



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Analisi critica dei meccanismi progettati da Leonardo Da Vinci e confronto con i  
macchinari moderni**

**Critical analysis of the mechanisms designed by Leonardo Da Vinci and comparison  
with modern machinery**

Relatore: Chiar.mo  
Prof. **Dario Amodio**

Tesi di Laurea di:  
**Elisa Gambelli Fenili**

**A.A. 2020 / 2021**



# Indice generale

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
1.1	Leonardo ingegnere	5
1.2	Sommario	6
<b>2</b>	<b>Analisi critica della vite aerea e confronto con il moderno elicottero</b>	<b>7</b>
2.1	Valutazione dei materiali, ipotesi di funzionamento e dimostrazione dell'impossibilità di volo della vite Aerea	7
2.2	Analisi delle problematiche della vite aerea e risoluzioni applicate ai moderni elicotteri	10
2.3	Valutazione delle problematiche dei moderni elicotteri e rispettive risoluzioni	12
<b>3</b>	<b>Analisi critica dello scafandro da palombaro e confronto con le attrezzature impiegate nella subacquea Moderna</b>	<b>17</b>
3.1	Descrizione dell'attrezzatura da palombaro ed analisi delle intuizioni adottate dal genio toscano	17
3.2	Analisi delle problematiche dello scafandro non considerate da Leonardo Da Vinci	19
3.3	Confronto dello scafandro con l'attrezzatura impiegata nella subacquea moderna	23
<b>4</b>	<b>Analisi critica del ponte girevole progettato da Leonardo e confronto con i moderni ponti girevoli</b>	<b>26</b>
4.1	Descrizione del progetto di Leonardo	26
4.2	Confronto del ponte girevole di Leonardo con il ponte Colbert	28
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Bibliografia e sitografia</b>	<b>30</b>



## 1 INTRODUZIONE

### 1.1 LEONARDO INGEGNERE

Leonardo Da Vinci nacque a Vinci il 15 aprile 1452. Egli è considerato uno dei più grandi geni dell'umanità, che incarnò a pieno lo spirito rinascimentale portandolo alle maggiori forme di espressione nei più disparati campi dell'arte e della conoscenza. Fu infatti scienziato, filosofo, architetto, pittore, scultore, disegnatore, trattatista, scenografo, matematico, anatomista, botanico, musicista, ingegnere e progettista. In questa trattazione, ci si concentrerà sul Leonardo ingegnere e progettista.

Di fatto, egli incominciò ad occuparsi di meccanica poiché provava un profondo interesse per ogni forma di movimento. Considerava sia le macchine sia l'uomo apparati concepiti per muoversi, dotati di componenti analoghi, quali corde e tendini. Come aveva fatto con i disegni anatomici di cadaveri sezionati, disegnò macchine smontate – ricorrendo a viste esplose e profili longitudinali – per dimostrare come il movimento sia trasferito dalle leve e dagli ingranaggi alle ruote e alle pulegge.

In particolare, due ossessioni che l'accompagnarono per tutta la sua vita furono il volo e l'acqua.

Per oltre due decenni, a cominciare dal 1490 circa, Leonardo studiò, con inusitata intelligenza, il volo degli uccelli e la possibilità di progettare macchine che permettessero all'uomo di volare. Su tale argomento produsse oltre cinquecento disegni e annotò trentacinquemila parole, sparsi in una dozzina di taccuini. Nell'impresa lo guidarono sia la curiosità nei confronti della natura e il suo spirito di osservazione sia il suo innato istinto di ingegnere. Di fatto, il suo interesse circa le macchine volanti iniziò all'epoca in cui si occupava di rappresentazioni teatrali.

Altra ossessione fu l'acqua. In particolare, egli considerava l'azione dei fluidi come la forza più fondamentale operante nella vita del pianeta e nei nostri corpi. Egli prestò particolare attenzione all'acqua. L'idrodinamica catalizzava infatti i suoi interessi di artista, scienziato e ingegnere. In uno dei suoi primi taccuini aveva disegnato un sistema di dispositivi meccanici – tra cui pompe, tubi idraulici, viti di Archimede e ruote a tazze – destinati a spostare l'acqua a diversi livelli. Di fatto, i suoi studi sull'acqua erano iniziati con finalità pratiche e artistiche, ma come quando si era applicato all'analisi dell'anatomia e del volo, rimase incantato dalla bellezza della scienza fine a se stessa. L'acqua forniva l'esempio perfetto del processo che lo affascinava in cui le forme si modificano per effetto del movimento. Leonardo apprese fin dall'inizio che non può essere compressa; una data quantità d'acqua ha sempre lo stesso volume, qualunque sia la forma del fiume o del recipiente. Quindi l'acqua che scorre fornisce trasformazioni geometriche perfette che hanno attratto fin da subito il genio toscano.

## 1.2 SOMMARIO

Ho deciso di dedicare questa tesi a Leonardo Da Vinci, un personaggio che mi ha sempre affascinato, prima come artista e poi come inventore. Sono stata attratta dalla sua inesauribile curiosità, dalla sua sete di sapere e dalla sua raffinata capacità di osservazione, che lo hanno portato ad immaginare quello che altri inventori avrebbero scoperto solo secoli dopo.

In particolare, in questa tesi si andranno ad analizzare tre invenzioni leonardesche: la vite aerea, lo scafandro da palombaro e il ponte girevole. Si andranno ad analizzare le criticità di tali progetti, dimostrandone l'impossibilità di funzionamento, ma pur riconoscendone la genialità. Si andrà inoltre ad effettuare un confronto di tali invenzioni con i moderni macchinari, mettendone in luce le differenze ed il funzionamento.

In particolare, i confronti verranno effettuati tra: la vite aerea e il moderno elicottero, lo scafandro da palombaro e l'attrezzatura della subacquea moderna, il ponte girevole di Leonardo e i moderni ponti girevoli.

## 2 ANALISI CRITICA DELLA VITE AEREA E CONFRONTO CON L'ELICOTTERO MODERNO

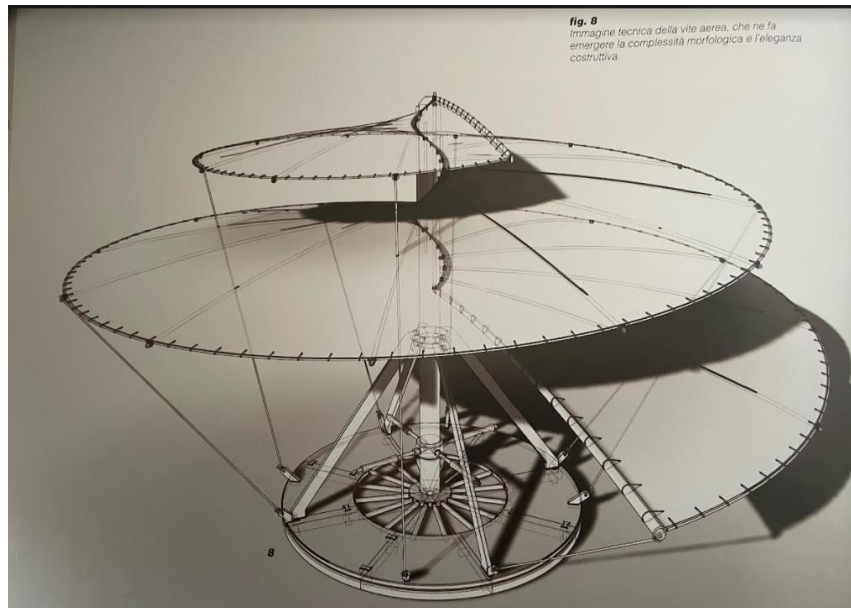
### 2.1 VALUTAZIONE DEI MATERIALI, IPOTESI DI FUNZIONAMENTO E DIMOSTRAZIONE DELL'IMPOSSIBILITA' DI VOLO DELLA VITE AEREA

Il progetto della vite aerea è forse uno dei più caratteristici di Leonardo. Esso è presente sul Codice Atlantico ed è datato fra il 1483 e il 1486. Per realizzare tale progetto egli si ispira ad un gioco per bambini, il cosiddetto "elicottero di carta". In particolare, egli osserva che facendo ruotare velocemente quest'ultimo, esso si solleva verso l'alto. Nel realizzare ciò, Leonardo si concentra su due aspetti fondamentali:

1. La potenzialità dinamica del corpo umano, la quale doveva sviluppare la forza e la velocità necessarie per far ruotare il meccanismo;
2. L'aria, cioè il mezzo attraverso cui la vite doveva operare. Questo è un aspetto molto importante, poiché egli comprese come l'aria fosse un fluido comprimibile, in grado cioè di ridurre il proprio volume se sottoposto ad una sufficiente energia. Quindi, se l'aria è comprimibile, essa ha un suo spessore materiale e in base a ciò Leonardo comprende che un dispositivo a forma di vite, ruotando velocemente, è in grado di sollevarsi in volo. Come una vite è in grado di avvitarsi in un certo materiale, allo stesso modo la vite aerea si sarebbe avvitata nello spessore fluido dell'aria.

