

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale



Politecnico di Torino

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Analoghi terrestri della microgravità per il volo spaziale

Relatrice:
Prof.ssa Stefania Scarsoglio

Candidato:
Mattia Mocci

Co-relatore:
Ing. Matteo Fois

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Indice

1	Introduzione	1
2	Cenni di fisiologia umana	3
2.1	Sistema cardiovascolare	3
2.1.1	Fisiologia del sistema cardiovascolare a terra	3
2.1.2	Effetti della microgravità sul sistema circolatorio	5
2.2	L'apparato locomotore	8
2.2.1	Fisiologia dell'apparato locomotore a terra	8
2.2.2	Effetti della microgravità sull'apparato locomotore	9
2.3	L'apparato vestibolare	11
2.3.1	La percezione terrestre dell'equilibrio	11
2.3.2	La percezione dell'equilibrio nello spazio	13
3	Analoghi terrestri della microgravità	15
3.1	Long Duration Bed rest	16
3.2	Immersioni	19
3.3	Unilateral Lower Limb Suspension	22
3.4	Volo parabolico	24
4	Sviluppo di contromisure	29
4.1	Esercizio fisico	30
4.2	Assunzione di soluzioni saline e farmaci	32
4.3	Lower Body Negative Pressure	32
4.4	Gravity Suits	34
4.5	Gravità artificiale	35
5	Conclusioni	39
	Bibliografia	41

Capitolo 1

Introduzione

Lo studio degli effetti della microgravità sul corpo umano e di possibili misure per contrastarli è un argomento che ha avuto un ruolo centrale nella ricerca scientifica sin dagli albori dell'esplorazione spaziale [1]. In tale senso l'uso di analoghi terrestri in grado di riprodurre le condizioni di microgravità vissute dagli astronauti ha permesso uno studio approfondito su soggetti umani a un costo notevolmente inferiore e tempi decisamente più brevi rispetto a quanto si otterrebbe in orbita [2].

Da un punto di vista evolutivo gli apparati e i sistemi degli organismi terrestri si sono sviluppati tenendo conto dell'attrazione gravitazionale che ci spinge a terra. Questo ha portato a una stretta correlazione tra le condizioni fisiche in cui il nostro corpo vive e il suo stesso funzionamento. Si potrebbe dire in tal senso che l'organismo è dotato di meccanismi che funzionano non solo *nonostante* le forze gravitazionali, ma anche *grazie* alle stesse [1].

Con microgravità si vuole intendere un'assenza di accelerazione gravitazionale, non di assenza effettiva di gravità. In tal senso si può usare anche il termine *zero-g* nel senso che la risultante delle accelerazioni gravito-inerziali del corpo in esame è nulla [2].

In un periodo in cui si contempla una nuova concezione dei viaggi spaziali che prevede lunghi periodi di permanenza nello spazio per raggiungere altri pianeti (per esempio, un viaggio dalla Terra a Marte, in cui la gravità è pari ai $\frac{3}{8}$ di quella terrestre [2], durerebbe circa 9 mesi [1]), è sicuramente di notevole interesse indagare sugli effetti che questo cambiamento avrà sui futuri astronauti che compiranno tali viaggi, sia nel corso del viaggio stesso, sia al rientro sulla Terra.

Lo scopo di questa tesi è quindi quello di esplorare le soluzioni che sono state ideate per ricreare le condizioni del volo spaziale, analizzando il loro funzionamento e i fenomeni che permettono di studiare. Tra queste, ci si focalizzerà in particolare su Head-Down Tilt, immersioni (nelle versioni *dry* e *wet*), Unilateral Lower Limb Suspension e volo parabolico.

Inoltre, ci si focalizzerà brevemente su alcune contromisure che i sopracitati analoghi hanno permesso di sviluppare.

Capitolo 2

Cenni di fisiologia umana

Prima di procedere con l'analisi di ogni analogo terrestre è opportuno soffermarsi sul funzionamento dei sistemi e degli apparati più condizionati dal volo spaziale e sui quali la ricerca si è focalizzata maggiormente negli ultimi decenni, vale a dire il sistema cardiovascolare, quello locomotore e l'apparato vestibolare. Sarà data per ognuno di essi una breve descrizione funzionale accompagnata dagli effetti più comunemente individuati dagli astronauti coinvolti in missioni spaziali. È altrettanto doveroso notare che le conseguenze citate non coprono un gran numero di sistemi che per questioni di sintesi non è stato possibile includere nel testo, tra i quali il sistema respiratorio.

Le informazioni di seguito presentate sono state in gran parte reperite dai testi di anatomia e fisiologia [3], [4] e [5].

2.1 Sistema cardiovascolare

2.1.1 Fisiologia del sistema cardiovascolare a terra

Il sistema cardiovascolare è un complesso sistema di trasporto: in particolare, si occupa della distribuzione di sostanze nutritive e dello smaltimento degli scarti per tutti i tessuti del corpo. Inoltre, è responsabile del trasporto di ormoni, ha un ruolo chiave in diversi meccanismi omeostatici quali il mantenimento della temperatura corporea e ha anche il compito di trasportare sostanze fondamentali per la difesa dell'organismo da agenti patogeni.

La struttura del sistema cardiovascolare è formata da una serie di elementi principali che possono essere visti da un punto di vista ingegneristico come:

- Una pompa meccanica autoalimentata elettricamente (il cuore)
- Un'infrastruttura che forma un loop chiuso (costituito dai vasi sanguigni)
- Un mezzo fluido che scorre al suo interno (il sangue)

Un complesso sistema di meccanismi di feedback (tra cui si possono ricordare i barorecettori) fornisce inoltre informazioni circa lo stato dell'organismo e premette il mantenimento del suo equilibrio.

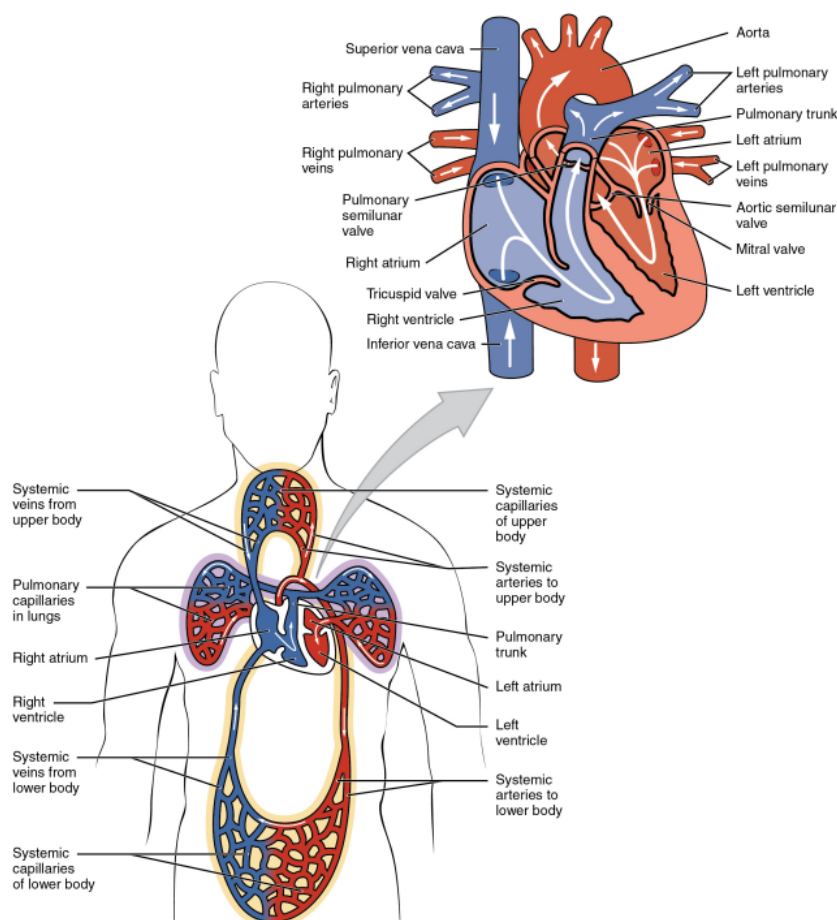


Figura 2.1: Visualizzazione del circuito cardiaco e dettaglio della struttura del cuore [5].

Partendo dal cuore, si tratta di un organo formato da quattro camere, visibili in fig. 2.1: due atri e due ventricoli. Esse si comportano come due pompe separate tra loro: quella destra si occupa della circolazione polmonare, grazie alla quale il sangue cede CO_2 e acquisisce O_2 , mentre quella sinistra gestisce l'afflusso del sangue al resto del corpo (che prende il nome di circolazione sistemica).

Il flusso sanguigno all'interno del cuore può andare solo in una direzione: questo è assicurato da apposite valvole che separano gli atri dai ventricoli. Gli eventi che si succedono tra un battito e un altro formano il cosiddetto ciclo cardiaco:

1. Durante la diastole, si ha un rilassamento dei muscoli cardiaci e il riempimento delle camere di sangue;
2. In seguito si ha la sistole, che consiste in una contrazione che spinge il sangue fuori dalle camere.

Il processo è regolato mediante segnali elettrici che si susseguono ritmicamente. La pressione arteriosa oscilla nelle due fasi tra gli 80 e i 120 mmHg.

Il circuito cardiaco segue un percorso che si può apprezzare in fig. 2.1. Esso inizia dal ventricolo sinistro, il quale spinge il sangue nell'aorta, un vaso sanguigno dotato di

pareti elastiche che, espandendosi e contraendosi, permette un flusso costante nonostante il funzionamento intermittente del cuore. Il sangue viene poi convogliato in vasi via via più piccoli in diametro e dotati di pareti sempre più sottili fino alle arteriole. Queste presentano un aumento repentino della resistenza offerta al passaggio del sangue, e a questo si associa un altrettanto rapido calo di pressione. Dalle arteriole si dirama un grande numero di capillari, che nonostante le loro esigue dimensioni presentano una sezione totale molto estesa e la maggior parte della resistenza idraulica. Considerando la quantità di sangue costante, per il principio di conservazione della portata a questo fatto si associa una velocità molto bassa, utile per lo scambio di sostanze nutritive e/o di scarto con le cellule circostanti attraverso sottili pareti. Inizia a questo punto il percorso di ritorno al cuore passante per le vene, che si fanno via via più grosse e in cui si immagazzina la maggior parte del volume del sangue.

Infine, per quanto riguarda il sangue stesso, esso è il mezzo grazie al quale si trasportano tutte le sostanze di cui ha bisogno l'organismo. Si tratta tecnicamente di un tessuto connettivo ed è composto da:

- una parte corpuscolare, a sua volta composta da globuli rossi, globuli bianchi e piastrine
- una parte extracellulare chiamata plasma, composta prevalentemente da acqua, nella quale le cellule sono sospese e si muovono

Concentrandosi sui globuli rossi (o eritrociti), i più rilevanti agli scopi di questa trattazione, hanno il compito di trasportare l'ossigeno dai polmoni al resto del corpo e l'anidride carbonica nel senso opposto. La loro produzione avviene nel midollo rosso delle ossa ed è innescata da un ormone chiamato eritropoietina (o EPO), prodotto nei reni.

2.1.2 Effetti della microgravità sul sistema circolatorio

Il funzionamento appena descritto del sistema cardiovascolare ha delle notevoli differenze tra quanto avviene sulla Terra e ciò che si osserva nel corso delle missioni nello spazio, come è stato ampiamente descritto in [1], di seguito usato come riferimento.

Si stima che l'essere umano passi circa il 70% della propria giornata in piedi. In tali condizioni, si nota una differenza di pressione tra il cuore e i vasi sanguigni dei piedi che raggiunge, come si può vedere in fig. 2.2, i 90 mmHg: questo avviene come conseguenza della pressione idrostatica. A questo aumento di pressione si associa un progressivo ristagno del sangue nei vasi della parte inferiore del corpo, specie nelle vene, dotate di pareti meno rigide che tendono a espandersi. Nel momento in cui si inizia a camminare, la contrazione dei muscoli che circondano le vene (nelle quali il sangue deve risalire contrastando la gravità) forza il movimento del sangue, che non ricade verso il basso grazie alla presenza di valvole a senso unico: in questo modo la pressione scende notevolmente.

