati da geometrie e dimensioni diverse, sono state eseguite delle prime prove sperimentali qualitative. Tali prove prevedevano di alimentare i dispositivi con aria compressa, in modo da ottenere la configurazione dispiegata. I dispositivi realizzati sono stati testati sia in condizioni libere da vincoli sia all'interno di un condotto in plexiglass, che simula in maniera semplificativa il pozzo artesiano.

Le prove sperimentali realizzate a livello qualitativo hanno permesso di individuare la forma cilindrica come la migliore tra quelle realizzate, sia in termini di perdite sia per la funzione di barriera fisica all'interno del condotto. Di conseguenza, l'analisi della pressione interna viene eseguita per tale geometria del dispositivo.

4.1.1 Equazione di Young-Laplace

La valutazione della pressione interna all'elemento dispiegabile fa riferimento al lavoro svolto da Goldman [19], che utilizza l'equazione di Young-Laplace per studiare la pressione di una bolla di gas meccanicamente stabile circondata da un mezzo fluido a cui viene applicata una pressione esterna costante. L'equazione generale di Young-Laplace; espressa dalla Eq. (4.1), definisce la differenza di pressione esistente tra l'interno e l'esterno di una superficie, caratterizzata da due raggi di curvatura differenti, in funzione della tensione superficiale:

$$\Delta P = P_{int} - P_{est} = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.1)$$

Dove:

- ΔP : differenza di pressione tra l'interno e l'esterno dell'elemento analizzato;
- γ : tensione superficiale;
- R_1 e R_2 : raggi di curvatura che caratterizzano l'elemento analizzato.

Nel caso in cui si consideri un dispositivo dispiegabile non vincolato, ci si trova davanti ad un sistema limitato dalla sola elasticità del dispositivo stesso, e quindi del tessuto che lo costituisce. Il gonfiaggio del dispositivo in tessuto genera una differenza di pressione tra l'interno e l'esterno che mette in tensione la membrana dell'elemento dispiegabile, la quale viene deformata. Tale deformazione genera una forza di ritorno che vuole riportare il dispositivo alle condizioni iniziali, ma se si ipotizza di avere un flusso di aria di alimentazione costante, la dimensione dell'elemento dispiegabile cresce fino a che il tessuto non può più deformarsi. Raggiunta la massima deformazione del tessuto, la pressione interna inizia a crescere, in quanto il dispositivo non può più aumentare di volume e l'aumento di pressione si traduce in un aumento della tensione superficiale. Il rischio che si corre in questa situazione è che il dispositivo gonfiabile venga gonfiato eccessivamente, generando una tensione superficiale così alta da provocarne la rottura.

L'analisi del comportamento di una geometria cilindrica risulta strategica per via del fatto che tale dispositivo è composto da due elementi strutturali che si comportano diversamente quando sottoposti alla medesima pressione interna. Si vogliono studiare le risposte, in termini di tensione superficiale, dei dischi di chiusura del cilindro, che si comportano diversamente rispetto alla zona centrale della struttura, che viene semplicemente messa in tensione. I dischi, infatti, tendono a deformarsi assumendo una geometria simile a quella delle calotte sferiche.

È necessario specificare che la pressione interna al dispositivo è uniforme, per cui anche la differenza di pressione che si calcola per mezzo dell'equazione di Young-Laplace deve essere la stessa per il tratto cilindrico e per i tratti emisferici.

Si considera inizialmente la zona intermedia di connessione, di forma cilindrica, rappresentata in Figura 4.1:

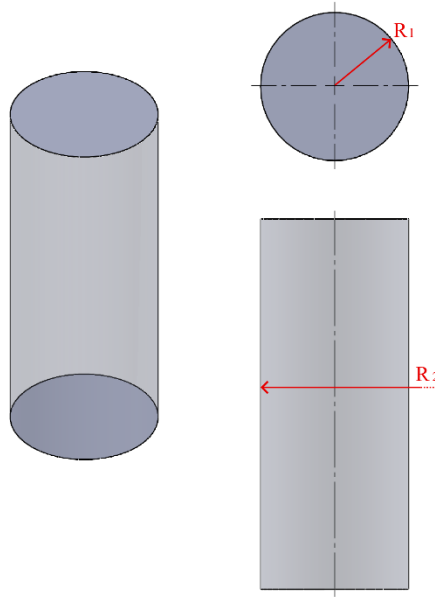


Figura 4.1: Rappresentazione raggi di curvatura del tratto cilindrico

L'equazione di Young-Laplace, per il tratto di geometria cilindrica, è:

$$\Delta P = P_{int} - P_{est} = \gamma_{cil} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \gamma_{cil} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\infty} \right) = \frac{\gamma_{cil}}{r} \quad (4.2)$$

Dove:

- γ_{cil} : tensione superficiale del cilindro;
- $R_1 = r$: il primo raggio di curvatura coincide con il raggio del cilindro lungo la sezione trasversale;
- $R_2 = \infty$: il raggio lungo l'asse longitudinale tende a infinito.

In alternativa all'Eq. (4.2), è possibile ottenere la relazione che definisce la differenza di pressione per l'elemento strutturale di forma cilindrica, considerando l'equilibrio tra la forza generata dalla pressione interna e la forza associata al tensionamento del tessuto. Per semplicità si decide di raffigurare tale situazione nella Figura 4.2:

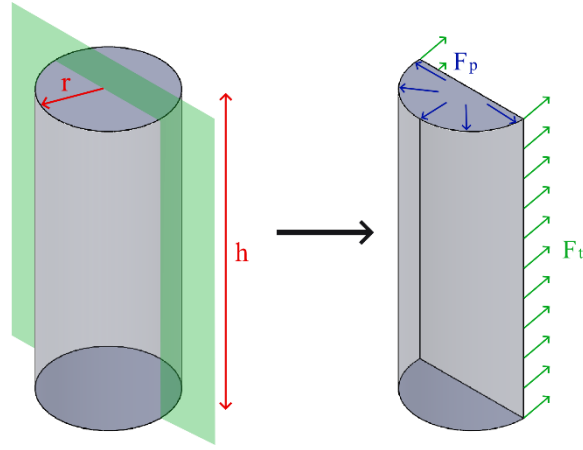


Figura 4.2: Forze agenti nel tratto cilindrico

La visualizzazione delle forze in gioco risulta semplificata nel caso in cui si vada a tagliare il cilindro di altezza h con un piano ausiliario, rappresentato in verde. Si ipotizza di avere un equilibrio delle forze generate dalla pressione interna, indicate con F_p , e delle forze circonferenziali relative al tensionamento del tessuto, F_t . In sintesi, la situazione ideale in cui si ipotizza di essere prevede che la pressione interna e la forza di ritorno del materiale si bilancino perfettamente e non si ha alcun tipo di deformazione del dispositivo. Dall'analisi all'equilibrio, quello che si ottiene è descritto dall'Eq. (4.3):

$$F_p = F_t \rightarrow \Delta P \cdot (2r \cdot h) = \gamma_{cil} \cdot (2h) \rightarrow \Delta P = \frac{\gamma_{cil}}{r} \quad (4.3)$$

La forza F_p viene ottenuta moltiplicando la differenza di pressione, ΔP , con l'area su cui agisce tale pressione. La forza F_t non agisce su un'area, ma su due segmenti lineari di lunghezza h .

Successivamente, si analizza il comportamento delle estremità emisferiche del dispositivo, per i quali la legge di Young-Laplace si può scrivere come segue:

$$\Delta P = P_{int} - P_{est} = \gamma_{sf} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \gamma_{sf} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r} \right) = \frac{2\gamma_{sf}}{r} \quad (4.4)$$

Dove:

- γ_{sf} : tensione superficiale della semisfera;
- $R_1 = R_2 = r$: entrambi i raggi di curvatura, lungo la sezione trasversale e longitudinale dell'elemento strutturale, sono uguali al raggio della semisfera, che è uguale al raggio del cilindro.

Allo stesso modo del tratto cilindrico analizzato in precedenza, è possibile ottenere la stessa relazione tra pressione e tensione della membrana considerando l'equilibrio statico delle forze che si generano nella semisfera, come raffigurato in Figura 4.3:

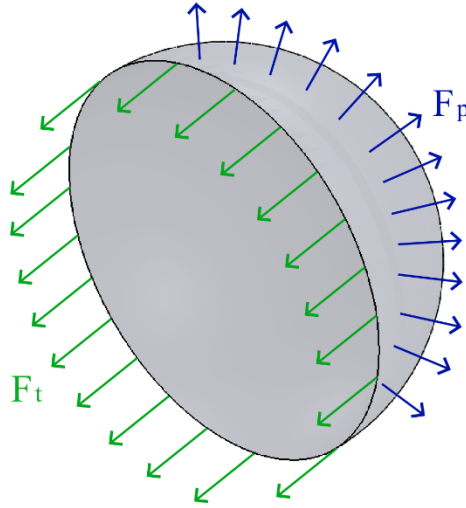


Figura 4.3: Forze agenti nel tratto semisferico

L'analisi dell'equilibrio statico restituisce l'Eq. (4.5):

$$F_p = F_t \rightarrow \Delta P \cdot (\pi r^2) = \gamma_{sf} \cdot (2\pi r) \rightarrow \Delta P = \frac{2\gamma_{sf}}{r} \quad (4.5)$$

Come in precedenza, la forza F_p viene ottenuta dalla moltiplicazione della pressione con l'area su cui essa agisce, mentre F_t è una forza che agisce lungo la circonferenza della semisfera.

Essendo che la differenza di pressione calcolata è la stessa per entrambi i tratti geometrici analizzati, poiché la pressione interna è uniforme, è necessario che la tensione superficiale della sfera sia pari alla metà della tensione superficiale che si ha nella zona cilindrica:

$$\Delta P = \frac{\gamma_{cil}}{r} = \frac{2\gamma_{sf}}{r} \rightarrow \gamma_{cil} = 2\gamma_{sf} \quad (4.6)$$

Il comportamento definito dall'Eq. (4.6) è vero per una geometria corrispondente allo schema presentato. Nel prototipo realizzato, si otterranno delle differenze con le tensioni superficiali teoriche, dovute principalmente al fatto che la forma degli elementi alle estremità del dispositivo non è perfettamente semisferica.

4.1.2 Teoria membranale dei gusci sottili

Il comportamento del dispositivo pneumatico in tessuto può essere assimilato anche a quello di un guscio sottile, come viene affermato da Gajbhiye et al. [20], che hanno studiato il comportamento di una struttura a membrana gonfiabile con uno spessore di pochi millimetri per mezzo della teoria membranale dei gusci.

La teoria membranale dei gusci consiste in un modello appartenente al campo della meccanica strutturale che analizza gusci sottili, ovvero strutture con spessore ridotto, assumendo che la loro resistenza derivi quasi solamente dagli sforzi di trazione nella membrana, immaginando di avere un tessuto elastico teso a causa della pressione interna. Si trascurano quindi la rigidezza flessionale e la rigidezza torsionale.

Un guscio sottile assialsimmetrico, mostrato in Figura 4.4, è un solido di rivoluzione con spessore sottile la cui superficie è ottenuta da una curva piana che ruota attorno ad un asse appartenente allo stesso piano della curva. La curva piana costituisce uno dei meridiani, mentre le circonferenze ottenute sezionando il solido con un piano ortogonale all'asse di rivoluzione prendono il nome di paralleli.

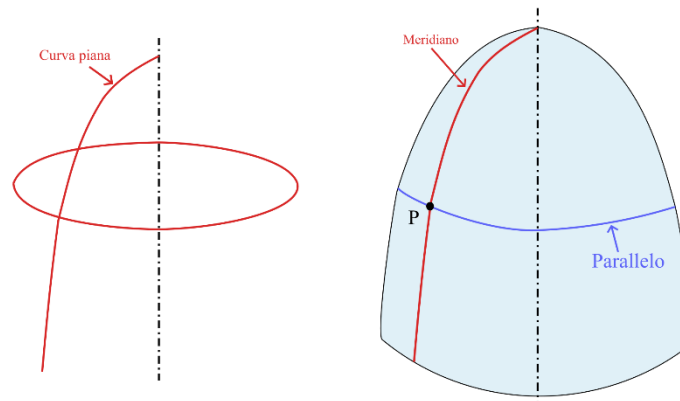


Figura 4.4: Guscio assialsimmetrico

La posizione di un meridiano è definita dall'angolo azimutale, ϑ , mentre la posizione di un parallelo è definita dall'angolo meridiano, φ , come si vede dalla Figura 4.5:

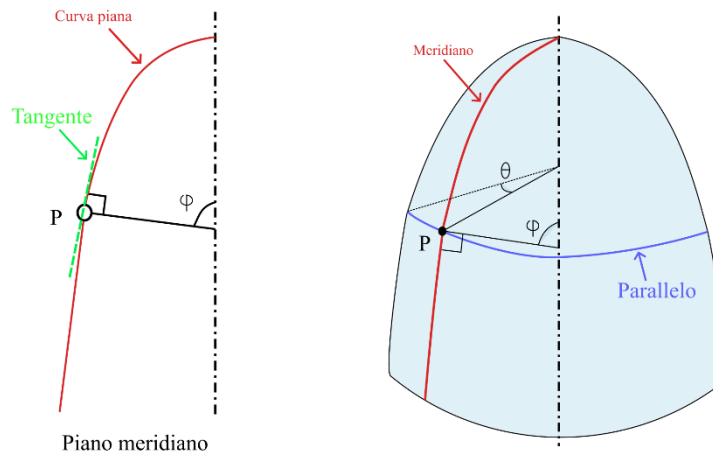


Figura 4.5: Angoli azimutale e meridiano

Fissato il punto P, si definisce la direzione normale al piano tangente, indicata con n nella Figura 4.6. A questo punto è possibile definire i raggi di curvatura meridiano e circonferenziale. Il primo, indicato con r_φ , corrisponde al raggio di curvatura della curva piana generatrice nel punto P. Il centro di curvatura giace sul prolungamento dell'asse della normale n partendo da P. Il secondo, indicato con r_θ , corrisponde alla distanza tra il punto P e l'intersezione tra l'asse dovuto alla normale n con l'asse di simmetria.