Si sottolineano, in particolare, i materiali di cui si compone la vite aerea:

- La struttura volante si costituisce di una guida in fil di ferro che definisce il profilo elicoidale, fissata all'albero centrale attraverso una serie di raggi in legno, grazie ai quali è possibile apporre la copertura in tessuto e agganciarla alla struttura. In particolare, la struttura elicoidale doveva avere un diametro di 8 braccia (1 braccio corrisponde a circa 58 cm);
- Il tessuto suggerito da Leonardo per la copertura della struttura elicoidale è il lino, trattato con l'amido per ridurne notevolmente la porosità;
- Un sistema di cavalletti in legno permette il fissaggio della struttura "volante" all'albero centrale e quindi alla base di manovra, ove gli uomini ne avrebbero azionato il meccanismo rotatorio;
- La base di manovra, circolare e in legno, ospita gli uomini che avrebbero prodotto l'energia necessaria alla vite per sfruttare la densità dell'aria e volare.



Di fatto, si evidenziano due possibili ipotesi circa il funzionamento della vite aerea.

Nella prima ipotesi si suppone che quattro persone, impugnando le quattro aste del timone di manovra, rimangano ferme e spingano con i piedi una struttura che è collegata saldamente all'elica. In questo modo l'elica inizierebbe a girare e raggiunta un'ipotetica "presa" sull'aria, insieme ad una struttura portante e al piano di rotazione volerebbe via lasciando a terra le persone e il pilone centrale, che è utilizzato come avvio e direzione della rotazione.

Nella seconda ipotesi si suppone invece che le strutture siano distribuite diversamente. Le quattro persone, spingendo con i piedi, si mettono a girare come nei girelli dei parchi giochi. Quando la vite gira abbastanza velocemente da avvitarsi nell'aria (in senso orario), la struttura dovrebbe teoricamente iniziare a volare. La base su cui fanno presa i piedi dei quattro manovratori comincia però a girare in senso opposto. In questo modo, anche se la struttura viene inizialmente spinta verso l'alto, non può proseguire il volo perché non è presente nulla su cui fare "presa" con i piedi e i moti rotatori opposti colliderebbero.

Di qui si comprende come, per la prima volta, la forma spirale che in ambito idrologico era stata onnipresente (si pensi ai sistemi idraulici basati sul sistema della vite d'Archimede o vite senza fine) viene applicata al volo e all'aria.

In particolare, la stessa vite di Archimede può essere paragonata alla moderna turbina idraulica a vite. Tale macchina, nota anche come coclea, è costituita da una grossa vite disposta all'interno di un tubo. La parte inferiore del tubo è immersa in un liquido e, ponendo in rotazione la vite, ogni passo raccoglie una certa quantità di sostanza che viene sollevata lungo la spirale fino ad uscire dalla parte superiore, per essere scaricata in un bacino di accumulo. Quindi, la vite scende sollevando l'acqua verso l'alto. Analogamente, cambiando il verso di rotazione, la vite si muove verso l'alto e l'acqua viene spinta verso il basso.



Proprio tale spinta dell'acqua può essere paragonata alla spinta dell'aria studiata dallo stesso Leonardo. Egli, infatti, osserva come l'aria in certe condizioni può comportarsi come un corpo solido: un oggetto che si avviti al suo interno deve sollevarsi verso l'alto. Egli comprese quindi come, spingendo l'aria verso il basso, si poteva essere sospinti verso l'alto. E questo altro non è che la base del funzionamento del moderno elicottero.

In particolare, la rotazione delle pale dell'elicottero (paragonabile alla rotazione della vite aerea e quindi di una vite senza fine) permette di creare la forza aerodinamica necessaria a generare portanza. La portanza a sua volta permette di trasformare velocità e coppia del motore in spinta. La spinta permette all'elicottero di sollevarsi.

Tuttavia, attraverso dei calcoli si può dimostrare come la vite aerea di Leonardo non sarebbe mai riuscita a prendere il volo. Bisogna cioè dimostrare che la potenza generata dagli uomini è inferiore alla potenza necessaria per mantenere in volo la vite con il relativo carico.

In particolare, si attuano una serie di approssimazioni:

1. Si suppone che un uomo abbia una massa  $m_1 = 75$  kg e che il braccio rispetto a cui è applicata la forza sia pari a  $b = 1$  m;
2. Si considera che quattro uomini compiano  $n = 5$  giri/min;
3. Si suppone inoltre che la vite aerea abbia una massa  $m_2 = 400$  kg.

Di seguito si va quindi a calcolare la potenza generata da quattro uomini.

Sapendo che la potenza  $P$  è pari al prodotto tra la coppia  $M$  e la velocità angolare  $\omega$  si ha che:

$$P = M\omega \text{ [W]}$$

Sostituendo i valori precedentemente ipotizzati si ottiene che:

$$P_1 = M\omega = F b \omega = 4 m_1 g b \frac{2\pi n}{60} = 1541 \text{ W}$$

Si procede ora con il calcolo della potenza necessaria per sollevare in volo la vite aerea.

In particolare, si approssima la superficie della spirale ad un'ala di lunghezza  $l = 5$  m. Ponendosi ai  $2/3$  di essa, quindi a circa 3 m e considerando  $\omega = \pi$ , la velocità media del profilo alare vale:

$$v_p = \omega r = 3\pi = 9,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Si procede quindi con il calcolo della superficie  $S$ :

$$S = \pi r^2 = \pi (2,5)^2 = 20 \text{ m}^2$$

Tramite un grafico si possono ricavare i valori del coefficiente di portanza  $c_L$  e del coefficiente di resistenza  $c_D$ , espressi in funzione dell'angolo di incidenza  $\alpha$ , qui supposto pari a  $20^\circ$ :

$$c_L = 1,5$$

$$c_D = 0,5$$

Di conseguenza, la portanza  $L$  sarà pari a:

$$L = \frac{1}{2} \rho v_p^2 S c_L = 1650 \text{ N}$$

Allo stesso modo si può ricavare il valore della resistenza  $D$ , che sarà pari ad un terzo della portanza  $L$ :

$$D = \frac{1}{2} \rho v_p^2 S c_D = 550 \text{ N}$$

La potenza necessaria per sollevare circa 165 kg vale:

$$P_2 = M\omega = 4320 \text{ W}$$

Considerando che solo i quattro uomini pesavano 300 kg, la potenza che avrebbero generato non sarebbe bastata a sollevare loro stessi e di conseguenza la vite stessa.

In ogni caso, tale progetto è stato fondamentale per porre le basi alla progettazione dei moderni elicotteri.

## 2.2 ANALISI DELLE PROBLEMATICHE DELLA VITE AEREA E RISOLUZIONI APPLICATE AI MODERNI ELICOTTERI

La vite aerea di Leonardo Da Vinci appena analizzata può essere considerata l'antenato del moderno elicottero. Quest'ultimo risolve i problemi riscontrati nel progetto del genio toscano.

In particolare, il problema della stabilità rotazionale è risolto apponendo una piccola elica in fondo alla coda, che evita che il mezzo giri su se stesso.

Infatti, il moto circolare del rotore creerebbe una forte coppia rotazionale in direzione opposta, che deve essere necessariamente compensata affinché l'aeromobile possa mantenere una direzione definita. Ecco perché al moto delle pale che girano in un senso, si dovrebbe aggiungere, per compensazione, un corrispondente moto del corpo dell'aeromobile in senso inverso. Quindi, per evitare questo "spiacevole" moto, viene installato nella coda degli elicotteri un secondo piccolo rotore, detto "di coda", le cui pale girano sul piano verticale, per bilanciare la rotazione orizzontale di quelle del rotore principale. I modelli più recenti, per ottenere lo stesso risultato, sfruttano il flusso d'aria generato dai gas di scarico della turbina, indirizzandolo lateralmente in coda. Al contrario, nella vite aerea di Leonardo era presente un solo "rotore" e quindi essa non poteva essere stabile.

Il rotore è un componente molto sofisticato, perché consente di cambiare l'inclinazione delle pale ad ogni giro, all'aumentare della velocità dell'elicottero. Ciò è indispensabile per evitare che l'elicottero si ribalti anche a velocità minime a causa della maggiore spinta fornita dalle pale che stanno girando contro vento, quindi con velocità all'aria maggiore.