Nel momento in cui si esce dalla morsa della gravità alcuni dei meccanismi di regolazione sviluppatasi sulla terra per contrastare il carico da essa comportato diventano ridondanti. Questo fatto comporta quello che si definisce decondizionamento e pone serie

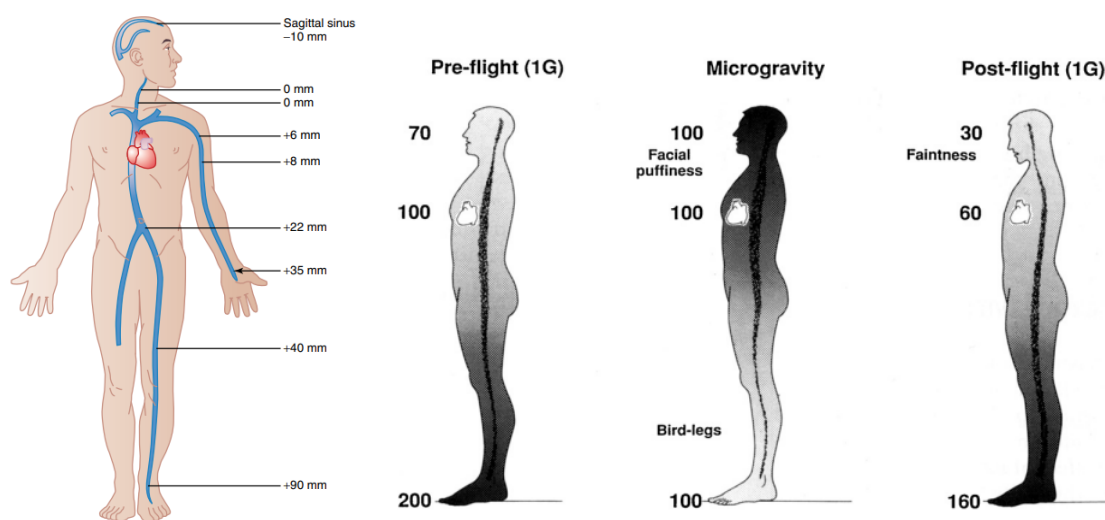


Figura 2.2: (sx) Distribuzione della pressione sanguigna durante la posizione eretta [4]. (dx) Andamento nelle varie fasi del volo spaziale della distribuzione del sangue nel corpo [6]. Si notino, oltre agli effetti acuti, anche le conseguenze a lungo termine che compaiono al rientro sulla Terra.

problematiche legate al rientro degli astronauti sulla Terra, dove quegli stessi meccanismi, ormai non più allenati a sopportare sforzi costanti, sono nuovamente richiesti.

Trascurando gli eventuali effetti dello stress causato dal liftoff o di farmaci assunti prima della partenza, che potrebbero avere delle conseguenze nelle condizioni registrate successivamente, il cambiamento principale che riguarda il sistema circolatorio sin dalle prime ore di permanenza nello spazio è una modifica della distribuzione dei fluidi all'interno del corpo¹. Le successive fasi che interessano il sistema circolatorio sono mostrate in fig. 2.2. Mancando la gravità che tende a portare una maggiore quantità di sangue nella parte inferiore del corpo, questo si distribuisce in modo uniforme. Gli astronauti percepiscono l'afflusso di sangue verso l'alto tramite sintomi paragonabili a quelli che si provano durante un raffreddore: sensazione di "pienezza" nella testa (fenomeno denominato *puffy head*) e nella cavità nasale, inibizione del senso del gusto e dell'olfatto e gonfiore intorno agli occhi e nel collo. Le gambe per contrasto, avendo perso fino a 2 litri di sangue, vedono la propria circonferenza ridotta (si parla in tal senso di *chicken legs*).

la redistribuzione del volume di sangue alla parte superiore del corpo porta le gambe a subire una pressione inferiore rispetto a quella misurata a terra durante la postura eretta, mentre l'effetto opposto si verifica per quanto riguarda torso e testa. Numerose misurazioni sono state effettuate in particolare sulla pressione media arteriosa², ma hanno mostrato una generale inconsistenza: questo ha portato a ipotizzare che le fluttuazioni misurate della pressione mettono in luce una generale instabilità del sistema circolatorio nelle prime fasi del volo spaziale, in cui il corpo cerca un nuovo equilibrio. Si stima [7] che questo equilibrio venga raggiunto in un tempo relativamente breve, intorno alle 24/48 ore. Per quanto riguarda la pressione venosa centrale³, è stato notato un incremento

¹problema noto in letteratura come fluid shift

²MAP, Mean Arterial Pressure, media della pressione nel corso di un ciclo

³CVP, Central Venous Pressure, misurata nella vena cava

nelle prime fasi di volo seguito da un sorprendente abbassamento al di sotto dei valori terrestri. Quest'ultimo dato, come verrà esposto in seguito, non è replicato in tutti gli analoghi terrestri della microgravità e per questo resta un aspetto tutt'ora da approfondire ulteriormente per accrescerne la comprensione.

Tra gli altri cambiamenti degni di nota, si è misurato un aumento della gittata sistolica, vale a dire del sangue spostato dopo ogni contrazione, che ha come conseguenza una diminuzione dei battiti cardiaci richiesti per spostare la stessa quantità di sangue nel tempo.

Non bisogna tuttavia sottovalutare gli effetti a lungo termine della permanenza nello spazio, che si verificano su scale temporali nell'ordine di più giorni/settimane. Il principale di essi è stato confermato essere una riduzione del volume sanguigno, con riduzioni del plasma fino al 20%, causato dal fatto che i barorecettori situati nel seno carotideo interpretano l'aumento dei fluidi nel torace come un eccesso da smaltire, in linea con quanto avverrebbe sulla Terra in presenza di sintomi simili. Questo fenomeno è stato confermato da misurazioni che confermano la diminuzione della gittata cardiaca. Benché inizialmente si ipotizzasse che la diminuzione dei fluidi corporei fosse collegata a un minore assorbimento di acqua nei reni associato a sua volta a una maggiore diuresi, vari esperimenti hanno confutato quest'idea, che è stata sostituita con l'assunzione che la diminuzione del plasma del sangue sia collegata a una diversa distribuzione dell'acqua nell'organismo, che non privilegia le vie sanguigne.

Un fenomeno particolarmente degno di nota e pericoloso per la salute degli astronauti è l'atrofia cardiaca legata all'ipovolemia. Nello specifico, è stato notato [7] in soggetti interessati da riduzioni del volume sanguigno un vero e proprio rimodellamento del cuore, che interessa le dimensioni delle camere e la massa del muscolo cardiaco.

A livello sanguigno è inoltre importante il cambiamento del volume totale degli eritrociti, che conta una riduzione che ha raggiunto valori dell'1% giornaliero in astronauti a bordo della ISS. Questo fenomeno è stato collegato a una produzione minore di EPO, che porta a una minore attività eritropoietica nel midollo osseo.

Un fenomeno di grande importanza, legato al decondizionamento cardiovascolare ed osservato in astronauti di rientro a terra in seguito a lunghe esposizioni ad ambienti privi di attrazione gravitazionale, è noto come intolleranza ortostatica ed è l'incapacità da parte del sistema circolatorio di mantenere costante l'afflusso di sangue al cervello [8]. Tra i sintomi più evidenti si nota una certa difficoltà a restare autonomamente in posizione eretta e camminare, una sensazione generale di stordimento con capogiri e un alto numero di battiti cardiaci, che portano a una tendenza a perdere i sensi una volta alzatisi in piedi. Le origini di questo fenomeno sono poco chiare; sono state teorizzate influenze da parte dell'ipovolemia, la quale come già visto causa delle modifiche nella struttura cardiaca che a loro volta portano a riduzioni della gittata cardiaca [7], ma anche dalla minore resistenza dei vasi sanguigni della parte inferiore del corpo che acuisce il ristagno di sangue negli arti inferiori. Anche i barorecettori a loro volta diventano meno responsivi e inefficaci nel segnalare a dovere al cervello eventuali modifiche della pressione sanguigna, con effetti negativi sulla regolazione autonoma della circolazione.

2.2 L'apparato locomotore

2.2.1 Fisiologia dell'apparato locomotore a terra

L'apparato locomotore è l'apparato che permette il movimento del corpo. Si tratta dell'unione di due sistemi: quello scheletrico (parte passiva) e quello muscolare (parte attiva).

I ruoli del sistema scheletrico sono molteplici: in primo luogo forma l'impalcatura che supporta il corpo, proteggendo allo stesso tempo gli organi interni, in particolare la gabbia toracica protegge cuore e polmoni, il cranio protegge il cervello e la spina dorsale circonda il midollo spinale; ha anche un ruolo nel processo di ematopoiesi, vale a dire la produzione delle cellule sanguigne, e nell'immagazzinamento di sostanze quali calcio e fosforo. I tessuti che formano il sistema scheletrico sono due: il tessuto osseo è un tessuto connettivo denso e duro e forma la struttura delle ossa, mentre il tessuto cartilagineo si trova nelle giunzioni e grazie alla sua flessibilità permette di ridurre l'attrito durante il movimento.

Lo scheletro di un adulto è composto da 206 ossa, molto diverse tra loro in forma e funzione. Nasce da qui la necessità di classificare le ossa in lunghe, corte, piatte, sesamoidi e irregolari.

La struttura delle ossa può essere visualizzata nel modo migliore prendendo in considerazione l'osso lungo presentato in fig. 2.3. Esso ha due parti ben riconoscibili esternamente: una struttura tubolare detta diafisi e delle estremità arrotondate dette epifisi. Internamente, al centro della diafisi si ha la cavità midollare, contenente il midollo giallo che custodisce riserve lipidiche e circondata dal midollo rosso, inserito in un tessuto spugnoso che viene attraversato da un gran numero di vasi sanguigni e nervi. L'esterno dell'osso è invece ricoperto da uno strato duro detto periostio.

Le cellule che compongono il sistema muscolare sono specializzate nella conversione di energia chimica, proveniente dall'ATP (adenosina trifosfato), in energia meccanica sotto forma di lavoro, con produzione contemporanea di calore (che può essere sfruttata a sua volta dal corpo). Il lavoro prodotto può essere impiegato in una lunga serie di attività e per questo motivo il tessuto muscolare si è evoluto in diverse forme, ognuna con il proprio ruolo:

- i muscoli striati scheletrici sono fissati alle ossa e permettono il movimento volontario, cioè quello controllato dal sistema nervoso centrale;
- i muscoli lisci sono invece responsabili delle funzioni involontarie e si possono trovare nelle pareti degli organi cavi (canale alimentare, vie respiratorie, vasi sanguigni e apparato uro-genitale) oppure nella pelle dove sono collegati ai peli;
- il muscolo cardiaco infine si classifica a parte in quanto, nonostante sia un muscolo involontario dotato di un proprio pacemaker integrato, è striato.

Di seguito si analizzeranno solo i muscoli striati scheletrici, poiché sono quelli più colpiti dalle alterazioni comportate da una prolungata assenza di gravità.