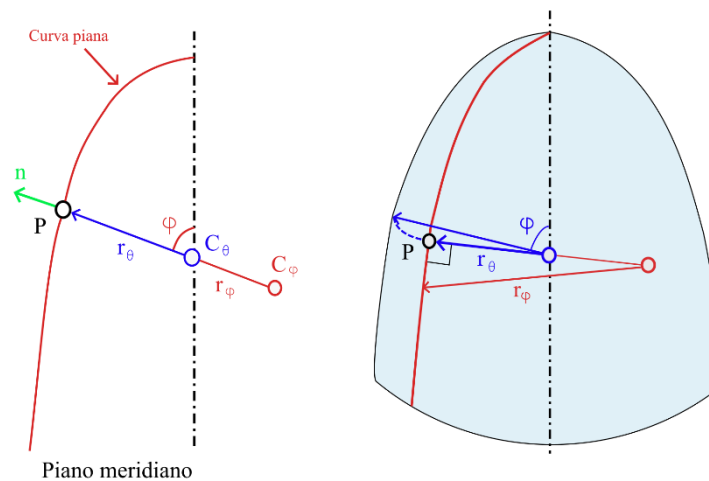


Figura 4.6: Raggi di curvatura meridiano e circonferenziale

La teoria dei gusci si basa su determinate ipotesi:

1. Elementi assialsimmetrici caratterizzati da uno spessore piccolo rispetto alle altre due dimensioni;

2. Il materiale è omogeneo, isotropo e si comporta elasticamente;
3. Carichi assialsimmetrici;
4. Vincoli assialsimmetrici;
5. Lo spostamento è solo nel piano meridiano;
6. Il guscio non offre resistenza alla flessione, si considera solo lo stato membranale;
7. La variazione delle tensioni lungo la normale è trascurabile;
8. Le tensioni sono funzione del solo angolo meridiano, φ .

Tuttavia, si specifica che l'ipotesi che modella il tessuto come omogeneo, isotropo ed elastico viene introdotta in maniera semplificativa allo scopo di semplificare la trattazione analitica e ricavare una soluzione per lo stato tensionale del dispositivo. La risposta dei tessuti dipende infatti dalla trama che li costituisce. Inoltre, le caratteristiche di resistenza del materiale variano in modo significativo in funzione della direzione di carico. Nonostante ciò, l'ipotesi di isotropia viene considerata valida per una valutazione conservativa di primo tentativo.

Considerando un elemento infinitesimo in corrispondenza del punto P, l'Eq. (4.7) rappresenta la prima equazione di equilibrio della teoria dei gusci membranali:

$$\frac{n_\varphi}{r_\varphi} + \frac{n_\vartheta}{r_\vartheta} = p, \quad 1^a \text{ equazione di equilibrio} \quad (4.7)$$

Dove:

- n_φ : carico meridiano per unità di lunghezza;
- n_ϑ : carico circonferenziale per unità di lunghezza;
- r_φ : raggio di curvatura meridiano;
- r_ϑ : raggio di curvatura circonferenziale;
- p : pressione interna.

La seconda equazione di equilibrio si ricava facendo riferimento ad un elemento anulare, raffigurato nella Figura 4.7:

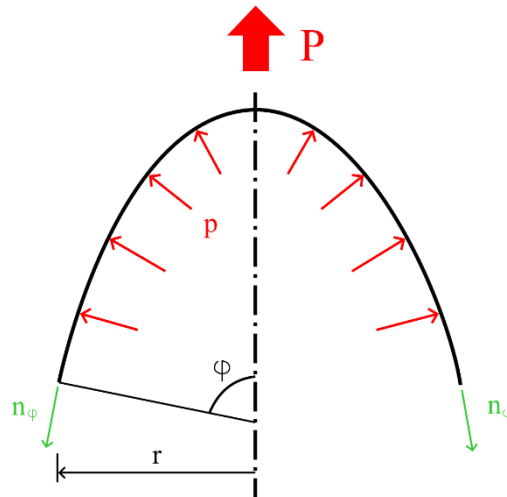


Figura 4.7: Equilibrio dell'elemento anulare

L'equilibrio verticale restituisce l'Eq. (4.8):

$$2\pi r \cdot n_{\varphi} \cdot \sin\varphi = P, \quad 2^a \text{ equazione di equilibrio} \quad (4.8)$$

Dove:

- r : raggio perpendicolare all'asse dell'elemento anulare;
- n_{φ} : carico meridiano per unità di lunghezza;
- φ : angolo meridiano;
- P : forza generata dalla pressione interna distribuita lungo il guscio.

Si vuole ora considerare un caso di studio specifico, che possa essere ricondotto, in maniera semplificativa, al gonfiaggio del dispositivo dispiegabile pneumatico. Se si considera un dispositivo di geometria cilindrica, i dischi di chiusura dello stesso tendono a comportarsi, durante il gonfiaggio, come delle calotte sferiche. La geometria gonfiata che si deve analizzare è quindi riportata in Figura 4.8:

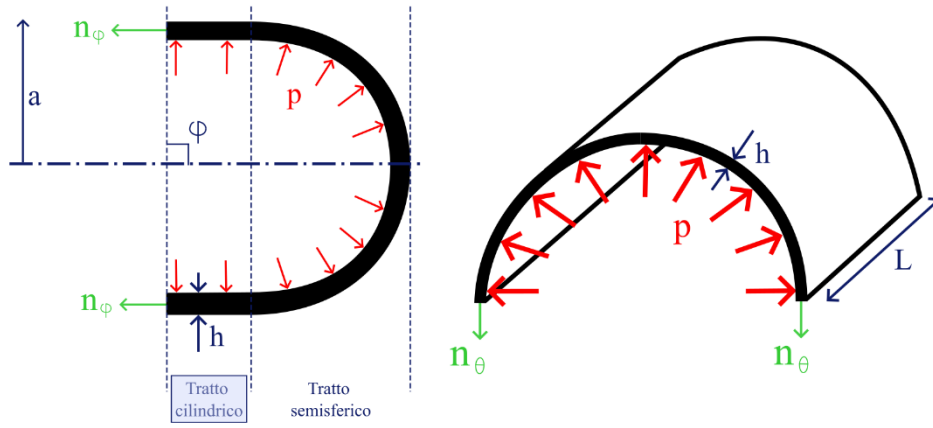


Figura 4.8: Analisi dei carichi nel tratto cilindrico del guscio

Dove:

$$r_\varphi = \infty ; r_\vartheta = a$$

Si valuta la seconda equazione di equilibrio dei gusci, Eq. (4.8), per cui si ottiene:

$$2\pi a \cdot n_\varphi \cdot \sin\varphi = P = \pi a^2 \cdot p \quad (4.9)$$

Dove:

$$\varphi = 90^\circ \rightarrow \sin\varphi = 1$$

Dalla Eq. (4.9) si ottiene:

$$n_\varphi = \frac{pa}{2} \rightarrow p = \frac{2n_\varphi}{a} \quad (4.10)$$

Considerando la prima equazione di equilibrio dei gusci, Eq. (4.7), si ha:

$$\frac{n_\varphi}{r_\varphi} + \frac{n_\vartheta}{r_\vartheta} = p \quad (4.11)$$

Essendo $r_\varphi = \infty$ e $r_\vartheta = a$, si ottiene:

$$\frac{n_\vartheta}{a} = p \rightarrow n_\vartheta = pa \rightarrow p = \frac{n_\vartheta}{a} \quad (4.12)$$

Per valutare le tensioni che sollecitano il guscio in tali condizioni di pressione interna uniforme, si deve considerare lo spessore del guscio, h , per cui si ha:

$$n_\varphi = \frac{pa}{2} \rightarrow \sigma_\varphi = \frac{n_\varphi}{h} = \frac{pa}{2h} \quad (4.13)$$

$$n_{\vartheta} = pa \rightarrow \sigma_{\vartheta} = \frac{n_{\vartheta}}{h} = \frac{pa}{h} \quad (4.14)$$

Per quanto riguarda i fondi di chiusura del dispositivo, si considera di avere una semisfera di raggio a e spessore h soggetta a pressione interna, come in Figura 4.9:

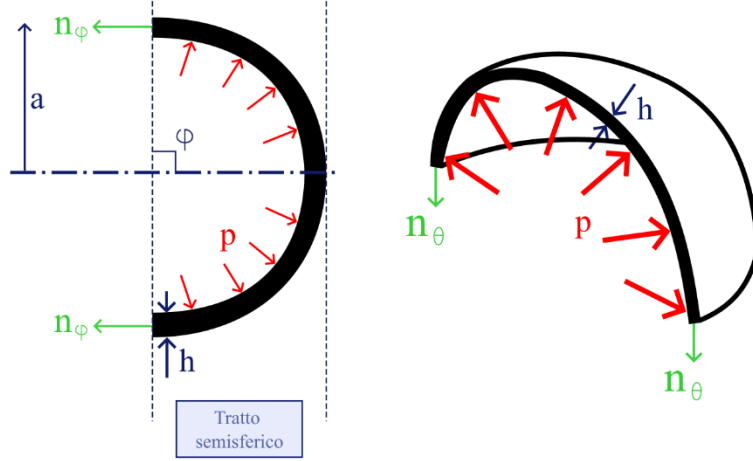


Figura 4.9: Analisi dei carichi nel tratto semisferico del guscio

In questo caso i raggi di curvatura lungo la direzione meridiana e circonferenziale coincidono con il raggio della sfera:

$$r_{\varphi} = r_{\vartheta} = a$$

Considerando la seconda equazione di equilibrio dei gusci, Eq (4.8) si ha:

$$2\pi a \cdot n_{\varphi} \cdot \sin\varphi = \pi a^2 \cdot p \quad (4.15)$$

Dove:

$$\varphi = 90^{\circ} \rightarrow \sin\varphi = 1$$

Quindi:

$$2\pi a \cdot n_{\varphi} = \pi a^2 \cdot p \rightarrow n_{\varphi} = \frac{pa}{2} \quad (4.16)$$

Sostituendo nella prima equazione di equilibrio dei gusci, Eq. (4.7), si ha:

$$\frac{pa}{2a} + \frac{n_{\vartheta}}{a} = p \rightarrow \frac{n_{\vartheta}}{a} = p - \frac{p}{2} \rightarrow n_{\vartheta} = \frac{pa}{2} \quad (4.17)$$

Quando si considera una geometria semisferica, il carico meridiano per unità di lunghezza coincide con il carico circonferenziale per unità di lunghezza:

$$n_{\varphi} = n_{\vartheta} \quad (4.18)$$

Anche le relative tensioni meridiana e circonferenziale sono identiche:

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{\vartheta} = \frac{n_{\varphi}}{h} = \frac{n_{\vartheta}}{h} = \frac{pa}{2h} \quad (4.19)$$

L'analisi della teoria membranale dei gusci mette in evidenza un comportamento tensionale differente tra i due tratti strutturali considerati. Infatti, la tensione circonferenziale calcolata nel tratto cilindrico risulta pari al doppio della tensione circonferenziale dell'elemento semisferico, a parità di pressione interna. Le tensioni meridiane sono invece coincidenti. Ciò è in accordo con l'analisi eseguita precedentemente tramite l'equazione di Young-Laplace.

4.2 Pressione interna al dispositivo dispiegabile vincolato

Si valuta in questo paragrafo il comportamento della pressione interna nel caso in cui il dispositivo pneumatico di sicurezza sia vincolato, come in un caso di funzionamento realistico. Per ottenere una situazione simile alla realtà è necessario vincolare il dispositivo lungo l'area di contatto che ha con la parete del pozzo.

Considerando tale situazione, il comportamento della pressione interna cambia rispetto al caso trattato in precedenza. Questo è dovuto al fatto che nel caso in cui non si ha alcun vincolo, raggiungere la massima tensione del dispositivo pneumatico significa rischiare che il tessuto ceda, causando una messa fuori servizio dell'elemento di sicurezza. Nel caso in esame, la presenza della parete del pozzo funge da vincolo dimensionale per cui la deformazione del dispositivo si propagherà tendenzialmente lungo la direzione verticale. In queste condizioni, è più semplice raggiungere una condizione di massima deformazione del tessuto e a partire da questo momento la pressione interna inizia a crescere.