Un altro aspetto fondamentale è che l'elicottero fonda il principio del volo sulla portanza e non sull'avvitamento ipotizzato da Leonardo. Nell'elicottero, un solo organo, il rotore, provvede a fornire sia la portanza che la trazione. Il più semplice tipo di elicottero ha un solo rotore principale e un rotore di coda. In particolare, quando la spinta verso l'alto, cioè la portanza, è uguale al peso dell'elicottero, quest'ultimo si trova in aria (volo stazionario). Quando, invece, la spinta è superiore, sale, e viceversa. Tutto ciò è possibile in quanto l'elicottero ha diverse possibilità di movimento. Quando esso si comporta come un'elica, genera portanza, mentre per avanzare e indietreggiare funziona come gli alettoni di un aereo. Per cambiare direzione è sufficiente ridurre la potenza al rotore di coda, o aumentarla a secondo del caso.

Sicuramente la vite aerea di Leonardo non era dotata di comandi. Nell'elicottero moderno si utilizza una mano per l'assetto orizzontale e laterale, un'altra mano per regolare la potenza del motore e l'inclinazione delle pale e i piedi per la direzione. In particolare, i controlli dell'elicottero sono il collettivo, la manetta, il ciclico e la pedaliera:

- Il collettivo controlla l'angolo di inclinazione su tutte le pale contemporaneamente in modo da ricevere più o meno spinta verso l'alto dell'elicottero;
- La manetta è semplicemente un acceleratore che consente di controllare il regime del motore e dunque di inviare maggiore o minore potenza al rotore;
- Il ciclico, niente altro che la cloche, è il più sofisticato ed il più delicato dei controlli, poiché gestisce la variazione ciclica dell'angolo di attacco delle pale, ovvero le variazioni di assetto e spostamento dell'elicottero;
- La pedaliera aziona il rotore di coda, che consente il controllo della direzione della prua rispetto alla direzione di avanzamento.

Si comprende quindi come la mancanza di comandi nella vite aerea comportava il venir meno della manovrabilità della stessa.

### 2.3 VALUTAZIONE DELLE PROBLEMATICHE DEI MODERNI ELICOTTERI E RISPETTIVE RISOLUZIONI

Si possono ora fare alcune considerazioni circa la velocità periferica, la portanza e la resistenza, le quali danno luogo a dei problemi non considerati dal genio toscano. La trattazione verrà articolata valutando i seguenti punti:

1. Velocità periferica delle pale
2. Portanza e resistenza sul rotore
3. Distribuzione del carico aerodinamico sulle pale e valutazione della forza centrifuga
4. Relazione tra portanza e velocità periferica
5. Risoluzione problemi derivanti dalla portanza e dalla velocità periferica

#### 1. Velocità periferica delle pale

Durante la rotazione, le pale compiono un dato numero di rivoluzioni al secondo, viaggiando attraverso il vento relativo ad una data velocità. Le condizioni di velocità per una pala differiscono a seconda del tipo di volo che si sta conducendo: se l'elicottero è in volo stazionario (hovering), la velocità in un dato punto della pala risulterà identica allo stesso punto della pala opposta, se invece si parla di volo traslato, la velocità di un punto di una pala sarà molto diversa da quella dello stesso punto della pala opposta.

È importante sottolineare, che la velocità sulle pale è proporzionale al raggio. In particolare, essa cresce con il crescere della distanza dal centro di rotazione e cioè dal mast verso l'estremità della pala. Questa condizione fisica di aumento della velocità periferica produce numerosi effetti, che pongono non pochi problemi. Prima di analizzarli, si va a ricavare il valore della velocità periferica attraverso la seguente formula:

$$v_p = \omega r = \frac{2\pi n}{60} r \left[ \frac{m}{s} \right]$$

n=numero giri del rotore

r=raggio del rotore

#### 2. Portanza e resistenza sul rotore

Si introduce il concetto di disco rotore. Quest'ultimo è una superficie virtuale, anche chiamata disco attuatore. Come la velocità delle pale, anche la portanza e la resistenza variano durante la rivoluzione. Durante quest'ultima, la pala descrive un angolo chiamato "azimuth" compreso tra l'asse della pala ad una direzione convenuta.

Per poter calcolare la capacità del rotore di sollevare tutto ciò che è vincolato ad esso, è necessario conoscere come il peso intero dell'aeromobile viene distribuito in maniera omogenea sul disco rotore. Per far ciò si va a considerare il "carico sul disco", cioè l'influenza che la portanza produce sul rotore. La conoscenza di questo valore permette il calcolo esatto della distribuzione del carico sostenibile sull'intera superficie del disco rotore:

$Cd$  (carico sul disco) = peso massimo elicottero/superficie disco rotante

Supponendo che l'elicottero abbia un peso complessivo di 893 kg e la superficie del suo disco rotore sia di 46.50 m<sup>2</sup>, si avrà un carico alare pari a 19.17 kg/m<sup>2</sup>.

Il carico sul disco non è un dato costante, poiché il disco rotore che si forma durante la rotazione delle pale subisce delle variazioni. Infatti, maggiore è il carico, maggiore è l'angolo conico che si forma e quindi minore è la superficie del disco rotore. Anche la velocità dell'elicottero può determinare una riduzione del disco che ne aumenta la conicità. Ovviamente maggiore è il carico sul disco, maggiore è la potenza indotta e quindi la velocità del downwash, cioè del flusso al di sotto del rotore.

### 3. Distribuzione del carico aerodinamico sulle pale e valutazione della forza centrifuga

Si va ora ad analizzare come viene distribuito il carico sulle singole pale e come esse si comportano durante il volo quando sostengono attivamente l'intera struttura.

Di fatto, le pale devono sostenere il peso dell'elicottero, incluse le variazioni prodotte dalle accelerazioni G verticali che ne modificano il valore di peso, pur conservando identica massa. Le pale subiscono uno stiramento prodotto dalla forza centrifuga che le rende rigidissime; tuttavia, esse sostengono comunque l'intero peso dell'elicottero che va diviso per l'area della pala.

$C_{pal}$  (carico sulla pala) = peso elicottero/area della pala

Durante la rotazione, la pala si comporta come una corda tesa a causa dell'azione della forza centrifuga, che avviene ogni qual volta un corpo è sottoposto a rotazione. L'azione della forza centrifuga è fondamentale per il volo degli elicotteri, poiché, stirando le pale verso l'esterno esse diventano rigidissime e forti. La forza centrifuga è una componente estrema nella meccanica del volo di un elicottero, essa produce una trazione verso l'esterno ed è distribuita nel carico non solo sulla struttura della pala, ma anche sui cuscinetti delle articolazioni, sul mast e su tutti gli altri elementi che lo compongono.

Essa è pari a:

$$F_C = m\omega^2 r$$

#### 4. Relazione tra portanza e velocità periferica

Al variare dell'angolo di incidenza, su ogni pala si otterrà la variazione della portanza. Un ruolo fondamentale sul meccanismo di questo aeromobile è dato dalla velocità periferica, che bisogna considerare in maniera incidente, come fattore fondamentale e variabile nella distribuzione del carico alare sulle pale. Ecco perché la formula per il calcolo della portanza subisce delle variazioni rispetto al caso di un'ala in traslazione:

$$L = \frac{1}{2} \rho v_p^2 S c_L$$

$v_p$  = velocità periferica

$S$  = superficie

$c_L$  = coefficiente di portanza

Si comprende quindi come la portanza aumenti di molto man mano che si procede verso l'estremità della pala (pala in rotazione).

In particolare, si va ad analizzare la questione della portanza che si deve generare sulla pala. L'obiettivo è quello di migliorare la distribuzione della portanza e della resistenza, per incrementare le prestazioni dei rotori.

Infatti, si è visto come la variazione dell'angolo di incidenza influenza la qualità della portanza e della resistenza. Si va dunque a supporre una posizione semplice dell'elicottero, cioè una posizione in cui l'angolo di attacco (angolo tra la corda ed il piano di rotazione) sia identico sia alla radice che nella zona periferica. In particolare, la pala è un'ala rotante, legata ad un centro di rotazione e che per questo è soggetta all'incremento della velocità periferica, che aumenta sempre più verso l'esterno della pala.

Cosa accade dunque alla portanza in quella zona? La portanza aumenta proporzionalmente sempre più verso la periferia di essa, dove anche la velocità periferica aumenta e come conseguenza la resistenza viene anch'essa moltiplicata. Dunque, in una pala avente lo stesso angolo di attacco sia alla radice che alla

periferia - cioè senza alcun angolo di svergolamento o rastremazione - la risultante della portanza e della resistenza sarebbe concentrata al 98% nella zona periferica di essa.