Se si analizza un muscolo di questo tipo si noterà che è formato da una serie di fibre unite tra loro a formare un fascio. Ciascuna fibra a sua volta è un raggruppamento di elementi chiamati miofibrille. Prendendo una delle unità ripetitive che formano una miofibrilla (i sarcomeri), si possono notare delle bande di diversi colori, visibili in fig. 2.4. I

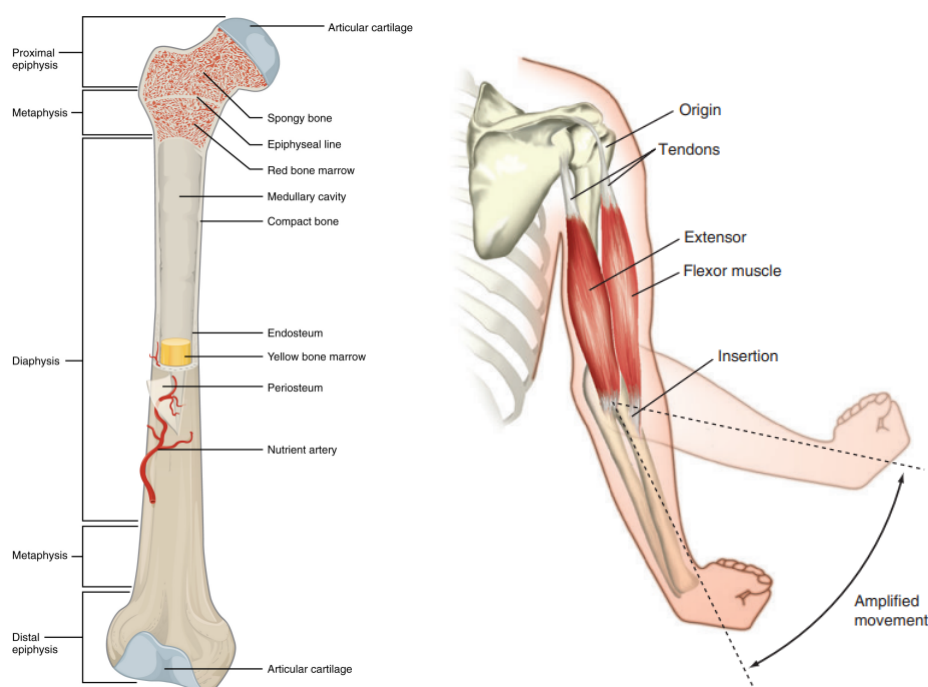


Figura 2.3: (sx) struttura interna ed esterna di un osso lungo [5]. (dx) Da un punto di vista meccanico le ossa agiscono da leve e fungono da punti di attacco per la muscolatura, mentre le giunzioni tra le ossa, a seconda della loro tipologia, restringono il numero di gradi di libertà per il movimento [3].

colori derivano dalla sovrapposizione di filamenti sottili di actina e spessi di miosina, il cui movimento reciproco è responsabile della contrazione del muscolo. Ognuno dei raggruppamenti in cui si può suddividere il muscolo è diviso da quelli adiacenti da uno strato di tessuto connettivo. Questi strati, che si raggruppano nella parte finale del muscolo, vanno a formare il tendine, un elemento di colore chiaro che collega il muscolo allo scheletro.

La proprietà principale delle cellule muscolari è la loro elasticità: ciò significa che possono estendersi notevolmente in una direzione (anche di svariati centimetri) per poi contrarsi e tornare alle dimensioni iniziali. Il movimento di una parte del corpo è il risultato dell'azione coordinata di più muscoli: l'agonista è il muscolo primario dedicato a quel dato movimento; la sua contrazione è aiutata da sinergisti e bilanciata da antagonisti, che si rilassano e servono a rendere controllabile il movimento.

2.2.2 Effetti della microgravità sull'apparato locomotore

A terra, l'apparato locomotore ha il compito di reggere il corpo sottoposto all'azione della forza gravitazionale, contribuendo al mantenimento della postura e dell'equilibrio, anche attraverso piccoli aggiustamenti. Ricopre una notevole importanza il monitoraggio delle funzioni locomotrici nello spazio anche in vista dei compiti che dovranno essere svolti nel futuro dagli astronauti nel corso delle missioni, il cui successo sarà legato alla capacità di svolgere ruoli che richiedono movimenti efficienti [9].

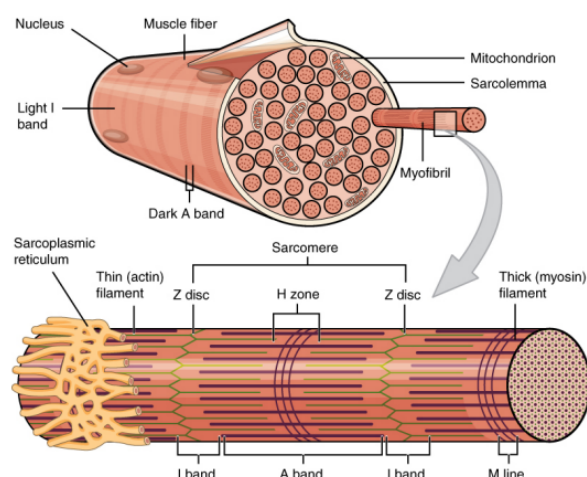


Figura 2.4: Le miofibrille sono lunghi filamenti dotati di più nuclei e formati da una serie di unità ripetitive di diversi colori, ognuna delle quali è contraddistinta da una lettera [5].

La conseguenza più nota del soggiorno spaziale sull'apparato locomotore è sicuramente una riduzione in massa dei tessuti di entrambi i sistemi che lo compongono su scale temporali medio-lunghe. Le implicazioni di queste condizioni sono al momento poco note in quanto si tratta di tessuti il cui adattamento richiede fino a sei mesi prima di manifestare effetti che possono influenzare l'esito di una missione e su cui potrebbe avere influenza l'esposizione alle radiazioni a cui sono generalmente soggetti gli astronauti [9].

L'atrofia muscolare ha notevoli conseguenze non solo nella forza sviluppata dal muscolo, ma anche nella velocità di estensione e nella resistenza a sforzi prolungati [10]. Sono state misurate riduzioni nel volume del tessuto muscolare di tricipiti e quadricipiti del 6% dopo 8 giorni e del 15-16% dopo 16 giorni [11].

Nelle ossa, la rimozione dei carichi porta nel tempo a una progressiva perdita di calcio [11], il cui smaltimento per mezzo delle vie urinarie aumenta del 60-70%. A questo fenomeno si associa una progressiva riduzione della densità minerale ossea, la quale è stata comparata all'osteoporosi comunemente osservata sulla Terra e causata dalla progressiva riduzione degli stimoli meccanici normalmente agenti sullo scheletro [12]. La conseguenza più evidente di questo cambio nell'architettura del tessuto osseo è un maggiore rischio di incorrere in fratture [13]. È interessante notare che i cambiamenti osservati nella cosiddetta Bone Mineral Density (BMD) non sono uniformi non solo tra le ossa dell'intero scheletro, ma anche all'interno di uno stesso osso [12]: mentre si stima una perdita mensile media dello 0.3-0.4% della BMD, le ossa lunghe degli arti inferiori, in particolare la tibia, mostrano riduzioni che si avvicinano all'1%. In generale, tuttavia, è stata riscontrata una grossa variazione dei risultati ottenuti all'interno dei gruppi di astronauti considerati, segno del fatto che la riduzione della BMD non solo non è lineare col tempo, ma è pesantemente influenzata dallo stile di vita e dalle condizioni fisiche di partenza [12]. Un grosso problema dell'osteoporosi da disuso è la mancanza attuale di metodi efficaci per contrastarla [13], e questo fatto ha un peso importante nella ricerca di contromisure adeguate.

Inoltre, un sintomo spesso riscontrato dagli astronauti nel corso delle missioni è il mal di schiena, segno della diversa distribuzione dei carichi sulla spina dorsale. È stata osser-

vata nel corso di studi in merito [14] una maggiore predisposizione negli astronauti alla comparsa di ernie del disco, causate dal fatto che nello spazio la colonna vertebrale tende a essere allungata di 5-6 cm [15].

L'attenzione della ricerca intorno a questo argomento presenta tuttora notevoli prospettive, come il collegamento tra il decondizionamento osseo e muscolare e lo spostamento di fluidi già accennato in precedenza oppure l'influenza della microgravità sui tessuti di cartilagine e tendini [9]. Questi ultimi hanno in comune scarse capacità di rigenerazione, rendendo di fondamentale importanza lo sviluppo di adeguate prevenzioni contro l'atrofia cartilaginea e il degrado dei tessuti connettivi che formano i legamenti.

Bisogna infine porre attenzione su un punto spesso trascurato nell'analisi dei cambiamenti subiti a livello scheletrico e muscolare dagli astronauti, vale a dire la riabilitazione degli stessi sistemi in seguito al volo spaziale, la quale si è rivelata una fase particolarmente delicata: è stato notato infatti che un astronauta di rientro da una missione di 6 mesi non necessariamente tornerà a livelli normali di BMD dopo altrettanti mesi di riabilitazione [13]. Questo aspetto riguarda in particolare gli astronauti impegnati in multiple missioni [9], la cui ricorrenza deve essere tale da non interferire con la fase di recupero intermedia.

2.3 L'apparato vestibolare

2.3.1 La percezione terrestre dell'equilibrio

L'apparato vestibolare è l'apparato che, attraverso la rilevazione delle accelerazioni angolari e lineari della testa, permette di regolare il senso dell'equilibrio.

Gli organi che compongono l'apparato vestibolare si trovano nella regione dell'orecchio interno, che presenta un labirinto membranoso posto all'interno di un labirinto osseo. Si possono distinguere tre canali semicircolari e due organi otolitici: il sacculo e l'utrículo. Ognuno di questi elementi ha un compito diverso, mostrato in fig. 2.5.

I tre canali semicircolari sono posti in piani ortogonali tra loro e permettono di individuare le accelerazioni angolari derivanti dalla rotazione della testa intorno ai tre assi. Ogni canale di un lato della testa è associato a un altro canale dell'altro lato. In corrispondenza del punto in cui i canali si raccordano all'utrículo si trovano dei rigonfiamenti noti come ampolle, nelle quali si trova un epitelio sensoriale chiamato cresta ampollare, sede delle terminazioni nervose del nervo vestibolare. L'epitelio è ricoperto di cellule cigliate, da cui emergono un chinociglio e una serie di stereociglia, immerse in una sostanza gelatinosa che forma la cupola ampollare. Quando la testa ruota, il canale semicircolare corrispondente al piano perpendicolare all'asse di rotazione ruota con essa, mentre il fluido in esso contenuto tende a stare fermo per effetto della propria inerzia. Questo causa una deviazione delle ciglia della cupola nella direzione opposta al movimento, che produce un segnale inviato immediatamente al cervello.

All'interno degli organi otolitici si trova un epitelio sensoriale chiamato macula. La macula utricolare è orientata orizzontalmente, quella sacculare verticalmente. Anche in questo caso ci sono numerose cellule cigliate immerse in una sostanza gelatinosa, con la differenza che oltre a essa sono presenti gli otoliti, piccoli elementi composti da carbonato di calcio. Gli otoliti hanno un ruolo fondamentale in quanto, essendo più densi del fluido

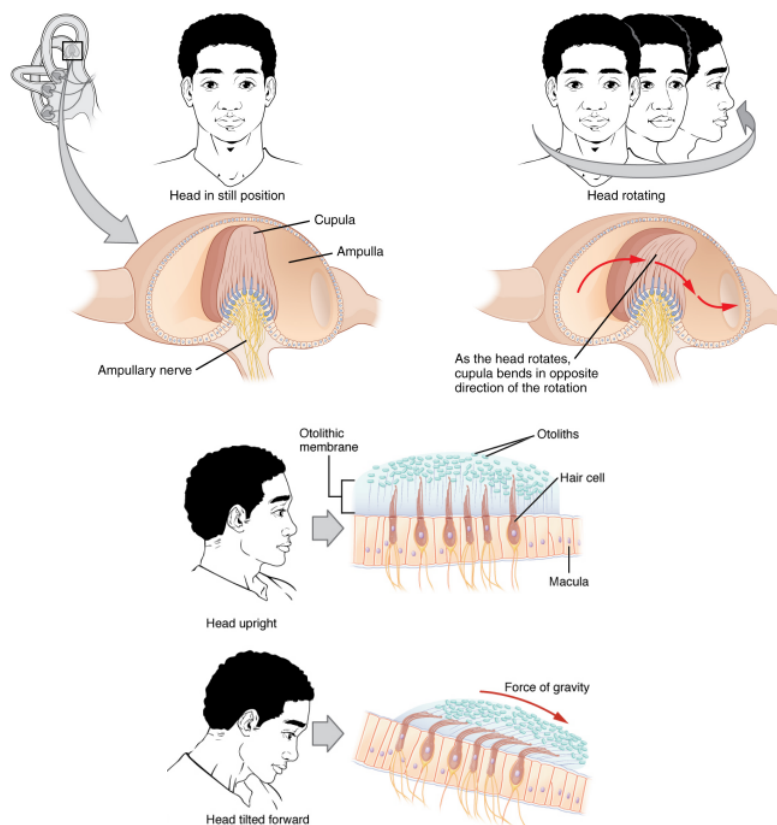


Figura 2.5: Differenze tra i ruoli dei canali semicircolari (in alto) e degli organi otolitici (in basso) nel riconoscimento delle accelerazioni della testa [5].

circostante, quando sottoposti a un campo gravitazionale possono muovere la sostanza gelatinosa e con essa le ciglia. Questo significa che sacculo e utricolo servono non solo a individuare le accelerazioni lineari della testa, ma anche la sua posizione rispetto al suolo, determinando l'equilibrio statico.