Le fasi di funzionamento del dispositivo di sicurezza, a partire dalla configurazione iniziale sgonfia fino al dispiegamento dello stesso, sono suddivise come segue e vengono rappresentate in Figura 4.10:

1. Nella prima parte del gonfiaggio il dispositivo non tocca la parete del pozzo e non risulta vincolato, per questo motivo la pressione rimane bassa e nel frattempo la membrana viene soggetta ad una piccola tensione.

2. Appena il tessuto entra in contatto con la parete, l'espansione del tessuto avviene solamente nella direzione verticale, poiché il dispositivo tende a muoversi dove non sono presenti vincoli.
3. Raggiunta la deformazione massima del tessuto, l'aria che viene immessa all'interno del dispositivo non serve più a deformarlo ma contribuisce a comprimere il volume interno di fluido. La diretta conseguenza a questa situazione è un aumento della pressione, secondo la legge dei gas perfetti indicata dalla Eq. (4.20):

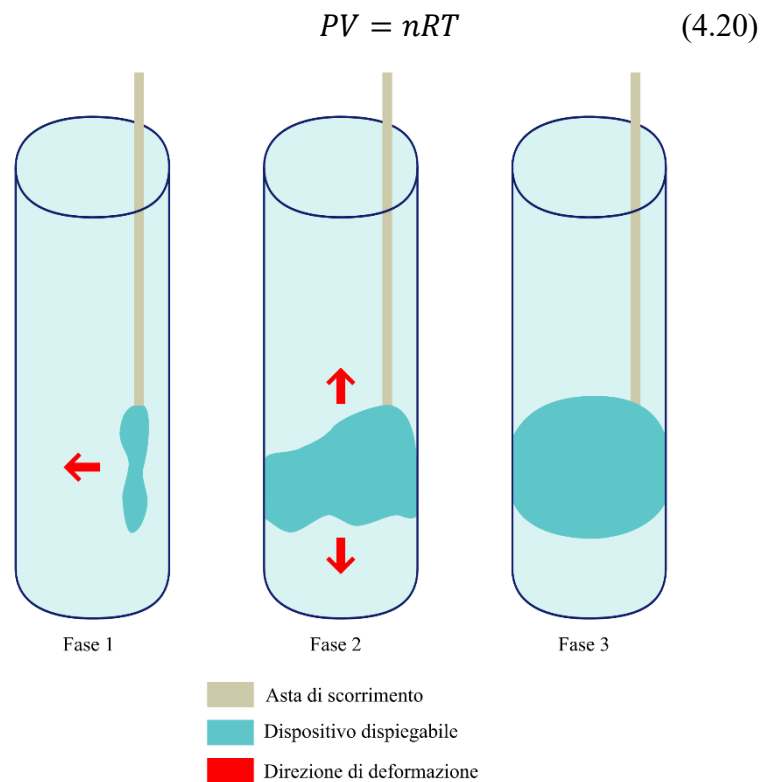


Figura 4.10: Sequenza di gonfiaggio del dispositivo dispiegabile

Capitolo 5. Prove sperimentali

Il capitolo corrente ha lo scopo di validare l'effettivo funzionamento del dispositivo dispiegabile ad attuazione pneumatica. Le condizioni operative a cui il dispositivo viene sottoposto sono tali da simulare, con una certa approssimazione, un tentativo di soccorso all'interno di un pozzo artesiano.

Inizialmente, si descrive il setup del banco prova allestito per replicare le condizioni operative all'interno del pozzo artesiano. Successivamente, si evidenziano le modifiche necessarie per adeguare l'asta di scorrimento alle richieste del dispositivo di sicurezza ad attuazione pneumatica, che sostituisce il dispositivo meccanico ad arpionismo del prototipo precedente.

Dopo aver calcolato le efficienze di impacchettamento dei dispositivi dispiegabili realizzati, si procede con l'esecuzione delle prove sperimentali. I test permettono di calcolare valori che non sono recuperabili in letteratura. Tra questi, si calcola la minima pressione necessaria a sorreggere la vittima con il dispositivo di sicurezza pneumatico. Inoltre, si ottiene una stima indicativa del coefficiente di attrito tra la parete del tubo di plexiglass e il dispositivo gonfiabile in tessuto in determinate condizioni operative. Successivamente, i risultati ottenuti per via sperimentale vengono utilizzati per valutare le prestazioni dei dispositivi fabbricati, con lo scopo di fornire una base progettuale per selezionare la geometria e il materiale da integrare nel sistema robotico, orientandone lo sviluppo verso future verifiche sperimentali in banchi prova più fedeli alla realtà.

5.1 Banco prova sperimentale

Per testare i prototipi realizzati è necessario definire l'ambiente di test. Successivamente, si eseguono le prove funzionali che permettono di validare o meno l'efficacia operativa del dispositivo pneumatico, simulando in maniera semplificativa un'operazione di salvataggio all'interno di un pozzo artesiano.

Il banco prova sperimentale si compone dei seguenti elementi principali:

- Tubo di plexiglass: simula la parete del pozzo artesiano. Ha un diametro esterno pari a 30 cm e un'altezza di circa 2 m, come rappresentato in Figura 5.1.

Il tubo di plexiglass determina uno spazio limitato per il funzionamento del dispositivo pneumatico. Chiaramente, la superficie del tubo di plexiglass non ha un comportamento identico alla parete del pozzo artesiano, la quale può risultare scivolosa, friabile, con sporgenze o restringimenti. Si tratta quindi di una soluzione che semplifica parecchio il contesto reale. Tuttavia, il fatto che tale tubo sia trasparente permette di analizzare ciò che succede al suo interno durante i test sperimentali.

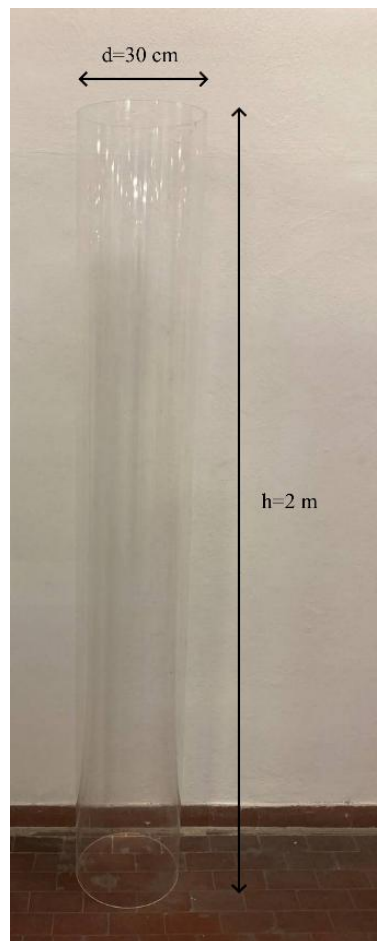


Figura 5.1: Condotto in plexiglass

- Manichino: la presenza del bambino all'interno del pozzo artesiano viene simulata da un manichino, caratterizzato da una massa di 13 Kg. Tale manichino antropomorfo simula un bambino di tre anni al novantesimo percentile. Le dimensioni del bambino sono riportate in Figura 5.2:



Figura 5.2: Manichino

- Circuito pneumatico.

5.1.1 Circuito pneumatico

Il circuito pneumatico che permette di ottenere il gonfiaggio e lo sgonfiaggio del dispositivo dispiegabile, mostrato in Figura 5.3, assume una fondamentale importanza, in quanto risulta essenziale gonfiare il dispositivo ad una pressione che sia in grado di generare la forza resistente che si oppone ad una eventuale caduta del bambino verso il basso.

La linea pneumatica di alimentazione che si utilizza è composta da una struttura semplice, formata dai seguenti componenti:

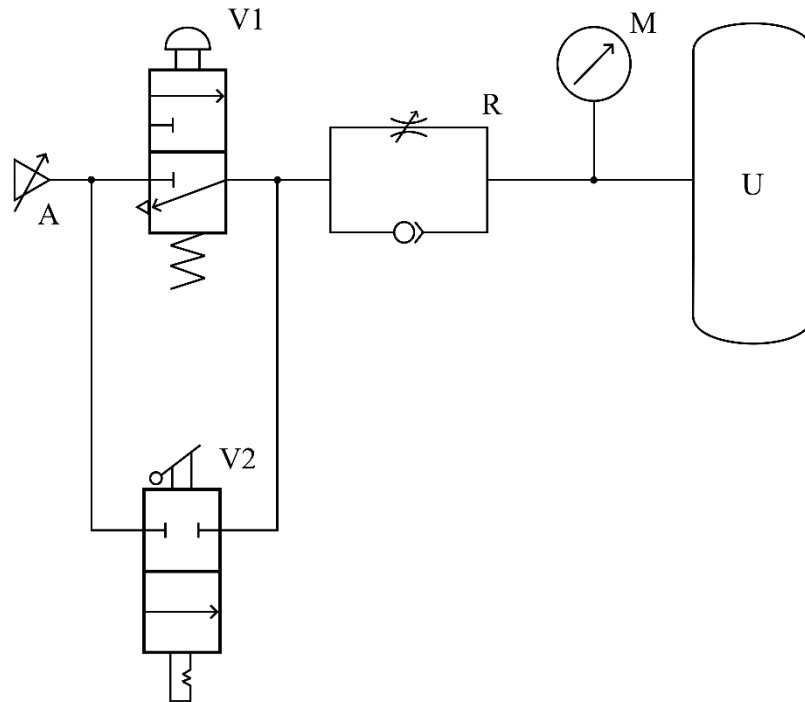


Figura 5.3: Linea pneumatica di alimentazione

La linea è composta da:

- A: alimentazione impostata alla pressione p_A in funzione della pressione che si vuole avere all'interno del circuito pneumatico e quindi nel dispositivo dispiegabile. Chiaramente, la pressione dell'alimentazione deve essere maggiore della pressione che si vuole avere nell'utilizzatore, in modo da compensare le perdite che si hanno lungo la linea pneumatica in un caso di funzionamento reale.
- V1: valvola 3/2, normalmente chiusa, monostabile e ad azionamento manuale tramite pulsante. Nella configurazione di funzionamento iniziale, anche se l'alimentazione A è a una certa pressione, non è permesso il passaggio dell'aria verso il dispositivo, il quale è collegato con lo scarico. In realtà, lo scarico viene bloccato per mezzo di un tappo, in maniera tale da avere una configurazione iniziale paragonabile ad una valvola che lavora con centri chiusi. In questa situazione, l'utilizzatore viene isolato sia dall'alimentazione che dallo scarico. Quando si preme il pulsante, la valvola commuta nella seconda posizione di funzionamento, permettendo all'aria compressa di fluire verso l'utilizzatore. In questo modo il dispositivo dispiegabile viene gonfiato.

- V2: valvola 2/2, normalmente chiusa, bistabile ad azionamento manuale tramite leva. Questa valvola viene inserita nel circuito pneumatico con lo scopo di compensare le perdite di pressione che si hanno nei casi di funzionamento reale per via del fatto che nei prototipi sono sempre presenti piccole perdite. Commutando la valvola, si manda aria all'utilizzatore che quindi mantiene la stessa pressione per un periodo di tempo prolungato.
- R: resistenza unidirezionale, permette di regolare la pressione in maniera precisa rispetto alla regolazione che si ha con la sola alimentazione. Essendo una resistenza unidirezionale, il passaggio dell'aria da sinistra verso destra è permesso solamente attraverso la resistenza (ramo superiore), mentre da destra verso sinistra l'aria compressa fluisce dal ramo inferiore, nel quale la resistenza è nulla.
- M: manometro che misura la pressione relativa all'interno del dispositivo dispiegabile.
- U: utilizzatore, o dispositivo di sicurezza dispiegabile. Si trova ad una determinata pressione, p_U , e funziona come se fosse una specie di serbatoio.

5.1.2 Dispositivo di scorrimento

Il dispositivo dispiegabile in tessuto deve essere collegato a un'asta di scorrimento rigida che ne permette la discesa all'interno del pozzo durante le operazioni di soccorso. All'interno dell'asta deve fluire l'aria in pressione fornita dalla linea di alimentazione fino al dispositivo di sicurezza.

In questo paragrafo si descrivono le modifiche apportate all'asta di collegamento tra la linea pneumatica e l'elemento gonfiabile, per adattarla al sistema di scorrimento già presente nel prototipo analizzato. Come descritto nel paragrafo 2.2.1, il sistema di scorrimento del dispositivo di sicurezza è composto da un motorino accoppiato con una ruota gommata, la quale va a battuta con l'asta scorrevole del dispositivo di sicurezza. La presenza della gomma genera una forza di attrito resistente che permette di mantenere in equilibrio l'asta di scorrimento, che dalla parte opposta è in contatto con una coppia di rulli folli che ne permettono il movimento verticale quando il motorino viene azionato.

Inoltre, si ha un corpo dell'asta centrale al cui interno passa un corpo scorrevole, di diametro inferiore, visibile in Figura 5.4. Quest'ultimo elemento è collegato ad una corda, che quando viene tirata consente l'apertura della parte inferiore del dispositivo di

sicurezza, una volta che l'asta di scorrimento è passata a lato della vittima e ha permesso di posizionare il dispositivo pneumatico al di sotto di essa.

