

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria meccanica, aerospaziale, dell'autoveicolo
e della produzione

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Triennale

Analisi Idrodinamica del Nuoto delle Meduse



Politecnico di Torino

Relatore

Prof.ssa Stefania Scarsoglio

Candidato

Federico Manzini

Ottobre 2021

Indice

<u>Introduzione</u>	1
1. <u>Biologia delle meduse</u>	4
2. <u>Locomozione</u>	7
2.1. <u>Struttura della campana</u>	7
2.2. <u>Spinta di aspirazione (Suction Thrust)</u>	10
2.3. <u>Recupero passivo dell'energia (PER – Passive Energy Recapture)</u>	14
2.4. <u>Effetto parete virtuale (Virtual Wall Effect)</u>	26
2.5. <u>Dinamica di rotazione (Turning Dynamics)</u>	34
3. <u>Applicazioni</u>	41
4. <u>Conclusioni</u>	46
<u>Appendice</u>	48
<u>Bibliografia</u>	50

Introduzione

Le meduse rappresentano una delle specie del regno animale più semplice da un punto di vista evolutivo, in quanto non solo sono prive di sistemi e apparati, ma anche i tessuti specializzati veri e propri sono decisamente ridotti. L'attenzione rivolta allo studio del nuoto di questi animali è legata a diversi motivi: primo, il loro corpo ha la caratteristica di essere traslucido, peculiarità che permette lo studio del moto fluido anche attraverso la struttura corporea; secondo, questi animali sono largamente diffusi in tutto il pianeta e anche l'allevamento è piuttosto semplice, perciò vi è un'abbondanza di esemplari reperibili per le analisi; infine, presentano una simmetria radiale che permette di svolgere trattazioni su un piano bidimensionale ed estenderle facilmente al tridimensionale, semplificando notevolmente i calcoli. [1]

Le meduse, come quasi tutti gli altri animali, possiedono un tessuto muscolare necessario per potersi spostare. A differenza delle altre specie, dove questo tessuto rappresenta una parte rilevante del peso corporeo, le meduse possiedono un tessuto muscolare di un solo strato cellulare di spessore. Di conseguenza la forza muscolare che riescono a generare è piuttosto limitata, neanche sufficiente a generare la spinta necessaria per spostarsi. Per poter sopperire a tale limitazione strutturale, le meduse si sono evolute sviluppando una cinematica di nuoto che permetta loro di sfruttare il moto del fluido circostante, l'acqua, a loro favore. [1]

Queste limitazioni e adattamenti evolutivi hanno fatto sì che la propulsione delle meduse sia la più efficiente tra quelle di tutto il regno animale in termini di costo del trasporto relativo alla massa corporea (Fig. 1). [1]

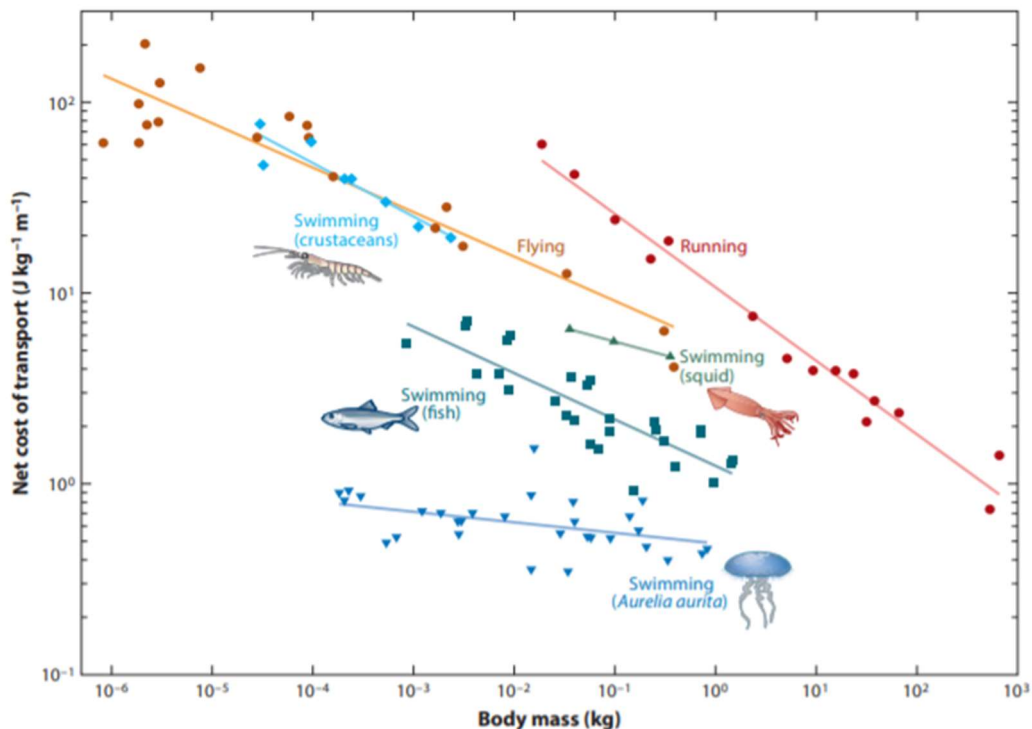


Figura 1 | Confronto del costo netto di trasporto in rapporto alla massa corporea di diversi animali marini. Sono riportate anche le curve sia per gli animali volanti (flying) che terrestri (running). [1]

Tutti questi aspetti, quali elevata efficienza, abbondante disponibilità, simmetria radiale del corpo e semplicità strutturale rivestono un ruolo importante non solo nella scelta di svolgere studi mirati alla comprensione del meccanismo di nuoto delle meduse ma anche nella ricerca ingegneristica volta alla realizzazione di tecnologie biomimetiche che non richiedano velocità elevate. Bisogna tenere anche conto che le meduse pulsano durante il nuoto, contraendo e rilassando ripetutamente la struttura, e che quindi la loro flessibilità è un fattore importante per raggiungere un'elevata efficienza. [2]

Grazie a delle tecniche nuove non invasive, questi studi sono stati effettuati su meduse che nuotavano liberamente e si fondano su misure e osservazioni empiriche, oltre che su modellazioni di fluidodinamica computazionale per svolgere i calcoli. Il fatto di studiare le meduse direttamente mentre nuotano ha giocato un ruolo fondamentale nell'ottenere misurazioni e dati, oltre che immagini, molto precise ed affidabili. [1]

Con questa analisi si vogliono descrivere da un punto di vista cinematico e fluidodinamico tre aspetti quali spinta di aspirazione, recupero passivo dell'energia ed effetto parete virtuale, che assieme formano quella che viene detta cinematica a campana, che consente alle meduse di muoversi. Si vuole analizzare, inoltre, la dinamica di rotazione di questi animali, perché anche la virata riveste un ruolo importante nel nuoto. [1]

La spinta di aspirazione, chiamata così perché la forza propulsiva è generata principalmente dalle zone a bassa pressione che si formano a monte della medusa, insieme al recupero passivo dell'energia, un meccanismo che sfrutta i vortici che si formano durante la fase di riempimento dell'ombrello per generare spinta, e l'effetto parete virtuale, secondo il quale la medusa riceve un'ulteriore spinta grazie alla formazione una sorta di muro immaginario dove i vortici prodotti dal movimento della medusa vengono a interagire, sono i responsabili dell'eccezionale efficienza propulsiva di questi esemplari.

[1]

I principi di nuoto individuati nelle meduse, perciò, incoraggiano una progettazione ingegneristica che miri a creare veicoli estremamente efficienti dal punto di vista energetico, anche se con prestazioni non eccezionali, tenendo conto di vincoli ma anche opportunità e obiettivi di progetto che sono del tutto nuovi e diversi. [3]

Infine, da studi effettuati su altri animali si è visto che alcune delle caratteristiche della locomozione delle meduse sono comuni anche ad altre specie che presentano una struttura corporea ed anatomica più complessa, suggerendo che sia possibile svolgere ricerche di biomimetica anche su altre specie, differenziando quindi le potenziali realizzazioni di sistemi propulsivi acquatici su più forme e grandezze. [1]

L'elaborato parte con un breve richiamo biologico sulle meduse, prosegue poi la parte centrale di questo studio, cioè l'analisi della propulsione nelle meduse con esperimenti in laboratorio e calcoli con software di calcolo sulla spinta, l'energia spesa e la fluidodinamica del moto, infine vengono descritte brevemente alcune applicazioni ingegneristiche che hanno alla base appunto lo studio delle meduse.

1. Biologia delle meduse

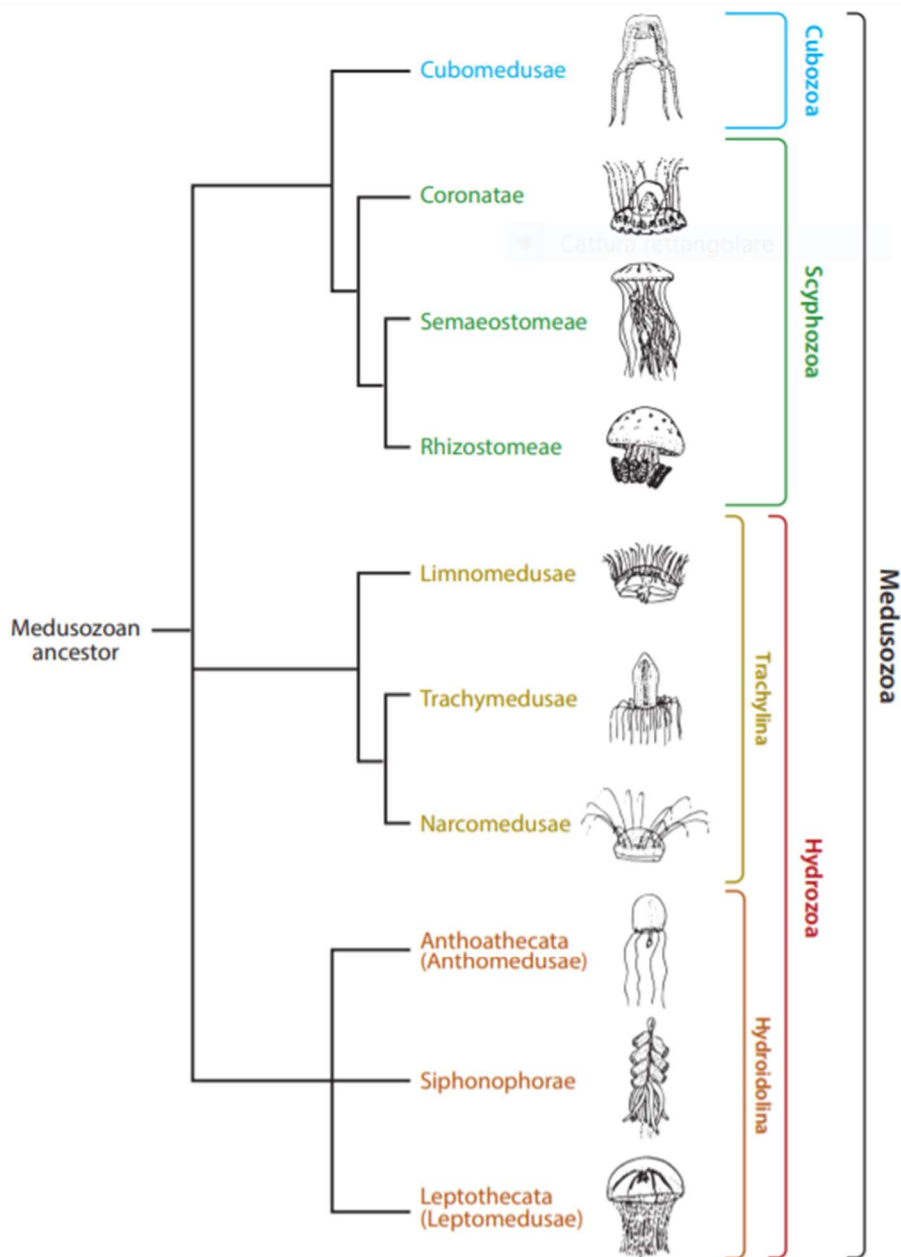


Figura 2 | Classificazione scientifica delle meduse. [1]

Le meduse fanno parte del phylum degli Cnidari, e sono suddivise in tre classi: Scifozoi, Idrozoi e Cubozoi (Fig. 2). Gli cnidari presentano due forme adulte: meduse e polipi. Le meduse sono tipicamente solitarie e libere di muoversi mentre i polipi possono anche organizzarsi in colonie e si legano al substrato. Le meduse sono caratterizzate dalla campana a forma di ombrello: una forma cava e trasparente costituita da materia gelatinosa chiamata mesoglea, la quale è composta di tessuto connettivo ed è la parte idrostatica all'animale. [4] [5]

La mesoglea è costituita quasi interamente da acqua, ma contiene anche collagene e altre proteine fibrose. La sua funzione principale è favorire il ritorno elastico alla forma rilassata dopo la contrazione dei muscoli. Il tessuto esterno che ricopre la mesoglea è detto epidermide e il tessuto che la riveste internamente è chiamato gastroderma. La faccia esterna convessa della campana è detta esombrello, mentre quella interna concava è detta subombrello. I fasci muscolari necessari per la locomozione, ma anche per l'alimentazione e la digestione si trovano alla base di questi due tessuti, in prossimità del margine della campana; anche i fasci nervosi si trovano qui. Questi ultimi vanno a formare una rete nervosa in tutta l'epidermide con anche delle strutture ad anello formate da nervi sempre in prossimità del bordo. [\[4\]](#) [\[5\]](#)

Le meduse presentano un tessuto muscolare che è composto da un solo strato di cellule, perciò, sono in grado di sviluppare una forza propulsiva limitata. [\[2\]](#)

L'estremità della campana è divisa in lamelle, che le consentono di flettersi, e possiede diversi tentacoli generalmente. Al centro della parte inferiore dell'ombrello pende una struttura a stelo, che funge sia da bocca che da ano, definita manubrio. [\[4\]](#) [\[5\]](#)

La maggior parte delle meduse non ha né un sistema nervoso centrale né sistemi specializzati, come per esempio quello per la regolazione osmotica, la respirazione o la circolazione, né tantomeno organi specializzati. Per via dell'assenza di un sistema respiratorio l'ossigeno di cui necessita diffonde attraverso l'epidermide. Le cellule portatrici del pungiglione, chiamate nematocisti, si trovano sui tentacoli, ma anche intorno alla bocca e allo stomaco. [\[4\]](#) [\[5\]](#)

Le meduse hanno un controllo limitato sul loro movimento, per spostarsi fanno affidamento su un moto pulsato e ciclico che alterna periodi di contrazione a periodi di rilassamento della campana; esse possono muoversi in modo attivo pulsando oppure farsi trascinare dalla corrente d'acqua passivamente. Nei vuoti tra le lamelle esterne vi sono organi di senso noti come ropali in grado di rilevare gli stimoli esterni (luce, vibrazioni, ecc.), la loro struttura è anatomica è piuttosto semplice ma sono molto funzionali. Grazie a questi organi le meduse hanno il controllo del nuoto in termini di velocità e direzione. Inoltre, i ropali, presentano delle strutture che fungono da occhi. Questi occhi servono per rilevare la luce e far orientare la medusa. [\[4\]](#) [\[5\]](#)

Leggermente diversi nella struttura sono invece i Cubozoi (o "meduse scatola"): essi hanno una campana quadrata, con uno stelo che pende da ciascuno dei quattro angoli e ad ognuno di essi sono attaccati diversi tentacoli. L'estremità della campana si ripiega verso l'interno a costituire il cosiddetto velario, che svolge due funzioni: limitare l'apertura della campana e creare un getto d'acqua durante il movimento, consentendo ai Cubozoi di nuotare più velocemente delle altre meduse. Le meduse più tossiche scoperte sul nostro pianeta fanno parte di questa classe. [\[6\]](#)

I Cubozoi hanno sviluppato una vista più evoluta e complessa rispetto agli Scifozoi e agli Idrozoi, infatti, questi esemplari presentano tipicamente un ropalio per ogni vertice della campana e per ognuno di essi possono avere fino a sei occhi, per un massimo di 24 occhi per ciascun esemplare. Alcuni di essi sono sensibili al colore per la presenza di pigmenti, che gli permettono di avere una visione a 360 gradi del suo ambiente, caratteristica comune a pochi animali. [6]

Gli Idrozoi hanno caratteristiche del tutto affini a Scifozoi e Cubozoi, ma molti di essi sono polipi coloniali e potrebbero non avere uno stadio di medusa vero e proprio. Presentano quattro tentacoli sul bordo della campana nella maggior parte degli esemplari e, come nei Cubozoi, l'estremità dell'ombrello si ripiega all'interno per formare il velo. [4]

2. Locomozione

La comprensione di come nuotano questi animali è essenziale per dare valore ai recenti sforzi per progettare robot biomimetici e bio-ispirati che hanno anche posto l'accento nuovamente sulla comprensione dei principi fisici alla base del loro nuoto. In passato si credeva che il movimento fosse determinato dalla generazione di zone ad alta pressione: il gradiente di pressione tra monte e valle risultante dal movimento della medusa, con la generazione di pressioni più alte a valle, agiva spingendo il fluido a valle e, di conseguenza, l'animale in avanti. Effettivamente, le osservazioni sulla dinamica del nuoto, avvaloravano questa ipotesi perché mostravano accelerazioni laterali del corpo anche elevate durante la locomozione, in grado di generare regioni locali di alta pressione. Tuttavia, questa osservazione venne poi smentita da studi più approfonditi, svolti con analisi e metodi nuovi, che determinarono la presenza di una zona a bassa pressione creata nel fluido circostante che dominava il meccanismo di nuoto. [3]

La bassa pressione sopracitata è responsabile della spinta di aspirazione e questa, insieme alle altre caratteristiche che verranno esaminate in questo capitolo quali effetto parete virtuale e recupero passivo dell'energia tra la fine di un ciclo di nuoto e l'inizio del successivo, determina l'eccezionale efficienza del moto e costituisce la cosiddetta cinematica a campana tipica di queste meduse (Fig. 4).