Le rilevazioni effettuate dagli organi dell'apparato vestibolare vengono trasmesse al cervello che a sua volta attiva una serie di comportamenti in risposta a esse, volti a contrastare la perdita di equilibrio. Un esempio di questi riflessi è dato dal riflesso vestibolo-oculare, cioè il meccanismo grazie al quale il movimento della testa in una direzione è controbilanciato da un movimento opposto dell'occhio. Questo permette di avere una visuale stabile indipendentemente dall'orientamento della testa. Il meccanismo è inoltre indipendente dalle condizioni di luminosità in quanto il funzionamento dell'apparato vestibolare è assicurato da meccanismi di tipo inerziale e non visivo. Un secondo esempio è il riflesso vestibolo-spinale, che attiva i muscoli necessari per mantenere il corpo stabile in caso di perdita improvvisa di equilibrio.

Si noti che l'apparato vestibolare è in grado di segnalare soltanto i movimenti della testa. Per poter riconoscere la posizione delle altre parti del corpo in relazione all'ambiente circostante sono necessari appositi propriocettori. Per esempio, la pressione percepita nelle gambe quando si è seduti è un indizio importante per il cervello per identificare la direzione verso cui agisce la gravità e orientarsi di conseguenza.

2.3.2 La percezione dell'equilibrio nello spazio

Il sistema vestibolare ha un ruolo molto importante nel riconoscimento della direzione verso cui il corpo viene tirato dalla forza di gravità. Questa sensazione, insieme a input di tipo visivo, contribuisce a creare la differenza che percepiamo tra sopra e sotto [16].

I cambiamenti che interessano l'apparato vestibolare nello spazio non sono uniformi in tutti i suoi componenti e nelle funzioni da essi ricoperte, ma dipendono dall'influenza della gravità sul loro corretto funzionamento. In particolare, se ci si focalizza sugli organi otolitici, questi non perdono la capacità di segnalare le accelerazioni lineari della testa, ma allo stesso tempo non sono più in grado di riconoscere le sensazioni dovute agli spostamenti della testa quando il corpo è fermo. Questa proprietà, fondamentale sulla terra per riconoscere la posizione del corpo rispetto all'ambiente, dovrà essere svolta nello spazio da altri attori come la vista, la quale può sostituire gli stimoli di natura inerziale finché i movimenti del corpo non sono eccessivi.

Altra funzione delicata ricoperta dagli otoliti sembra essere legata al riflesso vestibolo-simpatico che permette il controllo della tolleranza ortostatica quando la posizione del corpo cambia rapidamente da supina a eretta [8]. Un altro riflesso danneggiato da questi fenomeni è sicuramente quello vestibolo-oculare: la rotazione degli occhi in seguito a particolari accelerazioni è infatti utilizzata come misura del degrado degli organi otolitici.

È stato notato che circa il 50% degli astronauti ha subito mal di volo spaziale [4], mostrando sintomi quali nausea e perfino vomito, nei primi giorni di permanenza nello spazio. Le prime testimonianze del fenomeno arrivano dai cosmonauti sovietici dei primi anni '60: Gherman Titov in particolare sostenne di avere la sensazione di volare a testa in giù e iniziò a sentirsi male dopo poche ore dalla partenza [17]. In generale, si riscontra un conflitto tra i vari meccanismi che regolano la percezione spaziale dell'uomo [18]. I segnali di tipo vestibolare, visivo, propriocettivo e quelli legati all'effettivo movimento del corpo possono restituire informazioni contrastanti al cervello e innescare le risposte autonome menzionate in precedenza. Nella fattispecie del volo spaziale, questo fenomeno è stato correlato alla mancanza di input che segnalassero la presenza di un campo gravitazionale. A questa condizione si aggiunge il disorientamento generato dalla mancanza di una direzione che sulla Terra definiremmo sopra che porta svariati problemi nell'orientamento all'interno di strutture e nel riconoscere e maneggiare strumentazioni, compiti che formano la base dell'attività di ogni astronauta.[16]. Si noti che questa problematica non coinvolge chiunque con la stessa severità e per questo si effettuano delle prove che verificare quali soggetti ne sono maggiormente affetti.

Capitolo 3

Analoghi terrestri della microgravità

La necessità di sviluppare degli analoghi che permettessero uno studio delle conseguenze sul corpo umano delle condizioni di microgravità ha un'origine squisitamente pratica. La presenza quasi continua di astronauti nello spazio negli ultimi decenni grazie alle stazioni spaziali orbitanti intorno alla Terra (l'ultima delle quali l'ISS, in orbita dal 1998 e che ha ospitato ormai più di 200 astronauti [1]), ha permesso loro di vivere in prima persona condizioni di assenza di gravità; bisogna tuttavia precisare che non si tratta di microgravità effettiva, in quanto questa sensazione deriva dal fatto che la velocità di rotazione dell'ISS (28 000 km/h [1]) è abbastanza elevata da ottenere una situazione di "caduta libera continua", che ricordando il principio di equivalenza Einsteiniano è del tutto uguale fisicamente all'effetto sperimentato in assenza di una forza quale quella di gravità [19].

Questa situazione, apparentemente benefica per la ricerca in esame, comporta tuttavia delle complicazioni di natura logistica ed economica [1]: considerando per esempio il numero esiguo di soggetti in orbita in un dato momento, si ha una carenza cronica di dati a disposizione della ricerca, anche a causa del fatto che gli esperimenti richiesti necessitano di lunghi tempi, cosa che gli astronauti, avendo molti altri compiti all'interno della stazione, non possono garantire. A questo si aggiunge il rompicapo legato al trasporto e l'utilizzo di strumentazione ingombrante e pesante in un ambiente nel quale da questo punto di vista si punta notevolmente al risparmio.

Nasce in questo contesto la necessità di spostare la ricerca a terra, che si scontra con l'impossibilità di annullare la gravità localmente [2].

Quando si analizza la problematica in questione è prassi comune presso gli esperti del settore discutere di accelerazione gravitazionale nelle sue tre componenti in un sistema di riferimento cartesiano [17]. Di seguito verrà utilizzata la medesima notazione, indicando con G_z la componente diretta lungo l'asse rostro-caudale del corpo.

Verrà presentato nelle pagine successive lo stato dell'arte degli analoghi terrestri della microgravità, analizzandone in primo luogo il funzionamento e in seguito le applicazioni più comuni per quanto riguarda la ricerca fisiologica.

3.1 Long Duration Bed rest

I test basati sull'uso di lettini sono diventati nel corso del tempo i più comuni nella ricerca e quelli con i quali è stato ottenuto il maggior numero di informazioni. Inizialmente i test furono eseguiti su equipaggiamenti composti da lettini piani, in cui il soggetto stava in posizione supina orizzontale. Nel tempo ci si è resi conto tuttavia che il fenomeno degli spostamenti di fluidi che avveniva nello spazio superava sensibilmente quanto ottenuto a terra con lettini orizzontali [17]. Infatti, la posizione sprovvista di inclinazione causa una differenza di pressione tra dorso e ventre, anche se quest'ultima è di piccola entità se confrontata con la differenza tra torso e gambe che si ha a terra [20].

Nasce in questo contesto il cosiddetto Head Down Tilt (HDT), che ha soppiantato i lettini piani nella ricerca sin dagli anni '70, quando fu proposto inizialmente. Nel corso degli anni è stato studiato con diverse inclinazioni, che vanno dai 4 ai 15 gradi, ma il modello affermatosi come il più affidabile si è rivelato quello che ha un'inclinazione pari a 6° [17]. Il confronto tra i due metodi presentati fin'ora è visualizzabile in fig. 3.1. Questo modello, a causa della sua stessa natura non può garantire $0 G_z$, dato che sul corpo grava una componente rostro-caudale della forza di gravità. In prima approssimazione si può dire che questa componente ha un valore abbastanza basso ¹ da poter affermare, benché la presenza di una componente non trascurabile di accelerazione possa inficiare la somiglianza tra le condizioni di osservazione e il vero volo spaziale, che l'HDT è un metodo che permette una comprensione soddisfacente dei meccanismi di adattamento dell'organismo [14].

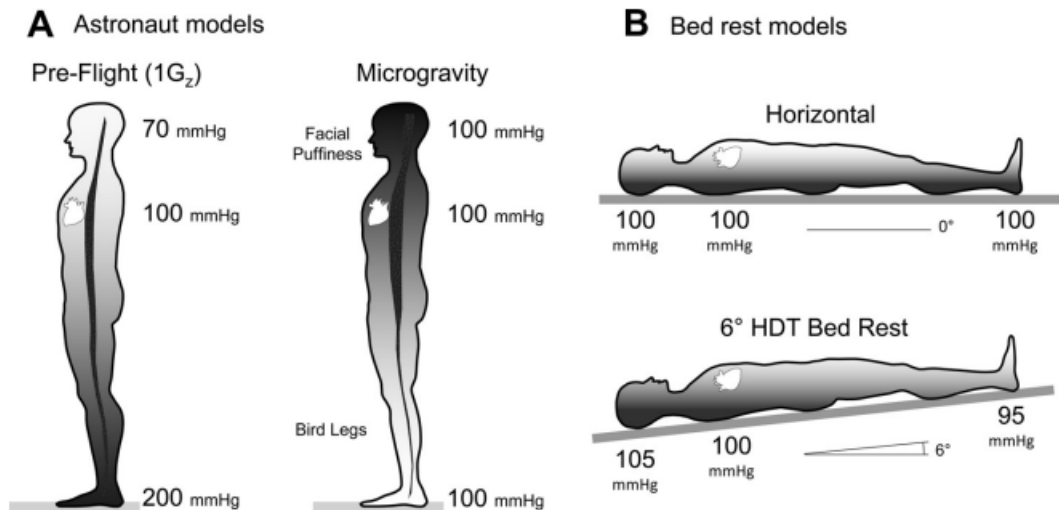


Figura 3.1: Gli analoghi basati sui lettini sono quelli più comunemente utilizzati nella ricerca per la simulazione accurata del *fluid shift* che propongono. Si nota tuttavia in figura la distribuzione della differenza di pressione dorso-ventre anziché testa-piedi [14].

La posizione non impedisce di eseguire alcuna attività fisiologica e igienica, e per que-

¹calcolabile come

$$\sin 6^\circ \sim 0.1 G_z$$

sto motivo è di grande importanza che ogni attività sia svolta senza cambiare la posizione del soggetto [20]. È consentito passare soltanto in rari casi a una configurazione a 0° (ma sempre per breve tempo) qualora fosse complicato da un punto di vista logistico operare altrimenti [17]. L'HDT è utilizzato per studi di lunga o lunghissima durata: benché la maggior parte delle osservazioni abbiano durate comprese tra i 60 e i 90 giorni, alcune hanno superato tale numero arrivando a un massimo storico di 370 giorni [21].

Alcune delle più importanti scoperte nella ricerca sugli effetti della microgravità sul sistema cardiovascolare sono state effettuate proprio in test basati sull'HDT: tra essi si segnala l'aumento della pressione venosa centrale [17], che contraddice quanto osservato durante le missioni spaziali. Se da un lato questo fatto fa nascere dei dubbi sulla plausibilità dell'analogo nel simulare accuratamente tutti gli aspetti del volo spaziale che influiscono sul sistema circolatorio [14], è stato fatto notare allo stesso tempo che la pressione venosa centrale potrebbe risentire non soltanto della semplice assenza di gravità - sia effettiva che percepita - ma anche dalle condizioni di pre-lancio [17]. In tal senso va ricordato che la posizione che gli astronauti assumono all'interno delle proprie capsule prima del lift off (generalmente orizzontale supina con le gambe rivolte verso l'alto) viene mantenuta per periodi di tempo che arrivano anche a qualche ora e potrebbe avere un'influenza sul successivo adattamento una volta completato il lancio e avvenuto l'ingresso in regime di 0g.