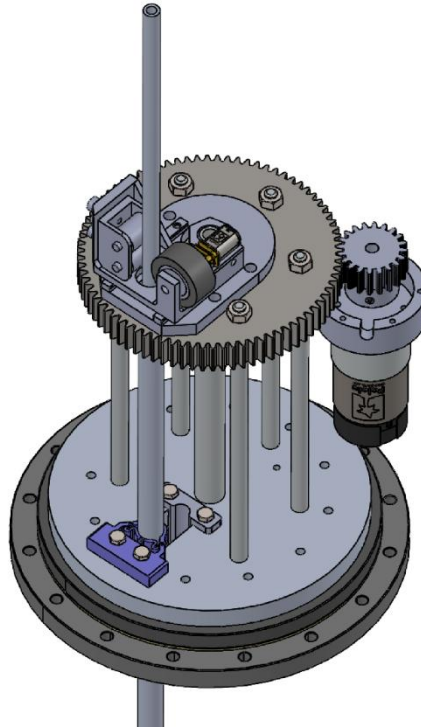


Figura 5.4: Sistema di scorrimento del dispositivo di sicurezza ad arpionismo

Nel lavoro di tesi corrente, il dispositivo di sicurezza non è più meccanico bensì pneumatico, per cui è necessario apportare delle modifiche all'asta di scorrimento. In questo caso, è sufficiente avere soltanto uno dei due elementi tubolari citati, per cui si decide di eliminare il corpo scorrevole interno, mantenendo il corpo principale dell'asta, quello esterno.

La funzione dell'asta del dispositivo di sicurezza è ora quella di trasportare l'aria fino al dispositivo di sicurezza gonfiabile. Per fare ciò è necessario filettare le due estremità dell'asta, in maniera tale da poter inserire due raccordi rapidi. Il raccordo rapido superiore viene collegato all'alimentazione dell'aria per mezzo di un tubo. Il secondo raccordo, nella parte inferiore dell'asta, viene collegato rigidamente con il dispositivo gonfiabile in tessuto.

In Figura 5.5 si evidenzia il fatto che, avendo eliminato il tubo interno dell'asta di scorrimento, il montaggio dell'asta con i raccordi evidenzia un problema di compenetrazione con la coppia di rulli, per cui è stato necessario modificare l'assieme.

Sono state variate le dimensioni del supporto dei rulli folli, diminuendone l'ingombro trasversale e modificando la posizione dei fori per l'inserimento dei perni dei rulli, permettendo di mantenere il diametro dell'asta inalterato.

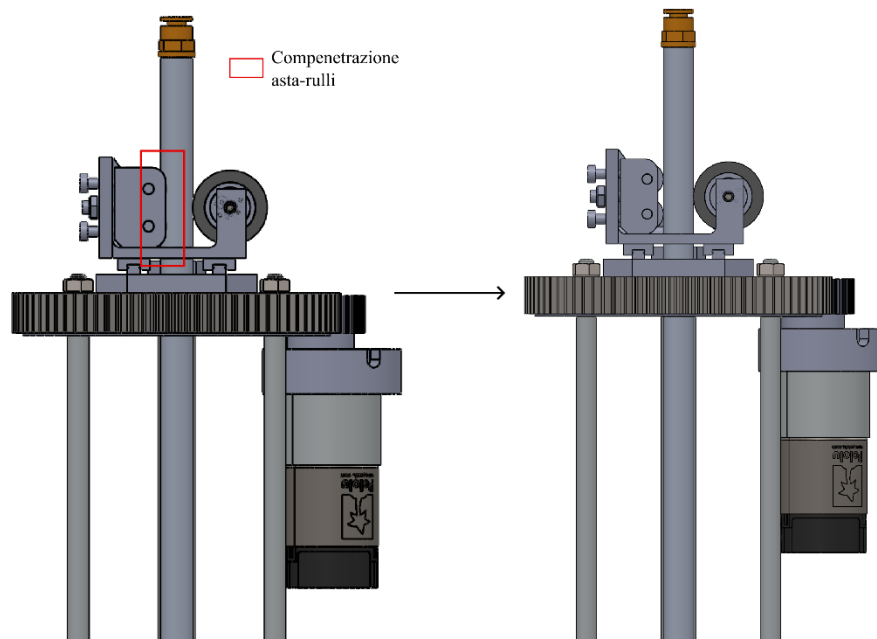


Figura 5.5: Modifica dell'asta di scorrimento del sistema di sicurezza

L'esecuzione delle prove sperimentali ha previsto di sostituire l'asta di scorrimento progettata in precedenza con un tubo di lunghezza pari a 160 cm e con un diametro di circa 2,5 cm, doppio rispetto a quello da progetto. Tuttavia, si sottolinea il fatto che il tubo utilizzato per i test ha il solo fine di andare a validare il comportamento del dispositivo dispiegabile. L'idea è quella di realizzare in futuro l'asta progettata da inserire all'interno del prototipo, per simulare in maniera più fedele la discesa del robot all'interno del pozzo artesiano.

Il tubo scelto non è chiuso alle estremità e non è possibile filettarlo per inserire i raccordi rapidi. Si opta per una soluzione semplificata che prevede di stampare in 3D i tappi da fissare in corrispondenza delle estremità, ai quali vengono poi fissati i raccordi rapidi. L'aria non scorre liberamente all'interno dell'asta perché si inserisce un tubo passante tra un raccordo e l'altro per garantire un flusso in alimentazione al dispositivo dispiegabile.

In Figura 5.6 vengono messi a confronto il progetto del corpo scorrevole con il corpo scorrevole realmente utilizzato per le prove:

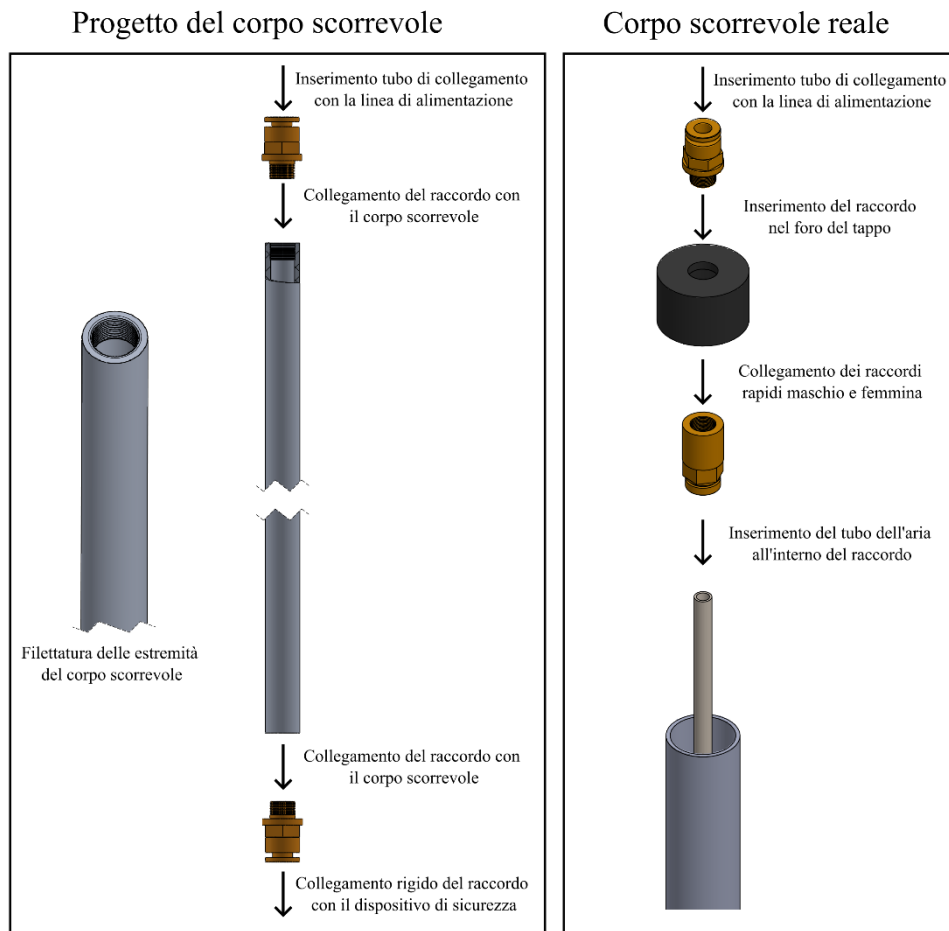


Figura 5.6: Progetto del corpo scorrevole e corpo scorrevole reale

Il corpo scorrevole del robot di salvataggio deve fungere anche da supporto per il dispositivo dispiegabile nella configurazione iniziale, prima che venga gonfiato. Tale funzione è necessaria per permettere al dispositivo in tessuto muoversi a contatto con la parete del pozzo, passando a lato del bambino senza subire variazioni di forma che possono comportare un successivo malfunzionamento. In Figura 5.7 si vede che inserendo una piccola asta di supporto, collegata rigidamente all'asta di scorrimento per mezzo di due elementi di chiusura, il dispositivo in tessuto non sarà più libero di muoversi ma viene fissato al sostegno, limitando eventuali problemi in fase di soccorso.

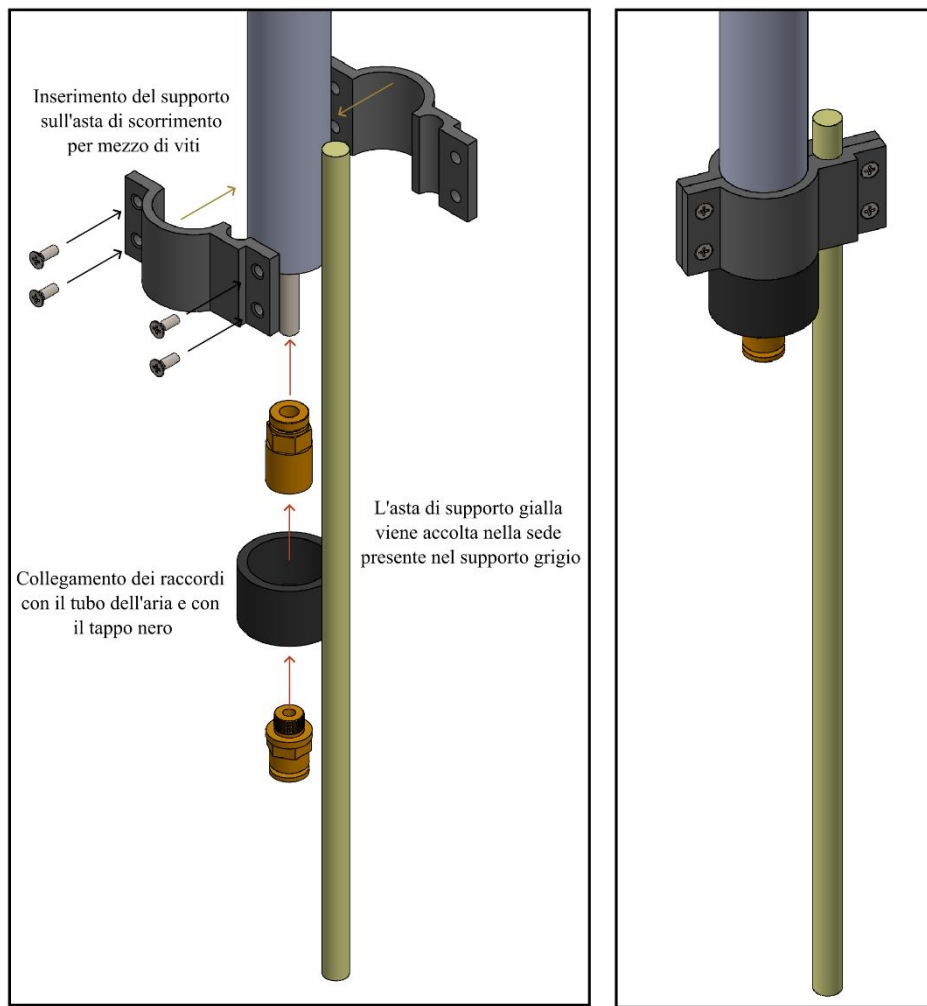


Figura 5.7: Supporto del dispositivo dispiegabile

Il fissaggio del dispositivo all'asta di supporto avviene per mezzo di componenti in PLA stampati in 3D che fungono da elastici di chiusura, rappresentati in Figura 5.8. Tali componenti hanno la funzione di mantenere il dispositivo di sicurezza in una configurazione impacchettata nelle fasi iniziali delle operazioni di soccorso, cioè durante la discesa e la messa in posizione dell'elemento pneumatico. Una volta che il dispositivo viene gonfiato, la pressione interna crea una forza sugli elastici tale da sbloccare le clip che si aprono e non interferiscono più con la deformazione.

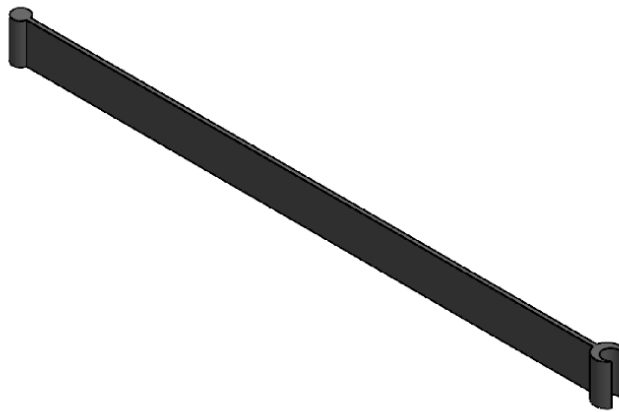


Figura 5.8: Elastico di chiusura del dispositivo dispiegabile

5.2 Impacchettamento ed efficienza di impacchettamento

In questo paragrafo si riportano le configurazioni impacchettate di ciascun prototipo realizzato, facendo riferimento ai tre metodi di impacchettamento descritti nel paragrafo 3.4.