[1]

2.1 Struttura della campana

Essenzialmente le meduse possono presentare due tipi di propulsione: la prima è la propulsione a getto (Fig. 3) che caratterizza le cubomeduse e le idromeduse mentre la seconda è detta "a remi" (Fig. 4), tipica delle scifomeduse. Per questi due metodi di movimento le meduse hanno sviluppato differenti strutture. [1]

Nelle meduse con propulsione a getto vi è un sottile lembo elastico che corre lungo tutto il bordo dell'ombrello che si forma da un ripiegamento su sé stesso del margine della mesoglea. Questa struttura è detta velario nella cubomeduse e velum nelle idromeduse. Per produrre spinta queste meduse contraggono i muscoli che si trovano disposti circolarmente nel subombrello. Tale contrazione provoca una riduzione del volume della campana, con conseguente fuoriuscita di acqua e formazione di vortici. La forza con cui questo getto d'acqua esce è la stessa che spinge avanti la medusa, ed è proporzionale alla pressione che ha il fluido che esce. Queste meduse vengono dette "prolate", questo termine sta a indicare la loro tipica forma allungata o simile a un proiettile. [1]

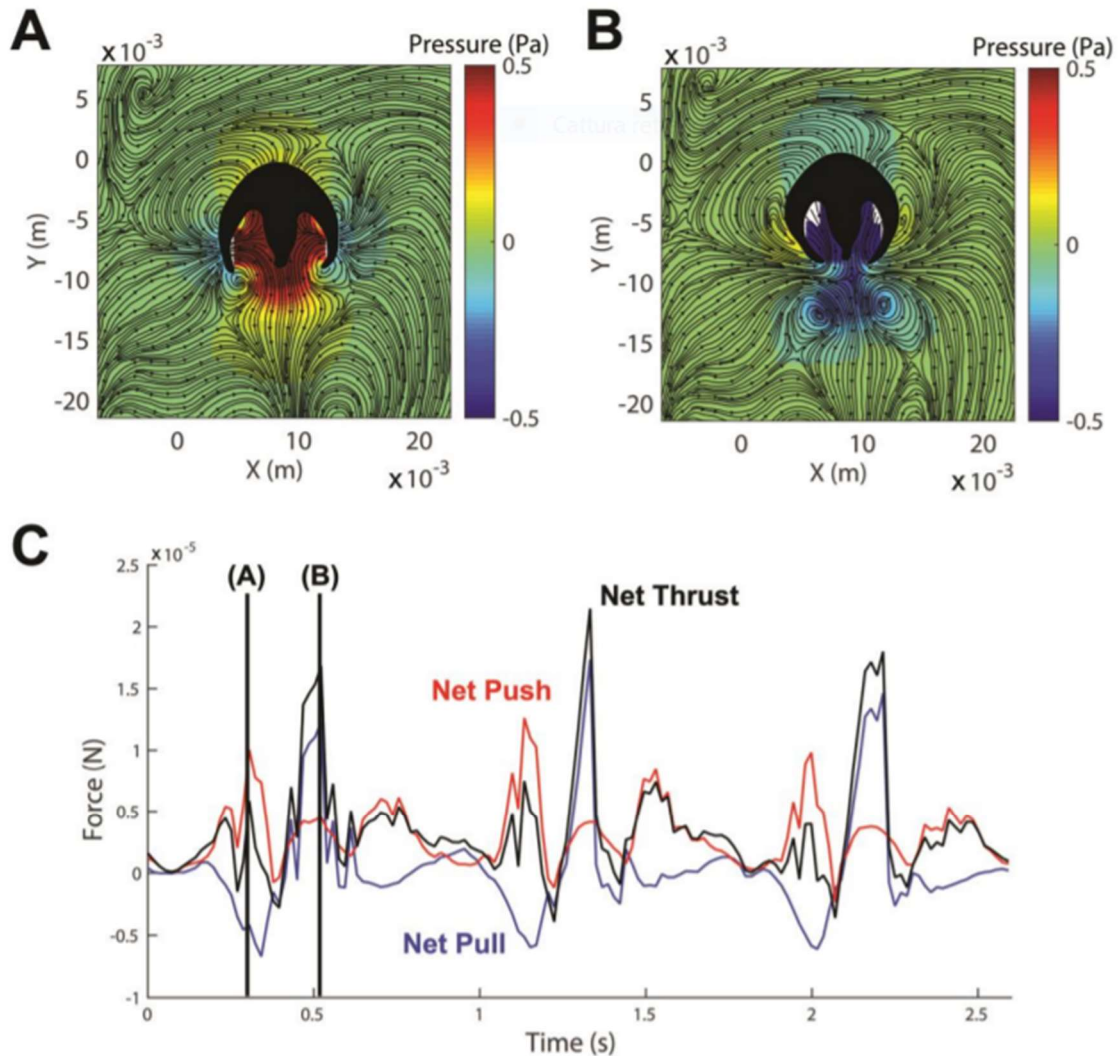


Figura 3 | Analisi della locomozione di una medusa con propulsione a getto (*Eutonia Indica*). (A, B) Zone di alta e bassa pressione e linee di flusso del fluido. © Andamenti nel tempo della spinta netta (Net Push) legata all’alta pressione, della trazione netta (Net Pull) dovuta alla bassa pressione e della spinta totale (Net Thrust) data dalla somma delle due forze precedenti. [3]

Gli scifozoi, invece, che non hanno il velario e presentano una forma dell’ombrello più appiattita rispetto alle altre due classi, devono fare affidamento su un altro meccanismo. Essi muovono il fluido circostante dall’esterno verso l’interno della campana e viceversa sfruttando un controllo molto preciso dell’ondulazione del margine della campana per ottenere un’elevata efficienza del moto. Il controllo dell’estremità ombrellare avviene grazie a fibre muscolari che si estendono in direzione radiale, dal centro verso il bordo della campana. Questi muscoli permettono alla medusa di svolgere una deformazione differenziale dall’ombrello, che le garantisce un elevato controllo dei vortici che si trovano vicino all’estremità della campana. Queste meduse vengono dette “oblate”, questo termine sta a indicare la loro tipica forma appiattita. [1]

Da notare che possedere una buona coordinazione nella nuotata è necessario, ma non sufficiente, a ottenere un'elevata efficienza con una locomozione che rispetti i principi di fluidodinamica descritti in precedenza. Ad esempio, sebbene le meduse che sfruttano i getti per avanzare si muovano in modo ben coordinato, sono caratterizzate da un'efficienza inferiore rispetto alle specie come l'Aurelia Aurita, che sfrutta il movimento ondulatorio della campana definita propulsione "a remi" (Fig. 4). [3]

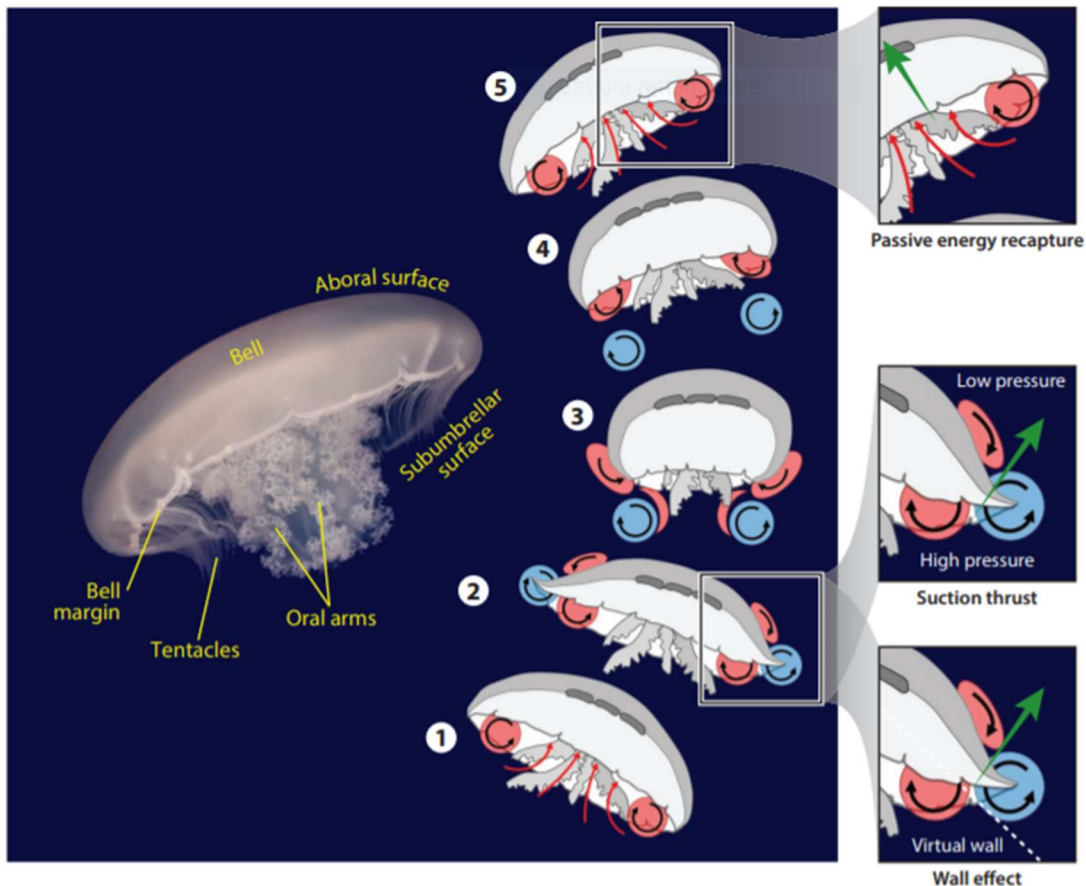


Figura 4 | Illustrazione del meccanismo propulsivo della medusa Aurelia Aurita, cosiddetto "a remi". Di fianco vengono messi in evidenza i tre aspetti della cinematica a campana: spinta di aspirazione, recupero passivo dell'energia e effetto parete virtuale. [1]

In ogni ciclo di nuoto la campana prima viene compressa dai muscoli e si svuota, e successivamente si rilassa sotto l'azione di segnali antagonisti riempiendosi nuovamente d'acqua. Il tempo che impiega a comprimersi è minore del tempo che impiega per il rilassamento, questa differenza di tempo rende il ciclo asimmetrico nelle due fasi e consente di avere una velocità di avanzamento, e quindi una quantità di moto, maggiore rispetto a un ciclo simmetrico. La conseguenza di queste compressioni e rilassamenti ciclici è che il moto delle meduse risulta essere pulsato e intrinsecamente instabile. Per via di questa caratteristica del nuoto, la forma che la campana può assumere ricade in un range limitato, non solo in termini di sagome ma anche di diametri: per una medusa che abbia una struttura emisferica a guscio ideale la forza che essa può generare contraendosi aumenta linearmente con il

diametro e questo perché, essendo il tessuto muscolare spesso un solo strato cellulare allora, l'area della sezione trasversale utile a sviluppare forza cresce al crescere della circonferenza mentre il volume di fluido contenuto nel subombrello da spostare aumenta proporzionalmente al cubo del diametro. Quindi, la forza che la medusa può sviluppare con i suoi muscoli cresce molto meno velocemente rispetto alla forza che è necessario applicare all'acqua da spostare, al crescere delle dimensioni. Il massimo valore di tensione che si è stimato i muscoli subombrellari della medusa possano applicare in modo isometrico ($0,13-0,20 \frac{N}{mm^2}$) è dello stesso ordine di grandezza di quello dei muscoli delle gambe di rane e topi ($0,15-0,36 \frac{N}{mm^2}$). Inoltre, la pressione che i fasci muscolari riescono a generare contraendosi sul fluido diminuisce con l'aumentare del diametro. Infine, non tutta la forza sviluppata è disponibile per la propulsione ma una parte viene immagazzinata per il ritorno elastico della campana. [1]

Nonostante le meduse siano in grado di sviluppare una forza così piccola, risultano essere gli animali più efficienti in natura per quanto riguarda l'energia spesa in rapporto alla massa corporea (Fig. 1), e questo grazie alla cinematica a campana (Fig. 4). [1]

2.2 Spinta di aspirazione (Suction Thrust)

Da studi recenti svolti con tecniche innovative si deduce un ruolo dominante della bassa pressione nella propulsione, infatti, la rotazione della superficie del corpo della medusa facilita la formazione di vortici superficiali coerenti e conseguentemente regioni di bassa pressione (Fig. 5a, b). [3]

Secondo la condizione di non scorrimento, deve essere rispettata la condizione che la velocità del corpo e la velocità del fluido devono corrispondere in corrispondenza della superficie corporea. Le misurazioni svolte hanno dimostrato che questa condizione è rispettata e hanno rivelato che la cinematica del corpo degli esemplari era correlata con quella del fluido sia in termini di segno (cioè in senso orario o antiorario) che di valore della velocità di rotazione del fluido vicino alla superficie del corpo. [3]

Per valutare i relativi contributi alle regioni di alta e bassa pressione, è stata calcolata, istante per istante, la forza netta dovuta a quattro contributi: alta pressione del fluido che genera la spinta in avanti; alta pressione che agisce in opposizione al movimento e genera quindi spinta all'indietro; bassa pressione che genera la trazione in avanti; e bassa pressione che agisce in opposizione al movimento e genera la trazione all'indietro. [3]

Mentre la campana si contrae, i suoi margini creano vortici controrotanti lungo il bordo. All'interfaccia tra questi vortici il fluido viene accelerato, e va a formare una regione ad alta velocità e bassa pressione sulla superficie anteriore del corpo. Questa bassa pressione, generando una forza di aspirazione, spinge la medusa in avanti (Figura 5a-d). Contemporaneamente, l'acqua spinta

all'indietro dalla regione subombrellare viene compressa e si crea una regione ad alta pressione che va a dare un ulteriore contributo alla spinta in avanti generata dalla bassa pressione. [1]

Le figure 5a e 5c mostrano che all'inizio della nuotata si forma una zona di alta pressione nel subombrello, dovuta ad un'accelerazione opposta (all'indietro) del bordo della campana. I contributi alla spinta di avanzamento relativi alla bassa pressione sull'esombrello, quindi la trazione in avanti F_{pull} , e all'alta pressione descritta sopra, quindi la spinta in avanti F_{push} , sono pressoché uguali in questo punto del ciclo di nuoto (Fig. 5e). Successivamente, la regione di bassa pressione si sposta dal centro verso l'estremità della campana insieme alla regione di fluido che è in rotazione (Fig. 5b). Man mano che il moto procede, si viene a formare una regione di alta pressione vicino alla punta della campana che va a contrapporsi all'alta pressione nella regione subombrellare (Fig. 5d), perciò l'unico contributo rimanente che vada a generare la spinta in avanti necessaria alla propulsione è dovuto alla bassa pressione sulla superficie esterna. La figura 5f fa vedere come durante l'intervallo di tempo in cui l'accelerazione è massima (cioè quando la pendenza della curva velocità-tempo è massima), il contributo principale alla spinta è effettivamente dato dalla bassa pressione (triangoli blu), e non dall'alta pressione che si forma nel subombrello (triangoli rossi). [3]

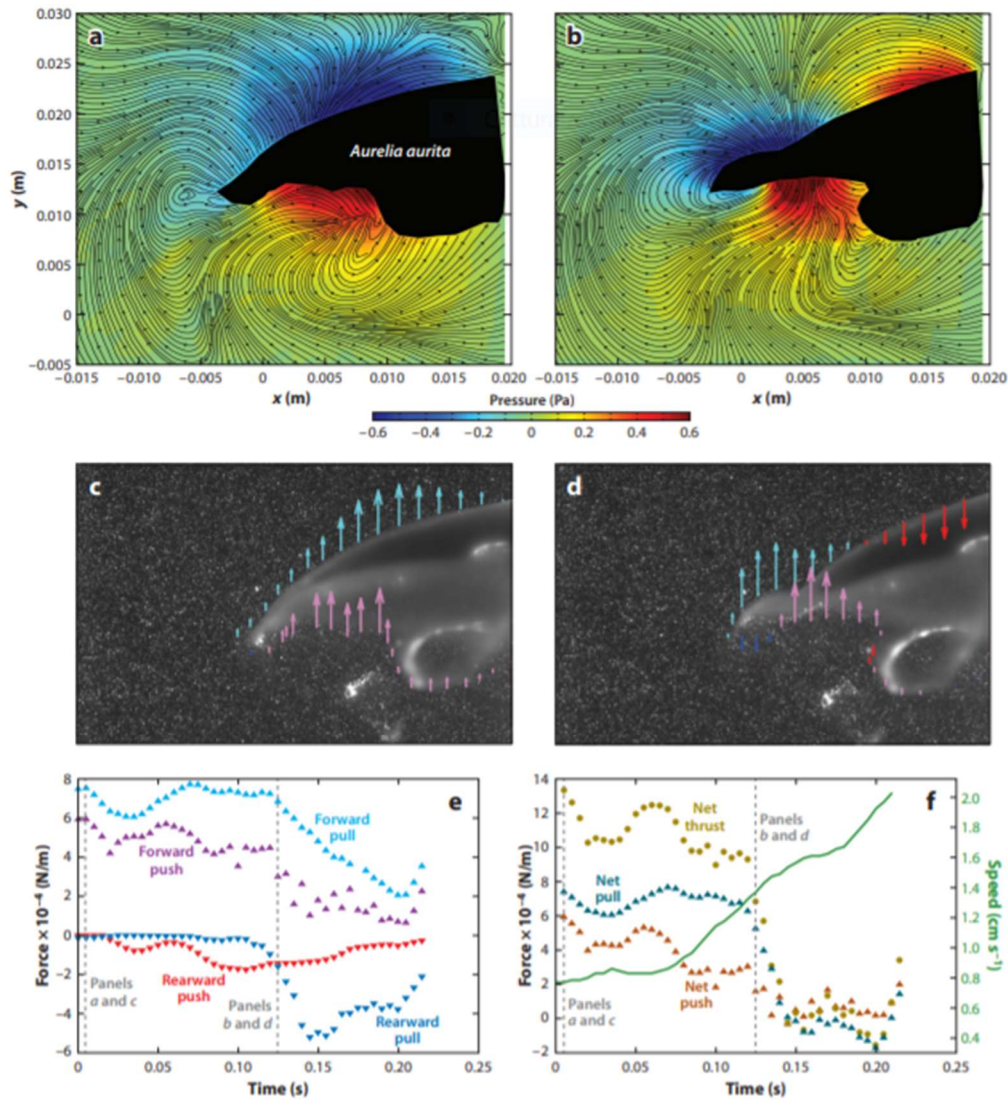


Figura 5 | Analisi della distribuzione della pressione e della spinta di aspirazione durante la locomozione della medusa *Aurelia Aurita*. (a,b) Due istantanee delle zone di alta e bassa pressione e delle linee di flusso. La metà sinistra del corpo è colorata di nero. (c,d) Rappresentazione delle forze di spinta in avanti (viola), spinta all'indietro (rosso), trazione in avanti (azzurro) e trazione all'indietro (blu), causate della pressione locale del fluido. La dimensione e la punta delle frecce indicano rispettivamente l'intensità e la direzione in cui spinge o tira la pressione che il fluido esercita sul corpo dell'animale. (e) Andamenti nel tempo dei contributi di spinta (alta pressione) e trazione (bassa pressione) nel ciclo di nuoto. Le linee tratteggiate verticali si riferiscono alle figure soprastanti come indicato. (f) Andamenti nel tempo della trazione netta (blu), della spinta netta (arancio) e della spinta totale netta (senape, data dalla somma due contributi precedenti) generati dalla pressione sulla medusa. La curva verde continua mostra la velocità della medusa (scala a destra). Le linee tratteggiate verticali si riferiscono alle figure soprastanti come indicato. [1]

La flessione del bordo della campana, con quest'ultima orientata ortogonalmente alla direzione del moto, permette alla medusa di utilizzare la bassa pressione per spingersi in avanti attraverso l'acqua. È importante sottolineare che l'acqua che si trova a monte rispetto all'animale è determinante per la

locomozione, perché è questa parte di fluido, e non quella che si trova nel subombrello, che viene tirata a valle per consentire l'avanzamento. [3]

Calcolo della pressione

Grazie all'utilizzo della velocimetria digitale a immagine di particelle ad alta velocità (DPIV – Digital Particle Image Velocimetry) si sono potute visualizzare le linee di flusso intorno agli esemplari. Avendo ora i dati sul campo di pressione e inserendoli in un algoritmo in MATLAB (Mathworks, Inc.) che integra le equazioni di Navier-Stokes (vedi Appendice) su diversi percorsi è stata ottenuta la distribuzione della pressione nello spazio. [3]