#### 5. Risoluzione dei problemi derivanti dalla portanza e dalla velocità periferica

La concentrazione della portanza per lo più nella parte periferica, per oltre il 90% della lunghezza di essa, ha rappresentato un serio problema all'inizio della storia delle macchine ad ala rotante. Infatti, questo fenomeno produceva elevate sollecitazioni strutturali legate alla flessibilità della pala, con conseguente generarsi di vibrazioni e gravi limitazioni aerodinamiche che terminavano spesso con la distruzione delle pale e dell'intero rotore.

La questione fu affrontata già dall'inizio del Novecento quando gli autogiri cominciavano a compiere i primi voli sperimentali. Per ovviare al problema della distribuzione della portanza, si pensò all'utilizzo di pale rastremate, aventi cioè una corda sempre più ridotta a partire dalla radice verso l'estremità di essa.

Queste pale sono state utilizzate fin dagli inizi degli anni '60 ed erano caratteristiche degli elicotteri Sikorsky SH 55. Quando più tardi scomparvero, esse vennero sostituite da pale svergolate, aventi cioè un angolo di attacco maggiore alla radice che diminuisce man mano che si raggiunge la periferia della pala. Questa strategia permette infatti di distribuire la portanza in maniera più efficace ed omogenea, concentrandola pressoché al 70% della sua lunghezza ed intorno al suo centro di pressione. La portanza risultante viene così perfettamente distribuita sull'intera superficie della pala, in modo proporzionale, per compensare gli squilibri prodotti dalla velocità periferica.

Sapendo che la portanza varia con il quadrato della velocità, se si dimezza quest'ultima si diminuisce la portanza di  $1/4$ . Il problema della velocità periferica è stato tecnicamente risolto in due modi diversi: svergolando la pala (twisting) oppure assottigliandone l'estremità (tapering) in modo che si generi sempre meno portanza man mano che si guarda verso l'esterno della stessa.

Nelle pale rastremate si genera però un fenomeno sgradevole, che provoca vibrazioni alle alte velocità, oltretutto fino a pochi anni fa erano molto difficili da costruire. Oggi le macchine a controllo numerico riescono a produrre pale perfette, identiche l'una all'altra e con forme molto particolari, un tempo inconcepibili. Le pale svergolate, invece, offrono maggiori garanzie sia dal punto di vista costruttivo che operativo. L'angolo di svergolamento medio (washout angle) tra la radice e l'estremità di una pala, è generalmente compreso tra i  $6^\circ$  ed i  $12^\circ$ .

Il problema principale della distribuzione della portanza sulla pala sta, tuttavia, proprio nello spostamento del suo centro di pressione. Questo risulta maggiormente vantaggioso se concentrato lungo la sezione posta al 70% del raggio, perché l'angolo di incidenza della pala risulti sempre minore verso la sua periferia.

Viceversa, il valore di portanza risulta sempre maggiore con l'avvicinarsi alla radice della pala, cioè nella zona dell'articolazione.

L'utilizzo di materiali compositi che permettono la costruzione di pale ad altissima resistenza e leggerezza, ha permesso l'adozione di questa strategia costruttiva, sostituendo le pale in legno che avevano la pianta rastremata, con pale fabbricate in fibra di vetro e materiali compositi. L'impiego dei materiali compositi ha permesso lo sviluppo di una tipologia di rotore che si è diffusa largamente sulla maggioranza degli elicotteri, grazie alle proprietà intrinseche di questi materiali.

Da questa trattazione si comprende come, nonostante il moderno elicottero vada a risolvere le criticità della vite aerea dà comunque luogo ad ulteriori problematiche (velocità periferica e portanza elevate all'estremità della pala) che negli anni si è cercato di risolvere, prima con la rastremazione e poi con lo svergolamento della pala. Ciò ha permesso una buona distribuzione della portanza e della componente resistiva su tutta la superficie della pala, che risulta ideale se concentrata intorno al 70% della lunghezza, ed il 25% della corda della pala.



### 3 ANALISI CRITICA DELLO SCAFANDRO DA PALOMBARO E CONFRONTO CON LE ATTREZZATURE IMPIEGATE NELLA SUBACQUEA MODERNA

#### 3.1 DESCRIZIONE DELL'ATTREZZATURA DA PALOMBARO ED ANALISI DELLE INTUZIONI ADOTTATE DAL GENIO TOSCANO

Lo scafandro da palombaro è un progetto di Leonardo da Vinci presente nel foglio 909 del Codice Atlantico. Egli realizza tale meccanismo per permettere la respirazione sott'acqua. In particolare, esso si costituisce di:

- due tubi di canna collegati da cuoio, con anelli d'acciaio. Tali tubi sono fissati ad una maschera facciale con due fori di vetro all'altezza degli occhi per vedere;
- due valvole collegate alla maschera: una si apre solo per l'inspirazione e l'altra solo per l'espirazione. Tale comportamento ricorda quello delle valvole cardiache;
- un enorme tappo di sughero presente in superficie e collegato ai due tubi. Il sughero, infatti, è un materiale che permette la tenuta stagna ed il galleggiamento;
- dei pesi costituiti da sacchetti di sabbia, che hanno la funzione di zavorra. In realtà, egli comprese poi che il piombo poteva essere la soluzione migliore per mantenere la profondità e la staticità;
- un sacco pieno d'aria in grado di essere sgonfiato per agevolare la discesa o viceversa, la risalita;
- un mantice, che grazie al suo beccuccio, permette di comprimere l'aria e spingerla all'interno del tubo di inspirazione. Di fatto, ciò può essere considerato il precursore delle pompe ad aria utilizzate dai primi sommozzatori nel XX secolo;
- un coltello da utilizzare nel caso ci siano complicazioni nel liberarsi da ostacoli sottomarini, quali scogli o reti e un corno per segnalare la fine dell'operazione. Completano l'attrezzatura una giubba, dei pantaloni ed un otre.



Si vanno ora ad analizzare gli accorgimenti adottati dal genio toscano al fine di permettere il funzionamento dello scafandro.

In particolare, si nota come Leonardo comprese che il sistema di respirazione a tubo semplice è del tutto inadeguato, in quanto non consente un efficace ricambio: a lungo andare, infatti, l'aria espirata finirebbe per ristagnare nel tubo, ostacolando se non impedendo l'afflusso di quella fresca. Per funzionare, il sistema deve quindi incanalare aria fresca e aria viziata in condotti separati e l'artista adotta infatti due tubi, muniti ciascuno di una valvola che ne regola l'apertura e la chiusura. Le due valvole vengono azionate dalla respirazione ed hanno funzionamento alternato: quando una si apre, l'altra si chiude. In tal modo, con l'inspirazione l'aria fresca può affluire dal primo tubo, mentre con l'espirazione l'aria viziata viene immessa nel secondo e fatta defluire verso l'esterno.

Leonardo è inoltre attento alla struttura dei tubi, che realizza utilizzando più canne collegate fra loro mediante giunti speciali. Allo studio di tali giunti egli dedica particolare attenzione, munendoli di molle interne di acciaio temperato e rivestendoli di una doppia guaina in cuoio, in modo da renderli resistenti alla pressione dell'acqua che potrebbe altrimenti schiacciarli, interrompendo l'afflusso di ossigeno.

Egli conosceva in maniera molto approfondita il funzionamento del corpo umano e si accorse quindi dell'impossibilità dei muscoli polmonari di espandersi in maniera sufficiente a permettere l'assorbimento del giusto quantitativo di aria, al fine di garantire la respirazione sott'acqua. Ecco perché prevede la presenza del mantice collegato al tubo di inspirazione.

Leonardo sapeva anche che l'idea di portarsi sott'acqua una borsa riempita di aria e respirare direttamente sott'acqua, avrebbe portato ad uno stordimento della respirazione dovuto alla presenza dell'anidride carbonica. Egli, infatti, aveva una visione ben precisa della circolazione sanguigna ed era a conoscenza di come in acqua, lo sforzo tenda ad aumentare notevolmente il ritmo metabolico e possa contribuire all'aumento della produzione di CO<sub>2</sub>. L'otre serviva proprio per scaricare l'anidride carbonica prodotta durante la respirazione.

È interessante sottolineare come, dagli scritti presenti nel Codice Atlantico, si evince la sua volontà di tacere circa la realizzazione della veste da palombaro che avrebbe consentito un'immersione completa e per lungo tempo, senza bisogno di collegamenti con la superficie e si occupi solo di altri accorgimenti subacquei considerati inoffensivi, in quanto visibili sul mare. Aveva infatti timore che l'uomo facesse dell'invenzione un pessimo uso.