In Figura 5.9 si mostra l'impacchettamento a rotolo singolo dei prototipi realizzati nei diversi materiali utilizzati:



Medical Windtex



Nylon-TPU



Poliestere-TPU

Figura 5.9: Roll packaging

In Figura 5.10 si mostra l'impacchettamento a doppio rotolo dei prototipi realizzati nei diversi materiali utilizzati:



Medical Windtex



Nylon-TPU



Poliestere-TPU

Figura 5.10: Double roll packaging

In Figura 5.11 si mostra l'impacchettamento a Z dei prototipi realizzati nei diversi materiali utilizzati:



Medical Windtex



Nylon-TPU



Poliestere-TPU

Figura 5.11: Z packaging

Il calcolo sperimentale dell'efficienza di impacchettamento prevede di:

- Impacchettare il prototipo cilindrico realizzato con tutti e tre i metodi elencati in precedenza, limitando al massimo l'ingombro volumetrico;
- Misurare le dimensioni del prototipo nella configurazione iniziale;
- Alimentare il dispositivo dispiegabile per mezzo del circuito pneumatico descritto nel paragrafo 5.1.1, permettendone il dispiegamento massimo in condizioni libere da vincoli;

- Mantenendo il prototipo alimentato, si misura il massimo ingombro volumetrico ottenibile;
- Con i dati ottenuti è possibile calcolare la PE .

Facendo riferimento agli step riportati, si definisce la PE per ciascun prototipo realizzato. A scopo semplificativo si ipotizza che la forma del dispositivo dispiegabile sia approssimata da un prisma, sia nella configurazione impacchettata che in quella dispiegata, caratterizzata da una pressione di gonfiaggio di 50 *mbar*. Il prisma che semplifica la geometria del dispositivo viene raffigurato in Figura 5.12:

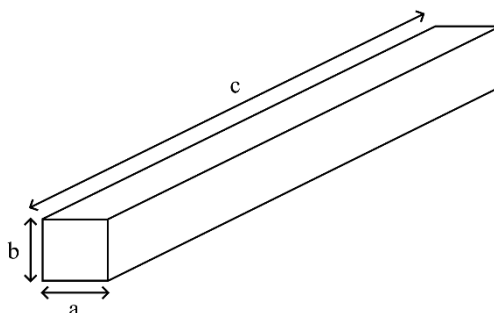


Figura 5.12: Dimensioni del prisma che approssimano il dispositivo dispiegabile

Ciascun prototipo fisico è stato misurato in entrambe le configurazioni di utilizzo. I valori dimensionali misurati sperimentalmente sono riportati nella Tabella 5.1:

	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Roll packaging			
a	4,5	3	3,5
b	4	3	3,5
c	42	49	44
Double roll packaging			
a	5,5	3,5	4
b	3,5	3	3,5

c	42	49	45
Z packaging			
a	6	3	4
b	4	4	5
c	42	49	44
Dispositivo gonfio			
a	35	37	36
b	35	37	39
c	29	28	27

Tabella 5.1: Dimensioni dispositivi dispiegabili impacchettati e dispiegati

La Tabella 5.2 riporta i valori dei volumi iniziale e finale per ogni prototipo di forma cilindrica considerato:

	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Roll packaging			
Volume iniziale [cm³]	760	440	540
Double roll packaging			
Volume iniziale [cm³]	810	520	630
Z packaging			
Volume iniziale [cm³]	1000	590	880
Dispositivo gonfio			
Volume finale [cm³]	34300	38330	37900

Tabella 5.2: Volume iniziale e finale dei dispositivi dispiegabili

Il volume calcolato ipotizzando in maniera semplificativa che la geometria sia prismatica è maggiore rispetto al reale valore, per cui si otterranno efficienze di impacchettamento sovradimensionate rispetto alla realtà.

I risultati sperimentali permettono di affermare che il roll packaging e il double roll packaging sono i metodi di impacchettamento migliori per quanto riguarda l'ingombro iniziale. Al contrario, il metodo di impacchettamento a fisarmonica, o a Z, permette di ottenere un volume iniziale del dispositivo maggiore.

Per quanto riguarda il volume finale, le casistiche riportate hanno risultati simili tra di loro, per via del fatto che le dimensioni dei vari prototipi sono all'incirca le medesime.

Le efficienze di impacchettamento ottenute sperimentalmente sono riportate nella Tabella 5.3:

	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Roll packaging			
Efficienza di impacchettamento (PE) [-]	0,45	0,87	0,70
Double roll packaging			
Efficienza di impacchettamento (PE) [-]	0,42	0,74	0,60
Z packaging			
Efficienza di impacchettamento (PE) [-]	0,34	0,65	0,43

Tabella 5.3: Efficienze di impacchettamento

L'analisi dei valori di *PE* ottenuti evidenzia che il miglior metodo di impacchettamento è il roll packaging, mentre per le altre due tipologie di impacchettamento sono stati ottenuti valori di *PE* minori. Il risultato trovato può essere spiegato dal fatto che il primo metodo di impacchettamento è il più semplice da realizzare e riduce al minimo la dimensione iniziale del dispositivo dispiegabile. Il metodo di impacchettamento a Z permette di

ottenere una configurazione simile ad una fisarmonica, ma risulta più complicato da realizzare rispetto agli altri due, per tale motivo si ha una *PE* minore.

I valori di *PE* che si ottengono per i primi due metodi di impacchettamento con i due materiali laminati, quindi con nylon-TPU e poliestere-TPU, risultano molto alti. In sintesi, tale materiale permette di avere una configurazione iniziale molto meno ingombrante rispetto alla configurazione finale di utilizzo del dispositivo.

5.2.1 Funzione degli elastici

L'impacchettamento dei prototipi realizzati è reso possibile per mezzo dell'utilizzo di elastici in PLA stampati in 3D, caratterizzati da una clip che si apre quando viene sottoposta a sollecitazione circonferenziale, legata alla pressione interna di funzionamento.

Gli elastici utilizzati per chiudere il dispositivo mantenendolo nella configurazione impacchettata sono tre e la loro disposizione è stata studiata per conferire all'elemento gonfiabile un determinato movimento in fase di gonfiaggio. Sono stati stampati elastici di diverse altezze, come si vede in Figura 5.13, in maniera tale da fornire una resistenza che aumenta quando l'altezza cresce, poiché l'area in presa nella clip è maggiore.

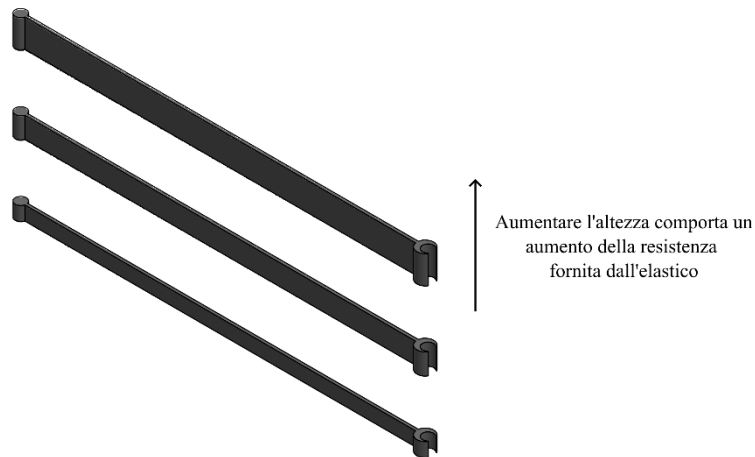


Figura 5.13: Elastici a confronto

Il movimento da conferire al dispositivo in fase di gonfiaggio richiede di portare la parte inferiore dello stesso a contatto con la zona della parete diametralmente opposta all'asta in fase di posizionamento dell'elemento di sicurezza. Per fare ciò, sono stati utilizzati tre elastici di altezze decrescenti dall'alto verso il basso: l'elastico più vicino al raccordo di

attacco tra l'asta e il dispositivo è quello con altezza maggiore, l'elastico intermedio ha un'altezza a metà tra quello superiore e quello inferiore, l'ultimo elastico ha l'altezza più piccola dei tre. In questa maniera, lo sgancio delle clip avviene dal basso verso l'alto, favorendo la risalita della zona inferiore del dispositivo.

Per generare il movimento desiderato, è necessario posizionare l'elastico con altezza maggiore in un punto vicino al raccordo di gonfiaggio che si collega all'asta di scorrimento. Durante il gonfiaggio è possibile che l'elastico in questione non si apra, ma viene spinto verso l'alto dalla deformazione del dispositivo. Questa situazione non rispecchia il progetto ma viene comunque garantito il sostegno del manichino.

In Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 sono mostrate le sequenze di sgancio delle clip con i dispositivi dispiegabili realizzati:

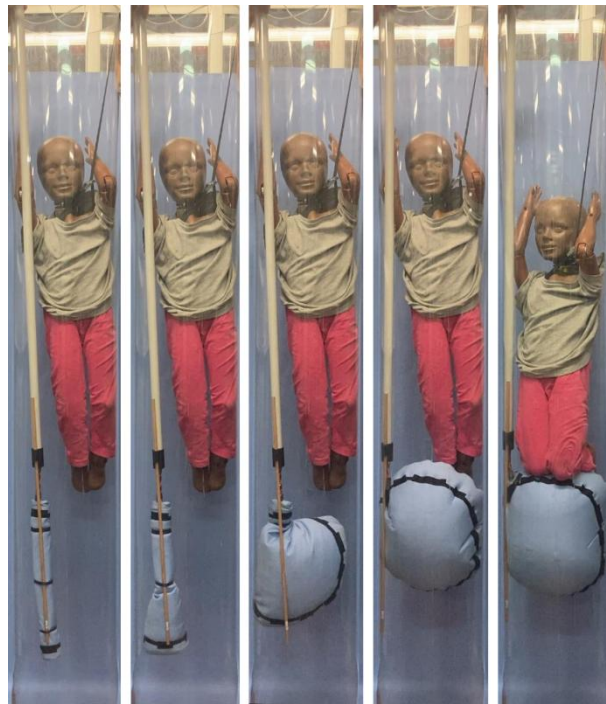


Figura 5.14: Sequenza di sgancio elastici con prototipo in Medical Windtex



Figura 5.15: Sequenza di sgancio elastici con prototipo in nylon-TPU

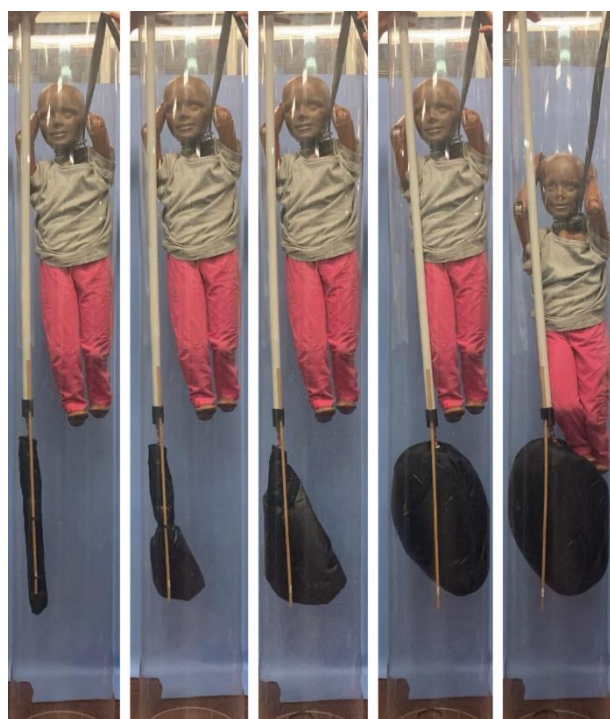


Figura 5.16: Sequenza di sgancio elastici con prototipo in poliestere-TPU

5.3 Pressione minima di distacco

La prova sperimentale corrente ha lo scopo di calcolare la minima pressione interna necessaria a sorreggere la vittima con il dispositivo di sicurezza pneumatico.

Nelle fasi precedenti le prove, è stato misurato il diametro del tubo di plexiglass e la massa del manichino utilizzato:

$$d_{est} = 30 \text{ cm} \rightarrow r_{est} = 15 \text{ cm} \quad (5.1)$$

$$d_{int} = 29,4 \text{ cm} \rightarrow r_{int} = 14,7 \text{ cm} \quad (5.2)$$

$$m_{man} = 13 \text{ kg} \quad (5.3)$$

La procedura seguita per l'esecuzione della prova è la seguente:

- Posizionamento del dispositivo come in Figura 5.17;



Figura 5.17: Posizionamento del dispositivo nel condotto in plexiglass

- Alimentazione pneumatica fino ad una pressione di 40 mbar;

- Si appoggia il manichino sulla superficie superiore del dispositivo, come in Figura 5.18;



Figura 5.18: Manichino appoggiato sulla superficie superiore del dispositivo

- Interruzione dell'alimentazione pneumatica, con conseguente diminuzione della pressione interna al dispositivo a causa della presenza di piccole perdite legate alla traspirabilità del tessuto o di un metodo di realizzazione imperfetto;
- Lettura della pressione in corrispondenza di un piccolo movimento del dispositivo dispiegabile verso il basso.