Calcolo della forza

Le varie forze agenti (spinta e trazione in avanti; spinta e trazione all'indietro) sono state calcolate integrando ciascuna componente di pressione lungo la superficie corporea dell'esemplare. Per tali misurazioni si è considerato solo il lato sinistro di ciascun animale, sfruttando l'ipotesi di simmetria radiale degli esemplari. [3]

Calcolo dell'efficienza

L'efficienza idrodinamica si calcola come

$$\eta = \frac{TU}{TU + P_{lat}}$$

dove T è la somma della spinta e della trazione in avanti; U è la velocità media della medusa, e P_{lat} è la potenza dissipata per muoversi lateralmente, definita come:

$$P_{lat} = - \int_{body} p(j \cdot n)j \cdot u_{body} dS$$

dove u_{body} è la velocità dell'animale ortogonale alla direzione del moto, j è il versore che indica tale direzione, e p è la pressione locale. Integrando il prodotto della pressione per la velocità sulla superficie del corpo si ottiene la potenza dissipata nel moto laterale. [3]

Si può anche calcolare l'efficienza idrodinamica legata alla sola componente di trazione in avanti

$$\eta_{pull} = \frac{T_{pull}U}{T_{pull}U + P_{lat,pull}}$$

dove T_{pull} è la sola forza di trazione in avanti dovuta alla bassa pressione, e $P_{lat,pull}$ è la potenza dissipata nella parte di superficie corporea che viene tirata in senso ortogonale al moto dalla bassa pressione. Analogamente si può calcolare η_{push} , l'efficienza idrodinamica legata alla sola componente di spinta in avanti, dovuta all'alta pressione. [3]

Risultati

Questa analisi indica che i fondamenti per un'efficiente locomozione degli animali partono dalla generazione sulla superficie corporea di vortici che ruotano e si spostano lungo il corpo. La bassa pressione che viene a formarsi vicino alla superficie del corpo consente alla medusa di trascinarsi attraverso l'acqua. Sebbene esistano regioni di alta pressione nel flusso, soprattutto a monte dell'esemplare e durante i periodi transitori di accelerazione laterale del corpo, queste non sono una discriminante nel perseguire una locomozione efficiente. [3]

Lo studio ha determinato che la forza di trazione dovuta alla bassa pressione ha un'intensità maggiore rispetto alla spinta in avanti generata dall'alta pressione e che inoltre, la spinta all'indietro generata dall'alta pressione ha un'intensità maggiore rispetto alla trazione all'indietro legata alla bassa pressione. Ciò si traduce in un'efficienza delle forze di bassa pressione decisamente superiore a quelle di alta pressione, da qui il ruolo fondamentale rivestito dalla bassa pressione nella locomozione delle meduse con propulsione a remi (Fig. 5e, f). [3]

2.3 Recupero passivo dell'energia (PER – Passive Energy Recapture)

In ogni ciclo di nuoto, dopo la contrazione della campana avviene il rilassamento dei muscoli con la campana che recupera la forma originale. Durante la decompressione, nel fluido che viene aspirato si generano dei vortici rotanti che localmente possiedono anche velocità elevate e si formano nei pressi del subombrello. Questi vortici spingono contro l'ombrello da sotto nella direzione del moto, sviluppando una forza debole ma costante che permette alla medusa di percorrere ulteriormente dello spazio senza spendere altra energia, per questo viene definito passivo questo processo. [1]

La scoperta del PER è piuttosto recente, perché i vortici che lo generano si trovano all'interno della cavità della parte inferiore dell'ombrellone. Questa condizione ha due conseguenze: la prima è che finché rimane sotto l'ombrello, e cioè per tutto il tempo che genera spinta, non risulta visibile trovandosi appunto coperto dalla campana, e la seconda è che quando veniva spinto fuori dalla compressione interagiva con altri vortici, modificandosi e perciò sembrava prodotto dalla compressione. [2]

Per sfruttare in modo efficace questo processo, la medusa deve lasciarsi spingere passivamente dall'alta pressione che si forma per la presenza dei vortici facendo una pausa prima della successiva compressione dell'ombrello. Il contributo del PER allo spazio percorso non dipende, o dipende debolmente, da forma e dimensioni dell'ombrello ma dipende dalla durata della pausa: normalmente contribuisce per circa un terzo dello spazio totale percorso con un ciclo, ma può arrivare a rappresentare anche più della metà dello stesso se le pause sono sufficientemente lunghe (Fig. 6). [1]

Pause brevi o addirittura assenti consentono alla medusa di avere accelerazioni e velocità più elevate, a discapito però dell'efficienza che diminuisce. [1]

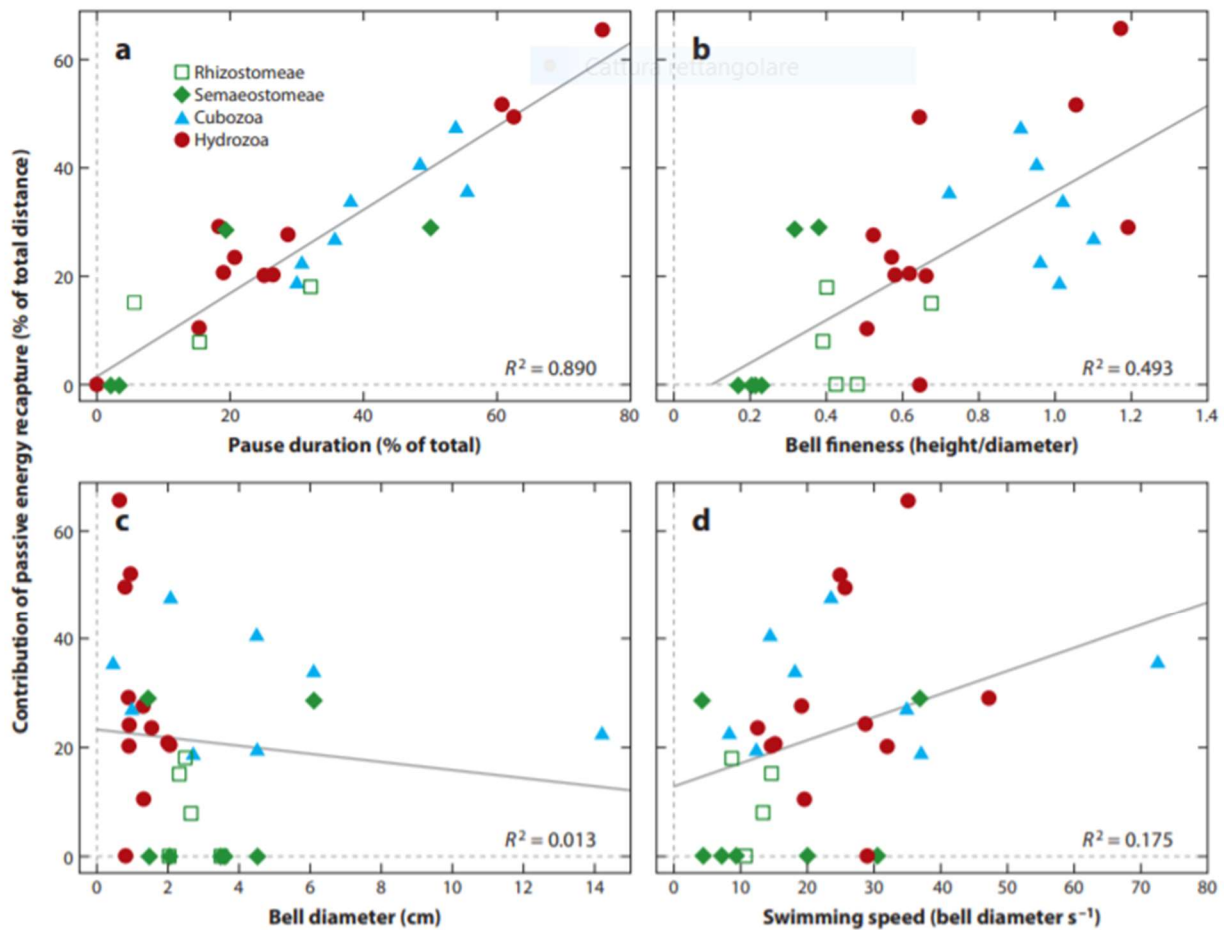


Figura 6 | Influenza di vari fattori sull'energia recuperata passivamente durante il nuoto di diverse specie di meduse. (a) Dipendenza del PER dalla durata della pausa tra una pulsazione e la successiva. (b) Dipendenza del PER dal rapporto di snellezza della campana (altezza campana /diametro campana). (c) Dipendenza del PER dal diametro della campana. (d) Dipendenza del PER dalla velocità di nuoto normalizzata rispetto al diametro. Per ottenere il coefficiente R^2 è stata utilizzata una retta di regressione costruita in base ai vari punti del grafico. [1][7]

Questa energia recuperata passivamente, e quindi risparmiata, è fondamentale per le meduse perché non possedendo occhi esse per nutrirsi devono venire in contatto diretto con la preda, e questo le pone in netto svantaggio rispetto ai pesci perché questi ultimi possiedono occhi veri e propri, a differenza delle meduse. Essendo la disponibilità di nutrienti, e quindi di energia per i muscoli, limitata per le meduse questo processo sopperisce a tale mancanza. [8]

Calcolo del costo netto di trasporto

Per valutare l'efficienza propulsiva e poter fare confronti fra le diverse specie animali è stata introdotta una grandezza chiamata Costo Netto del Trasporto (COT – Net Cost of Transport), così definita:

$$COT = \frac{E}{MV}$$

Dove E è l'energia spesa per il movimento, M è la massa dell'animale considerato e V è la velocità posseduta dallo stesso. L'unità di misura del COT è $\frac{J}{kg\ m}$. Esso rappresenta l'energia spesa per unità di massa e distanza. [8]

Il metodo del COT è molto utile, soprattutto dal punto vista ecologico, per poter fare confronti di efficienza tra le varie specie in quanto l'energia spesa per mettere in moto il corpo e il fluido circostante variano tra le diverse specie. Infatti, per poter fare un confronto significativo è necessario tenere conto della richiesta netta di energia, che è specifica per ogni specie, e metterla in relazione alla massa da spostare e alla distanza che viene percorsa. [8]

Calcolo dell'energia spesa per la propulsione

Per calcolare l'energia per unità di massa spesa per il movimento si calcola prima di tutto la quantità di ossigeno respirato dell'esemplare nell'intervallo di osservazione e si tiene conto di un fattore di conversione di 19 joule ogni millilitro di O₂ respirato. Quella appena trovata però è l'energia totale di cui ha bisogno l'animale, ad essa bisogna sottrarre l'energia che viene usata per i normali processi metabolici per trovare l'energia spesa per la locomozione. Ad esempio, si stima che per la medusa Aurelia Aurita la metà dell'energia totale venga usata per la propulsione (calcolo conservativo), la percentuale più bassa registrata tra le varie specie, questo perché questa medusa è quella che ha la fase di contrazione della campana più breve tra tutte. [8]

Calcolo della velocità della medusa

Le meduse sono state investite con un fascio laser (LaVision) orientato ortogonalmente alle stesse per ottenere le immagini 2D fedeli del profilo del corpo, successivamente, con l'ausilio del software Image J è stato ottenuto il campo di velocità bidimensionale. Le meduse considerate per questo calcolo sono solo quelle che nuotavano verso l'alto così da evitare che l'accelerazione gravitazionale agisse a favore del movimento. [8]

Per trovare la velocità U si è calcolato lo spostamento che compiva la medusa prendendo come riferimento la punta della campana, secondo la formula:

$$U = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{t_2 - t_1}$$

Dove x_1, y_1 e t_1 sono le coordinate e l'istante di tempo iniziali e x_2, y_2 e t_2 sono le coordinate e l'istante di tempo finali dell'intervallo di misurazione. [8]

Calcolo del campo di velocità e pressione del fluido

Sono state disperse particelle di vetro di 10 μm nell'acqua e investite con un fascio laser. Utilizzando la velocimetria digitale a immagini di particelle (DPIV) e un algoritmo che fosse in grado di relazionare le varie immagini (software LaVision) si sono ottenuti i dati sul campo di velocità e di pressione del fluido. [8]

Le equazioni di Navier-Stokes (vedasi Appendice) sono state risolte usando il software Fluent 13.0 (ANSYS). [8]

Modello CFD di una medusa

Per sviluppare un modello di medusa innanzitutto si è assunta la simmetria assiale dell'esemplare, così da poter modellizzare solo metà della campana e ottenere l'altra per simmetria. Il modello è stato ottenuto prendendo dei punti del corpo e interpolandoli con polinomi di ottavo grado e spline cubiche. [8]

Calcolo delle forze

Partendo dai dati sulla pressione, le forze agenti in direzione assiale e l'accelerazione risultante sono state ottenute integrando la pressione sulla superficie corporea dell'animale. [8]

Ponendo in equilibrio le forze di taglio e pressione si ha

$$\sum F_z^n = M \left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right)^n$$

dove $\sum F_z^n$ è la somma di tutte le forze di pressione e taglio dirette lungo l'asse z (quello di simmetria) all'istante di tempo n , M è la massa della medusa, e $\left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right)^n$ è l'accelerazione posseduta dal centro di massa della medusa. [8]

Calcolo dello spostamento

Applicando l'espansione di Taylor arrestata al secondo ordine all'accelerazione, la si può approssimare con un'equazione agli incrementi finiti:

$$\left(\frac{d^2 z}{dt^2} \right)^n \approx \frac{2z^n - 5z^{n-1} + 4z^{n-2} - z^{n-3}}{(\Delta t)^2}$$

Dove z è lo spostamento all' n -esimo istante di tempo, e t è l' n -esimo istante di tempo. [8]

Partendo da quest'ultima equazione e sostituendovi la condizione di equilibrio delle forze, si può valutare lo spostamento compiuto dalla medusa all'istante n :

$$z^n \approx \frac{(\Delta t)^2 \sum F_z^n}{2m} + \frac{5}{2}z^{n-1} - 2z^{n-2} + \frac{1}{2}z^{n-3}$$

Infine, per tenere conto di un plausibile divario tra la stima del modello e lo spostamento reale della medusa, è stato necessario introdurre un fattore $\alpha \in [0, 1]$, detto fattore di livellamento, e fare una media mobile:

$$\zeta^n = \begin{cases} z^n, & n = 0 \\ \alpha z^n + (1 - \alpha) \zeta^{n-1}, & n > 0 \end{cases}$$

Dove ζ è lo spostamento della medusa che tiene conto di un possibile mismatch tra il modello e la realtà. È stato individuato un fattore di livellamento che garantisce l'affidabilità dei risultati pari ad $\alpha=0.25$. [8]

Risultati

Confrontando il COT dell'Aurelia Aurita con quello del salmone, si vede che quello del salmone è circa 3,5 volte maggiore di quello della medusa. Confrontando invece ora il COT dell'Aurelia Aurita con quello di un'altra medusa, lo Stomolophus meleagris, si vede che il COT di quest'ultimo è due volte maggiore a quello dell'Aurelia Aurita, o anche di più, e questo perché l'Aurelia Aurita spende 15 volte meno energia per il nuoto rispetto allo Stomolophus meleagris (Fig. 7). [8]

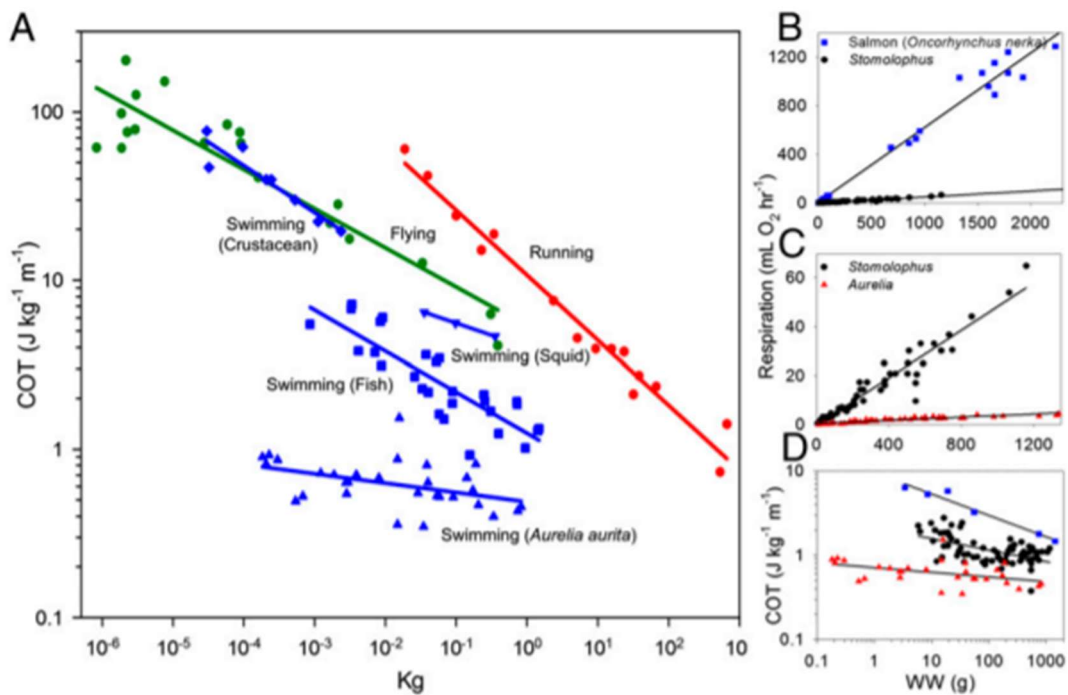


Figura 7 | (A) Costo netto di trasporto per diversi animali. (B) Confronto della quantità di ossigeno respirato (e quindi dell'energia spesa) tra il salmone e la medusa Stomolophus meleagris. (C) Confronto della quantità di ossigeno respirato (e quindi dell'energia spesa) tra la medusa Aurelia Aurita e la medusa Stomolophus meleagris. (D) Confronto del COT tra Aurelia Aurita, Stomolophus meleagris e il salmone. (B, C, D) Sulle ascisse è riportata la massa corporea in grammi. [8]

Quello che permette alle meduse di poter respirare così poco ossigeno, come è testimoniato dai grafici della Fig. 7, è il fatto che il tessuto muscolare nel loro corpo, quello che ha bisogno di energia, rappresenta l'1% della massa totale, mentre nei pesci supera il 50% della massa totale. Il fatto di avere una massa muscolare così ridotta però porta con sé anche degli svantaggi, infatti, le meduse non hanno la capacità di nuotare e la loro unica possibilità locomotoria non è altro che la pulsazione. Di conseguenza le meduse possono raggiungere velocità relativamente basse, e questo spesso porta a COT piuttosto elevati, ma ciò è compensato da una richiesta di energia molto contenuta. Inoltre, il PER contribuisce ad abbassare ulteriormente il COT. [8]

Come detto nel Capitolo 1, la mesoglea possiede proprietà elastiche che favoriscono il ritorno alla forma rilassata e che sono di fondamentale importanza per quanto riguarda la spinta che si sviluppa durante il recupero passivo dell'energia, infatti, questa spinta viene sostenuta proprio dall'elasticità della mesoglea. All'inizio della contrazione, quando l'accelerazione è elevata e c'è un'elevata richiesta di spinta, il tessuto della mesoglea si deforma con l'applicazione di carichi contenuti mentre alla fine della contrazione invece accumula deformazioni elastiche, e ciò perché la curva sforzo-deformazione di questo tessuto è non lineare sebbene sia elastico. Questo accumulo di energia di deformazione elastica è molto importante, perché nella fase di rilassamento permette alla mesoglea di riassumere la forma originaria senza il bisogno di reazioni antagoniste, che richiederebbero ulteriore energia, e di formare i vortici che generano la spinta responsabile del PER. Le meduse poi raccolgono l'energia necessaria a rallentare la campana quando deve cessare la contrazione sfruttando il nuovo riempimento del subombrello, per la pulsata successiva. Anche questo aspetto contribuisce ad aumentare l'efficienza del nuoto abbattendo i costi energetici. [8]