Quindi, nonostante si ipotizzi che lo scafandro di Leonardo sia stato progettato per essere applicato in ambito bellico e quindi permettere il sabotaggio di imbarcazioni nemiche, l'assenza di cenni a strumenti offensivi o difensivi e l'assenza di armi nei suoi disegni, fa pensare alla volontà di applicare tale invenzione piuttosto all'ambito civile. Infatti, comprendeva che la manutenzione delle basi delle dighe, dei porti e delle navi potesse essere gestita attraverso la creazione di una "particolare tuta" che potesse essere vestita da operai manutentori in grado di operare a diverse profondità, grazie alla presenza di pesi in sabbia allacciati alla tuta.

### 3.2 ANALISI DELLE PROBLEMATICHE DELLO SCAFANDRO NON CONSIDERATE DA LEONARDO DA VINCI

Dalla trattazione appena compiuta si comprende la genialità del progetto di Leonardo. Tuttavia, si evidenziano una serie di problematiche che al tempo non erano state considerate.

Innanzitutto, ci si può soffermare sul progetto del mantice necessario per comprimere l'aria e spingerla all'interno del tubo di inspirazione, operazione che non poteva essere compiuta dai polmoni umani.

In particolare, per la legge Boyle, a temperatura costante la pressione e il volume sono inversamente proporzionali tra loro. Ciò significa che, se ci si immerge in apnea a 10 metri di profondità, la pressione assoluta è esattamente il doppio di quella in superficie, cioè è pari a 2 atmosfere e quindi il volume d'aria contenuto nei polmoni si riduce della metà. Di conseguenza, dovendo riempire i polmoni come in superficie, per ogni atto respiratorio si ha bisogno di più aria.

Quindi, moltiplicando la quantità di litri d'aria che si riesce a ventilare in superficie in ogni atto respiratorio, per la profondità espressa in atmosfere assolute alla quale si vuole arrivare, si trova il quantitativo di aria consumato per ogni ventilazione a quella certa profondità. Considerando che un subacqueo scambia per

ogni atto respiratorio 2 litri d'aria in superficie, a 10 metri verranno consumati 4 litri di aria, a 20 metri 6 litri d'aria e così via.

Inoltre, considerando che un subacqueo medio ventila circa 20 litri di aria al minuto in superficie, a 10 metri consuma 40 litri di aria al minuto, a 20 metri 60 litri di aria al minuto.

Di fatto, considerando un mantice di circa 70 centimetri di lunghezza, 30 centimetri di ampiezza e 20 centimetri di spessore, questo sarebbe stato in grado di fornire 40 litri di aria al minuto, necessari per garantire la respirazione del palombaro a 10 metri di profondità. Tuttavia, la pressione sarebbe stata insufficiente. Per dimostrare ciò basta considerare che le moderne pompe a mano, utilizzate per gonfiare i sup o le canoe, lavorano fino alla pressione di 1,5 bar. Questo valore non sarebbe mai stato raggiungibile da un semplice mantice.

Inoltre, durante l'immersione, bisogna tener conto delle variazioni di temperatura in acqua, in quanto la temperatura di quest'ultima varia da 0° a 26°. Essendo l'acqua fredda più densa, essa affonda sotto quella calda. Ciò crea stratificazioni differenti all'aumentare della profondità. I sottili strati nei quali la temperatura cambia si chiamano termoclini. Questi sono presenti in tutte le masse d'acqua e in alcune sono più avvertibili che in altre; ecco perché si necessita di un'adeguata protezione termica. Infatti, la perdita di calore può essere 25/30 volte maggiore di quella in aria, per contatto con l'acqua (conduzione) e per il movimento dell'acqua lungo la pelle (convezione). La muta teorizzata da Leonardo non garantiva la giusta protezione termica e quindi rendeva difficoltosa la permanenza in acqua dell'uomo per tempi lunghi, nonostante fosse impermeabile in quanto realizzata con pelle di cinghiale sulla quale veniva strofinata colla di pesce.

Altro aspetto non considerato da Leonardo è il pericolo di embolia gassosa arteriosa. Quest'ultima è una grave patologia da decompressione a cui può andare incontro un subacqueo, che si manifesta con la presenza di bolle gassose di azoto all'interno della circolazione sanguigna. Di solito, si verifica a seguito di una risalita troppo veloce rispetto alla velocità di sicurezza di 9/10 metri al minuto.

A tal proposito si può ricordare la legge di Henry secondo cui, a temperatura costante, la quantità di gas che si può sciogliere in un liquido è direttamente proporzionale alla pressione parziale del gas stesso. Di fatto, l'aria che si respira è composta da una miscela di gas, due dei quali partecipano agli scambi alveolari, cioè l'ossigeno e l'anidride carbonica; gli altri, fra cui l'azoto (circa il 78% di tutta la miscela), sono definiti inerti perché sono assunti ed espirati senza subire trasformazioni. Durante la fase di immersione, l'azoto che viene inspirato aumenta la sua pressione parziale in modo proporzionale a quell'esterna e si trasferisce dai polmoni al sangue e poi in tutti i tessuti. Tale fase viene detta di saturazione e termina quando, raggiunta una determinata quota per un periodo sufficientemente lungo, la pressione dei gas inerti all'interno del corpo è pari a quella esterna. Durante la risalita avviene il fenomeno inverso: l'azoto in

eccesso torna alla forma gassosa, attraversa il sistema venoso e viene eliminato attraverso la respirazione, in modo asintomatico, a condizione che vengano rispettati i giusti tempi d'ascesa e d'eventuali soste di decompressione.

Si prendono quindi da esempio le cosiddette "tabelle di decompressione". In particolare, si riporta di seguito la tabella di decompressione relativa all'aria:

#### 4 - Tabella di immersione con aria

##### 4.1 - Fronte: "Tabella 1 - Tabella di decompressione con aria per immersioni singole"

1 - TABELLA DI DECOMPRESSIONE															usare la tabella soltanto con		<b>ARIA</b>		F.I.P.S.A.S.	
Velocità di discesa: 23 m/min (max)					Velocità di risalita: 9 m/min															
6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	prof.						
															← tappe					
26	17	12	9	7	6	5	4	4	3	3	2	2		A						
43	27	20	15	12	10	9	7	6	6	5	4	4	3	B						
61	38	27	21	17	14	12	11	9	8	7	6	6	5	C						
82	50	36	28	22	19	16	14	12	11	10	9	8	7	D						
106	62	44	34	28	23	20	17	15	14	12	11	10	8	E						
133	76	53	41	33	28	24	21	18	16	15	12		10	2	F					
165	91	63	48	39	32	28	24	21	19		15	3			G					
205	107	73	56	45	37	32	28	25	20	4		15	5	15	8	H				
256	125	84	63	51	42	36	31		25	5		20	8			I				
330	145	95	71	57	47	39	33	30	3		25	9		20	13	J				
461	167	108	80	63	48	45	10		30	14						K				
illim.	193	121	89	70	7	55	9		40	14	35	15				L				
	223	135	92			60	14									M				
	260	151	100	4	80	14										N				
	307	163	110	8												O				
	371	180	14													Z				

**ATTENZIONE!** L'osservanza delle tabelle non esclude del tutto i rischi dell'immersione! Adottare comportamenti prudentiali

- Immergersi in perfette condizioni psicofisiche, in coppia, con attrezzatura completa ed efficiente, nei limiti di brevetto
- In presenza di fattori di rischio (stress, freddo, fatica, ecc.) usare il tempo di tabella successivo
- Raggiungere la profondità massima ad inizio immersione, non effettuare YO-YO
- Pianificare l'immersione in curva di sicurezza (consigliato raggiungere i 6 m entro la fine del tempo di tabella scelto)
- **Sosta profonda** (imm. in curva): 2,5 min a metà profondità max (stacco dal fondo 2,5 min prima del tempo tabellare)
- **Sosta di sicurezza:** 3 min a 6 m. **Emersione:** 3 m/min da 6 m alla superficie

NOTA: Per tempi e profondità intermedi a quelli in Tabella 1, 2 e 3 scegliere i valori immediatamente superiori

F.A.R.

consumi superiori a 2250 lt → 19

tempo entro la curva di sicurezza → 20

tempo limite in curva di sicurezza → 25

tempo fuori curva di sicurezza → 5

tempo di decompressione a 6 m →

Si definisce "tempo di fondo" il tempo trascorso dal momento in cui il subacqueo abbandona la superficie al momento in cui si stacca dal fondo per iniziare la risalita diretta in superficie. Di conseguenza, ipotizzando che il palombaro di Leonardo si immerga ad una profondità di 10 metri, il tempo limite di non decompressione è pari a 163 minuti. Quindi, il tempo di fondo non potrà essere maggiore di quest'ultimo, poiché si andrebbe a superare la curva di sicurezza. Se ciò non può essere evitato, bisogna determinare il tempo di decompressione richiesto alla tappa a 6 metri, in questo caso 14 minuti. Ne consegue che, all'aumentare della profondità di immersione si riduce di molto il tempo limite di non decompressione: a 40 metri di profondità, il tempo limite di non decompressione è di 10 minuti. In particolare, il gruppo di appartenenza a fine immersione, considerando un tempo di fondo di 44 minuti è "E". Quest'ultima è una lettera utilizzata per indicare la quantità di azoto residuo presente nel corpo del subacqueo a fine immersione.