La lettura della pressione viene eseguita per mezzo di un manometro, mostrato in Figura 5.19 e disposto il più vicino possibile al dispositivo dispiegabile, per limitare al minimo le perdite di carico e per avere una lettura della pressione più realistica possibile. Le caratteristiche principali del manometro utilizzato sono riportate in Tabella 5.4.

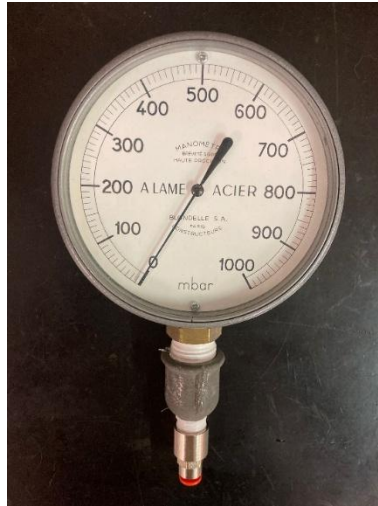


Figura 5.19: Manometro

	Unità di misura	Fondo scala	Offset
Manometro	[mbar]	1000	0

Tabella 5.4: Caratteristiche manometro

È importante sottolineare il fatto che la pressione letta dal manometro è leggermente influenzata dalla presenza di un flusso di aria in movimento con una certa velocità. Si parla infatti di pressione dinamica, in funzione del prodotto tra densità e velocità del flusso al quadrato secondo la seguente legge:

$$p_{din} = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (5.4)$$

Il calcolo della pressione di un fluido all'interno di un tubo richiede di sommare la pressione statica a quella dinamica:

$$p_{tot} = p_{st} + p_{din} \quad (5.5)$$

Si ipotizza che la pressione letta dal manometro, nella condizione in cui si abbia una piccola portata di flusso di aria mandata o una portata nulla, sia in prima approssimazione uguale alla pressione reale all'interno del dispositivo. Quando la portata di flusso è piccola si ha infatti una bassa velocità e quindi la pressione dinamica è poco influente sulla pressione totale.

Quando l'alimentazione di aria in pressione viene interrotta, la pressione interna del dispositivo che si sta testando diminuisce lentamente e si arriva ad un momento in cui tale pressione non è più sufficiente a sostenere il peso del bambino e il dispositivo di sicurezza

inizia a muoversi verso il basso. Non appena si raggiunge tale situazione, si legge la pressione corrispondente nel manometro.

Questa tipologia di prova è stata eseguita con manicotti realizzati mediante tre diverse tipologie di materiale:

- Medical Windtex;
- Poliestere-TPU;
- Nylon-TPU.

La procedura seguita è stata la stessa per tutte le prove ed ha restituito i valori di pressione di distacco riportati in Tabella 5.5:

	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Pressione di distacco [mbar]	30	15	10

Tabella 5.5: Pressioni di distacco ottenute sperimentalmente

In corrispondenza di tali valori di pressione interna si ha scorrimento del dispositivo di sicurezza rispetto alla parete del pozzo. In un caso di soccorso reale all'interno di un pozzo artesiano, è sempre necessario stare in condizioni di sicurezza, per cui raggiungere pressioni interne al dispositivo poco superiori a quelle appena calcolate si traduce in un forte rischio di scivolamento della barriera fisica creata dall'elemento di sicurezza.

I valori ottenuti sperimentalmente permettono di dire che la migliore tipologia di contatto tra dispositivo e parete viene restituita dal tessuto combinato tra poliestere e TPU, in quanto la pressione necessaria a sostenere il manichino è la più bassa dei tre casi analizzati. La combinazione di nylon e TPU restituisce un valore leggermente superiore a quello ottenuto nel caso migliore, probabilmente a causa di una minore area di contatto tra il dispositivo di sicurezza e la parete. Invece, il Medical Windtex si dimostra il meno performante, con la richiesta di pressione interna più alta di tutti e tre i casi analizzati.

5.4 Coefficiente di attrito tra dispositivo in tessuto e parete in plexiglass

A partire dai dati ricavati nel primo test sperimentale, si vuole calcolare il coefficiente di attrito di primo distacco presente tra il tubo di plexiglass e il dispositivo gonfiabile in

tessuto. Il coefficiente di attrito che si vuole calcolare è di tipo statico perché, come già detto in precedenza, in condizioni operative reali non si vuole mai raggiungere una condizione di strisciamento tra le superfici a contatto, poiché vorrebbe dire avere un movimento del dispositivo di sicurezza verso il basso, favorendo lo scivolamento in profondità della vittima.

La valutazione del coefficiente di attrito richiede il calcolo della superficie di contatto che si ha tra la parete e il dispositivo. Tale misurazione risulta particolarmente complicata, in quanto il gonfiaggio del dispositivo all'interno del tubo di plexiglass crea un'area di contatto non regolare. A scopo semplificativo, si approssima l'irregolarità dell'area di contatto considerando che questa sia di forma anulare, rappresentata in Figura 5.20 e caratterizzata da una altezza assiale media h . Il calcolo dell'altezza media si esegue prendendo in considerazione la zona con altezza di contatto massima e quella con altezza di contatto minima, per poi fare una media tra le due:

$$h = \frac{h_{min} + h_{max}}{2} \quad (5.6)$$

Si può ricavare l'area di contatto come:

$$A = 2\pi \cdot r_{int} \cdot h \quad (5.7)$$

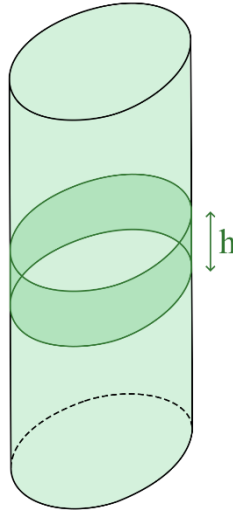


Figura 5.20: Area di contatto dispositivo-tubo semplificata

Considerando un arco di spessore angolare $d\theta$ e per unità di lunghezza assiale, come mostrato in Figura 5.21, si calcola la forza normale elementare:

$$dN' = pr \cdot d\theta \quad (5.8)$$

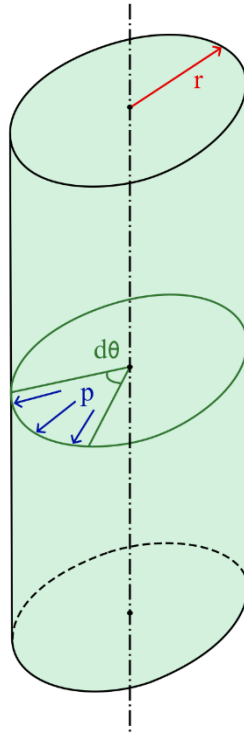


Figura 5.21: Pressione interna agente su un arco $d\theta$

La pressione interna agisce uniformemente su un arco circonferenziale completo per cui è necessario integrare su tutto l'arco di contatto da 0 rad a $2\pi \text{ rad}$ per ottenere la forza normale totale per unità di lunghezza assiale:

$$N'_{tot} = pr \int_0^{2\pi} d\theta = pr[\theta]_0^{2\pi} = pr[2\pi - (0)] = pr(2\pi) \quad (5.9)$$

Moltiplicando per l'altezza dell'area di contatto, h , si ottiene la forza normale totale:

$$N_{tot} = pr \cdot (2\pi) \cdot h \quad (5.10)$$

La forza di attrito resistente massima, in condizioni statiche, è:

$$F_{res,max} = \mu \cdot N_{tot} = \mu \cdot pr \cdot (2\pi) \cdot h \quad (5.11)$$

Per essere in condizioni di sicurezza, nelle quali si garantisce che il dispositivo di sicurezza sia in grado di sopportare la forza d'impatto, si deve avere:

$$F_{res,max} \geq F \quad (5.12)$$

Dove F è la forza verticale che agisce sul dispositivo di sicurezza e che simula la presenza della vittima sull'elemento in tessuto.

Nel caso in analisi si vuole valutare il coefficiente di attrito esistente tra la parete del pozzo artesiano (simulato dal tubo in plexiglass) e il dispositivo dispiegabile in tessuto.

La formula inversa della relazione che esprime la forza massima di attrito resistente restituisce:

$$\mu = \frac{F_{res,max}}{p \cdot (2\pi r \cdot h)} > \frac{F_{peso}}{p \cdot (2\pi r \cdot h)} \quad (5.13)$$

Da un punto di vista semplificativo, si vede tale relazione come se la pressione stesse agendo su una superficie di contatto pari a $2\pi r \cdot h$. La risultante di tale pressione è la forza resistente che si oppone alla forza verticale applicata al dispositivo di sicurezza.

Dal punto di vista sperimentale, l'iter da seguire per il calcolo del coefficiente di attrito di primo distacco è quello riportato in Figura 5.22:

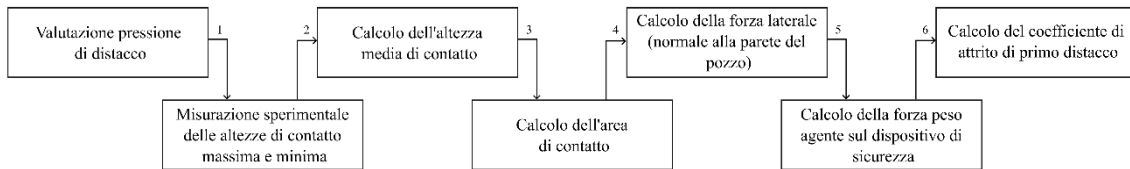


Figura 5.22: Iter per il calcolo del coefficiente di attrito di primo distacco

La Tabella 5.6 riporta i coefficienti di attrito per i dispositivi dispiegabili realizzati:

	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Pressione di distacco, p [mbar]	30	15	10
Altezza media di contatto, h [m]	0,12	0,18	0,1925
Forza laterale, N_{tot} [N]	332,4	249,5	177,8
Forza peso, F_{peso} [N]	127,53	127,53	127,53
Coefficiente di attrito statico, μ_s [-]	0,38 $\approx$ 0,4	0,51 $\approx$ 0,5	0,71 $\approx$ 0,7

Tabella 5.6: Iter per il calcolo dei coefficienti di attrito statico

I valori dei coefficienti di attrito ottenuti sono valori sperimentali e quindi sono valori realistici, a meno di una tolleranza legata ad errori umani durante l'esecuzione della prova.

Considerando la Figura 5.23, che mette in relazione la forza di attrito, parallela alla direzione del pozzo, e la forza legata alle sollecitazioni esterne trasferite al dispositivo dispiegabile (forza peso o forza d'impatto), si ha:

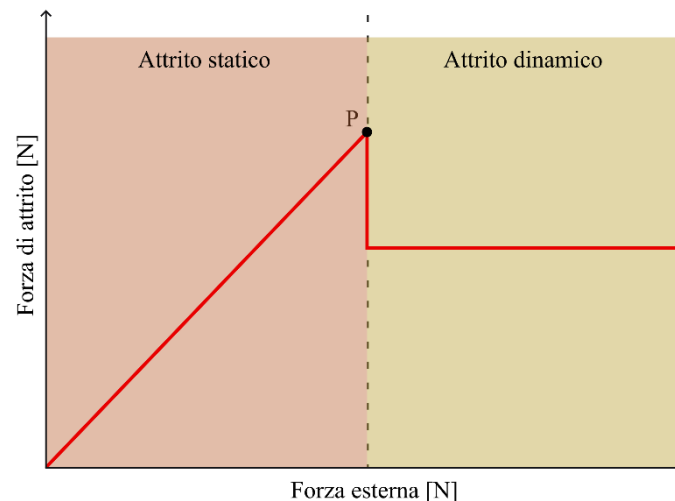


Figura 5.23: Andamento forza esterna-forza di attrito

Il punto P indica la condizione in cui ci si trova per il calcolo del coefficiente di attrito di primo distacco. Tale posizione appartiene alla zona limite del campo di attrito statico, in corrispondenza della transizione da coefficiente di attrito statico a coefficiente di attrito dinamico.

Le condizioni operative in caso di reale funzionamento del dispositivo in tessuto non devono coincidere con quelle del punto P, in quanto il rischio che il tessuto perda aderenza nei confronti della parete del tubo è troppo alto.

5.5 Indeformabilità del dispositivo dispiegabile

A questo punto si tiene in considerazione un istante di tempo in cui il bambino è caduto sul dispositivo di sicurezza, che ha retto l'urto e non sprofonda ulteriormente nel pozzo. Si vuole capire se il peso del bambino, che agisce su un'area ristretta del dispositivo, provoca una deformazione dello stesso verso l'interno. Questa situazione non è desiderata poiché crea una ridistribuzione delle sollecitazioni interne, con il rischio di perdere il

contatto tra il dispositivo e la parete del pozzo, con conseguente collasso della barriera fisica.