I risultati degli studi hanno constatato che la distanza percorsa durante il processo passivo di recupero dell'energia può rappresentare fino a circa il 32% di quella totale, mentre la medusa si lascia spingere passivamente dall'alta pressione che si crea nella zona concava dell'ombrello. [8]

Per approfondire e svolgere studi più precisi, sono stati anestetizzati degli esemplari di *Aurelia Aurita* e successivamente sono stati mossi artificialmente a velocità pressoché uguali a quelli normali di nuoto, e l'obiettivo era valutare il contributo del PER che durasse per un periodo di tempo maggiore rispetto al solito. Lo studio ha prodotto come risultato che nella fase attiva del nuoto, quella dove vengono spinte artificialmente, un'*Aurelia Aurita* di 4 cm percorreva 12,7 mm, e che nella fase passiva, quella dove avviene il recupero energetico passivo con la spinta creata dai vortici nel subombrello, la distanza percorsa era di 10,1 mm, pari a circa l'80% dello spazio percorso attivamente. [8]

Per capire il principio su cui si basa la generazione della spinta che osserviamo nel PER è stato necessario svolgere analisi sulla pressione intorno al corpo della medusa. Per analizzare il campo di

pressione circostante si è utilizzata la fluidodinamica computazionale (CFD – Computational Fluid Dynamics) unitamente a una tecnica che partendo dai dati ottenuti dalle rilevazioni sul campo di velocità, calcola empiricamente il campo di pressione. [8]

È stata osservata una differenza sostanziale di complessità del campo di pressione tra le meduse con propulsione a remi (es. *Aurelia Aurita*), dette oblate, e quelle con propulsione a getto (es. *Eutonia Indica*), dette prolate, con le prime che generano un campo di pressione ben più complesso delle seconde. Quello che è stato osservato è che nelle meduse con propulsione a remi la fase di rilassamento della campana inizia con la formazione di una bassa pressione nella cavità inferiore dell'ombrello, altrimenti l'acqua non entrerebbe qui ma uscirebbe, e successivamente a causa dell'interazione tra i vortici di arresto (i cui nuclei come detto sono a bassa pressione), si forma una zona piuttosto estesa di alta pressione (Fig. 8). [8]

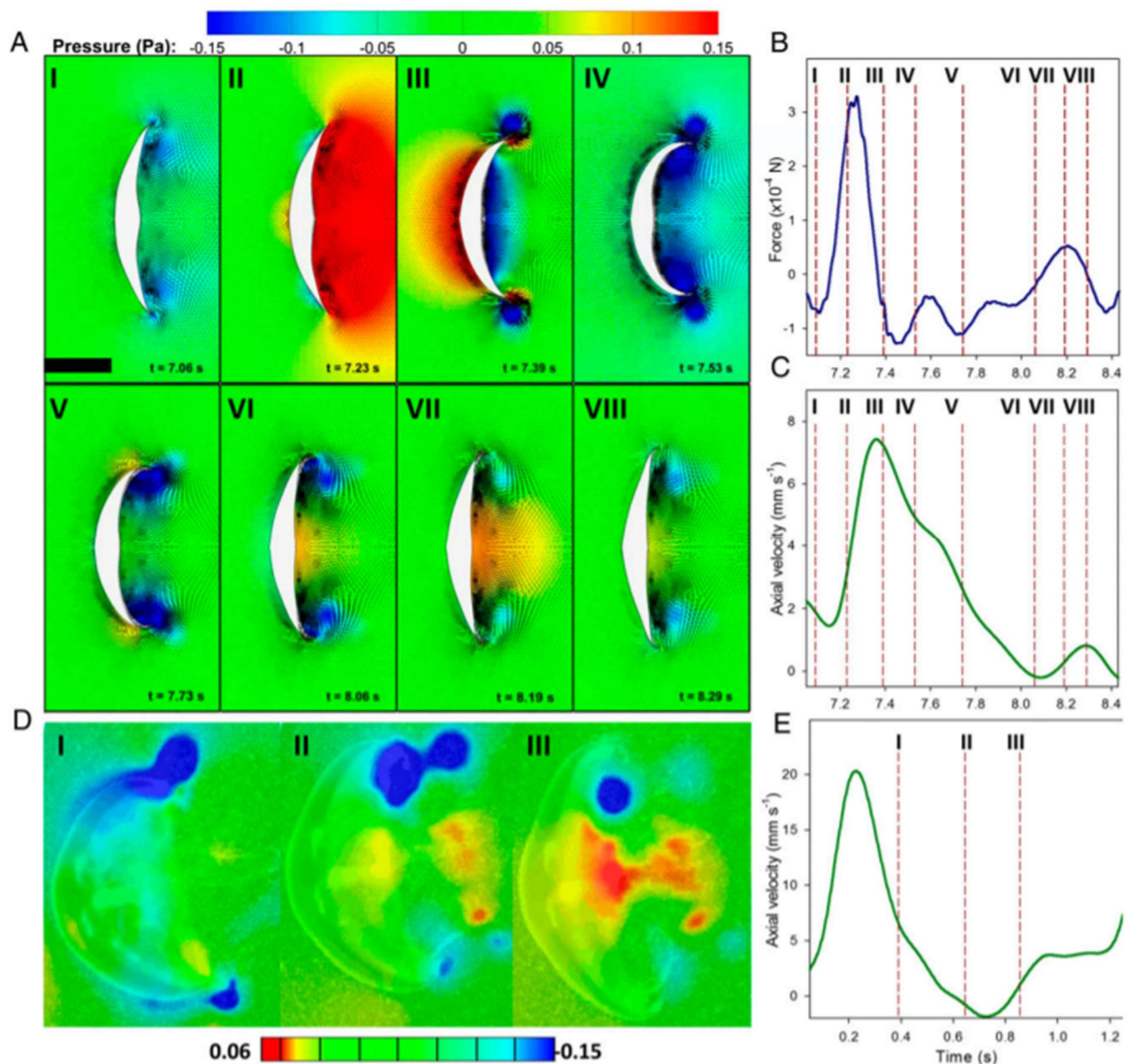


Figura 8 | (A) Istantanee (I-VIII) del ciclo di nuoto della medusa oblata Aurelia Aurita, ottenute con la CFD. Nelle istantanee (VI, VII, VIII) si vede molto bene la formazione della zona di alta pressione che causa la spinta caratterizzante il recupero passivo dell'energia. (B) Forza diretta lungo l'asse di simmetria del corpo, cioè nella direzione del moto valutata nelle varie istantanee. (C) Velocità lungo la direzione assiale valutata nelle varie istantanee. (D) Istantanee (I-III) della pressione nel ciclo di nuoto di Aurelia Aurita ottenute empiricamente dalle misure sulla velocità. (E) Velocità lungo la direzione assiale valutata nelle varie istantanee. [8]

È possibile fare una stima del contributo al COT del recupero passivo dell'energia. Si assume che nella medusa Aurelia Aurita il tempo di pausa tra una pulsazione e l'altra, cioè il tempo che ha il PER per agire, sia la metà dell'intero ciclo di nuoto, quindi $\frac{T_{ip}}{T_{tot}} = 0,50$, dove T_{ip} è il tempo di pausa tra una pulsazione e la successiva ('ip' sta per interpulse) e T_{tot} è il tempo totale dell'intero ciclo. Ponendo $T_{ip} = 0$, cioè eliminando la pausa tra le pulsazioni, si ha che la frequenza di queste ultime raddoppia. Per calcolare il COT è necessario conoscere l'energia spesa, che a sua volta dipende dalla quantità di ossigeno respirato, ma non si conosce la relazione tra la frequenza di pulsazione e quella di respirazione nelle meduse. Per essere conservativi, si assume essere lineare (nei pesci è esponenziale), perciò secondo questa assunzione, essendo doppia la frequenza, l'energia spesa per il movimento risulta essere raddoppiata. Inoltre, per determinare il COT è stata utilizzata la velocità posseduta durante la fase attiva del nuoto di meduse Aurelia Aurita aventi un diametro da 2 a 10 cm, e si è stimato che essa sia 1,35 volte la velocità posseduta dagli esemplari sull'intero ciclo, in quanto si stanno considerando dei cicli formati da solo fasi attive. Utilizzando questi dati si ottiene:

$$COT_{nopause} = \frac{2E}{M \times 1.35V} = 1,48COT$$

Ciò significa che in un ciclo di nuoto il COT, o costo netto di trasporto, senza il PER aumenta del 48%. In sostanza, questa semplice stima mostra che il recupero passivo dell'energia incide in maniera considerevole sull'efficienza. [8]

L'analisi dell'efficienza tramite il metodo del COT mostra che alle meduse conviene avere dimensioni ridotte, poiché ridotta è anche la massa muscolare e quindi la forza che possono produrre (come già detto nel capitolo 2.1). Negli altri pesci invece l'aumento delle dimensioni abbassa il COT, infatti, come si vede dal grafico in Fig. 7 per pesci di massa circa 100kg o maggiore il COT è minore che per le meduse. [8]

L'energia recuperata passivamente, e quindi risparmiata, è fondamentale per le meduse perché non possedendo occhi esse per nutrirsi devono venire in contatto diretto con la preda, e questo le pone in netto svantaggio rispetto ai pesci perché questi ultimi possiedono occhi veri e propri, a differenza delle meduse. Essendo la disponibilità di nutrienti, e quindi di energia per i muscoli, limitata per le meduse questo processo sopperisce a tale mancanza. [8]

Come appena spiegato, il PER ha due aspetti fondamentali: riduce la richiesta di nutrienti perché viene spesa meno energia per mettere in moto i muscoli e nel fare ciò aumenta anche lo spazio percorso ad ogni pulsazione, aumentando di conseguenza la quantità di sostanza nutritive incontrate nel ciclo di nuoto. Questi adattamenti evolutivi permettono alle meduse non solo di svilupparsi in modo rapido grazie all'energia risparmiata per il moto che viene sfruttata per i processi metabolici, ma anche di poter competere con i pesci. [8]

Infine, è importante tenere conto del processo passivo di recupero energetico e del COT per quanto riguarda la progettazione biomimetica e bio-inspirata. Per costruire veicoli o robot in grado di spostarsi in un fluido (sia esso acqua o aria o un qualsiasi fluido in generale) che non puntino sulle prestazioni ma sull'efficienza e su una bassa spesa energetica è necessario partire da questi aspetti e trarne ispirazione, non solo perché abbattano i costi energetici ma anche perché, come mostrato per i pesci nella Fig. 7, essi scalano favorevolmente con le dimensioni, dando una possibilità di scelta che spazia su svariate forme e grandezze. [8]

Confronto del contributo del PER nelle varie specie di meduse

È stato fatto un confronto tra tredici diverse specie di meduse, appartenenti a tutte e tre le classi del phylum degli Cnidari (Scifozoi, Idrozoi e Cubozoi), per capire che ruolo riveste il recupero passivo dell'energia per ciascuna specie. Passando da una classe all'altra cambia il metodo propulsivo, a getto per Idrozoi e Cubozoi e a remi per gli Scifozoi, e di conseguenza anche l'approvvigionamento di cibo. [7]

È stato osservato innanzitutto che tutte le meduse sono in grado di utilizzare il PER durante il nuoto, ma che tra le diverse specie ve ne sono alcune che sfruttano in misura maggiore questo processo e altre meno, e quindi la quantità di energia risparmiata derivante da questo processo è diversa tra le meduse. Secondo poi, è stato osservato che la differenza di contributo energetico dipende essenzialmente dalla tecnica propulsiva e non dalla forma o dalle prestazioni. [7]

In ogni caso, si è tenuto in considerazione anche il rapporto di snellezza della campana (altezza della campana/diametro della campana quando questa è completamente rilassata) per valutare l'influenza della forma sul PER, e si è visto che influenza debolmente questo processo. In particolare, le specie prolate, cioè con rapporto di snellezza elevato e caratterizzate dalla propulsione a getto, sfruttano di più il recupero passivo dell'energia fermandosi per maggiore tempo tra un ciclo e l'altro rispetto alle specie oblate, con basso rapporto di snellezza e propulsione a remi (Fig. 6). [7]

Per svolgere valutazioni oggettive è stato considerato il rapporto tra la distanza percorsa tramite la spinta responsabile del recupero energetico passivo e la distanza totale percorsa in un ciclo. [7]

Come riferimento per l'inizio del PER è stato scelto l'istante in cui, dopo essersi rilassata, la campana riprende ad accelerare, e come riferimento per la fine del PER è stato preso l'istante in cui la medusa

comprime nuovamente la campana, che segnala l'inizio di un nuovo ciclo di nuoto. In questo lasso di tempo la medusa teneva un comportamento del tutto passivo, restava inattiva e si lasciava trasportare dall'alta pressione venutasi a creare nel subombrello in seguito all'aspirazione dell'acqua. [7]

Nella specie *Phyllorhiza punctata*, appartenente alla classe degli Scifozoi e all'ordine delle Rhizostomeae (propulsione a remi), è stato osservato che la medusa iniziava la contrazione del ciclo successivo poco dopo che la campana si rilassava completamente. Di conseguenza l'entità del recupero energetico è decisamente contenuta, essendo breve la durata della pausa che ha il PER per agire. [7]

La specie *Sarsia Tubulosa*, appartenente alla classe degli Idrozoi (propulsione a getto), invece effettua una pausa piuttosto lunga tra un ciclo e il successivo e perciò il contributo del PER durante il ciclo di nuoto risulta essere importante, pari a circa un terzo della distanza totale. [7]

Un altro fatto interessante è che il contributo del PER per ciascuna specie non è sempre lo stesso, ma può variare a seconda che l'animale decida di aumentare o diminuire la frequenza dei cicli di nuoto. Per esempio, nella specie *Aurelia Aurita*, della classe degli Scifozoi, in genere il contributo del PER rappresenta il 30% dello spazio percorso, ma se la frequenza di pulsazione viene raddoppiata il contributo del PER diventa nullo (Fig. 9A, C). [7]

Similmente, per la medusa *Stomatoca atra*, appartenente agli Idrozoi, quando essa aumenta la sua frequenza dei cicli di nuoto da 0,8 Hz a 4,7 Hz lo spazio percorso grazie al PER passa dal rappresentare il 50% a essere nullo. In questo caso però la velocità di nuoto passa da essere 6,8 mm/s a 14,4 mm/s, più del doppio (Fig. 9B, D). [7]

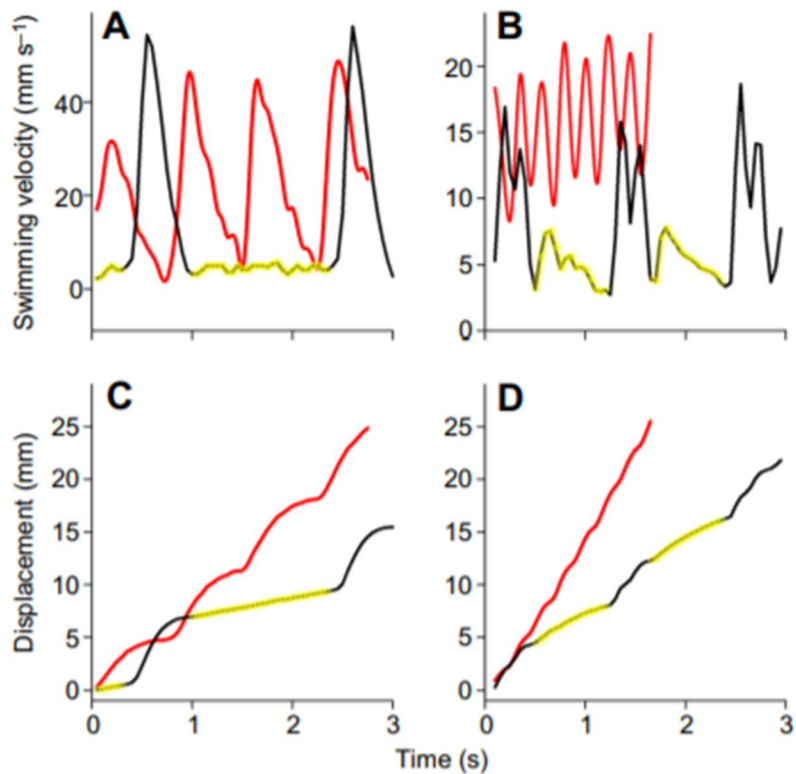


Figura 9 | (A) Velocità di nuoto per la medusa *Aurelia Aurita*. La linea nera rappresenta l'andamento tenuto generalmente dalla medusa con sfruttamento del PER, la parte gialla indica la pausa per il PER. La linea rossa indica l'andamento senza pause per il PER dopo essere stata toccata da una sonda. (B) Velocità di nuoto per la medusa *Stomatoca atra*. Analogamente la linea nera indica il nuoto normale con l'uso del PER (parte gialla) e la linea rossa un nuoto con frequenza di pulsazione aumentata senza PER. (C) Spazio percorso da *Aurelia Aurita* nelle due diverse modalità di nuoto, normale (linea nera e gialla, il giallo indica lo spazio percorso durante il PER) e a frequenza doppia (linea rossa). (D) Spazio percorso da *Stomatoca atra* nelle due diverse modalità di nuoto, normale (linea nera e gialla, il giallo indica lo spazio percorso durante il PER) e a frequenza doppia (linea rossa). [7]

In entrambi i casi, quando il contributo del recupero passivo dell'energia diventa nullo si ha un aumento della spesa energetica adibita al nuoto; in particolare per *Aurelia Aurita* l'energia spesa raddoppia (vedasi *Risultati* all'interno di questo capitolo), mentre si stima che nel caso di *Stomatoca atra* l'energia spesa possa aumentare anche in misura maggiore dato che la frequenza a cui può pulsare questa medusa va ben oltre il doppio di quella tipicamente utilizzata. [7]

La capacità di variare la frequenza dei cicli però può essere utile in certe situazioni, come la fuga dai predatori o per nutrirsi. [7]

Come detto in precedenza, le meduse con propulsione a getto sfruttano in maniera maggiore il PER rispetto a quelle con propulsione a remi, ma ciò risulta essere controintuitivo in quanto i vortici prodotti da queste ultime sono più grandi e durano di più. Inoltre, come riportato nei *Risultati* all'interno di questo capitolo uno studio sulle meduse *Aurelia Aurita* anestezizzate ha mostrato che le

esse non sfruttano totalmente il contributo che potrebbe fornire il PER, ma bensì ne sfruttano solo il 43%. Ciò è stato riscontrato anche in altre specie. [7]