Si vanno ora ad analizzare altre due tabelle che permettono di completare la trattazione:

#### 4.2 - Retro: "Tabella 2 - Intervallo di superficie", "Tabella 3 - Tempo di azoto residuo"

2 - INTERVALLO DI SUPERFICIE																3 - TEMPO DI AZOTO RESIDUO																	
F.A.R. iniziale																Profondità della immersione successiva																	
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Z	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45				
0:10																**																	
0:52																**	+308	+169															
0:10 0:53																*	+83	-															
0:10 0:53 1:45																**	+261	+152	+100														
0:52 1:44 2:37																*	+110	+11	-														
0:10 0:53 1:45 2:38																**	+224	+136	+99	+79													
0:52 1:44 2:37 3:29																*	+147	+27	-	-													
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30																**	+184	+122	+90	+72	+59												
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21																*	+177	+41	+2	-	-												
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30 4:22																+82	+168	+109	+81	+65	+54												
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13																*	+203	+54	+11	-	-												
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30 4:22 5:14																+331	+146	+97	+73	+58	+49	+42	+37	+33	+30								
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13 6:06																*	+225	+66	+19	+5	-	-	-	-	-	-							
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30 4:22 5:14 6:07																+257	+126	+85	+65	+52	+44	+38	+33	+30	+27	+24							
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13 6:06 6:58																*	+245	+78	+27	+11	+4	+1	-	-	-	-	-						
0:10 0:53 1:40 2:38 3:30 4:22 5:14 6:07 6:59																+208	+108	+74	+57	+46	+39	+33	+29	+26	+24	+22	+20	+19					
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13 6:06 6:58 7:50																*	+263	+89	+35	+17	+9	+6	+4	-	-	-	-	-	-	-	-		
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30 4:22 5:14 6:07 6:59 7:51																+166	+92	+64	+49	+40	+34	+29	+26	+23	+21	+19	+18	+16	+15				
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13 6:06 6:58 7:50 8:42																*	+279	+99	+43	+23	+14	+10	+7	+2	-	-	-	-	-	-	-		
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30 4:22 5:14 6:07 6:59 7:51 8:43																+134	+77	+55	+42	+35	+29	+25	+22	+20	+18	+17	+15	+14	+13				
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13 6:06 6:58 7:50 8:42 9:34																*	+294	+108	+50	+28	+19	+14	+11	+5	+2	-	-	-	-	-	-		
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30 4:22 5:14 6:07 6:59 7:51 8:43 9:35																+106	+63	+45	+35	+29	+25	+22	+19	+17	+16	+14	+13	+12	+11	+10	+9		
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13 6:06 6:58 7:50 8:42 9:34 10:27																*	+308	+118	+57	+34	+23	+17	+14	+8	+4	+1	-	-	-	-	-		
0:10 0:53 1:45 2:38 3:30 4:22 5:14 6:07 6:59 7:51 8:43 9:35 10:28																+83	+51	+37	+29	+24	+20	+18	+16	+14	+13	+12	+11	+10	+9				
0:52 1:44 2:37 3:29 4:21 5:13 6:06 6:58 7:50 8:42 9:34 10:27 11:19																*	+320	+126	+63	+39	+28	+21	+17	+11	+7	+3	+1	-	-	-	-		
0:10 0:56 1:48 2:40 3:32 4:24 5:17 6:09 7:01 7:53 8:45 9:38 10:30 11:22 12:14																+62	+39	+29	+23	+19	+16	+14	+12	+11	+10	+9	+8	+7	+6	+8	+8		
0:55 1:47 2:39 3:31 4:23 5:16 6:08 7:00 7:52 8:44 9:37 10:29 11:21 12:13																*	+332	+134	+69	+44	+32	+25	+21	+14	+10	+6	+3	+2	-	-	-		
0:10 0:56 1:48 2:40 3:32 4:24 5:17 6:09 7:01 7:53 8:45 9:38 10:30 11:22 12:14																+44	+28	+21	+17	+14	+12	+10	+9	+8	+7	+6	+5	+4	+4	+6	+6		
1:16 2:11 3:03 3:55 4:48 5:40 6:32 7:24 8:16 9:09 10:01 10:53 11:45 12:37 13:30																*	+343	+142	+75	+49	+36	+29	+24	+17	+12	+8	+6	+4	+2	-	-		
0:10 1:17 2:12 3:04 3:56 4:49 5:41 6:33 7:25 8:17 9:10 10:02 10:54 11:46 12:38 13:31																+27	+18	+13	+11	+9	+8	+7	+6	+5	+5	+4	+4	+4	+4				
2:20 3:36 4:31 5:23 6:15 7:08 8:00 8:52 9:44 10:36 11:29 12:21 13:13 14:05 14:58 15:50																*	+353	+150	+81	+54	+40	+32	+27	+20	+15	+10	+8	+6	+4	-	-		

- La reimmersione entro 10 min va considerata continuazione dell'immersione precedente  
 - Tra due immersioni successive si consiglia un intervallo di superficie minimo di 2 h  
 - L'immersione ripetitiva deve durare almeno 15 min ed essere meno profonda della precedente  
 - Non eccedere con le immersioni ripetitive per più giorni consecutivi ("settimane blu"). Interrompere la sequenza con adeguati periodi di riposo

\*\* l'immersione successiva non modifica il F.A.R.  
 \* il tempo residuo in curva di sicurezza è illimitato  
 + tempo da aggiungere alla permanenza effettiva  
 - tempo residuo in curva di sicurezza, (-) immersione fuori curva  
 intervallo oltre il quale l'immersione successiva non è ripetitiva

La "tabella 2 - intervallo di superficie" permette di determinare la riduzione del gruppo di appartenenza al variare dell'intervallo di superficie. Quest'ultimo rappresenta il tempo che il subacqueo trascorre in superficie tra due immersioni consecutive; inizia appena il subacqueo emerge dalla prima immersione e termina appena inizia la discesa della seconda immersione. Per poter utilizzare tale tabella, l'intervallo di superficie tra due immersioni deve essere almeno di 10 minuti. Se l'intervallo di superficie è inferiore a 10 minuti, l'immersione successiva è considerata prosecuzione dell'immersione precedente. In senso lato, è necessario considerare un intervallo di superficie minimo di almeno 2 ore tra due immersioni successive, in quanto la ricerca scientifica ha evidenziato che il picco di microbolle al termine dell'immersione si manifesta entro le 2 ore dopo l'emersione, dopodiché comincia a diminuire in modo significativo, soprattutto dopo le 4 ore. Rispettare un intervallo di superficie minimo di 2 ore garantisce quindi un minor stress decompressivo nelle immersioni ripetitive.

Di conseguenza, ipotizzando di effettuare una seconda immersione 2 ore dopo, con un gruppo di appartenenza finale pari a E, il gruppo di appartenenza alla fine dell'intervallo di superficie è C.

Si procede ora con l'analizzare la "tabella 3 - tempo di azoto residuo". Questa permette di determinare il tempo di azoto residuo, cioè il tempo da aggiungere al tempo di fondo effettivo dell'immersione ripetitiva, per tener conto dell'azoto residuo in eccesso disciolto nell'organismo al termine dell'intervallo di superficie.

Ipotizzando di effettuare un'immersione ripetitiva di 20 minuti a 10 metri, con gruppo di appartenenza alla fine dell'intervallo di superficie pari a C, il tempo di azoto residuo è di 29 minuti. Il tempo residuo in curva di



sicurezza a 12 metri è di 134 minuti; quindi, l'immersione è in curva di sicurezza. Ritornando alla "tabella 1 – tabella di decompressione" e considerando un'immersione di 10 metri con un tempo di fondo di 29 + 20 = 49 minuti, il gruppo di appartenenza al termine dell'immersione ripetitiva è F.

Ciò evidenzia come, effettuando un'immersione ripetitiva si partirà da un certo valore di azoto dovuto alla precedente immersione. Tutte queste particolarità non erano state evidenziate da Leonardo, per cui la realizzazione del suo progetto avrebbe presentato numerosi limiti, soprattutto per, come si pensa, la manutenzione di dighe, porti e navi in cui si devono raggiungere anche profondità elevate.