Per poter verificare dal punto di vista teorico che tale situazione non accada, è necessario che la forza peso sia minore della forza generata dalla pressione interna al dispositivo in tessuto, agente su una superficie più piccola rispetto a quella massima del pozzo. La superficie su cui agisce la pressione in considerazione viene calcolata utilizzando un coefficiente di sicurezza:

$$CS = 2 \quad (5.14)$$

Da cui si può calcolare l'area ridotta su cui agisce la pressione interna al dispositivo:

$$A_{ridotta} = \frac{A_{totale}}{CS} \quad (5.15)$$

Si calcola poi la forza che agisce verso l'alto, cioè quella resistente:

$$F_{resistente} = p \cdot A_{ridotta} \quad (5.16)$$

Dove la pressione che si considera è quella interna al dispositivo dispiegabile. La forza appena calcolata deve rispettare la seguente relazione, come già definito in precedenza:

$$F_{resistente} > F_{peso} \quad (5.17)$$

Nel caso in cui tale relazione non sia rispettata, significa che il dispositivo di sicurezza non è in grado di sopportare la forza peso generata dal bambino, agente su un'area ristretta rispetto a quella totale disponibile nel dispositivo.

Si sottolinea che più il coefficiente di sicurezza è alto e più il valore dell'area ridotta diminuisce. Essendo che tale valore dell'area ridotta viene utilizzato per calcolare la forza resistente che il dispositivo esercita nei confronti della forza peso, la diminuzione dell'area ridotta comporta una diminuzione della forza resistente applicata, a parità di pressione interna considerata. Nel caso in cui si voglia aumentare il valore della forza resistente, mantenendo costante il coefficiente di sicurezza, è necessario aumentare la pressione all'interno del dispositivo.

Per evitare di incorrere in una situazione indesiderata, si calcola l'area ridotta a partire dall'area interna disponibile nel tubo di plexiglass e la forza peso è quella relativa al manichino.

$$A_{totale} = \pi \cdot r_{int}^2 = \pi \cdot (14,7)^2 = 679 \text{ cm}^2 = 0,0679 \text{ m}^2 \quad (5.18)$$

$$A_{ridotta} = \frac{A_{totale}}{CS} = \frac{0,0679}{2} = 339,5 \text{ cm}^2 = 0,03395 \text{ m}^2 \quad (5.19)$$

$$F_{peso} = mg = 13 \cdot 9,81 = 127,5 \text{ N} \quad (5.20)$$

Dalle relazioni ricavate precedentemente si valuta la pressione interna minima che si deve avere per evitare la deformazione del dispositivo di sicurezza:

$$p \cdot A_{ridotta} > F_{peso} \quad (5.21)$$

Da cui:

$$p > \frac{F_{peso}}{A_{ridotta}} = \frac{127,5}{0,03395} = 3756 \text{ Pa} \approx 38 \text{ mbar} \quad (5.22)$$

La pressione ricavata in questa maniera rappresenta il limite minimo che la pressione interna deve avere per sostenere il peso del manichino per prevenire la deformazione del dispositivo di sicurezza in tessuto.

5.6 Forza d'impatto sul dispositivo di sicurezza

Il test d'impatto risulta di fondamentale importanza per la validazione dei dispositivi dispiegabili realizzati. Si ipotizza di essere in una situazione di soccorso reale, in cui il dispositivo pneumatico è già stato posizionato e gonfiato, per cui sta operando come una barriera fisica all'interno del pozzo. È possibile che si presenti una situazione nella quale, a causa delle vibrazioni causate dalle operazioni di scavo del tunnel parallelo per il soccorso, la vittima perda stabilità e precipiti in profondità, fino ad incontrare il dispositivo. Nella situazione descritta, la forza d'impatto posseduta dalla vittima è decisamente superiore rispetto alla forza peso che si considerava nelle casistiche precedenti. La richiesta di forza resistente per garantire il sostegno del dispositivo è di conseguenza maggiore, per evitare che lo stesso perda aderenza con la parete del pozzo e venga messo fuori servizio.

La procedura che si segue per il test d'impatto sperimentale è la seguente:

- Posizionamento del dispositivo all'interno del condotto in plexiglass, come in Figura 5.24;
- Alimentazione pneumatica fino ad una pressione tale da mettere sotto tensione la membrana del dispositivo;

- Si lascia cadere il manichino posto a una certa distanza dal dispositivo sulla superficie superiore di quest'ultimo;
- Si verifica la tenuta del dispositivo dispiegabile all'impatto del dispositivo.

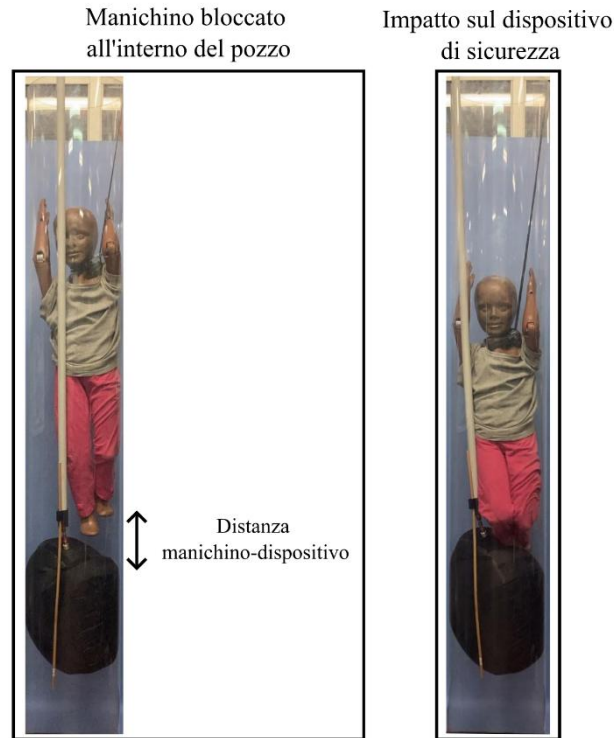


Figura 5.24: Test d'impatto

Le prove effettuate in laboratorio dimostrano la validità dei prototipi all'interno del banco prova realizzato. La prova d'impatto è stata eseguita con i dispositivi realizzati con ciascuna delle tipologie di tessuti considerati e ognuno di essi ha risposto correttamente alla sollecitazione ricevuta dalla caduta libera del manichino.

Nel seguito si considera il calcolo della forza d'impatto della vittima, facendo uso del teorema dell'impulso. Secondo tale teorema, l'impulso è generato dalla variazione di quantità di moto tra due istanti temporali. Si prende quindi in considerazione un primo istante in cui la vittima risulta bloccata nel pozzo e un secondo momento in cui la stessa sta precipitando verso il basso a causa delle vibrazioni indotte dagli scavi.

$$\Delta p = m \cdot (v_{finale} - v_{iniziale}) \quad (5.23)$$

Dove:

- Δp : impulso generato dalla variazione di quantità di moto;

- m : massa della vittima (o del manichino);
- v_{finale} : velocità di caduta della vittima;
- $v_{iniziale} = 0 \frac{m}{s}$

Per semplificare il problema si ipotizza che la caduta della vittima sia libera, per cui non viene ostacolata da alcun tipo di sporgenza del pozzo. La velocità di caduta libera, che coincide con la velocità finale, è definita dalla seguente relazione:

$$v_{finale} = \sqrt{2gh} \quad (5.24)$$

Dove:

- v_{finale} : velocità di caduta libera;
- g : accelerazione gravitazionale;
- h : distanza tra la vittima e il dispositivo di sicurezza.

Conoscendo la massa e la velocità finale del manichino si calcola l'impulso, dal quale si ricava la forza corrispondente dividendolo per la durata dell'impatto. L'intervallo di tempo che si considera, Δt , è il tempo necessario per azzerare la velocità della vittima a partire dalla velocità di caduta libera. La determinazione di tale intervallo temporale richiede di eseguire un'analisi del materiale che costituisce il dispositivo di sicurezza. Si sottolinea il fatto che più la superficie d'impatto è morbida e più la forza d'impatto risultante è piccola, poiché la superficie rallenta l'impatto e disperde l'ampiezza dell'impulso in un periodo di tempo più lungo. Al contrario, se la superficie d'impatto è dura, l'intervallo di tempo richiesto per azzerare la velocità di caduta risulta decisamente inferiore. Il calcolo della forza d'impatto viene eseguito con differenti valori di Δt , per via della difficoltà legata all'ipotesi di tale valore.

Il lavoro di Soica e Toganel [21] si basa sull'analisi di infortuni causati dal gonfiaggio degli airbag frontali nei confronti dei passeggeri di automobili, quando quest'ultimo è in una posizione scorretta. Nello studio analizzato, che può essere comparato al caso di impatto di un bambino con il dispositivo dispiegabile in tessuto all'interno di un pozzo artesiano, viene affermato che la durata massima dell'impatto tra l'airbag gonfiato e la faccia dell'occupante è di 40 – 45 ms. Per tale ragione, si decide di calcolare la forza d'impatto in due diverse situazioni:

$$\Delta t_1 = 0,05 \text{ s} \quad (5.25)$$

$$\Delta t_2 = 0,1 \text{ s} \quad (5.26)$$

La prima situazione, come detto, fa riferimento all'urto del passeggero di un'automobile con l'airbag frontale. Nel secondo caso, si ipotizza che il tempo di durata del contatto sia maggiore al primo caso perché la velocità di caduta libera del bambino risulta probabilmente inferiore alla velocità con cui la testa dell'occupante si muove verso l'airbag. Si tratta quindi di un urto meno violento, caratterizzato da una durata del contatto maggiore.

La forza d'impatto media trasferita al dispositivo di sicurezza è quindi definita dalla seguente relazione:

$$F_{\text{impatto}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (5.27)$$

La forza d'impatto calcolata è la forza teorica che deve essere sopportata dal dispositivo pneumatico affinché non si verifichi una situazione di scorrimento tra il tessuto e la parete del pozzo.

$$F_{\text{resistente}} > F_{\text{impatto}} \quad (5.28)$$

Tenendo presente che la forza normale alla parete trasferita dal dispositivo deve essere tale da generare una forza resistente che si oppone alla forza d'impatto, si valuta quanto deve essere grande la pressione interna dell'elemento di sicurezza.

In primo luogo, si considera di avere l'intervallo di tempo $\Delta t_1 = 0,05 \text{ s}$. La valutazione della forza d'impatto è riportata nella Tabella 5.7 e nella Tabella 5.8 ed è eseguita in funzione della distanza tra il dispositivo dispiegabile e la vittima, h :

$h = 0,2 \text{ m}$			
	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Velocità di caduta libera $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	2,0	2,0	2,0
Impulso $\text{Kg} \cdot \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	25,8	25,8	25,8

Forza media d'impatto [N]	515	515	515
Coefficiente di attrito statico [-]	0,4	0,5	0,7
Forza normale alla parete [N]	1288	1030	736
Altezza di contatto [cm]	12	18	19,25
Area di contatto [cm²]	1108	1663	1778
Pressione interna richiesta [mbar]	116	62	41

Tabella 5.7: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,2 \text{ m}$ e $\Delta t_1 = 0,05 \text{ s}$

$h = 0,4 \text{ m}$			
	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Velocità di caduta libera $\left[\frac{m}{s}\right]$	2,8	2,8	2,8
Impulso $Kg \cdot \left[\frac{m}{s}\right]$	36,4	36,4	36,4
Forza media d'impatto [N]	728	728	728
Coefficiente di attrito statico [-]	0,4	0,5	0,7
Forza normale alla parete [N]	1820	1456	1040

Altezza di contatto [cm]	12	18	19,25
Area di contatto [cm²]	1108	1663	1778
Pressione interna richiesta [mbar]	164	88	59

Tabella 5.8: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,4 \text{ m}$ e $\Delta t_1 = 0,05 \text{ s}$

Successivamente, nella Tabella 5.9 e nella Tabella 5.10 si analizza la medesima situazione considerando una durata del contatto pari a $\Delta t_2 = 0,1 \text{ s}$:

$h = 0,2 \text{ m}$			
	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Velocità di caduta libera $\left[\frac{m}{s}\right]$	2,0	2,0	2,0
Impulso $Kg \cdot \left[\frac{m}{s}\right]$	25,8	25,8	25,8
Forza media d'impatto [N]	258	258	258
Coefficiente di attrito statico [-]	0,4	0,5	0,7
Forza normale alla parete [N]	645	516	369
Altezza di contatto [cm]	12	18	19,25
Area di contatto [cm²]	1108	1663	1778

Pressione interna richiesta [<i>mbar</i>]	58	31	21
--	----	----	----

Tabella 5.9: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,2 \text{ m}$ e $\Delta t_2 = 0,1 \text{ s}$

$h = 0,4 \text{ m}$			
	Medical Windtex	Nylon-TPU	Poliestere-TPU
Velocità di caduta libera $\left[\frac{m}{s}\right]$	2,8	2,8	2,8
Impulso $Kg \cdot \left[\frac{m}{s}\right]$	36,4	36,4	36,4
Forza media d'impatto [<i>N</i>]	364	364	364
Coefficiente di attrito statico [-]	0,4	0,5	0,7
Forza normale alla parete [<i>N</i>]	910	728	520
Altezza di contatto [<i>cm</i>]	12	18	19,25
Area di contatto [<i>cm</i>²]	1108	1663	1778
Pressione interna richiesta [<i>mbar</i>]	82	44	29

Tabella 5.10: Pressione interna richiesta al dispositivo con $h = 0,4 \text{ m}$ e $\Delta t_2 = 0,1 \text{ s}$

I valori di pressione interna ottenuti mettono in luce l'influenza della durata del contatto e della distanza tra il dispositivo dispiegabile e la vittima. Diminuendo la durata del contatto si evidenzia un aumento della forza media d'impatto, di conseguenza è come se il contatto fosse più violento. L'aumento della distanza tra il dispositivo dispiegabile e la vittima ha come conseguenza un aumento della velocità di caduta libera, di conseguenza

anche dell'impulso generato e trasmesso al dispositivo di sicurezza, che richiede una pressione interna maggiore per garantire il sostegno della vittima.