Sebbene non sia del tutto chiaro il motivo di questa scelta, una spiegazione plausibile è legata ad un fatto di inerzia: risulta essere più vantaggioso energeticamente iniziare un nuovo ciclo di nuoto prima dell'arresto totale del corpo per le meduse che nuotano in modo continuativo e questo si spiega tenendo in considerazione la cosiddetta reazione di accelerazione, una delle principali resistenze al movimento delle meduse. Si definisce massa aggiunta la massa di fluido che viene spostata quando la medusa si muove. La reazione di accelerazione è proporzionale alla massa aggiunta, e la massa aggiunta a sua volta dipende dal rapporto di snellezza: più il rapporto di snellezza aumenta, più la massa aggiunta diminuisce e viceversa. Di conseguenza, forme oblate come quelle degli Scifozoi con propulsione a remi, risultano essere aerodinamicamente sfavorite avendo una reazione di accelerazione più elevata. Inoltre, la reazione di accelerazione aumenta all'aumentare del volume della campana, e anche questa volta sono le meduse oblate ad essere svantaggiate avendo volumi di campana maggiori. [7]

In sintesi, le meduse oblate risultano possedere una maggiore inerzia rispetto a quelle prolate e perciò è più vantaggioso sfruttare solo parzialmente il contributo del PER ed iniziare un nuovo ciclo nell'istante in cui la spinta del PER è massima, in modo da minimizzare l'inerzia. [7]

Anche il metodo di alimentazione può influenzare il contributo del PER tra le varie specie: le meduse con propulsione a remi si nutrono incontrando le prede mentre nuotano e generando un vortice che porta i nutrienti dove possono essere ingeriti, per questo gli conviene mantenere un nuoto continuo, e di conseguenza effettuare delle pause per il PER più brevi. In questo caso quindi, il contributo in termini di energia risparmiata e spazio percorso grazie al PER rappresentano un compromesso tra l'efficienza propulsiva e la nutrizione. Al contrario, le specie con propulsione a getto che si nutrono facendo imboscate, possono fare pause più lunghe per il recupero energetico passivo, non dovendo mantenere un moto continuo. [7]

In conclusione, il fatto che lo sfruttamento di questo meccanismo sia presente in tutte le meduse di ogni forma e dimensione, che venga usato in misura maggiore o minore a seconda di come conviene alla medusa, e che l'entità del contributo del recupero passivo dell'energia possa essere modificata dilatando o accorciando la pausa che questo processo ha per agire porta alla conclusione che possa essere sfruttato anche in progetti di biomimetica per la realizzazione di sistemi propulsivi che si ispirino a questi animali. [7]

2.4 Effetto parete virtuale (Virtual Wall Effect)

È già ben conosciuto il cosiddetto effetto parete solida, un fenomeno che coinvolge veicoli che si trovano a volare parallelamente e in prossimità di un muro solido, reale. Questo fenomeno prevede l'aumento delle prestazioni in termini di portanza grazie proprio alla presenza della parete e all'aumento della pressione al di sotto della superficie propulsiva. [1]

Un'analisi più recente ha poi determinato che questo fenomeno si riscontra anche in acqua, quando gli animali nuotano nei pressi di una parete reale. [1]

È stato stimato che gli animali che si trovano a nuotare vicino ad una parete riscontrano un aumento del 25% della velocità e del 45% della spinta, oltre che riduzione del costo di trasporto e concomitante aumento dell'efficienza. [1]

Per studiare questo fenomeno, si considera il vortice reale e un vortice immaginario con rotazione opposta che si trova dall'altra parte della parete, in modo speculare. [1]

Come detto, questo fenomeno prevede la presenza di una parete materiale, ma molto spesso i pesci e le meduse nuotano in mare aperto, dove non ci sono muri solidi. [1]

Recenti studi sulle meduse Aurelia Aurita hanno approfondito l'analisi dell'effetto parete dove non vi sono superfici solide, per questo detto effetto parete virtuale, e hanno individuato la presenza di un vortice di arresto nella parte inferiore dell'ombrello che si forma al termine del ciclo di nuoto e che, causando un incremento della pressione, aumenta la spinta propulsiva della medusa. Questo vortice agisce allo stesso modo del vortice immaginario che si usa per studiare l'effetto parete. [1]

Quindi, le meduse mentre nuotano creano una sorta di parete virtuale tramite l'interazione dei vortici di arresto reali di segno opposto, e ciò costituisce un altro vantaggio in termini propulsivi delle meduse sugli altri animali acquatici e contribuisce all'eccezionale efficienza di questi nuotatori (Fig. 10). [1]

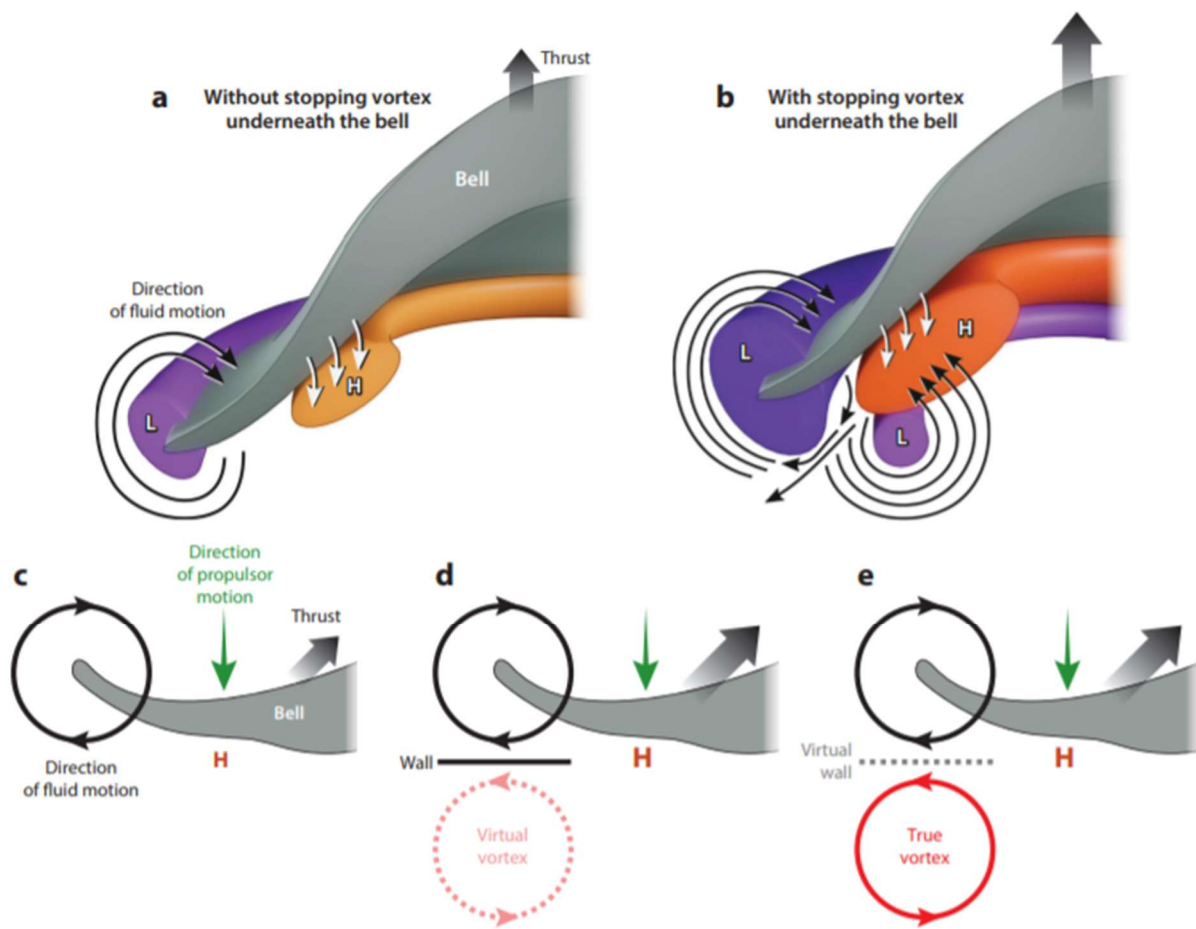


Figura 10 | Illustrazione della pressione e dei vortici rotanti durante il movimento della campana. Per ragioni di simmetria, è mostrata solo metà ombrello. **(a, c)** Rappresentazione di una nuotata senza l'effetto parete virtuale generato dai vortici di arresto. **(b)** Rappresentazione di una nuotata con l'effetto parete virtuale generato dai vortici di arresto. **(a, b)** Le regioni arancioni sono di alta pressione (H), quelle viola di bassa pressione (L). In **(b)** l'intensità dei colori è più forte, a significare una pressione maggiore. Le frecce nere sottili indicano la direzione di moto dell'acqua, quelle bianche la direzione della campana. Le frecce nere spesse in alto indicano la spinta generata dalla contrazione. **(d)** Rappresentazione di una nuotata con l'effetto parete causato da una superficie vera e presenza del vortice virtuale (in rosso) con generazione di pressioni e spinta maggiore dei casi **(a, c)**. **(e)** Rappresentazione di una nuotata con l'effetto parete virtuale e generazione di un vero vortice di arresto di segno opposto al di sotto del muro fittizio (in rosso). **(c, d, e)** Le frecce verdi indicano il movimento della campana. Le frecce nere spesse indicano la spinta generata dalla contrazione. Le frecce nere sottili indicano la direzione di moto dell'acqua. [1]

Calcolo della velocità della medusa

Le meduse sono state investite con un fascio laser (LaVision) orientato ortogonalmente alle stesse per ottenere le immagini 2D fedeli del profilo del corpo, successivamente, con l'ausilio del software Image J è stato ottenuto il campo di velocità bidimensionale. Le meduse considerate per questo

calcolo sono solo quelle che nuotavano verso l'alto così da evitare che l'accelerazione gravitazionale agisse a favore del movimento. [2]

Per trovare la velocità U si è calcolato lo spostamento che compiva la medusa prendendo come riferimento la punta della campana, secondo la formula:

$$U = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{t_2 - t_1}$$

Dove x_1, y_1 e t_1 sono le coordinate e l'istante di tempo iniziali e x_2, y_2 e t_2 sono le coordinate e l'istante di tempo finali dell'intervallo di misurazione. [2]

Calcolo del campo di velocità e pressione del fluido

Sono state disperse particelle di vetro di 10 μm nell'acqua e investite con un fascio laser. Utilizzando la velocimetria digitale a immagini di particelle (DPIV) e un algoritmo che fosse in grado di relazionare le varie immagini (software LaVision) si sono ottenuti i dati sul campo di velocità. I campi di pressione sono stati determinati usando il pacchetto di calcolo queen 2.0 per MATLAB (Mathworks, Inc.) per risolvere l'equazione di Navier-Stokes (vedasi Appendice) della quantità di moto per fluidi inviscidi (o equazione della quantità di moto di Eulero) partendo dai dati sulla velocità. [2]

L'equazione è la seguente:

$$\nabla p = -\rho \frac{Du}{Dt}$$

Dove ρ è la densità dell'acqua, p è la pressione, u è la velocità del fluido, $\frac{Du}{Dt}$ è la derivata lagrangiana (vedasi nota 2 in Appendice) di u , cioè l'accelerazione del fluido. [2]

Risultati

Quello che è stato osservato innanzitutto è che le meduse non presentano diversità dal punto di vista cinematico a seconda che partano da ferme oppure siano già in movimento, per questo la loro cinematica viene detta coerente. Questa prima considerazione è molto importante perché consente di fare confronti diretti tra la propulsione che avviene senza l'effetto parete virtuale e quella che avviene con questo fenomeno. [2]

Nonostante la cinematica fosse la stessa è stato riscontrato che le prestazioni invece non sono uguali a seconda che la partenza sia da fermo o in moto: un animale che si trova già in movimento infatti registra velocità fino al 41% più elevate e percorre fino al 61% di spazio in più. [2]

Il motivo è che, mentre nel caso di partenza da fermo non si ha la formazione di vortici di arresto, nel caso in cui la medusa si stia già muovendo si ha la formazione di questi vortici che aumentano la spinta. [2]

Appena una medusa che si trova già in movimento termina un ciclo si formano dei vortici di arresto di vorticità¹ media massima di 18 s^{-1} e che durano anche all'inizio del ciclo successivo con una vorticità massima di 11 s^{-1} . Invece, per una medusa che si trova a partire da ferma, la vorticità dei vortici generati è circa $0,2 \text{ s}^{-1}$, praticamente nulla. [2]

Quando una medusa contrae la campana per spingersi in avanti, si forma un vortice di partenza in prossimità della punta della campana. Con l'avanzamento del ciclo di nuoto questo vortice di partenza si sposta verso il margine della campana e va ad interagire con il vortice di arresto, che nel frattempo si è formato ed è di segno opposto a quello di partenza. Questa interazione, che appunto è alla base dell'effetto parete virtuale, fa sì che l'acqua venga spinta da sotto contro il margine inferiore della campana, generando la forza propulsiva in avanti (Fig. 11). [2]

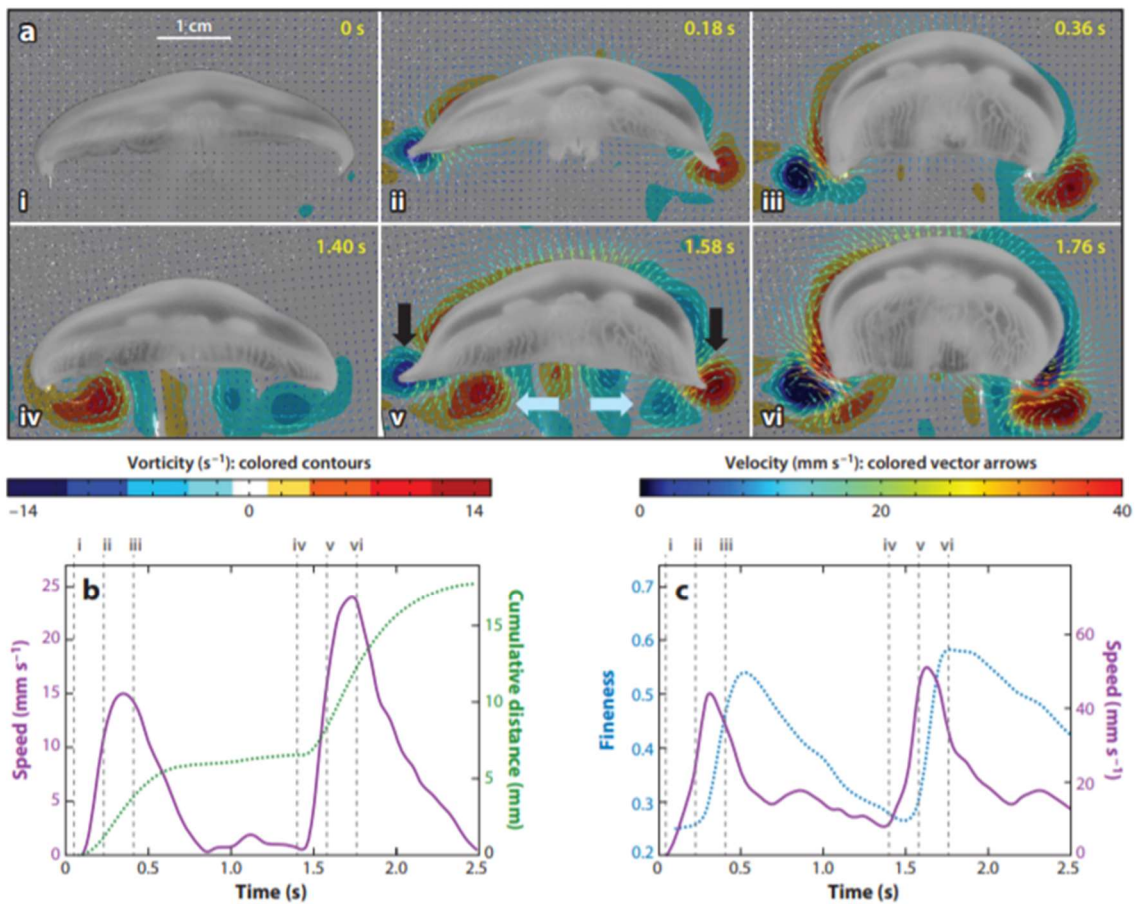


Figura 11 | (a) Le istantanee (i-vi) mostrano la formazione dei vortici di partenza e arresto durante il nuoto della medusa *Aurelia Aurita* mentre parte da ferma (istantanea i). Vengono rappresentati il campo di vorticità (aree colorate) e il campo di velocità (freccie colorate) del fluido. L'istantanea iv è quella relativa alla formazione dei vortici di arresto, indicati con le frecce celesti spesse. Le frecce nere spesse indicano invece i vortici di partenza che si sono spostati sul margine della campana. Nell'istantanea v

¹ La vorticità è un vettore e rappresenta la velocità angolare con cui ruota il fluido. È definito come il rotore del vettore velocità del fluido, secondo la formula: $\omega = \nabla \times V$, dove ω è appunto il vettore vorticità, ∇ è l'operatore Nabla e V è il vettore velocità. [13]

la medusa contrae nuovamente la campana, iniziando un nuovo ciclo. (b) Curve della velocità (linea continua viola) e dello spazio percorso (linea verde tratteggiata) dalla medusa. Le linee verticali tratteggiate indicano l'istantanea della figura (a) così come indicate. (c) Curve del rapporto di snellezza (linea tratteggiata blu) e della velocità (linea continua viola) della medusa. Le linee verticali tratteggiate indicano l'istantanea della figura (a) così come indicate. [1]

Per comprendere come i vortici interagiscono tra loro, sono stati studiati i campi di pressione relativi alla zona dove si trova il bordo della campana. Nel caso di una partenza da fermo, e quindi in assenza dei vortici di arresto, si ha una zona di bassa pressione con un valore di picco di $-0,34 Pa$ (Fig. 12a); nel caso invece di una medusa che sta nuotando, perciò in presenza dei vortici di arresto, si registra sempre una zona di bassa pressione vicino all'estremità dell'ombrello, cioè proprio dove il vortice viene a formarsi. Qui si è misurato un valore di picco della pressione di circa $-0,51 Pa$. I due valori non mostrano una differenza importante (Fig. 12b). [2]

Subito dopo che la medusa inizia a comprimere la campana, si forma una zona di alta pressione sempre vicino al margine. Il valore massimo che può raggiungere la pressione in questa zona però varia molto a seconda dei casi. Se non vi sono vortici di arresto, la pressione massima registrata è di circa $0,32 Pa$ (Fig. 12a); in presenza di vortici di arresto il valore massimo trovato invece è circa $0,74 Pa$ (Fig. 12b). [2]

Di conseguenza, la spinta che si genera nella zona inferiore dell'ombrello è diversa nei due casi. Nel caso di assenza di vortici di arresto e partenza da fermo la spinta massima è pari a circa $0,75 \cdot 10^{-4} N$, mentre se vi sono vortici di arresto il valore massimo della spinta è circa $2 \cdot 10^{-4} N$, quasi tre volte maggiore. [2]