Altra informazione ottenuta mediante l'HDT riguarda la massa e la capacità delle camere cardiache: sono state misurate riduzioni dell'ordine del 9-12% nel volume del ventricolo sinistro, accompagnate da una diminuzione della massa dello stesso del 8-16% [17]. Si segnala inoltre una netta riduzione del plasma e una riduzione dello spessore dei vasi sanguigni nella parte inferiore del corpo [1].

L'uso dell'HDT si è rivelato benefico nell'individuazione delle regioni dello scheletro maggiormente colpite dalla rimozione dei carichi che normalmente gravano su di esso e alcuni esempi sono forniti a riguardo in fig. 3.2. Si nota tal a proposito un indebolimento del tessuto e un difficoltoso riadattamento una volta ritornati sulla Terra [20]. L'effetto immediato è una modifica della struttura interna delle ossa [14]: tra le scoperte fatte in merito si segnala una modifica nella densità di minerali presenti all'interno delle ossa, che si ripercuote su una maggiore percentuale di calcio nell'urina e nella maggiore probabilità di formazione di calcoli renali.

L'obiettivo dell'analisi quantitativa delle ossa [14] (che si effettua mediante tecniche non invasive come i raggi X) ha come obiettivo quello di individuare gli elementi determinanti per valutare le resistenze delle ossa: se il 65% dei cambiamenti osservati dipende dalla BMD, aggiungendo informazioni e indici relativi alla geometrie e all'architettura ossea si arriva a una percentuale del 94%.

Un altro campo in cui sono stati ottenuti risultati ragguardevoli riguarda l'evoluzione dei tessuti muscolari dopo un certo numero di giorni di HDT. Si tratta di un lato spesso trascurato rispetto a quanto avviene nelle ossa, ma è strettamente correlato ai meccanismi di adattamento del sistema circolatorio e in quanto tale va riconosciuto un certo grado di correlazione tra le modifiche della circolazione sistemica e le capacità dei muscoli di funzionare correttamente, ma anche di crescere e ripararsi [14]. Un esempio di questi fenomeni, la cui comparsa è molto più rapida di quanto già visto per le ossa, è dato dal cambiamento

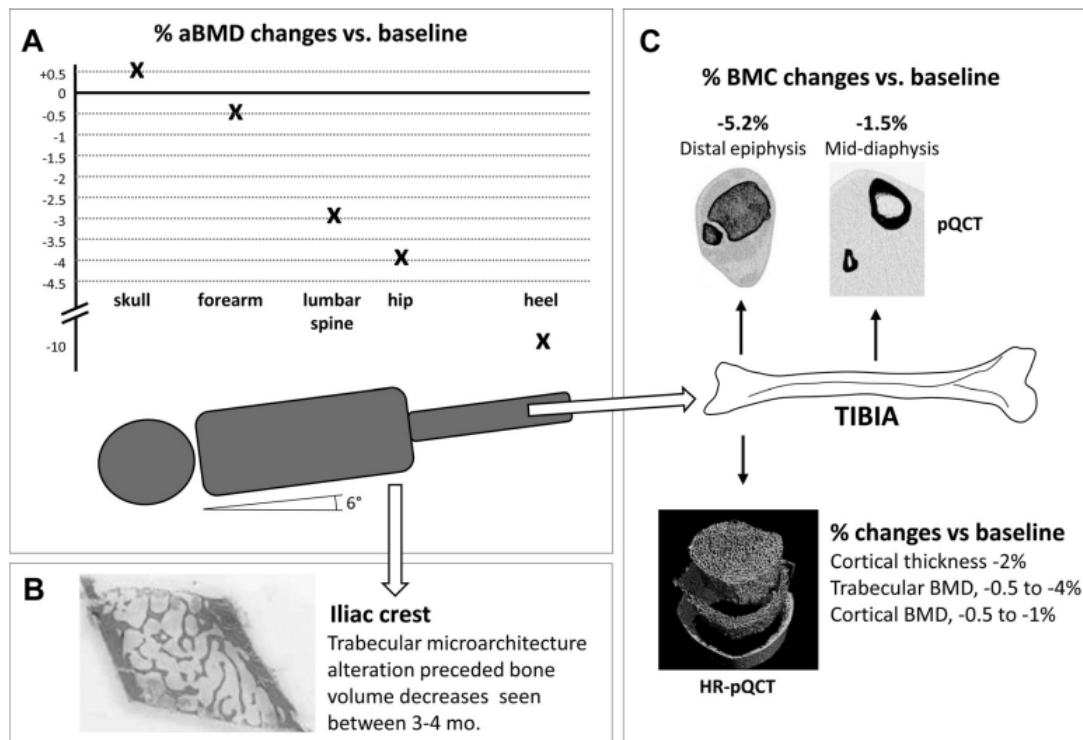


Figura 3.2: Dopo 2-3 mesi di HDT si segnala una riduzione nella densità ossea pari al 3.8% nell'anca e del 10% nel tallone [20], mentre nelle ossa lunghe degli arti inferiori si segnalano perdite maggiori (intorno al 5%) nelle epifisi [14].

dell'area della sezione trasversale nei muscoli del polpaccio, che subiscono una riduzione rispetto alle condizioni normali. Al contrario, si osserva un fenomeno diametralmente opposto nei muscoli del collo [14].

I test effettuati su lettini reclinati hanno messo in luce un ulteriore aspetto del decondizionamento da volo spaziale dei tessuti scheletrico-muscolari legato non tanto al test in sé quanto alla successiva riabilitazione: essa ha una durata che può superare di 5 o 6 volte quella del test stesso per quanto riguarda le ossa, mentre si nota un recupero più rapido nei muscoli [14]. A proposito del sistema scheletrico, il grafico in fig. 3.3 aiuta meglio a comprendere la problematica.

Il sistema circolatorio invece esibisce una serie di comportamenti evidenti sin dal primo istante in cui si interrompe il test [1]: aumento dei battiti per minuto e riduzione di gittata cardiaca e pressione venosa, fenomeni che indicano il tentativo del sistema di riequilibrare il movimento dei fluidi che migrano nuovamente verso le zone periferiche che ormai non erano più allenate a sopportare i livelli di utilizzo precedenti all'inizio dell'esperimento.

La grande affidabilità dei test su lettini reclinati porta con sé alcuni svantaggi di tipo economico [21]: se infatti questo è tutt'ora il migliore analogo per sperimentare a terra con strumentazione che non potrebbe essere trasportata al di sopra della superficie terrestre e con l'aiuto di un gran numero di ricercatori ed esperti che collaborano coi partecipanti 24 ore su 24, bisogna allo stesso tempo riconoscere che tra gli analoghi terrestri questo è, per la sua stessa natura, il più costoso tra quelli effettuati a terra.

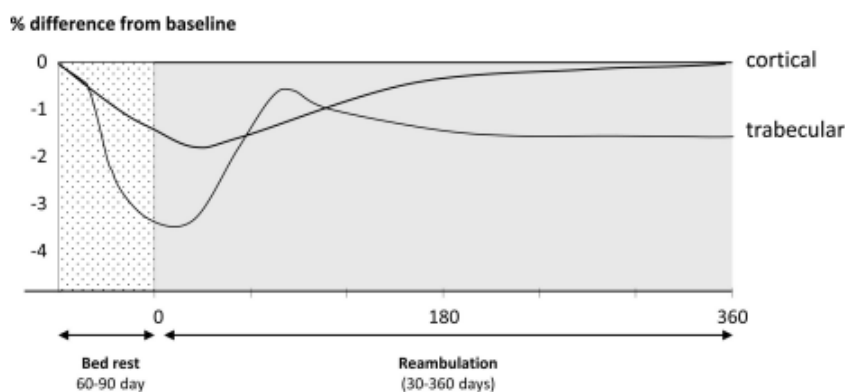


Figura 3.3: Perdita del tessuto osseo causata da un esperimento di HDT della durata di 2-3 mesi e suo successivo recupero nel corso di un anno. Sono inserite le densità sia della parte interna (*trabecular*) che esterna (*cortical*) dell'osso [14].

Un altro problema associato all'HDT è connesso alla presenza di un supporto che regge il corpo e lo tiene fermo in posizione: benché come già affermato la differenza di pressione tra dorso e ventre sia abbastanza bassa da essere considerata un effetto collaterale del metodo, bisogna comunque sottolineare che nello spazio, a differenza di quanto si osserva nei lettini, ogni compressione esterna dei tessuti corporei proveniente da contatto con oggetti e/o superfici è pressoché nulla. La presenza del lettino pone un ostacolo al corpo, che altrimenti tenderebbe a cadere verso il basso, e ciò causa una distribuzione di pressioni localizzata nella schiena del soggetto: a questo fatto è collegato il rischio di una distribuzione dei fluidi che porta effetti quali deidratazione delle zone più caricate [14].

3.2 Immersioni

Gli analoghi che si basano sull'immersione sono stati sviluppati in Russia e prevedono l'uso di acqua a temperature poco più basse di quella corporea ($32/34.5^\circ$) [20]. A differenza dei test basati sui lettini, non cercano di modificare le componenti dell'accelerazione gravitazionale a cui è sottoposto il corpo, ma si occupano di neutralizzare le forze da essa indotte tramite forze di galleggiamento [17]. La posizione dei partecipanti è variabile: esistono prove effettuate in posizione supina (con angoli di inclinazione del corpo variabili) o anche seduta, come mostrato in fig. 3.4.

Un primo metodo, noto come *wet immersion*, consiste nell'immersione fino al collo del soggetto [20]. Si tratta di un metodo poco utilizzato in quanto, pur simulando l'assenza di carichi legati alla forza di gravità, ha il notevole svantaggio di non poter essere utilizzato per esperimenti di lunga durata. Si segnalano infatti dopo appena 72 ore gravi problemi cutanei. Questo metodo si basa sulla pressione idrostatica dell'acqua per controbilanciare quella all'interno dei vasi sanguigni, ma potrebbe causare problemi alla respirazione a causa della compressione del petto.

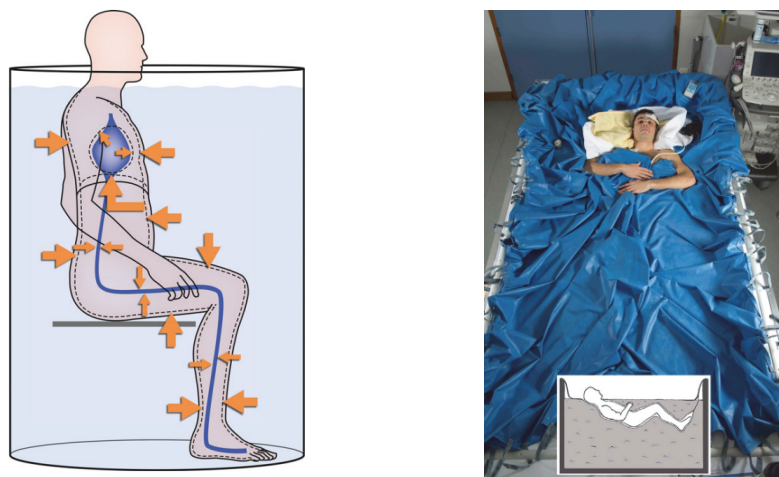


Figura 3.4: (sx) Le forze di pressione esercitate dall'acqua sul corpo sono distribuite uniformemente in esso nei metodi basati sulle immersioni [1]. (dx) Esempio di *dry immersion* con indicazione della posizione assunta dal soggetto [15].