### 3.3 CONFRONTO DELLO SCAFANDRO CON L'ATTREZZATURA IMPIEGATA NELLA SUBACQUEA MODERNA

Si va ora ad analizzare come si è evoluto lo scafandro nel tempo. In particolare, con Leonardo da Vinci si è parlato di palombaro, cioè di un subacqueo che riceve aria dalla superficie tramite tubi di gomma e che risulta essere vincolato al fondo mediante un pesante equipaggiamento. Al contrario, qui si parlerà di sommozzatore. Di fatto, si definisce sommozzatore una qualsiasi persona che si immerga sott'acqua con l'ausilio di un sistema di erogazione autonomo, A.R.A o A.R.O, in grado di fornire la miscela respiratoria, costituita da aria, ossigeno, elio-ossigeno, azoto-elio-ossigeno, alla pressione dell'ambiente in cui opera, permettendo di restare sott'acqua per periodi variabili e relativi alla quantità di gas che il sistema può trasportare ed alla profondità in cui questa viene respirata. Un sommozzatore può essere dunque svincolato da qualunque piattaforma fissa e porta con sé il gas necessario compresso in bombole assicurate alle spalle.

Come accennato, esistono due tipologie di equipaggiamenti per la subacquea:

1. Il sistema a circuito aperto detto A.R.A. Si tratta di un autorespiratore ad aria originariamente sviluppato da Jacques Cousteau con il nome di Aqua-lung. Esso è solitamente composto da:
  - Una bombola caricata con aria compressa;
  - Un erogatore che consente l'immissione di aria;
  - Un manometro per controllare l'aria residua nella bombola.

In questo caso, dunque, l'aria proviene dalle bombole, viene inspirata tramite un erogatore e attraverso quest'ultimo viene espulsa all'esterno. L'aria viene fornita alla stessa pressione dell'ambiente circostante.

2. Il sistema a circuito chiuso detto A.R.O. Si tratta di un autorespiratore ad ossigeno in grado di riutilizzare il gas respirato dal subacqueo. Si costituisce di:
  - Un sacco polmone in materiale elastico per contenere l'aria espulsa;
  - Un filtro interno per l'alloggiamento della calce sodata. Quest'ultima è una miscela di componenti chimici utilizzata per rimuovere l'anidride carbonica dall'aria respirata;

- Una o più bombole di ossigeno di piccole dimensioni, 2/3 litri, raccordinate al sacco per mezzo di una valvola by-pass.

In questo caso il gas non viene espulso, ma trattato tramite filtri per eliminare l'anidride carbonica e reintrodotta nel circuito nel sacco polmone.

Oltre agli autorespiratori, che permettono di risolvere il problema dell'uomo dell'essere visibile in superficie, esistono altre attrezzature fondamentali per l'immersione, tra cui la muta subacquea. Quest'ultima è un indumento in grado di mantenere il corpo caldo durante l'immersione e può essere di tre tipologie differenti:

-muta umida, la quale permette all'acqua di entrare, seppur in minime quantità, e quindi crea un velo di acqua tra il corpo e la muta. Quando questo strato sottile si riscalda produce una sorta di effetto isolante, ottimo per ambienti con acqua calda, ma insufficiente negli altri casi;

-muta semistagna, che risulta essere molto aderente al corpo e di spessore maggiore della precedente. Tende a far inumidire solo braccia e gambe isolando il busto. È adatta per ambienti con acqua fredda;

-muta stagna, in grado di isolare completamente il corpo dall'acqua, lasciando che si bagnino solo le mani e la testa. È adatta per ambienti con acque molto fredde o per permanenze prolungate in acqua.

Fondamentale è poi il cosiddetto GAV (giubbotto ad assetto variabile). Si tratta di uno zainetto utilizzato per le immersioni subacquee che ha la finalità di aumentare la capacità di controllo del livello di profondità da mantenere sott'acqua, garantendo un assetto stabile e una profondità costante. Inoltre, viene utilizzato per immergersi ed emergere in maniera controllata. Questo è possibile in quanto all'interno viene spinta l'aria delle bombole che permette di bilanciare il peso di corpo, zavorra e attrezzatura. La quantità necessaria di aria è regolata tramite un meccanismo di gonfiaggio molto semplice: una valvola su una frusta di bassa pressione comandata da due pulsanti per gonfiaggio e sgonfiaggio (VIS). Per accelerare quest'ultima funzione sono previste delle apposite valvole di scarico rapido che, azionate da semplici cordoni da tirare, liberano l'aria velocemente. È anche presente una valvola di sicurezza per evitare un eccessivo gonfiaggio: quando la pressione supera i 2 bar una molla interna si rilascia consentendo all'aria di fuoriuscire.

Come sottolineato in precedenza, durante un'immersione è necessario adottare i giusti accorgimenti al fine di evitare l'embolia gassosa arteriosa o malattia da decompressione. Di conseguenza, diventa fondamentale l'utilizzo delle tabelle di decompressione. Tuttavia, queste possono essere sostituite da un computer subacqueo, altro strumento indispensabile durante un'immersione. Ciò consente al subacqueo di comprendere il proprio profilo di immersione, se siano necessarie o meno soste di decompressione e la durata e la profondità di queste.



Alcuni studi recenti stanno verificando che la pratica di soste profonde a determinate profondità, a seconda di quella massima raggiunta, possono aiutare nella desaturazione dei gas e possono quindi ridurre il rischio di patologia da decompressione. Secondo tali studi bisogna effettuare una sosta della durata di due minuti ad una profondità dove vi sia la metà della massima pressione raggiunta; ad esempio, per un'immersione a 40 metri (pari a 5 atmosfere) la sosta profonda andrebbe effettuata a 15 metri (pari a 2,5 atmosfere). Dopodiché si può riprendere la risalita, avendo cura di rallentare man mano che ci si avvicina alla superficie.

La sosta profonda può essere calcolata nel seguente modo:

$$\text{Profondità sosta profonda} = \frac{\text{profondità max} - 10}{2}$$

In particolare, è emerso che la combinazione di una velocità di risalita massima pari a 9 metri/minuto, una sosta profonda effettuata alla profondità equivalente alla metà della massima pressione raggiunta e una sosta prudenziale a 5 metri per 3-5 minuti aiuta in modo sensibile a prevenire eventuali patologie da decompressione.

Un'altra problematica da considerare è che l'occhio umano si è evoluto per vedere attraverso l'aria e non può mettere a fuoco in acqua, a causa delle differenze fisiche dei due mezzi. Di conseguenza, il problema della visione subacquea viene risolto tramite l'utilizzo di una maschera subacquea, simile all'elmo di immersione teorizzato da Leonardo. In particolare, tali dispositivi frappongono uno strato di aria tra gli occhi e l'ambiente permettendo di vedere. Tuttavia, a causa della rifrazione gli oggetti appaiono il 25% più vicini e il 33% più grandi.

Di conseguenza, si può affermare anche in questo caso che Leonardo ha fornito una soluzione geniale al tempo per permettere all'uomo di respirare sott'acqua, ma con delle criticità che non ne avrebbero permesso l'utilizzo. Tali criticità sono state risolte in epoca moderna e hanno potuto completare e rendere utilizzabile il progetto leonardesco.

## 4 ANALISI CRITICA DEL PONTE GIREVOLE PROGETTATO DA LEONARDO E CONFRONTO CON I MODERNI PONTI GIREVOLI

### 4.1 DESCRIZIONE DEL PROGETTO DI LEONARDO

Nella sua vita, Leonardo si è dedicato alla progettazione di ponti da utilizzare soprattutto a scopo bellico. In particolare, durante la sua permanenza a Milano compie numerosi disegni al fine di realizzare ponti che abbiano come caratteristiche fondamentali la mobilità, la leggerezza dei materiali costitutivi, la facilità e velocità di montaggio e smontaggio.

Di fatto, la caratteristica principale del progetto del ponte girevole, che si trova nel manoscritto B del Codice Atlantico, è la velocità di chiusura e di apertura. Queste sono qualità fondamentali per fermare l'avanzata del nemico.

Tale ponte, a profilo parabolico, si costituisce di una sola campata centinata, la quale è sostenuta da una serie di travi a reticolo. Esso è fissato ad una delle sponde su un perno verticale, che ne consente la rotazione. In particolare, l'uso del termine "polo" riportato sul manoscritto per indicare il pilone centrale, fa pensare agli studi sulla bilancia, nei quali, con questo termine, si indica il fulcro attorno al quale oscilla il giogo.