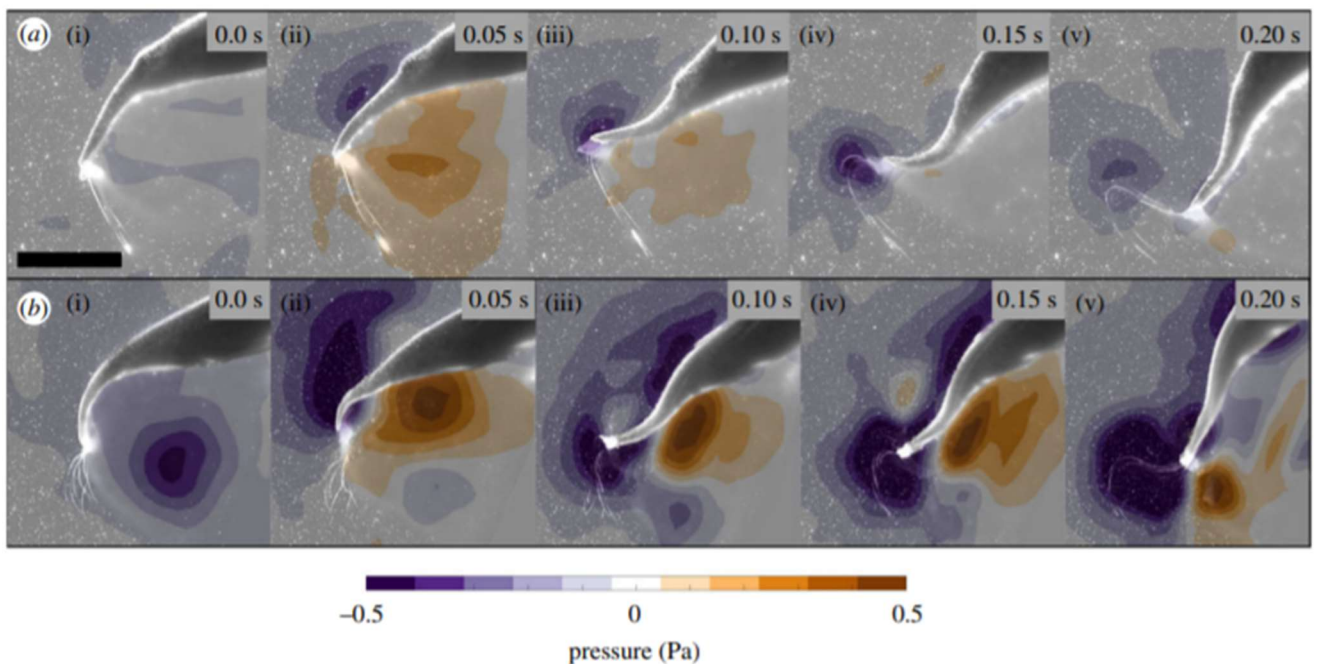


Figura 12 | (a) Istantanee (i-v) del campo di pressione in prossimità del margine della campana di una medusa che parte da ferma. Le zone in blu sono di bassa pressione, quelle in rosso di alta pressione. (b) Istantanee (i-v) del campo di pressione in prossimità del margine della campana di una medusa che si trova in movimento. Le zone in blu sono di bassa pressione, quelle in rosso di alta pressione. [2]

Quando la campana si rilassa, il suo movimento verso l'alto e verso l'esterno rafforza i vortici di arresto e fa in modo che rimangano attaccati alla superficie inferiore dell'ombrello. Mentre la medusa riassume la forma rilassata inoltre, i vortici si spostano verso il centro della campana e continuano a ruotare, dando vita al processo di recupero passivo dell'energia (trattato nel capitolo 2.3). [2]

Nel caso dell'*Aurelia Aurita*, il vortice di partenza è presente sia che la medusa parta da ferma sia che si trovi già in movimento, ma in quest'ultimo caso risulta essere significativamente più forte per la presenza dei vortici di arresto che si sono formato nella pulsata precedente (Fig. 13). [2]

Dall'analisi delle immagini delle particelle si vede che le velocità più elevate e le accelerazioni più intense si misurano nella zona dove i vortici di partenza e arresto vengono a interfacciarsi. Questa zona è situata nella subombrello, in prossimità del margine della campana (Fig. 13). [2]

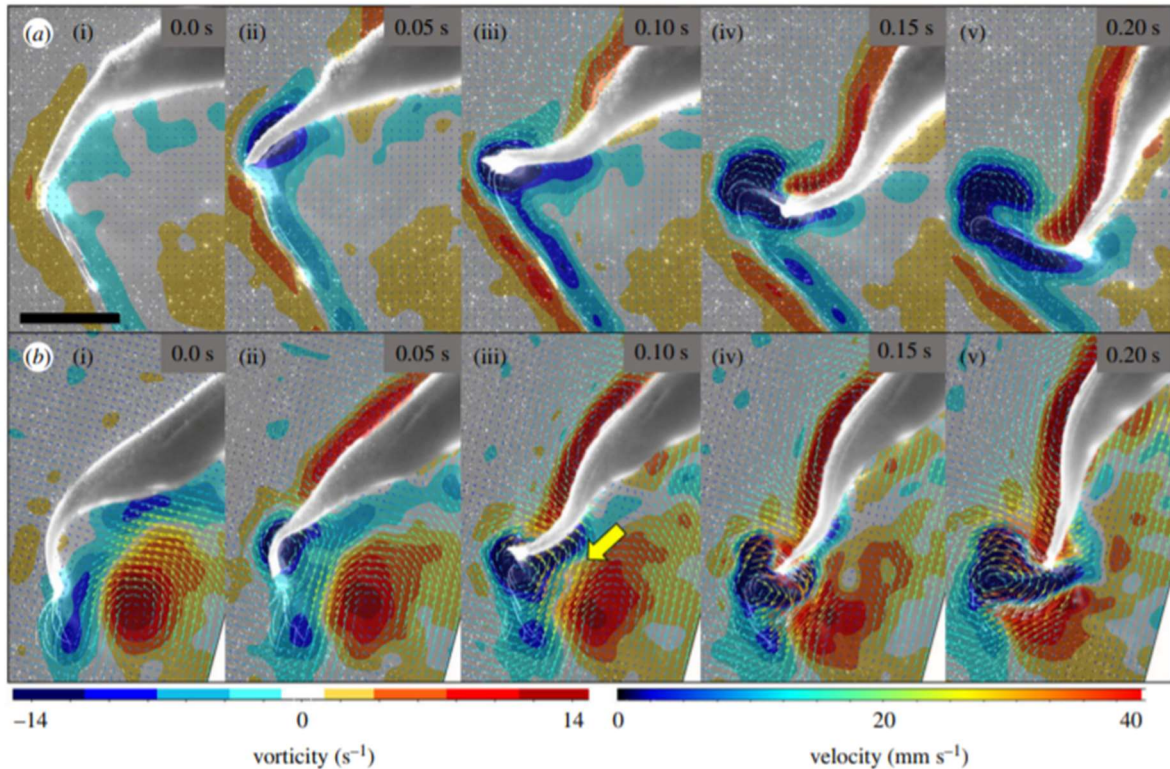


Figura 13 | (a) Istantanee (i-v) della vorticità (aree colorate) e della velocità (freccie colorate) del fluido durante una partenza da riposo della medusa *Aurelia Aurita*. È stata rappresentata metà dell'ombrello in grigio con contorno bianco. (b) Istantanee (i-v) della vorticità (aree colorate) e della velocità (freccie colorate) del fluido durante una pulsata della medusa *Aurelia Aurita* mentre è già in movimento. È stata rappresentata metà dell'ombrello in grigio con contorno bianco. La freccia gialla indica la zona dove il fluido viene fortemente accelerato dall'interazione dei vortici controrotanti. [2]

Dai risultati appena mostrati si deduce che l'effetto parete virtuale contribuisce a migliorare non solo l'efficienza propulsiva generando una spinta aggiuntiva senza spendere energia, ma migliora anche le prestazioni delle meduse, come era già stato dimostrato per i veicoli e gli animali che sfruttano l'effetto parete reale, o effetto suolo; questo è un punto di affinità tra i due effetti. Infatti, l'incremento stimato del 41% della velocità massima grazie all'effetto muro virtuale è molto prossimo, in termini percentuali, all'incremento del 40% di spinta che è stato calcolato su una lamina quando si sfrutta l'effetto suolo. [2]

Quello che però rende uniche le meduse è che esse sono in grado di sfruttare questo effetto senza la necessità di trovarsi in prossimità di un muro vero. Mentre per poter svolgere una trattazione semplificata dell'effetto suolo quello che è immaginario è il vortice controrotante che si trova dall'altra parte della parete posizionato in modo simmetrico prendendo appunto come asse di simmetria la parete, le meduse simulano con il loro nuoto pulsato la presenza di una parete e generano un vero vortice di arresto controrotante. [2]

Alla base dell'effetto parete virtuale c'è la generazione di vortici di partenza e di arresto, e la concomitante formazione di aree ad alta e bassa pressione nella zona periferica della campana. Dall'interazione tra i vortici, quindi, nasce un gradiente di pressione che genera la spinta ricevuta dalla medusa da sotto l'ombrello. [2]

I risultati mostrano che la velocità massima del fluido si ha in corrispondenza della zona dove i vortici di partenza e arresto si trovano a interagire, e che quando non vi sono i vortici di arresto invece la velocità massima del fluido si ha sul dorso della medusa. [2]

L'interazione tra i vortici avviene perché, col progredire del ciclo di nuoto, il vortice di partenza, che si forma sull'apice della campana, si sposta verso il margine dell'ombrello, fino ad arrivare ad interfacciarsi con quello di arresto. Qui la rotazione dei vortici viene trasformata in un getto rettilineo di acqua diretto verso il centro del subombrello e caratterizzato da un'elevata accelerazione. Questo getto viene detto accelerazione all'interfaccia del vortice (VIA - Vortex Interface Acceleration). [2]

Grazie alle particelle che sono state disperse nell'acqua per poter effettuare la DPIV si è notato che gran parte del fluido che forma il getto proviene dal vortice di partenza, perciò, si può dedurre che le meduse siano in grado di sfruttare l'effetto parete virtuale senza dover modificare l'ondulazione dell'ombrello, e quindi nemmeno l'energia utilizzata per la locomozione. [2]

Il getto di fluido diretto verso il centro della faccia concava della campana può anche rappresentare un importante contributo all'alimentazione, in quanto è possibile che il plankton di cui si nutrono le meduse si trovi nella zona dove vengono a interfacciarsi i vortici, e che quindi venga spinto verso il manubrio (la bocca dell'animale, descritto nel capitolo 1). [2]

È stato poi mostrato come lo sfruttamento di questo effetto dipenda essenzialmente dalla condizione in cui si trova la medusa, cioè se si trova a riposo o in movimento, e che la partenza da riposo impossibilita la medusa a beneficiare dell'effetto parete virtuale. Mentre tra i due casi i valori della bassa pressione non mostrano una grande differenza, i valori dell'alta pressione sono piuttosto diversi a seconda del caso. Per questo motivo, se da un lato è facile capire che relazione c'è tra le zone di alta pressione e la formazione dei vortici di arresto, dall'altro non si può dire lo stesso della relazione che unisce la formazione di zone a bassa pressione con la nascita dei vortici di arresto. [2]

Considerando il caso dell'Aurelia Aurita il movimento che fa la campana per nuotare è più o meno lo stesso sia che parta da ferma sia che si trovi già in movimento, ma la velocità con cui si muove nel secondo caso è più alta che nel primo. Questo si traduce ragionevolmente in una diminuzione del costo netto di trasporto (COT, vedasi capitolo 2.3), e quindi in una maggiore efficienza del nuoto grazie all'effetto parete virtuale. [2]

Da un punto di vista ingegneristico, il fatto di essere vincolati alla presenza di una superficie materiale per poter sfruttare i vantaggi propulsivi dell'effetto parete reale ne limita di fatto le applicazioni. La

scoperta che le meduse sfruttano questo effetto senza bisogno di un muro vero amplia gli orizzonti ingegneristici di applicazione veicolare di ispirazione biologica. [2]

Per poter sfruttare questo effetto nel modo corretto è necessario tenere conto del fatto che le meduse per beneficiare della spinta generata dall'effetto parete virtuale non vanno in nessun modo a modificare la natura del loro moto. [2]

La comprensione del ruolo che rivestono i vortici nella locomozione non solo delle meduse, ma anche delle altre specie animali non strettamente acquatiche, può essere molto importante per capire come sfruttare i vortici prodotti dalle superfici propulsive per aumentare il gradiente di pressione lungo le stesse superfici e disporre quindi di maggiore portanza. [2]

2.5 Dinamica di rotazione (Turning Dynamics)

Finora è stato analizzato come le meduse si muovono in avanti, lungo una traiettoria rettilinea (Fig. 14a-c). Un aspetto fondamentale e da tenere in considerazione però è come questi animali riescono a compiere le virate, cioè a cambiare direzione di nuoto (Fig. 14d-f), perché esso riveste un ruolo importante in funzioni come l'alimentazione o la fuga. Diversamente dal nuoto rettilineo in avanti, che prevede flessioni simmetriche della campana, per poter effettuare una rotazione le meduse devono flettere in modo asimmetrico la cupola, generando così movimenti diversi del fluido a seconda del lato considerato. [1]

Inoltre, sebbene sia stato studiato molto più approfonditamente il moto rettilineo rispetto al moto di rotazione negli animali, questi ultimi passano molto tempo a compiere virate. Perciò, ne risulta che anche il moto rotazionale degli animali è uno dei fattori che influenzano il perseguimento di una propulsione efficiente. [9]

Descrivere una traiettoria curva per una medusa significa controllare la cinematica della campana in modo molto preciso. Per effettuare la rotazione la medusa innanzitutto contrae e poi mantiene rigida solo la parte di bordo della campana che si trova all'interno della traiettoria curvilinea che intende percorrere. Grazie a questo movimento succedono due cose: la prima è che l'esemplare fissa un centro di rotazione attorno al quale compiere la virata, la seconda è che i flussi vorticosi vengono spinti dalla zona periferica dell'ombrello verso l'asse di simmetria del corpo, cioè verso il centro. In questo modo, viene inibito il movimento in avanti in direzione rettilinea e viene modificata la direzione del moto. [1]

Al termine di questa fase, la medusa flette verso l'alto il margine diametralmente opposto a quello che mantiene rigido in modo da creare dei vortici che, generando una coppia, spingano questa parte del corpo nella direzione di curvatura. [1]

A seconda che la medusa voglia compiere virate più o meno brusche, l'asimmetria della flessione dell'ombrello è più o meno pronunciata, rispettivamente. [1]

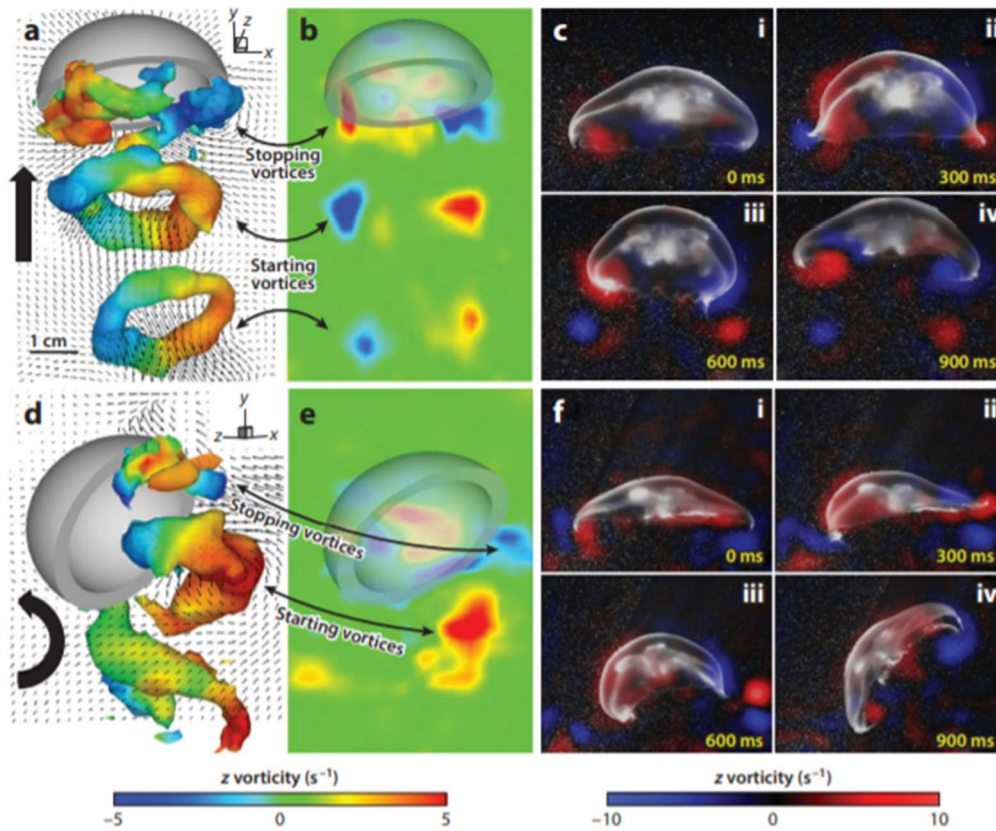


Figura 14 | (a, b, c) Esemplare di medusa *Aurelia Aurita* che si muove in avanti in modo rettilineo. (d, e, f) Esemplare di medusa *Aurelia Aurita* che si muove in avanti in modo rettilineo. (a, d) Campo di vorticità 3D. La campana della medusa corrisponde alla cupola grigia. (b, e) Campo di vorticità 2D. La campana della medusa corrisponde alla cupola grigia traslucida. Nelle figure (a, b, d, e) sono indicati i vortici di partenza e di arresto. (c) Istantanee (i-iv) ottenute con la DPIV del moto in avanti della medusa. (f) Istantanee (i-iv) ottenute con la DPIV del moto di rotazione della medusa. [1]

Con le nuove tecniche di analisi si è potuto comprendere più profondamente gli aspetti che sono alla base della dinamica di rotazione delle meduse: la creazione di zone di alta o bassa pressione più o meno intense durante la rotazione precedente sono causa di rotazioni più o meno rapide durante la virata successiva. [1]

Da considerazioni di meccanica, si può affermare che più la medusa apre l'ombrello, più aumenta il braccio della coppia e maggiore sarà la coppia su cui può contare l'animale per effettuare la rotazione ma, allo stesso modo, aumenterà anche il momento di inerzia del corpo, e quindi la forza che si oppone alla rotazione. Di conseguenza, ad un vantaggio di coppia corrisponde uno svantaggio di inerzia. La soluzione evolutiva che hanno adottato le meduse, illustrata nei *Risultati* all'interno di questo capitolo, le permette di massimizzare la coppia e minimizzare il momento di inerzia. [9]

È stato possibile dedurre che un fattore molto importante per poter compiere rotazioni quanto più rapide ed efficienti possibili è la flessibilità strutturale della medusa. [1]

Infatti, i corpi rigidi, come quelli per esempio di fabbricazione ingegneristica, rispetto a quelli flessibili, possono compiere virate con accelerazioni angolari minori. [9]

Calcolo della velocità della medusa

Le meduse sono state investite con un fascio laser (LaVision) orientato ortogonalmente alle stesse per ottenere le immagini bidimensionali fedeli del profilo del corpo, e anche per far sì che i valori ottenuti su posizione e velocità in 2D fossero precisi. Le meduse considerate per questo calcolo sono solo quelle che nuotavano nella zona illuminata dal laser. Un solo fascio laser era in grado di attraversare il corpo della medusa e di illuminare il fluido circostante al corpo per via della semitrasparenza della campana. [9]

Calcolo del campo di velocità e pressione del fluido

Sono state disperse particelle di vetro di 10 μm nell'acqua e investite con un fascio laser.