L'altro metodo, decisamente più utile, è noto come *dry immersion* e riesce a eliminare le complicazioni legate all'immersione diretta in acqua grazie ad apposite tute impermeabili indossate dai partecipanti. Questi ultimi, galleggiando, vivono un'esperienza simile da un punto di vista fisico a quanto avviene nello spazio. Un punto di forza importante di questo mezzo è sicuramente il fatto che simula meglio di ogni altro analogo terrestre l'assenza di supporti sul corpo [20]: mentre nei test su lettino il carico è redistribuito nella parte posteriore del corpo, in questo caso le forze vincolari tra corpo immerso e ambiente esterno sono uniformi, come si può vedere in fig. 3.4; in altri termini, non si hanno forze di pressione localizzate in nessuna parte del corpo [17]. Si tratta inoltre di un metodo che restituisce risultati in tempi brevi (per esempio si notano dopo 3 giorni di immersioni condizioni molto simili a quelle riscontrate dopo ben 21 giorni di HDT [20]).

I campi più interessati da questo analogo sono quelli legati alla ricerca riguardante gli effetti della microgravità sul sistema circolatorio e sull'apparato locomotore.

Per quanto riguarda la circolazione [20] si segnala innanzitutto una riduzione pari al 17% nel volume del plasma. Lo spostamento dei fluidi riguarda ovviamente in primo luogo la parte inferiore del corpo, che subisce una maggiore differenza in pressione tra posizione eretta e stato di immersione, anche grazie al fatto che, trovandosi gli arti inferiori in fondo alla vasca, si trovano in un ambiente in cui la pressione dell'acqua circostante è maggiore per effetto del suo stesso peso. Questi cambiamenti, come già discusso, portano a una riduzione dei battiti cardiaci: si segnalano riduzioni nell'ordine dei 5 bpm dopo le prime 4 ore di osservazione, accompagnate da riduzioni nella pressione cardiaca di 5 mmHg. A differenza del volo spaziale tuttavia si nota un aumento anziché una riduzione della pressione venosa centrale, mentre i cambiamenti nella gittata cardiaca sono in linea con quanto ci si aspetta.

Condizione comune nei partecipanti agli studi nel campo è sicuramente anche una rapida riduzione della massa muscolare e un generale cambiamento della struttura del tessuto, con una conseguente minore forza sviluppata dai muscoli (si stimano riduzioni del 20% dopo 7 giorni, in genere durata massima degli esperimenti [21]). I muscoli più

interessati sono quelli posturali, che in condizioni di $1 G_z$ sopportano i carichi dovuti al peso corporeo.

Le conseguenze degli esperimenti basati sulle immersioni sul sistema scheletrico si concretizzano in una riduzione pari al 2% della densità del tessuto osseo [20]. Un'altra condizione, già menzionata in precedenza, che viene adeguatamente simulata nel corso delle immersioni è sicuramente il mal di schiena causato dalle modifiche dei carichi agenti sulla spina dorsale [15], che trova le sue origini nell'allungamento della spina stessa e nell'annullamento della sua curvatura abituale, fattori entrambi alla base della comparsa di ernie del disco. Le modifiche subite dalla schiena si ripercuotono inoltre sul sistema nervoso e sulle capacità di movimento dei soggetti testati: in posizione eretta con gambe e braccia completamente distese e la schiena piegata verso il basso, misurando la distanza tra dita e suolo si è notata un notevole aumento della stessa di 10cm. Le motivazioni per cui le immersioni si sono rivelate utili a comprendere il fenomeno si possono notare in fig. 3.5: mentre il bacino tende a sprofondare, il torace ha una tendenza opposta a risalire sotto l'effetto della forza di Archimede a causa della grande quantità d'aria in esso contenuta. Allo stesso tempo gli organi viscerali sono spinti verso il diaframma, e a questo fatto si associa un ulteriore dolore localizzato nella zona immediatamente sotto le costole.

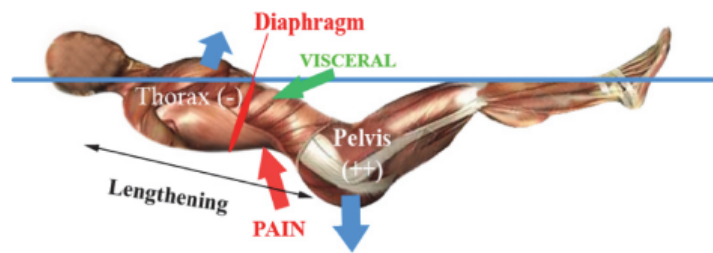


Figura 3.5: Rappresentazione schematica delle forze agenti sul corpo durante la *dry immersion* e che causano l'allungamento della schiena alla base della sensazione di dolore e malessere fisico provato in seguito a esperimenti a riguardo [15].

L'influenza delle immersioni sul corpo da un punto di vista neurovestibolare è un ambito che è stato trattato in misura inferiore rispetto alle altre condizioni. Ciononostante viene menzionata [21], spesso a livello aneddotico, una tendenza delle immersioni a simulare in modo molto preciso la sensazione di assenza di gravità effettivamente provata dagli astronauti. In tal senso potrebbe essere di notevole interesse approfondire queste informazioni in futuro, per chiarire ulteriormente il rapporto tra corpo e ambiente nello spazio. I risultati più promettenti sono arrivati in configurazioni speciali, quali la posizione supina a testa in giù ($-1G_x$) e quella verticale invertita ($-1G_z$); sembra infatti che tali condizioni, unite a un sistema che falsi la percezione visiva mostrando un ambiente come se ci si trovasse in piedi, possa innescare i meccanismi che portano alla chinetosi per effetto della discordanza tra quanto visto e quando percepito grazie agli otoliti [17]. È altrettanto vero che la viscosità dell'acqua, essendo molto superiore a quella dell'aria, non permette movimento libero all'interno dell'apparecchiatura e sicuramente questo pone una problematica nello studio della chinetosi [17].

Un difetto importante delle immersioni, anche in versione *dry*, è che il movimento dei liquidi corporei simulato con grande precisione nell'HDT in questo caso è meno preciso a causa della mancata immersione di testa e parte superiore del collo. Anche gli effetti sulla spina dorsale accennati in precedenza perdono la loro accuratezza man mano che ci si avvicina alla zona cervicale [15]. È altrettanto problematico il fatto che i soggetti testati dovranno lasciare periodicamente l'attrezzatura per motivi igienici e fisiologici, con possibili effetti sui risultati finali. La posizione, che a volte si avvicina più a quella seduta piuttosto che a quella supina, è sicuramente una peculiarità di cui tenere conto a causa delle sue implicazioni sulla redistribuzione dei carichi gravitazionali sul corpo, che in questo caso si potrebbe rivelare non uniforme [20].

3.3 Unilateral Lower Limb Suspension

Il metodo noto come Unilateral Lower Limb Suspension (ULLS) è un particolare analogo della microgravità che, a differenza degli altri fin'ora analizzati, permette un certo grado di libertà nel movimento del soggetto testato [10]. Consiste nell'elevazione di una gamba mediante l'uso di una suola di grosso spessore; la deambulazione è assistita da stampelle. Questa configurazione permette di rimuovere il carico del peso corporeo sull'altra gamba e studiarne l'adattamento in condizioni paragonabili a quanto riscontrato in assenza di gravità. Mentre in un primo momento era previsto un cavo che collegava il piede alla spalla, facendo assumere alla gamba una posizione leggermente inflessa, è ora più comune una versione in cui la gamba è slegata e tenuta dritta in posizione di riposo, come visibile in fig. 3.6 [10].

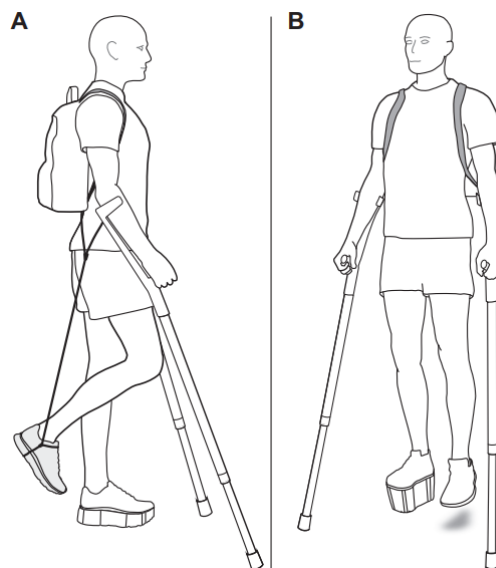


Figura 3.6: evoluzione dei sistemi utilizzati per l'ULLS [10].

Molte delle informazioni attualmente note sulla ULLS sono reperibili in [10]. La ULLS ha una grande importanza nello studio degli effetti della microgravità sull'apparato locomotore e restituisce dei risultati evidenti già dopo 2-3 giorni di prova. Il periodo di osservazione è variabile e può raggiungere una durata superiore ai 20 giorni [20]. La pri-

ma evidenza riscontrata sui partecipanti è l'atrofia muscolare, in particolare nei muscoli posturali della parte inferiore della gamba, che consiste nella riduzione del volume del tessuto muscolare e perdite di massa che raggiungono il chilogrammo per gamba. Questi effetti hanno conseguenze non solo nello sforzo in grado di essere sopportato dalla gamba, ma anche nel metabolismo: da un lato la sintesi diminuisce, dall'altro la denaturazione aumenta. Un gruppo muscolare particolarmente osservato è quello responsabile dell'estensione della gamba, ancorato intorno al ginocchio. Gli effetti si sviluppano costantemente nel tempo ma non si manifestano uniformemente nel tessuto muscolare e in tutti i muscoli contemporaneamente.

Nonostante non si notino grandi cambiamenti di dimensioni dei tendini, si attesta un'attenuazione nella sintesi di collagene, collegata direttamente a una riduzione del modulo di Young del tessuto connettivo, calcolato normalizzando la resistenza a trazione del tendine con la sua stessa dimensione.

Allo stesso tempo i cambiamenti nella densità del tessuto osseo, altro effetto importante della ULLS, sono simili a quanto rilevato nei test su lettini inclinati e consistono in una diminuzione attestata intorno al 0.7%, soprattutto nell'epifisi della tibia [17].

Bisogna constatare che la ULLS non è particolarmente indicata per studiare l'effetto della microgravità sul sistema cardiovascolare. Questo, unito alla natura locale degli effetti sperimentati, rendono la ULLS un metodo non utilizzabile per valutare gli effetti globali della microgravità [17]. Allo stesso tempo però è importante notare una notevole diminuzione dei rischi legati a questo analogo per i partecipanti, limitati a un sensibile rischio di tromboembolismi venosi che riguardano gruppi ristretti di persone, quali per esempio donne che fanno uso di pillole contraccettive.

La semplicità del metodo unita alla sua versatilità rendono questo analogo quello più economico e semplice da applicare negli studi. La possibilità per il soggetto di spostarsi liberamente durante il periodo di osservazione è un fatto che porta a una maggiore facilità nel trovare volontari disposti a essere sottoposti allo studio, in quanto essi potranno nel frattempo continuare a lavorare o stare comodamente a casa anziché restare sotto osservazione per lunghi periodi di tempo in cliniche specializzate [20], pur dovendo avere a che fare con un sistema che comporta delle difficoltà in alcune azioni quotidiane quali guidare [10]. Ovviamente l'assenza di monitoraggio costante mediante strumenti complessi e personale apposito è benefica per i costi sostenuti.

Un fattore di cui tuttavia bisogna tenere conto è che questa sorveglianza minore porterà a un'affidabilità incerta dei dati ottenuti [21], che si dovranno basare maggiormente sulla fiducia nel corretto utilizzo degli strumenti messi a disposizione dei partecipanti. Bisogna comunque notare che nel tempo è aumentato il numero di strumenti utilizzabili per monitorare a distanza i test, quali videocchiate e sensori che individuano le accelerazioni durante i movimenti o la pressione dovuta a carichi esterni. È inoltre importante considerare che ogni soggetto sarà libero (entro i limiti consentiti dal programma) di gestire la propria alimentazione, esposizione solare e il proprio sonno e a seconda della propria occupazione sarà soggetto a livelli diversi di stress fisico e psicologico. Ognuno di questi aspetti riduce la controllabilità e la riproducibilità degli esperimenti, ma va comunque notato che la loro influenza sui risultati è considerata in ogni caso trascurabile in quanto l'assenza di carico su una gamba resta di gran lunga la principale causa dell'atrofia muscolare [21].