Di fatto, mediante un sistema di corde e argani e per mezzo di una serie di rulli per favorire lo scorrimento, il ponte viene fatto ruotare di 90° permettendo il passaggio di imbarcazioni o l'isolamento di uno dei versanti del fiume. Per riportare il ponte alla sua posizione iniziale e permettere l'attraversamento pedonale, si aziona l'argano opposto, quello più lontano dal pilone. Facendo avvolgere la fune, questa tirerà l'estremità del ponte a cui è collegata. In questo modo, l'estremità del ponte si ricongiunge alla rampa secondaria di accesso, fissa sulla sponda opposta a quella su cui è agganciato il pilone di rotazione. Inoltre, per facilitare la manovra di apertura, Leonardo prevede la costruzione di un cassone di pietra, che funziona da contrappeso quando il ponte si trova ad essere sospeso prima di poggiare sull'altra sponda.

Si comprende quindi come tale ponte girevole sia costituito da:

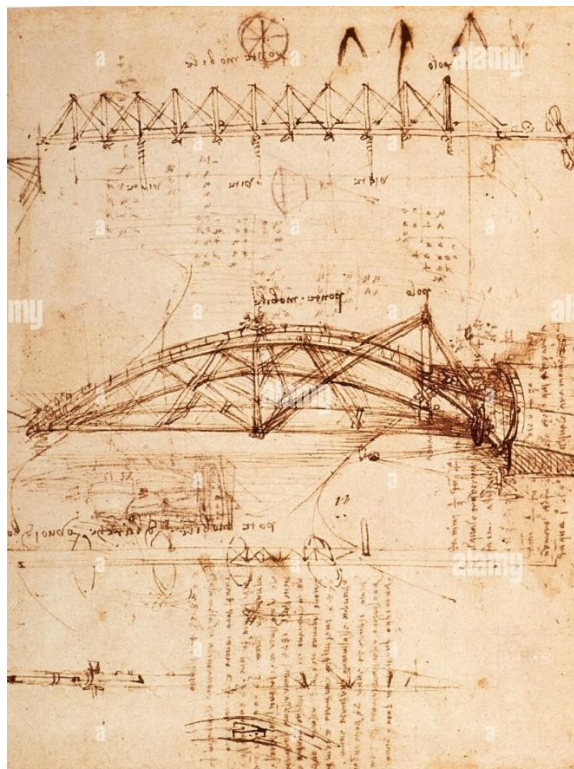
- Un argano di apertura e uno di chiusura del ponte;
- Un sistema di carrucole fisse sulla sponda che vincola lo scorrimento della fune e ne determina la traiettoria;
- Un contrappeso grazie al quale viene garantito l'equilibrio della struttura durante l'intera durata delle manovre;
- Ruote o rulli metallici presenti nel lato del ponte che resta permanentemente appoggiato sul terreno, in modo da consentirne uno scorrimento agevole;

- Una rampa secondaria di accesso fissa sulla sponda opposta a quella su cui è agganciato il pilone di rotazione, che permette di ricongiungere l'estremità del ponte.

In particolare, il disegno di un cavaliere presente sul ponte fornisce un'importante indicazione dimensionale. Infatti, tale ponte doveva avere una lunghezza di 35/40 metri, gigantesco per l'epoca.

Inoltre, considerando che sarebbe stato realizzato in legno, avrebbe avuto un peso di circa 20 tonnellate. Infatti, considerando che le due travi alla base avevano una lunghezza di 40 m e larghezza e spessore di circa 30 cm, avrebbero avuto un peso ognuna di circa 3600 kg; stessa cosa per le travi superiori. Sono poi presenti altre travi, nella struttura, di dimensione inferiore, il cui peso si sarebbe aggirato intorno a 150 kg ognuna, quindi in totale 3450 kg. Supponendo che la pavimentazione avesse un peso di circa 5000 kg, si arriva alle 20 tonnellate ipotizzate.

Tuttavia, tale peso gravava tutto sul pilone centrale, che non sarebbe mai stato in grado di sostenere una pressione di quel tipo. Nonostante non siano presenti disegni di cuscinetti in tale progetto, Leonardo sicuramente li conosceva, grazie agli studi effettuati sull'attrito. Di conseguenza, la presenza di un cuscinetto reggispinta avrebbe ridotto al minimo gli attriti e consentito la rotazione del ponte attorno al pilone, che a quel punto fungeva da centraggio, nonché da punto di equilibrio.



#### 4.2 CONFRONTO DEL PONTE GIREVOLE DI LEONARDO CON IL PONTE COLBERT

Il ponte Colbert è un ponte girevole di fine Ottocento situato a Dieppe, in Francia. Esso ha una lunghezza di 70 m e un peso di circa 800 tonnellate. Di fatto, come il ponte progettato da Leonardo, presenta una struttura a traliccio metallico. Tuttavia, non è realizzato in legno ma in travi di acciaio e laminati. Non si avrà più l'utilizzo di corde per effettuare la rotazione, ma due catene lunghe 70 m, che fanno girare una corona di oltre 10 m di diametro. Anche nel ponte Colbert si ha la presenza di un contrappeso, di circa 200 tonnellate di peso e larghezza pari a 5 m, riempito con ghisa e lastre di ferro cementate al fine di mantenere salda la struttura. Inoltre, in questo caso si avrà anche un opportuno sistema idraulico che permette di controllare la posizione del ponte.

In particolare, dopo aver chiuso il ponte al traffico automobilistico e pedonale, la procedura di apertura è la seguente:

- Si solleva leggermente il ponte e tramite un attuatore idraulico si spostano i cuscinetti di supporto da sotto il perno;
- Si procede poi con abbassare il ponte fino a quando le ruote, situate al di sotto del telaio, non poggiano su di una corona circolare;
- Si utilizzano delle catene e un sistema di pulegge per convertire il movimento lineare dei due attuatori in un movimento rotazionale del ponte. Quest'ultimo ruota di 90° consentendo il passaggio di imbarcazioni.

Di fatto, il pilone deve permettere un movimento verticale del ponte limitato a qualche grado e una rotazione di circa 90°. Esso è quindi un elemento fondamentale: impedisce strisciamenti del ponte durante le manovre di apertura e chiusura.

A differenza dei progetti della vite aerea e dello scafandro da palombaro, il ponte girevole di Leonardo si presenta estremamente attuale, nonostante sia stato progettato circa 500 anni fa.

## 5 CONCLUSIONI

Dalla precedente trattazione emerge l'insuperabile talento di Leonardo Da Vinci, che nonostante sia prevalentemente conosciuto come pittore, si è sempre considerato, piuttosto, uomo di scienza e ingegnere. Molto spesso viene definito genio nel senso divino del termine, come sottolineato da Giorgio Vasari ne "Le vite de' più eccellenti pittori, scultori e architettori" del 1550, primo esempio di letteratura artistica:

"Grandissimi doni si veggono piovere dagli influssi celesti ne' corpi umani molte volte naturalmente, e sopra naturali, talvolta, strabocchevolmente accozzarsi in un corpo solo bellezza, grazia e virtù, in una maniera, che dovunque si volge quel tale, ciascuna sua azione è tanto divina, che lasciandosi dietro tutti gl'altri uomini, manifestamente si fa conoscere per cosa (come ella è) largita da Dio e non acquisita per arte umana".

In realtà, è più veritiero considerare Leonardo come un genio umano, forgiato dalla sua volontà e dalla sua ambizione, che ha saputo anticipare di secoli molti inventori, nonostante i limiti dettati dall'epoca in cui ha vissuto.

In conclusione, si possono riportare alcune parole scritte da Leonardo nei suoi taccuini, che incarnano l'essenza di questo maestro:

"Ma prima farò alcuna esperienza avanti ch'io più oltre proceda" disse in un'occasione "perché mia intenzione è allegare prima la speranza, poi colla ragione dimostrare". In altre parole, egli cercava di guardare ai fatti e capire in base a quelli i meccanismi e le forze di natura che facevano accadere le cose: "Che la natura cominci dalla ragione e termini nella esperienza, a noi bisogna seguire il contrario (come di sopra dissi), dalla esperienza e con quella investigare la ragione".

## 6 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- “Leonardo Da Vinci” di Walter Isaacson
- “Le macchine di Leonardo Da Vinci” di Domenico Laurenza
- Aerodinamica Elicottero ([www.gizio.it](http://www.gizio.it))-Aerodinamica della pala
- il palombaro di leonardo da vinci ([leonardodavinci-italy.it](http://leonardodavinci-italy.it))
- Il palombaro di Leonardo ([tiscali.it](http://tiscali.it))
- Tab\_FIPSAS-2017\_170718
- Tappa di decompressione - Wikipedia
- Autorespiratore ad aria - Wikipedia
- Autorespiratore a ossigeno - Wikipedia
- 7ME-2016-France-ColbertBridge-Report.pdf ([europanostr.org](http://europanostr.org))