Utilizzando la velocimetria digitale a immagini di particelle (DPIV) e un algoritmo che fosse in grado di relazionare le varie immagini (software LaVision) è stato calcolato il campo di velocità del fluido. Successivamente, partendo dai dati sul campo di velocità e integrando le equazioni di Navier-Stokes (vedasi Appendice) su diversi percorsi con un algoritmo scritto in MATLAB (Mathworks, Inc.) è stato determinato il campo di pressione del fluido. La pressione calcolata corrisponde alla media delle pressioni calcolate sui diversi percorsi. [9]

Calcolo della coppia

Per determinare la coppia, innanzitutto si deve trovare la forza. Per fare questo, è stata integrata la pressione lungo la superficie del corpo dove essa agiva. Per effettuare l'integrazione è stato suddiviso il corpo in segmenti di uguale estensione. Essendo bidimensionali i campi di pressione calcolati, si è visto che i risultati ottenuti sono accettabili se solo una piccola parte del flusso si trova fuori dal piano; inoltre, sempre per lo stesso motivo, le forze ottenute sono una forza per unità di profondità $\left(\frac{N}{m}\right)$. [9]

È stato poi necessario determinare i bracci di azione di tali forze. Per tale operazione si è presa la distanza tra il centro di massa dell'esemplare e il punto dello spazio dove la forza era applicata.

Infine, facendo il prodotto vettoriale tra forza e braccio, è stata ottenuta la coppia responsabile della rotazione del corpo. Essendo la forza misurata in $\frac{N}{m}$, l'unità di misura della coppia, quindi, è $\frac{N}{m}m$.

[9]

Calcolo del momento di inerzia e della velocità angolare

Questo studio è stato sviluppato sfruttando immagini bidimensionali, perciò il momento di inerzia utilizzato nei calcoli coincide con il momento di inerzia polare della sezione trasversale del piano di simmetria del corpo della medusa:

$$I = \iint_A r^2 dA$$

Dove I è appunto il momento di inerzia, A è l'area della sezione trasversale, ed r è la distanza dell'elemento infinitesimo di area dA misurata da un asse preso come riferimento. [9]

Il momento di inerzia è stato calcolato tramite un algoritmo in MATLAB (Mathworks, Inc). L'integrale riportato sopra è stato approssimato con la seguente sommatoria:

$$I_p = \sum_{i=1}^N r_i^2 a_i$$

Dove I_p è il momento di inerzia della sezione della campana contenuta in ciascuna immagine scattata con la DPIV, r_i è la distanza dall'asse dell'elemento i -esimo di area infinitesima a_i considerato, e $i = 1 \dots N$ è il numero di elementi in cui è stata suddivisa la sezione. [9]

La coppia data dal momento di inerzia si calcola come:

$$C = \frac{d}{dt}(I\omega) = I \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dI}{dt}$$

Dove ω è la velocità angolare con cui ruota la medusa, e C è la coppia resistente. Dalla formula si vede che la coppia dipende dall'accelerazione angolare $\frac{d\omega}{dt}$ e dalla variazione del momento di inerzia $\frac{dI}{dt}$, le variazioni di momento di inerzia sono causate da variazioni di massa o di distribuzione spaziale della massa. [9]

Per calcolare la velocità angolare delle meduse Aurelia Aurita sono state prese come riferimento le gonadi (quattro strutture ad anello presenti al centro della campana), perché esse durante il non cambiano la loro posizione relativa rispetto al resto del corpo. L'angolo di rotazione delle gonadi è stato determinato utilizzando il software Image J. [9]

Risultati

Con le analisi svolte in questo studio, è stato possibile osservare che le meduse per compiere una rotazione durante un ciclo di nuoto generano le zone di pressione necessarie per compiere il movimento voluto già nel ciclo precedente. [9]

Come già anticipato precedentemente in questo capitolo, le meduse hanno sviluppato un meccanismo per massimizzare la coppia e minimizzare il momento di inerzia (Fig. 15). [9]

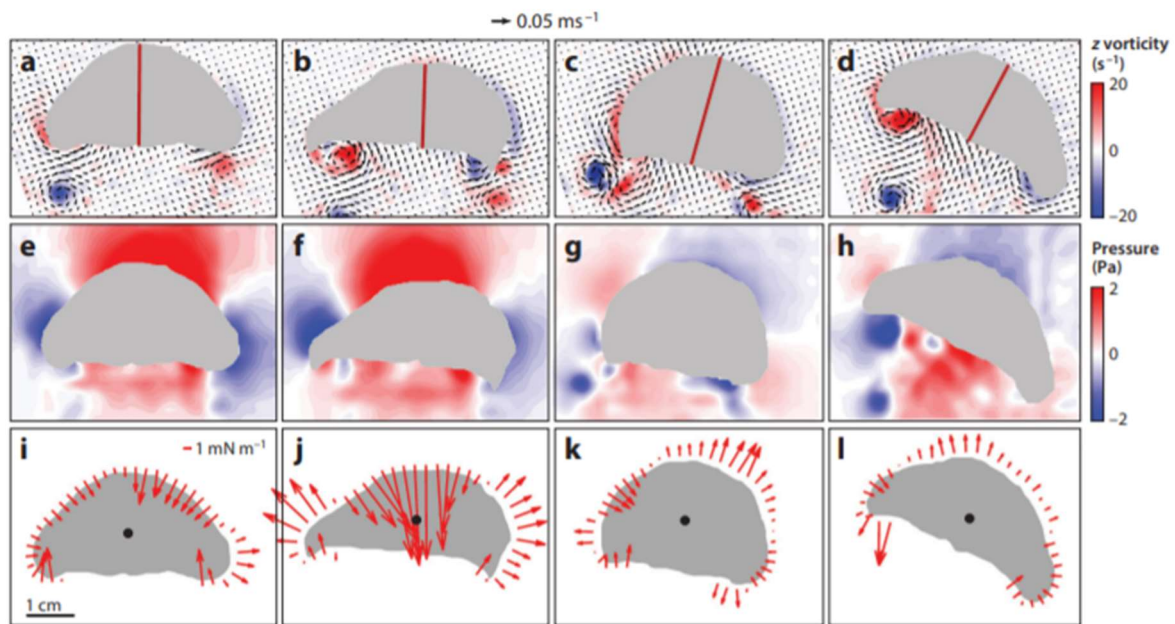


Figura 15 | (a, b, c, d) Campo di vorticità del fluido attorno alla medusa *Aurelia Aurita* mentre effettua una rotazione. La linea rossa indica l'asse di simmetria del corpo, preso come riferimento per il calcolo del momento di inerzia. | (e, f, g, h) Distribuzione della pressione nel fluido attorno alla medusa *Aurelia Aurita* mentre effettua una rotazione. (i, j, k, l) Distribuzione delle forze che il fluido esercita sulla medusa *Aurelia Aurita* mentre effettua una rotazione, dovute all'azione della pressione circostante. Il puntino nero al centro rappresenta il centro di massa dell'animale. La coppia massima, e quindi anche l'accelerazione angolare di picco, si hanno durante la contrazione della campana (j). Durante il rilassamento della campana, la medusa applica una coppia opposta che serve a terminare la rotazione (l). [9]

Poco prima di effettuare la virata, la medusa compie una piccola ma repentina contrazione del margine, che quindi si flette con un'accelerazione elevata. Le accelerazioni stimate sono circa uguali a $1 \frac{m}{s^2}$. Con questo movimento, la medusa, per prima cosa spinge contro l'acqua che si trova dove il margine è stato portato in seguito alla flessione, creando una zona di alta pressione nel fluido essendo quest'ultimo incompressibile, e secondariamente genera una zona di bassa pressione nella zona dove si trovava il margine prima di flettersi (Fig. 15e-h). Questo gradiente di pressione che si è creato tra la superficie superiore e quella inferiore del bordo della campana, unitamente alla contrazione asimmetrica dell'ombrello, genera la coppia che causa la rotazione della medusa (Fig. 15i-l). [9]

Il movimento che effettua la medusa con l'ombrello dopo aver creato le suddette zone di alta e bassa pressione serve a ridurre il momento di inerzia del suo corpo, così da aumentare l'accelerazione con cui compie la virata. [9]

Con questa tecnica la medusa massimizza la coppia prima di effettuare la virata e poi minimizza il momento di inerzia mentre sta compiendo la rotazione. Così facendo la medusa riesce ad aggirare il

contrasto tra il vantaggio di esercitare una coppia elevata e lo svantaggio concomitante di possedere un grande momento di inerzia (Fig. 16). [9]

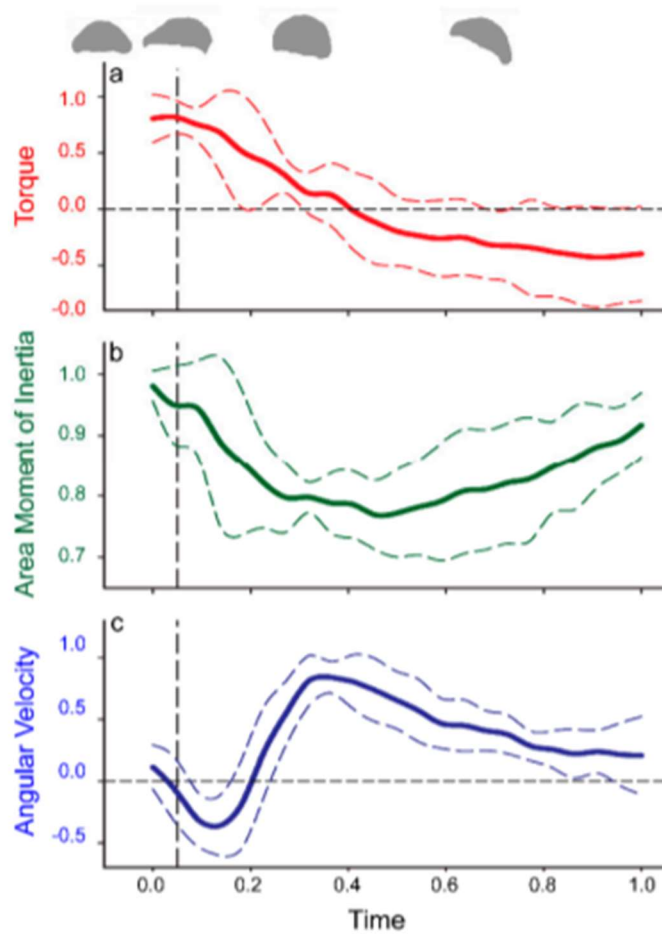


Figura 16 | Andamento nel tempo della coppia (curva rossa), del momento di inerzia (curva verde) e della velocità angolare (curva blu) misurate per la medusa Aurelia Aurita durante una virata. Si vede chiaramente che mentre la medusa si prepara a curvare si ha il massimo della coppia e del momento di inerzia. Inoltre, una volta che la medusa sta curvando si ha il momento di inerzia minimo e la velocità angolare massima. [9]

Il controllo dell'asimmetria del corpo consente alla medusa di effettuare virate più o meno brusche, perché proporzionalmente all'asimmetricità del corpo aumenta o diminuisce il momento di inerzia del corpo. [9]

Un fattore molto importante per poter compiere rotazioni quanto più rapide ed efficienti possibili è la flessibilità strutturale della medusa. Come appena spiegato, la diminuzione del momento di inerzia del corpo porta con sé benefici prestazionali, perché permette di curvare con accelerazioni angolari più elevate, ma anche benefici in termini di efficienza, perché diminuendo l'inerzia diminuisce la spesa energetica. Essendo il movimento dell'ombrello vincolato alla sua flessibilità, ne risulta che una maggiore flessibilità permetta di compiere movimenti più ampi e veloci. [9]

Le considerazioni fatte sono valide per le meduse e più in generale per i pesci di piccola taglia perché, per numeri di Reynolds bassi, gran parte della coppia generata viene dissipata dalla viscosità del fluido, e quindi la forza muscolare disponibile potrebbe non essere sufficiente a compiere virate rapide negli animali più grandi come ad esempio le balene. [9]

Sebbene le meduse sfruttino questa tecnica caratterizzata da piccole ma rapide flessioni corporee per effettuare delle rotazioni, da un punto di vista tecnologico e biomimetico potrebbe essere utile invece utilizzare questo meccanismo per la propulsione rettilinea in avanti, attuando i dovuti aggiustamenti nella generazione del campo di pressione perché quello generato da questi animali non produce una spinta netta in avanti, ma bensì una coppia data dal prodotto tra una forza debole e un braccio elevato. [9]

Infine, l'analisi delle forze che caratterizzano il meccanismo di rotazione delle meduse ma anche delle altre specie acquatiche è utile per comprendere il ruolo rivestito dalla virata nell'evoluzione, nella predazione e nella sopravvivenza degli animali, ma anche per studiare l'interazione che avviene tra i pesci e l'acqua che li circonda. [9]

3. Applicazioni

Lo studio della propulsione delle meduse ha portato allo sviluppo di diverse tecnologie in diversi campi di applicazione, come lo studio delle acque profonde o il monitoraggio delle specie marittime direttamente nel loro habitat naturale senza produrre rumori o vibrazioni che le potessero spaventare. Vi è un'ampia gamma di scelte costruttive, sia in termini di forma dell'ombrello, sia in termini di dimensioni ma anche il tipo di azionamento degli attuatori (meccanico, elettrico, pneumatico, con smart materials, ...). Ogni soluzione costruttiva presenta vantaggi e svantaggi. Di seguito vengono riportati alcuni esempi.

RoboJelly

Questo robot biomimetico trae ispirazione dalla medusa *Aurelia Aurita* per la sua realizzazione. In particolare, è stato studiato e analizzato in modo molto preciso il ciclo di nuoto della medusa fin nei minimi particolari, come per esempio il legame che intercorre tra la riduzione del diametro della campana a seguito della contrazione muscolare sia dei fasci muscolari circolari vicino al bordo della campana che dei fasci radiali che partono dall'apice dell'ombrello. [\[10\]](#)

Si è tenuto conto delle proprietà elastiche della mesoglea della medusa: essa è caratterizzata da un elevato modulo elastico e un'alta resilienza, e questo consente di immagazzinare parecchia energia elastica che viene sfruttata per favorire il ritorno della campana alla forma rilassata. [\[10\]](#)

La campana di Robojelly è stata costruita con una matrice siliconica vulcanizzata al platino, che permette di replicare le proprietà elastiche della mesoglea. Gli otto attuatori necessari per la propulsione sono stati realizzati con un materiale composito chiamato BISMALC – Bio-Inspired Shape Memory Alloy Composite, che ha capacità di deformazione addirittura maggiori dei muscoli delle meduse *Aurelia Aurita*. Questi attuatori sono inglobati nella matrice che forma la campana e disposti radialmente, collegati in serie. Essi convergono all'apice della campana a formare una bocca, dove sono collocati i circuiti elettronici. Per fissare gli attuatori è stata utilizzata una resina acrilica isolante, così che interferisse con i comandi elettrici. Ogni attuatore è costituito da uno strato spesso $0,05\text{ mm}$ e largo $0,6\text{ mm}$ di acciaio per molle e da due set di due fili ciascuno realizzati in Biometal Fiber 100 (un SMA – Shape Memory Alloy), collegati in serie. Ogni filo è lungo 110 mm ed ha un diametro di $100\text{ }\mu\text{m}$. [\[10\]](#)

Per creare l'ombrello è stato utilizzato uno stampo diviso in due parti, una superiore e una inferiore, realizzato con una stampante 3D. La resina siliconica è stata poi versata una volta inseriti opportunamente gli attuatori nello stampo. Nella struttura è presente anche un doppio strato di schiuma di polistirene per garantire il galleggiamento (caratteristica delle meduse *Aurelia Aurita*).

[\[10\]](#)

Il modello realizzato presenta un diametro di 164 mm e una massa pari a circa 242 g . [10]

Per migliorare le prestazioni sia in termini di velocità che potenza consumata, successivamente, la campana è stata segmentata e sono stati aggiunti dei flap passivi collegati al margine. Lo studio ha mostrato che a regime il robot si muove con una velocità, normalizzata rispetto al diametro, di $19\frac{1}{s}$ e consuma $16,74\text{ W}$ ad ogni ciclo di nuoto. L'esemplare di Aurelia Aurita analizzato raggiungeva la velocità normalizzata di $25\frac{1}{s}$. [10]

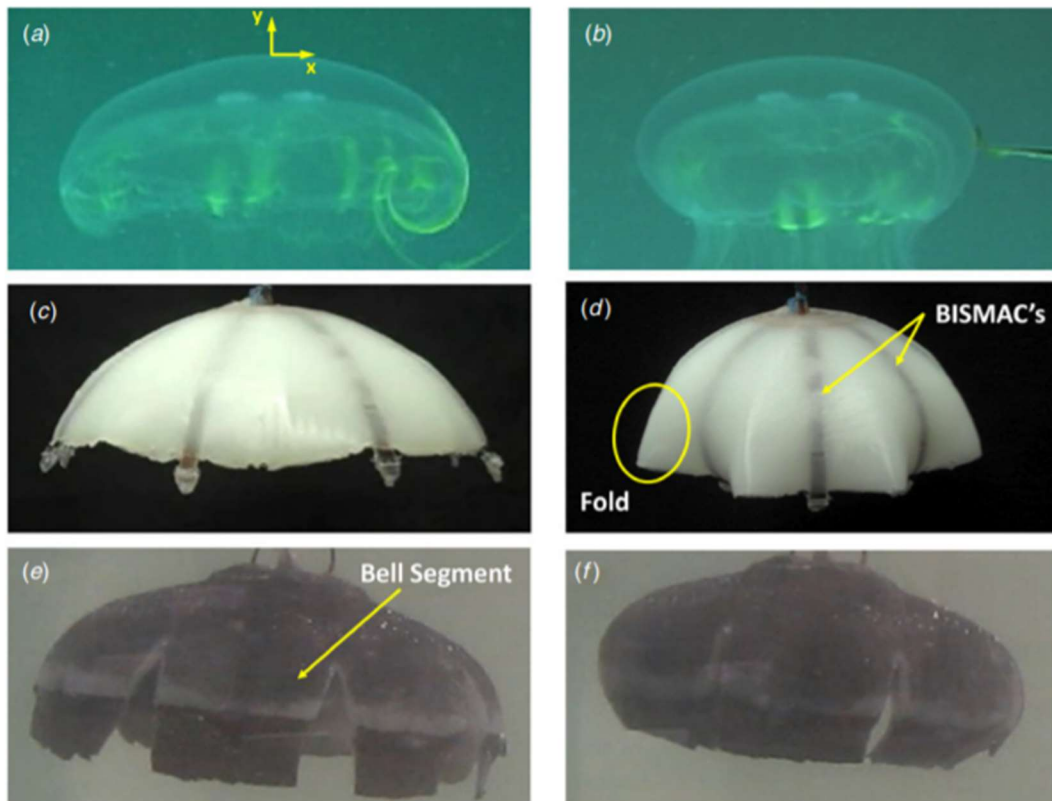


Figura 17 | (a, b) Esemplare di medusa Aurelia Aurita nella forma rilassata (a) e contratta (b). (c, d) Immagini di Robojelly nella forma rilassata (c) e contratta (d) senza segmentazione della campana e flap passivi. In (d) vengono messi in evidenza gli attuatori con le frecce gialle (e, f) Immagini di Robojelly nella forma rilassata (e) e contratta (f) con segmentazione della campana e flap passivi. [10]

KryptoJelly

Il progetto di questo robot è basato sulla medusa Chrysaora Colorata, ma strutturalmente non riprende esattamente tutte le caratteristiche della medusa. Infatti, questo robot ha una struttura divisa in due parti: la parte dove sono situati gli attuatori che è rigida, e una parte elastica che forma la campana. [11]