3.4 Volo parabolico

Il volo parabolico è un analogo unico nel suo genere in quanto a differenza degli altri permette di operare effettivamente in condizioni di microgravità (o meglio, di caduta libera) senza doverne simulare la sensazione.

Da un punto di vista operativo consiste nel volare a bordo di un aeromobile lungo una traiettoria parabolica che prevede una fase di salita e una successiva di discesa. Seguendo quanto mostrato in fig. 3.7, si nota che nel corso delle fasi in cui si hanno variazioni di quota si sperimentano condizioni di ipergravità, mentre nella parte in cui l'aereo raggiunge l'apice si ha microgravità. Ognuna delle tre fasi dura dai 20 ai 25 secondi [21]. In un'epoca in cui la ricerca è focalizzata sugli effetti a lungo termine e le missioni non hanno più durate nell'ordine delle ore o dei giorni, questo è sicuramente uno svantaggio. Inoltre, la presenza di fasi di ipergravità potrebbe influenzare e compromettere i risultati successivamente ottenuti. Tuttavia, esistono ancora svariati campi in cui questo analogo ha una sua utilità [22], tra i quali possiamo annoverare:

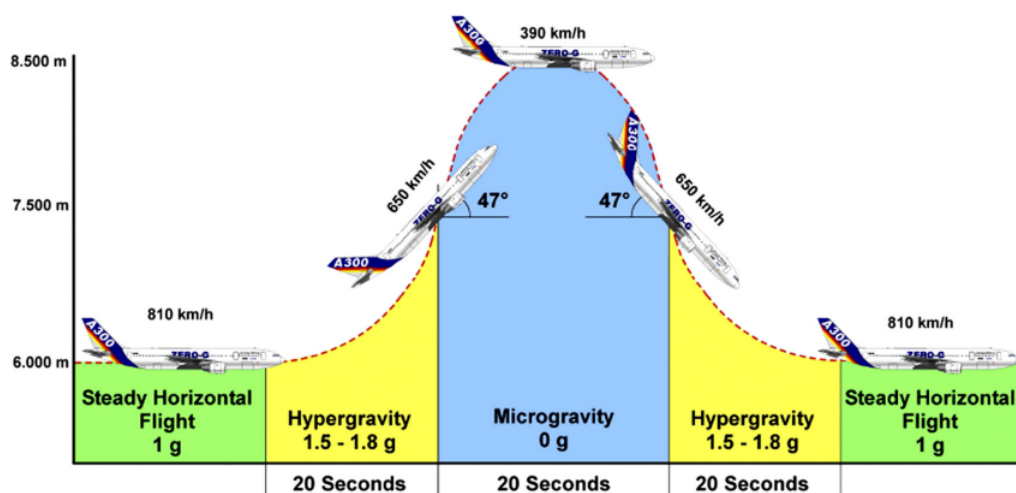


Figura 3.7: fasi del volo parabolico, con indicazione circa l'assetto dell'aeroplano e il numero di G a cui è sottoposta la crew [21].

- Simulazione di situazioni operative per addestramento del personale (volto a esercitarsi sulle attività da svolgere quotidianamente o in caso di emergenza, come le procedure di pronto soccorso) e collaudo della strumentazione;
- Studio degli effetti causati da un campo gravitazionale variabile;
- esperimenti che prevedono l'uso di strumenti di grosse dimensioni o che necessitano di personale aggiuntivo per garantire la buona riuscita delle prove, elementi che in missioni spaziali non sarebbero disponibili;
- esperimenti di breve durata che necessitano di essere ripetuti più volte: in questo caso il volo può prevedere una successione di parabole

Le motivazioni fisiche della forma della traiettoria utilizzata si identificano nell'obiettivo perseguito [19]. Benché la sensazione percepita sia quella di assenza totale di gravità, il corpo e con esso l'aereo in cui si trova subiscono eccome l'attrazione gravitazionale terrestre, con un'intensità quasi identica a quella misurata sul suolo: ciò che viene effettivamente manipolato è l'accelerazione relativa tra il velivolo e i suoi occupanti. Se i due corpi cadono verso la Terra con la medesima accelerazione non si hanno reazioni vincolari sui passeggeri. Per ottenere tale condizione i piloti sono addestrati per controllare l'aereo in modo tale che la variazione di accelerazione interessi solo l'asse z (orientato verticalmente) per evitare accelerazioni indesiderate lungo gli altri assi, evitando allo stesso tempo che il corpo si accorga delle accelerazioni angolari dovute al movimento intorno all'asse trasversale alla fusoliera. È interessante notare che per questo motivo i controlli dell'aereo sono disaccoppiati in modo tale che beccheggio e rollio siano manipolati da due piloti diversi.

L'oggetto della ricerca in ambito fisiologico per quanto riguarda il volo parabolico non può ovviamente prevedere adattamenti a lungo termine o patologie croniche, ma questo metodo è stato ampiamente utilizzato nello studio di condizioni come il ricircolo dei fluidi corporei e in generale gli adattamenti a breve termine del sistema cardiovascolare [22]. Altra problematica trattata dagli esperimenti effettuati durante il volo parabolico è quello dell'improvviso calo della pressione venosa centrale, come effettivamente riscontrato in orbita.

Per quanto riguarda invece l'apparato vestibolare, è stato ampiamente trattato il tema del mal di volo spaziale, direttamente collegato al funzionamento in regimi non convenzionali degli organi otolitici. Ciò che viene indagato è il collegamento tra movimento oculare e gravità percepita, anche se la correlazione tra il malessere provato durante il volo parabolico e quello rilevato nel volo spaziale è ancora da dimostrare [22]. Benché spesso il volo parabolico sia usato per riconoscere all'interno di un campione di partecipanti coloro i quali potrebbero essere maggiormente colpiti dal mal di volo spaziale, è da verificare anche la capacità di predire tale dato in modo sicuro data la brevità degli esperimenti. Tuttavia, si potrebbe rivelare un dato utile il disaccoppiamento del movimento torsionale degli occhi [17].

Un ulteriore possibile campo di ricerca riguarda la locomozione in ambienti sottoposti a microgravità, con l'obiettivo di perfezionare le tute spaziali e gli esercizi effettuati dagli astronauti una volta in orbita [21].

Un ambito nel quale il volo parabolico si è rivelato particolarmente utile è stato quello riguardante lo studio dell'orientamento percepito dagli astronauti durante il volo spaziale. Come già visto, informazioni circa la posizione del corpo nello spazio sono fornite sia visivamente che non. Nel secondo caso, la direzione della gravità segnalata dall'apparato vestibolare ha un ruolo molto importante nel determinare dove si trovi il sopra, in questo caso visto come la direzione opposta rispetto a quella verso cui si viene tirati. Gli otoliti in particolare possono essere simulati mediante un modello del tipo massa-molla-smorzatore [19] che misurano la differenza tra il loro stesso peso e la risultante delle forze scambiate tra aereo e corpo, variabile durante il volo stesso.

Gli indizi circa la direzione del sopra sono divisibili in base alla loro natura: si hanno quelli vestibolari, quelli visivi e l'asse del proprio corpo. Se si associa rispettivamente a

ogni tipologia di indizio un vettore che indica quale sia la direzione della gravità da esso suggerita, si può poi calcolare una somma vettoriale (pesando maggiormente gli indizi che contribuiscono in modo predominante alla percezione finale) che restituisce la direzione percepita in generale dal corpo. In un esperimento in merito [16] sono stati forniti ad alcuni soggetti degli schermi con immagini di paesaggi (che quindi contenessero chiari riferimenti circa la posizione di terreno e cielo) e che impedissero di vedere gli spazi circostanti (fig. 3.8); l'orientamento dell'immagine poteva essere modificato a piacimento. I soggetti sono poi stati sistemati in varie posizioni, alcuni seduti, altri coricati: In questo modo gli indizi comunicati al corpo potevano entrare in conflitto tra loro. lo schermo, oltre al paesaggio, mostrava quattro simboli identici ruotati ognuno di 90° rispetto agli altri. Il compito dei soggetti era quello di segnalare quale delle quattro forme apparisse più convessa (per capire quale fosse la direzione ipotizzata della luce, che generalmente viene identificata come quello che chiamiamo sopra), per poi confrontare le loro scelte con il modello vettoriale proposto.

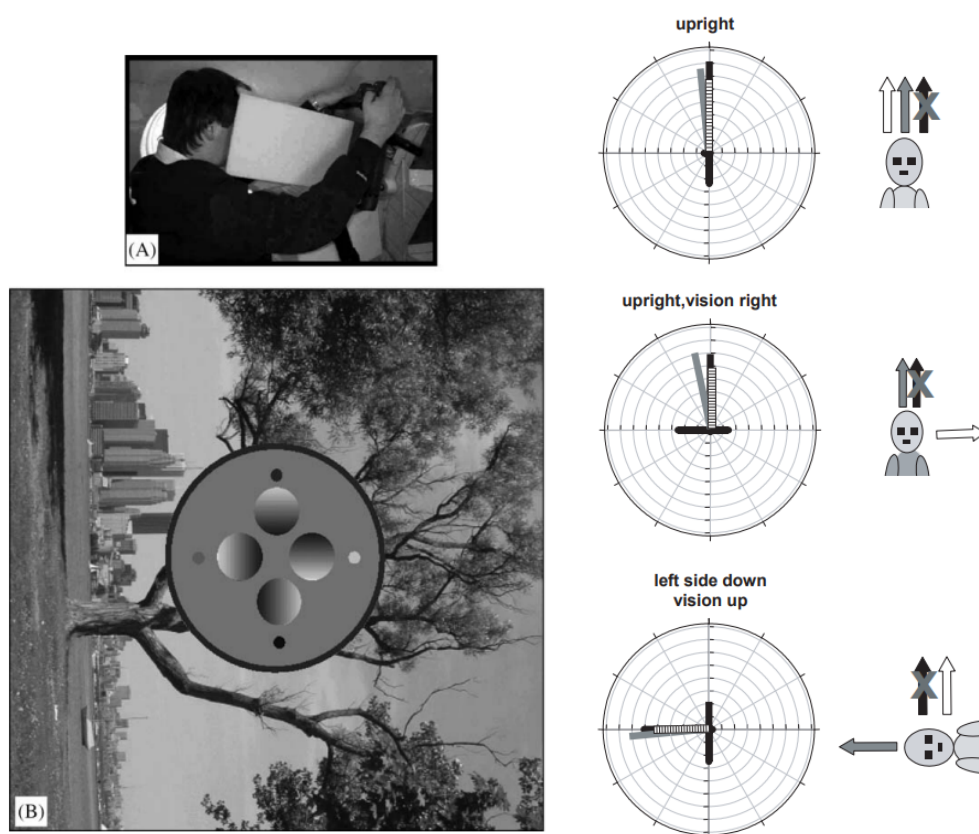


Figura 3.8: (sx) Lo schermo dato in dotazione ai passeggeri, dotato di pezzi laterali che impedissero di vedere l'ambiente circostante, presenta un'immagine sulla quale sono posizionate alcune figure con sfumature di orientamento diverso. (dx) Risultati dell'esperimento [16].

Raccogliendo dati in ogni fase del volo si è potuto notare come la sensazione di gravità influenzi pesantemente le scelte: mentre durante il volo livellato ognuno dei tra indizi contribuiva alla scelta finale, in microgravità (con l'eliminazione dell'indizio vestibolare) i soggetti si sono basati esclusivamente sull'asse del proprio corpo per scegliere la prove-

nienza della luce sul simbolo. In fig. 3.8 sono presentati i risultati dell'esperimento: le linee nere indicano quante volte ogni direzione della figura tra le quattro proposte sia stata scelta dai partecipanti e la linea grigia è la loro somma vettoriale. Si nota come questa sia concorde con la direzione del corpo in ogni caso (freccia grigia), mentre non si ha quasi nessuna influenza della percezione visiva (freccia bianca). Questi dati comunicano il fatto sorprendente che la mancanza di gravità porti automaticamente all'esclusione degli indizi visivi nella percezione della differenza tra sopra e sotto: in altre parole, l'orientamento del paesaggio non ha avuto alcun peso. Si segnala inoltre una buona accuratezza delle previsioni del modello matematico proposto (linea tratteggiata nei grafici) con i dati sperimentali.