Il posizionamento del dispositivo in tessuto risulta di fondamentale importanza per determinare una forza d'impatto della vittima limitata. È importante che il dispositivo venga posto poco al di sotto della vittima, in maniera tale da limitare la forza d'impatto trasmessa da quest'ultima e diminuendo quindi il rischio di messa fuori servizio dell'elemento dispiegabile di sicurezza.

5.7 Test di tenuta dinamica

Il test di tenuta dinamica prevede di sottoporre il dispositivo in tessuto ad un flusso di aria in ingresso costante, per un periodo di tempo prolungato. L'obiettivo è quello di sollecitare il tessuto che costituisce i prototipi in un lasso di tempo esteso, poiché le operazioni di soccorso richiedono decine di ore per essere portate a termine.

La procedura operativa che si segue in questo caso è la seguente:

- Si dispone l'elemento di sicurezza in una posizione di funzionamento all'interno del condotto in plexiglass;
- Si alimenta il dispositivo per mezzo della linea pneumatica;
- Si dispone il manichino sulla superficie superiore del dispositivo di sicurezza;
- L'alimentazione viene mantenuta aperta per mezzo della valvola 2/2, normalmente chiusa, bistabile e ad azionamento manuale tramite leva, con lo scopo di compensare le perdite di aria in pressione che si hanno in una situazione reale di sperimentazione del prototipo. La regolazione del flusso di aria mandato all'utilizzatore può essere gestita per mezzo della resistenza unidirezionale posizionata nel circuito prima dell'utilizzatore. Aumentando la resistenza diminuisce l'area di passaggio dell'aria, di conseguenza, anche la portata di aria che fluisce verso l'utilizzatore cala. Al contrario, quando la resistenza diminuisce, aumenta l'area di passaggio e quindi anche la portata in massa di aria cresce;
- Al termine del periodo di tempo, si verifica che la posizione del dispositivo dispiegabile sia inalterata rispetto a inizio prova.

L'esecuzione del test di tenuta dinamica evidenzia una ingente richiesta di aria in pressione per garantire un buon funzionamento del dispositivo di sicurezza in tessuto.

Tale richiesta viene diminuita migliorando il metodo di realizzazione del dispositivo, prestando attenzione a limitare le perdite legate alla traspirabilità del tessuto e all'incollaggio delle parti.

6. Conclusione e sviluppi futuri

La presente tesi ha affrontato la progettazione, realizzazione e caratterizzazione sperimentale di un dispositivo di sicurezza dispiegabile in tessuto, ad attuazione pneumatica, concepito come barriera fisica per le operazioni di soccorso di una vittima caduta all'interno di un pozzo artesiano.

In questo capitolo vengono riassunti i principali risultati ottenuti e messi in evidenza i possibili sviluppi futuri, sottolineando che il lavoro svolto rappresenta una tappa significativa verso la realizzazione di un sistema robotico completo, affidabile e utilizzabile in scenari reali di emergenza.

6.1 Risultati conseguiti

Lo sviluppo del progetto ha richiesto una lunga fase preliminare, nella quale sono stati analizzati e testati sperimentalmente alcuni materiali tessili, con i quali sono stati realizzati i prototipi fisici dei dispositivi dispiegabili. I tessuti utilizzati nel presente elaborato di tesi sono stati il Medical Windtex della ditta VAGOTEX e tessuti laminati ottenuti dalla combinazione di nylon-TPU e poliestere-TPU. In particolare, sono state analizzate le proprietà principali dei tessuti, tra cui l'impermeabilità all'aria, la resistenza meccanica, ma anche lo spessore e la grammatura. Successivamente sono state studiate molteplici configurazioni dimensionali e geometriche (prismatiche, sferiche, cilindriche e a soffierto) e diverse tecniche di impacchettamento (roll, double roll e Z packaging), con lo scopo di ridurre al minimo l'ingombro volumetrico iniziale del dispositivo dispiegabile.

Più tardi, è stato necessario effettuare delle modifiche all'asta di scorrimento proposta nel prototipo di robot di salvataggio preesistente, che fa uso di un dispositivo di sicurezza ad arpionismo attuato meccanicamente. Tale intervento è risultato fondamentale per evitare di avere fenomeni di impuntamento.

Inoltre, è stato progettato un sistema di supporto per il dispositivo dispiegabile, collegato all'asta di scorrimento, che conferisce una buona rigidità durante la fase di discesa e posizionamento. Il fissaggio del dispositivo all'asta di supporto è reso possibile da una

serie di elastici con clip, che mantengono il dispositivo impacchettato prima del posizionamento dello stesso, fin tanto che non si esegue il gonfiaggio.

Sono state poi effettuate delle prove sperimentali all'interno di un banco prova semplificato formato da un condotto in plexiglass, una massa simulante la vittima e una linea pneumatica di alimentazione, connessa ad un circuito pneumatico progettato per avere un corretto gonfiaggio dei prototipi realizzati. Tali test hanno permesso di determinare la pressione interna minima necessaria a sostenere la massa, compresa tra i 10 e i 30 *mbar* a seconda del materiale considerato. Inoltre, sono stati stimati i valori dei coefficienti di attrito esistenti tra il tessuto del dispositivo e la parete in plexiglass. È stata poi valutata la robustezza dei prototipi realizzati in risposta alla forza d'impatto derivante da una caduta libera del manichino ed è stato eseguito un test di tenuta dinamica per sollecitare il dispositivo in un intervallo di tempo prolungato, così da simulare il più fedelmente possibile un intervento di soccorso reale. I risultati conseguiti forniscono una solida base progettuale per selezionare la migliore combinazione di geometria e materiale con cui il dispositivo dispiegabile di sicurezza deve essere realizzato, favorendone la futura integrazione all'interno del sistema robotico di soccorso.

6.2 Sviluppi futuri

Il progetto di tesi corrente richiede di essere ampiamente migliorato prima di poter essere impiegato all'interno di scenari operativi realistici.

Durante la realizzazione dei prototipi è stata messa in luce la difficoltà legata all'incollaggio manuale del tessuto, che può causare la nascita di grinze e quindi generare perdite di aria in fase di funzionamento. Un possibile sviluppo futuro potrebbe riguardare l'utilizzo di macchinari industriali per la realizzazione di tali prototipi, per aumentarne l'impermeabilità, ridurre le perdite e di conseguenza la richiesta di aria in pressione.

È possibile eseguire anche un lavoro che permetta di ottimizzare l'ingombro volumetrico del dispositivo. Ciò si traduce in un approfondimento del lavoro preliminare di ricerca eseguito nel corrente lavoro di tesi, individuando ulteriori materiali adatti alla realizzazione del dispositivo e migliorandone l'aspetto produttivo. Nelle prove sperimentali eseguite, il dispositivo è passato agevolmente a lato del manichino perché lo

spazio a disposizione era molto ampio, condizione che raramente si riscontra nella realtà dei pozzi artesiani.

Un ulteriore sviluppo consiste nella realizzazione fisica dell'asta di scorrimento progettata, che andrebbe a sostituire la soluzione provvisoria utilizzata nel presente lavoro. L'integrazione dell'asta all'interno del prototipo di sistema robotico di soccorso permetterebbe inoltre di effettuare test in condizioni più realistiche, per le quali sarebbe richiesto l'utilizzo di un argano o di un sistema a carrucola per eseguire la fase di discesa del robot e per sostenere il manichino all'interno del condotto verticale. Nel caso in cui l'asta venisse integrata nel robot, sarebbe possibile testare il dispositivo pneumatico insieme alle braccia robotiche teleoperate, che dovrebbero interagire con la vittima senza infierire danni e risulterebbero di grande aiuto per il posizionamento dell'elemento di sicurezza.

Infine, si potrebbe pensare di migliorare la regolazione della pressione del dispositivo, rendendola automatica implementando un sistema di controllo ad anello chiuso gestito da un microcontrollore. Per fare ciò sarebbe richiesto l'uso di un sensore di pressione integrato all'interno del dispositivo di sicurezza, che permetterebbe di monitorare la relativa pressione e azionare il compressore solo quando necessario per compensare le perdite.

Bibliografia

- [1] Nilesh K. Tumram, (2020), *Fatal Accidents of Children Falling into Abandoned Borewells: An 11-Year Review of Data and Literature*, Disponibile su: <https://journals.nauss.edu.sa/index.php/AJFSFM/article/view/1185/924>
- [2] Rai Teche, (2021, 13 giugno), *13 giugno 1981. La tragedia di Vermicino*, Disponibile su: <https://www.teche.rai.it/2021/06/13-giugno-1981-la-tragedia-vermicino/>
- [3] L. David William Raj, R. Abinaya, A. Brundha, N. Durga Lakshmi, S. Geethapriya, (2020), *Robotic Arm for Extricate Operation in Bore well*, Disponibile su: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9262297>
- [4] J. Dhiyaneswaran, S. Senthil Kumar, A. Mohan, M. Jemimah Carmichael, Anand Mohan, T.C. Manjunath, Makarand Upadhyaya, V.M. Jothiprakash, (2021) *WITHDRAWN: Design and development of rescue robot in borewell environment*, Disponibile su: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321008658>
- [5] S. Prabhavathi, Pallavi Nayaka B, Nagarathna, Shobha, Sneha Tambekar (2022) *Child Rescue System from Open Borewell using Robot*, Disponibile su: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9985595>
- [6] Matheus S. Xavier, Charbel D. Tawk, Ali Zolfagharian, Joshua Pinski, David Howard, Taylor Young, (2022), *Soft Pneumatic Actuators: A Review of Design, Fabrication, Modeling, Sensing, Control and Applications*, Disponibile su: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9785890>
- [7] Fionnuala Connolly, Diana A. Wagner, Conor J. Walsh, Katia Bertoldi, (2019), *Sew-free anisotropic textile composites for rapid design and manufacturing of soft wearable robots*, Disponibile su: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431618302141?via%3Dihub>
- [8] Ipsita Sahin, Mehrnoosh Ayazi, Caio Mucchiani, Jared Dube, Konstantinos Karydis, Elena Kokkoni, (2023), *A Fabric-based Pneumatic Actuator for the Infant Elbow: Design and Comparative Kinematic Analysis*, Disponibile su: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10354824>

- [9] S. Astuti, (2024), *Robot mobile per operazioni di soccorso in pozzi artesiani*, [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]
- [10] F. Termite, (2025), *Studio e sperimentazione di un sistema per il monitoraggio di parametri fisici e chimici in pozzi artesiani*, [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]
- [11] R. Sanchirico, (2025), *Robotics for Life: Sviluppo di Dispositivi di Sicurezza e di Manipolazione per Robot di Salvataggio Tele-operato*, [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]
- [12] D. Reina, (2023), *Progettazione e simulazione di sistemi per la messa in sicurezza di bambini caduti in pozzi*, [Tesi di la Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]
- [13] X. Ding, (2008), *Fabric permeability testing*, Disponibile su: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845692971500073>
- [14] Md. Azharul Islam, Rochak Rathour, Md. Jawad Ibn Amin , Apurba Das , Ramasamy Alagirusamy, (2024), *Protective and Comfort Performance of Fire Protective Clothing*, Disponibile su: <https://doi.org/10.31881/TLR.2024.066>
- [15] Pham Huy Nguyen, Wenlong Zhang, (2020), *Design and Computational Modeling of Fabric Soft Pneumatic Actuators for Wearable Assistive Devices*, Disponibile su: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-65003-2>
- [16] B. Gatti, (2015), *Dispositivo pneumatico intermittente per il recupero della funzionalità cardiovascolare*, [Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino]
- [17] Chaohua Yang, Jingchao Wei, Lei Li, Zhaohui Wei, Chunyi Sun, Bin Luo, (2025), *Strength analysis of CFRP hybrid adhesive-bolt interference connection structures under tensile load*, Disponibile su: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/3102/1/012055/pdf>
- [18] G. A. Secheli, (2018), *Modelling of Packaging Folds in Metal-Polymer Laminates*, Disponibile su: https://openresearch.surrey.ac.uk/esploro/outputs/doctoral/Modelling-of-packaging-folds-in-metal-polymer/99514343102346/filesAndLinks?institution=44SUR_INST&index=0

[19] S. Goldman, (2009), *Generalizations of the Young–Laplace equation for the pressure of a mechanically stable gas bubble in a soft elastic material*, Disponibile su: <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article/131/18/184502/315129>

[20] S.C. Gajbhiye, S.H. Upadhyay, S.P. Harsha, (2012), *Geometric non-linear analysis of thin flat membrane*, Disponibile su: https://www.academia.edu/71238659/Geometric_non_linear_analysis_of_thin_flat_membrane

[21] Adrian Ovidiu Soica, George-Radu Toganel, (2017), *Passenger head in impact with frontal airbag in OOP postures*, Disponibile su: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/252/1/012005/pdf>