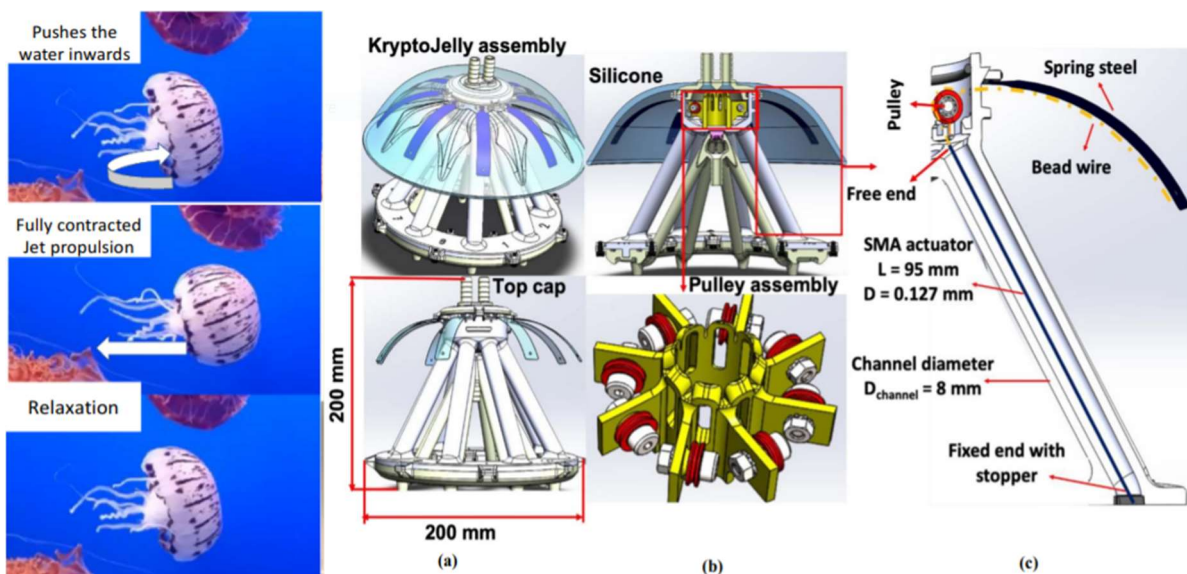
Per quanto riguarda la parte rigida della struttura, mediante l'utilizzo di una stampante 3D sono stati creati otto canali cavi che ospitano gli attuatori formati ognuno da un fascio di quattro fili di SMA –

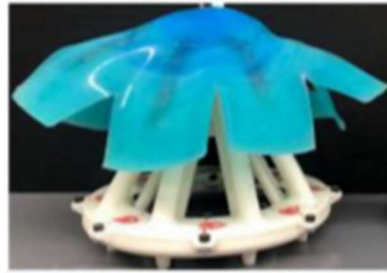
Shape Memory Alloy in lega di NiTi collegati in parallelo. Gli attuatori in SMA sono utilizzati per il loro azionamento simile a quello dei muscoli, per la loro alta densità di potenza per unità di massa e per il loro facile controllo tramite la tensione. Ogni filo è lungo 95 mm ed ha un diametro di $127\text{ }\mu\text{m}$. Gli attuatori vengono azionati elettricamente. All'interno dei canali è stato implementato anche un sistema di raffreddamento perché le prestazioni degli attuatori decadono con l'aumento della temperatura, oltre che un sistema di alimentazione per gli attuatori stessi. [11]

La campana è stata realizzata in silicone vulcanizzato al platino per colaggio dentro uno stampo. Sono state realizzate campane segmentate e intere, al fine di effettuare confronti. Nel caso segmentato, la campana è stata divisa in otto segmenti, ognuno controllato da un attuttore dedicato. Ciascun segmento della campana appoggia su uno strato sottile di acciaio per molle. Nel caso intero, l'intera campana appoggia sugli strati di acciaio per molle. Questi strati sono collegati alla struttura rigida degli attuatori tramite la puleggia centrale, che è l'elemento dove convergono e vengono fissati gli attuatori. Gli attuatori quando vengono azionati trasmettono il moto agli strati di acciaio e, di conseguenza, alla campana siliconica a cui sono incollati. [11]

È stata adottata questa tipologia di soluzione costruttiva perché nella fase di test si è visto che la parte che più spesso andava incontro a rotture erano gli attuatori. In questo modo è stato possibile semplificare la loro manutenzione. [11]

Il robot complessivamente pesa circa 650 g ed ha un diametro di 210 mm . Nel caso di campana segmentata la velocità verticale massima raggiunta vale circa $51\frac{\text{mm}}{\text{s}}$, nel caso di campana intera circa $60\frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Per il nuoto orizzontale, invece, è stata misurata una velocità massima di $45\frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Sia nel nuoto verticale (in avanti) che orizzontale (laterale) la distanza percorsa ad ogni ciclo risulta essere circa $15 - 20\text{ mm}$. [11]





KryptoJelly

Figura 18 | A sinistra un esemplare di *Chrysaora Colorata* nelle varie fasi del ciclo di nuoto. A destra vengono mostrate le varie parti di KryptoJelly. **(a)** Le due parti, rigida (bianco) ed elastica (azzurro) della struttura di KryptoJelly. **(b)** Vista in sezione frontale (sopra) e puleggia centrale dove sono fissati gli attuatori e gli strati di acciaio per molle (sotto). **(c)** Sezione frontale di un attuttore. In basso, una foto di KryptoJelly completamente assemblato. [11]

Fludojelly

FludoJelly è un robot di ispirazione biologica ma per la sua realizzazione non ci si è ispirati ad una medusa in particolare, bensì alla loro propulsione in generale. Inoltre, per gli attuatori sono state di ispirazione anche le strutture gonfiabili presenti in alcuni animali, come per esempio le rane e gli uccelli fregata. [12]

La campana di Fludojelly, come nei casi precedenti, è stata realizzata in silicone tramite colaggio in uno stampo ed è stata divisa in otto segmenti, ciascuno contenente un attuttore disposti radialmente, questa volta però azionati ad aria compressa. [12]

Questo robot è stato sviluppato per il solo moto verticale. Gli attuatori gonfiabili sono stati realizzati in composito pneumatico leggero (SPC – Soft Pneumatic Composite). Ogni attuttore è formato da una camera d'aria e uno strato in acciaio per molle spesso $0,005\text{ mm}$ e largo $0,5\text{ mm}$, che è incollato sull'esterno della camera d'aria e si flette per generare la propulsione. La novità di questo robot è proprio l'utilizzo dell'acciaio per molle come materiale inestensibile (prima si usavano carta e PDMS – polidimetilsilossano) per far sì che avvenga la flessione e non altri tipi di deformazione. Il vantaggio di questa soluzione costruttiva è che essendo un acciaio per molle, appena viene annullato il carico, c'è un ritorno repentino alla forma non deformata. [12]

Fludojelly è azionato da un compressore ad aria a singolo stadio, che gonfiando la struttura applica una forza che flette la campana e attraverso compressioni e rilassamenti genera portanza. Dopo la fase di impulso, breve, c'è una fase di recupero della forma originale di durata significativa. Il duty cycle scelto era del 20% con una frequenza di $0,8\text{ Hz}$. Il fatto che l'azionamento sia ad aria favorisce anche il galleggiamento. Per incanalare l'aria delle camere sono state utilizzate due valvole con solenoidi, alimentate da una tensione continua di 12 V . La sorgente di energia elettrica non è

incorporata nel robot. Le due valvole sono pilotate da dei MOSFET. È stato inserito anche un sensore di pressione per misurare la pressione nelle camere d'aria. [12]

Fludojelly pesa circa 500 g ed ha un diametro di 220 mm. [12]

Questo robot è risultato il più performante in termini di velocità quando trasporta un carico utile (il carico utile è qualsiasi cosa ci interessi trasportare), questo grazie all'azionamento ad aria compressa.

Esso è in grado di percorrere 400 mm in circa 2,5 s e raggiunge una velocità di $160 \frac{mm}{s}$ mentre trasporta un carico pari a 100 g quando viene azionato con una pressione di circa 70 psi. [12]

La minima deflessione degli attuatori registrata vale circa il 45% della loro lunghezza, mentre la massima vale circa il 59%. [12]

Date le elevate prestazioni nel moto verticale, questi robot possono essere utilizzati, ad esempio, per operazioni di salvataggio in mare. [12]

Si è anche provato a integrare tutta la struttura che comprende la sorgente di energia, le valvole e la parte per l'azionamento (compressore, serbatoi per il gas, ...) nel robot. È stato realizzato un robot che nel compresso pesava circa 1,7 kg. Il problema principale è l'autonomia che può garantire il serbatoio. In futuro verranno studiate alcune soluzioni. [12]

Come detto, Fludojelly è in grado solo di muoversi in verticale. Per il moto in tutte le direzioni dovranno essere aggiunte pompe o valvole aggiuntive per controllare separatamente tutti gli attuatori, così da generare una contrazione non simmetrica quando lo si vuole. [12]

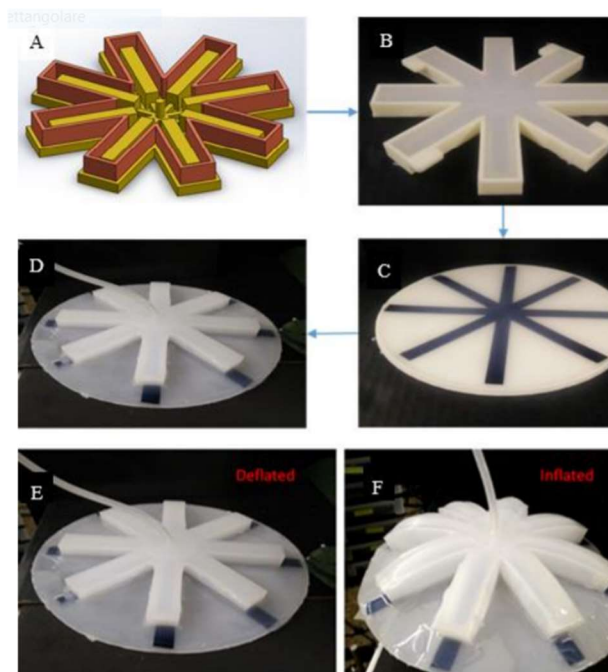


Figura 19 | (A) Immagini CAD dello stampo utilizzato per realizzare Fludojelly. (B) Camere d'aria in silicone realizzate tramite lo stampo. (C) Strati di acciaio per molle inseriti nella matrice siliconica. (D) Unione delle camere d'aria e dello strato inestensibile (con l'acciaio) che formano Fludojelly. (E) Fludojelly nella forma rilassata. (F) Fludojelly nella forma compressa. [12]

4. Conclusioni

L'analisi sulle interazioni fluidodinamiche che interessano le meduse hanno non solo chiarito i principi che si trovano alla base del loro nuoto, ma rappresentano anche possibili spiegazioni di diverse scelte evolutive, come per esempio il metodo di predazione e alimentazione. Più importante, questi studi possono fornire una rilevante ispirazione per le future ricerche ingegneristiche volte alla realizzazione di sistemi propulsivi di ispirazione biologica. Le meduse mostrano che è possibile ottenere una propulsione estremamente efficiente attuando alcuni accorgimenti per sfruttare a proprio favore i flussi vorticosi e rettilinei del fluido ambientale, pur essendo caratterizzate da una produzione di forza muscolare limitata e da una struttura delle superfici di spinta decisamente rudimentale. [1]

Si è mostrato che alla base di questa straordinaria efficienza vi sono la grande flessibilità della campana, oltre che un controllo molto preciso dei movimenti del corpo e un'attenta manipolazione del moto dell'acqua. Tutti questi sono fattori che vanno tenuti in considerazione, perché da un punto di vista ingegneristico possono portare alcune problematiche. [1]

Il grande numero di specie di meduse di dimensioni e forme diverse che fanno affidamento sui principi della cinematica a campana per poter nuotare, suggerisce che lo studio della loro locomozione possa essere utilizzato per creare un'ampia gamma di veicoli biomimetici che pulsano, con funzioni e finalità diverse. Ad esempio, il recupero passivo dell'energia è presente in moltissime meduse, e il fatto che esso dipende principalmente dalla durata della pausa lo rende molto versatile e di facile gestione. [7]

L'ampliamento di questa analisi ad altre specie con corpi e strutture propulsive più complesse, soprattutto per quanto riguarda la dinamica di rotazione, può rappresentare un importante approfondimento nella comprensione delle interazioni tra fluido e animale, e contribuire allo sviluppo di tecnologie biomimetiche. [9]

Le potenziali applicazioni sono innumerevoli e molto diversificate, per esempio si possono realizzare droni sottomarini controllati da remoto che non richiedano la presenza di un equipaggio (UUV – Unmanned Underwater Vehicles) per studiare l'ambiente sottomarino, monitorare le specie animali, le correnti oceaniche, le migrazioni, gli agenti chimici presenti, ma anche per missioni militari o di spionaggio. [10]

È molto importante tenere in considerazione, infatti, che le acque molto profonde sono proibitive per gli esseri umani, e che anche un minimo rumore o una piccola vibrazione possono disturbare l'ambiente che si vuole osservare. Per questo è molto importante realizzare veicoli molto leggeri, che cerchino di ridurre al minimo la presenza di attuatori meccanici che possono generare rumore e vibrazioni nell'ambiente circostante. Da qui nasce l'importanza dello studio delle meduse, perché

questi animali sono piccoli, leggeri e usano pochissima forza muscolare per la propulsione, che ingegneristicamente significa attuatori piccoli e leggeri, quindi risparmio di peso, di costi (materiali e manutenzione) e di ingombri (quindi meno resistenza), poco rumore e basse vibrazioni. [\[11\]](#)

Appendice

Richiamo teorico relativo alle equazioni di Navier-Stokes e di Eulero

Le equazioni di Navier-Stokes e di Eulero fanno parte delle equazioni della meccanica dei fluidi. Consistono in un sistema di tre equazioni, due scalari e una vettoriale, derivate dalle equazioni di bilancio della massa (scalare), della quantità di moto (vettoriale) e dell'energia interna (scalare) e introducendo in queste ultime l'equazione costitutiva per i fluidi Newtoniani-Stokesiani e la legge di Fourier. [13]

Essendo l'acqua un fluido incomprimibile, le equazioni di Navier-Stokes per fluidi incomprimibili sono le seguenti:

$$\begin{cases} \frac{D\rho}{Dt} = 0 \\ \rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla V + \nabla V^T)] + \rho f \\ \rho c \frac{DT}{Dt} = \rho D + \nabla \cdot (k\nabla T) + q_v \end{cases}$$

Dove ρ è la densità del fluido, μ è la viscosità dinamica, c è il calore specifico, k è la conducibilità termica, V è il vettore velocità, p è la pressione, T è la temperatura, f rappresenta le forze di campo per unità di volume, q_v rappresenta e sorgenti volumiche di calore, D è la funzione di dissipazione, il termine ∇V è il tensore gradiente di V e ∇V^T è il suo trasposto, $\frac{D\alpha}{Dt}$ è la derivata lagrangiana² di α , con α grandezza qualsiasi. [13]

Le equazioni di Navier-Stokes per fluidi incomprimibili a proprietà costanti (densità e viscosità costanti) sono le seguenti:

$$\begin{cases} \frac{D\rho}{Dt} = 0 \\ \rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + \rho f \\ \rho c \frac{DT}{Dt} = \rho D + k \nabla^2 T + q_v \end{cases}$$

Dove $\nabla^2 \alpha$ è il laplaciano di α , con α grandezza generica. [13]

² La derivata lagrangiana, o materiale, definita come $\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} + V \cdot \nabla \alpha$ tiene conto di un termine convettivo dato dalla variazione nel tempo di α mentre questa grandezza si sposta nello spazio, e un termine locale $\frac{\partial \alpha}{\partial t}$, detto derivata locale o euleriana, che tiene conto della sola variazione di α nel tempo. [13]

Le equazioni di Eulero, che equivalgono alle equazioni di Navier-Stokes quasi si hanno flussi con numero di Reynolds³ elevato, sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\rho}{Dt} = 0 \\ \rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla p + \rho f \end{array} \right.$$

In questo caso, per via del Re elevato i termini diffusivi cinematici e termici sono trascurabili. [13]

³ Il numero di Reynolds (Re) è una misura del rapporto tra forze di inerzia e forze viscosi. La formula è $Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$, dove U è la velocità di nuoto della medusa, L è la lunghezza caratteristica della medusa (altezza o diametro della campana), ρ è la densità del fluido (in questo caso acqua), μ è la viscosità dinamica del fluido e $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ è la viscosità cinematica del fluido. [13]

Bibliografia

- [1] Costello J.H., Colin S.P., Dabiri J.O., Gemmell B.J., Lucas K.N., & Sutherland K.R., “The Hydrodynamics of Jellyfish Swimming”, in *Annual Review of Marine Science*, 2020
- [2] Gemmell B.J., Du Clos K.T., Colin S.P., Sutherland K.R., Costello J.H., “The most efficient metazoan swimmer creates a ‘virtual wall’ to enhance performance”, in *Proceedings of the Royal Society B.*, 2020
- [3] Gemmell B.J., Colin S.P., Costello J.H. & Dabiri J.O., “Suction-based propulsion as a basis for efficient animal swimming”, in *Nature Communications*, 2015
- [4] Folino-Rorem, Nadine C. "Chapter 9 - Phylum Cnidaria." *Ecology and General Biology*. Fourth ed. Elsevier, 2015. 159-179
- [5] Arai M.N., *A Functional Biology of Scyphozoa*, First ed. Chapman&Hall, 1997
- Gemmell B.J., Colin S.P., Costello J.H. & Dabiri J.O., “Suction-based propulsion as a basis for efficient animal swimming”, in *Nature Communications*, 2015
- [6] Kingsford M.J. & Mooney C.J., “Chapter 12 – The Ecology of Box Jellyfish.” *Jellyfish Blooms*. First ed. Springer Netherlands, 2014. 267-302
- [7] Gemmel B.J., Colin S.P., Costello J.H., “Widespread utilization of passive energy recapture in swimming medusae”, in *Journal of Experimental Biology*, 2018
- [8] Gemmell B.J., Costello J.H, Colin S.P., Stewart C.J., Dabiri J.O., Taftid D., & Priya S., “Passive energy recapture in jellyfish contributes to propulsive advantage over other metazoans”, in *Proceedings of the National Academy of Science*, 2013
- [9] Dabiri J.O., Colin S.P., Gemmell B.J., Lucas K.N., Leftwich M.C., Costello J.H., “Jellyfish and fish solve the challenges of turning dynamics similarly to achieve high maneuverability”, in *Fluids – MDPI*, 2020
- [10] Villanueva A., Smith C., Priya S., “A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators”, in *Bioinspiration & Biomimetics – IOPscience*, 2011
- [11] Almubarak Y., Punnoose M., Xiu Maly N., Hamidi A., Tadesse Y., “KryptoJelly: a jellyfish robot with confined, adjustable pre-stress, and easily replaceable shape memory alloy NiTi actuators”, in *Smart Materials and Structures – IOPscience*, 2020
- [12] Joshi A., Kulkarni A., Tadesse Y., “FludoJelly: Experimental Study on Jellyfish-Like Soft Robot Enabled by Soft Pneumatic Composite (SPC)”, in *Robotics – MDPI*, 2019
- [13] Arina R., *Fondamenti di aerodinamica*, Seconda ed. Levrotto&Bella, 2015