In conclusione, il volo parabolico è sicuramente uno strumento molto utile in un certo numero di applicazioni e assumerà un ruolo ulteriormente importante in futuro. Questo dato è causato dal fatto che il numero di persone impegnate in attività nell'orbita bassa terrestre ² è destinato ad aumentare non solo per motivazioni legate alla ricerca scientifica, ma anche per commercio e turismo [22]. Questi astronauti improvvisati potranno, prima di sperimentare il volo suborbitale vero e proprio, abituarsi alle condizioni fisiche riscontrare nello spazio tramite voli parabolici. La breve durata dell'esperienza in questo caso non rappresenta un problema, dato che le missioni di cui si sta parlando saranno di durata altrettanto brevi e non comporteranno l'insorgenza delle problematiche a lungo termine già citate. Altro punto a favore del volo parabolico è la possibilità di simulare la transizione tra varie intensità dell'accelerazione gravitazionale e simulare così i movimenti e le operazioni da effettuare durante decollo e rientro.

Bisogna tuttavia segnalare la presenza di alcune problematiche che non vanno sottovalutate: in primo luogo la brevità degli esperimenti, relegati ad appena una ventina di secondi, non permette test approfonditi e a lungo termine; in secondo luogo a seconda delle condizioni di volo l'ambiente potrebbe distogliere l'attenzione dei soggetti dall'esperimento e tale influenza sulle condizioni psicofisiche dei partecipanti può danneggiare la veridicità dei risultati finali.

²Low Earth Orbit (LEO)

Capitolo 4

Sviluppo di contromisure

Lo studio di possibili metodi che mitigassero gli effetti sperimentati nel corso delle missioni spaziali ha avuto inizio sin dalle prime missioni che evidenziarono dei cambiamenti a livello fisiologico negli astronauti che ne facevano parte. Con contromisura si intende dunque un'attività il cui obiettivo sia quello di controllare le risposte fisiologiche che comparirebbero spontaneamente nel caso in cui non ci siano interventi [21]. L'effetto sperato sarà ovviamente quello mantenere il benessere fisico degli astronauti a livelli adeguati, in modo da portare a termine i propri compiti e tornare in sicurezza sulla Terra [23].

Rientrano in questo quadro gli analoghi fin'ora trattati, nella misura in cui essi permettono da un lato di simulare le suddette risposte in modo più o meno credibile, e dall'altro di replicare le stesse su un campione sufficientemente largo di soggetti nel corso di lunghi tempi [21]. Un insieme di regole standardizzate circa le condizioni di operabilità e i risultati attesi permette la ripetibilità degli esperimenti e il confronto tra di essi, in modo da combinare varie contromisure tra loro evitando che entrino in conflitto.

Va notato che non tutti gli analoghi sono equivalenti nella loro efficacia e per questo motivo ognuno di essi è accuratamente selezionato in base al sistema o apparato che si intende studiare e alle possibili contromisure che permetterà di testare. Il processo di sviluppo e perfezionamento di una contromisura parte generalmente con test a $1g$ in laboratorio seguiti da applicazioni supportate da analoghi a basso costo come l'ULLS. Seguono poi gli esperimenti che prevedono l'uso dell'HDT e infine le applicazioni nel volo spaziale vero e proprio, con le quali si possono confrontare i risultati del laboratorio con la realtà ed effettuare ulteriori modifiche [21]. Il processo, come prevedibile, parte con campioni molto ampi di soggetti testati e prosegue secondo un percorso di restringimento del numero di partecipanti fino al singolo astronauta, che necessiterà di configurazioni ad hoc.

Da un punto di vista del ruolo assunto dal partecipante durante il loro svolgimento, le contromisure possono essere suddivise in attive e passive [1]. Nel corso di questo capitolo saranno analizzate alcune di queste possibili risposte ai cambiamenti indotti dall'assenza di gravità, partendo dal primo gruppo (che comprende tutti gli esercizi fisici effettuati in orbita) e proseguendo in seguito con l'analisi del secondo, nel quale si riconosce, come si potrà osservare, una maggiore varietà nelle proposte.

4.1 Esercizio fisico

Le contromisure basate sull'esercizio fisico come possibile risposta al decondizionamento dei tessuti corporei nel volo spaziale sono state le prime a essere proposte agli astronauti in missione e, nel corso dei decenni, l'esercizio si è confermato il fondamento delle contromisure abitualmente utilizzate. Le prime testimonianze in tal senso provengono dal programma spaziale americano Gemini [21] e risalgono a circa 60 anni fa.

Una preparazione fisica ottimale garantisce uno svolgimento più efficiente delle operazioni necessarie durante le missioni e un aumento della resistenza [1]. Per questo motivo gli astronauti seguono un rigido programma di esercizi fin da prima del lancio, che prevede due o tre sessioni settimanali di esercizio aerobico o anaerobico, con l'obiettivo di tenere alto il livello di benessere fisico e garantire un superamento agevole delle fasi di lancio e una preparazione adeguata in caso di evacuazioni di emergenza. Ciononostante, l'attività più importante resta quella effettuata in orbita [1], la quale è composta da sessioni giornaliere di 2-3 ore.



Figura 4.1: Alcuni esempi di esercizio a bordo della ISS, che comprendono, da sinistra a destra, cicloergometri, tapis roulant con cinghie di supporto e ARED per esercizio anaerobico [24].

L'attrezzatura utilizzata durante il volo spaziale è stata a lungo testata e migliorata a bordo della ISS e se ne possono osservare alcuni esempi in fig. 4.3. Lo strumento più comune per l'esercizio aerobico è il tapis-roulant, sul quale è possibile correre simulando il proprio peso grazie a delle corde agganciate al bacino che tirano verso il basso. Questo metodo, tuttavia, è ritenuto particolarmente scomodo per carichi superiori al 70% del peso corporeo [6]. In alternativa, si ricorre al cicloergometro (simile a una cyclette) [11].

In aggiunta agli strumenti sopracitati, nel 2008 è stato incluso nella ISS un dispositivo noto come Advanced Resistive Exercise Device (ARED) [11], il quale permette all'utilizzatore di svolgere un grande numero di esercizi anaerobici, tra cui squat, trazioni, distensioni su panca e stacchi da terra. L'uso di questa attrezzatura, abbinata a contromisure nutrizionali e farmacologiche ad hoc per ogni astronauta, ha contribuito al miglioramento delle

condizioni fisiche degli occupanti della stazione. L'insufficienza del solo esercizio aerobico si può spiegare considerando che in essi manca un gradiente gravitazionale paragonabile a quello terrestre [14], con conseguenze negative su tolleranza ortostatica, massa muscolo-scheletrica e capacità di svolgere compiti in posizione eretta.

Gli effetti dell'esercizio sul corpo hanno svariate ripercussioni sul sistema cardiovascolare [1]: l'allenamento aumenta l'afflusso di sangue ai muscoli delle gambe, favorendo la redistribuzione dei fluidi corporei nella parte inferiore del corpo. Si hanno effetti benefici anche sul mantenimento del volume sanguigno e sull'efficacia dei barorecettori, diminuendo i rischi associati all'intolleranza ortostatica.

Per quanto riguarda le ossa, è stata riscontrata una sostanziale incapacità da parte degli esercizi aerobici di contrastare da soli la riduzione della BMD [11], che si è attestata al 4% nella spina dorsale e al 10% nel femore. Queste perdite sono mitigate dall'utilizzo dell'ARED in combinazione con contromisure nutrizionali e farmacologiche, che tuttavia piuttosto che evitare il riassorbimento del tessuto aumenta la sua produzione [14].

Ovviamente non si può non considerare l'effetto dell'esercizio fisico sul sistema muscolare, grazie al quale si può combattere l'atrofia mediante esercizi che lavorano sulla resistenza e sull'esplosività del muscolo [25]. Questi hanno come primo effetto quello dell'aumento della forza sviluppata dal muscolo e in generale della mobilità corporea, essenziale per svolgere le attività quotidiane previste dai programmi degli astronauti. Un ulteriore campo che ha avuto effetti benefici riguarda il mal di schiena di cui si è già discusso, che ha visto riduzioni in soggetti che hanno praticato esercizi che prevedono un movimento della schiena ampio, lento e regolare [25].

Le ricerche sugli esercizi più consoni da effettuare in orbita per evitare l'atrofizzazione dei muscoli e la riduzione in massa del tessuto osseo può essere affidata alla ULLS [10], in particolare grazie alla sua caratteristiche di non ridurre eccessivamente la mobilità corporea del soggetto e alla sua accuratezza per quanto riguarda la parte del corpo più colpita dalle sopracitate condizioni, cioè gli arti inferiori.

Nonostante lo sforzo effettuato in orbita alcuni movimenti corporei saranno inevitabilmente più complicati una volta ritornati a terra [1], e questo fatto porta gli astronauti a seguire un ulteriore programma di allenamento post-rientro, benché esso sia di intensità notevolmente inferiore.

Una problematica riscontrata in alcuni cosmonauti russi [23] è quella della corretta esecuzione delle attività fisiche prescritte da terra: è stato notato infatti che in alcuni casi sono pochi gli astronauti che riescono a portare a termine i programmi a loro imposti, con dirette conseguenze sull'efficacia dell'esercizio come contromisura. Diventano di crescente importanza quindi le contromisure passive, che permettono livelli stabili di forma fisica anche in casi come questi.

4.2 Assunzione di soluzioni saline e farmaci

Un metodo spesso proposto per contrastare l'ipovolemia è l'assunzione di sostanze che incrementino il volume di sangue prima del rientro a terra. Questo obiettivo si può portare a compimento tramite fluidi ricchi di sale: generalmente, si tratta di 8g di sale dissolto in un litro d'acqua che viene bevuto circa due ore prima del rientro [25]. L'effetto del sale è quello di aumentare la ritenzione idrica incrementando il volume di fluidi presenti nel corpo e mantenendo costante la concentrazione di elettroliti [1]. Allo stesso tempo, si verifica un riassetamento della pressione sanguigna e dei battiti cardiaci.

Grazie a questo tipo di contromisura l'astronauta dopo il rientro soffrirà di meno delle conseguenze dell'intolleranza ortostatica [1].

Un effetto simile alle soluzioni saline si può ottenere per mezzo di farmaci, come il *Florinef*, che incrementino la ritenzione di sodio da parte dei reni [1]. Un'altra possibilità è data da farmaci come la midodrina, che agisce sulla capacità venosa riducendo il ristagno del sangue nelle vene e in generale aumentando la resistenza del sistema venoso periferico [1].

Per quanto riguarda il tessuto osseo, sono stati effettuati test farmacologici volti a studiare possibili metodi per inibire la riduzione della BMD per mezzo di farmaci anti-riassorbitivi [14]. La mancanza di alternative di tipo meccanico che evitino l'insorgenza di problematiche legate alla struttura ossea rende questa l'unica strada al momento disponibile, benché susciti una certa diffidenza.

Il rischio dell'assunzione di farmaci è infatti evidentemente legato ai loro effetti collaterali, oltre che ai possibili conflitti risultanti dalla loro combinazione [1]. Un esempio riguarda la midodrina e la prometazina, utilizzata per contrastare il mal di volo spaziale [21].

In ogni caso, sia per quanto riguarda le soluzioni saline che i farmaci, non si può pensare di evitare l'intolleranza ortostatica esclusivamente attraverso la loro assunzione e la loro efficacia va abbinata ad altre contromisure per ottenere risultati soddisfacenti. Va infatti ammesso che l'uso di queste sostanze non risolve alla radice il problema della perdita di fluidi, ma pone semplicemente un rimedio temporaneo [1].

4.3 Lower Body Negative Pressure

Il metodo noto come Lower Body Negative Pressure (LBNP) consiste nell'inserire la parte inferiore del corpo in un macchinario di forma allungata e a tenuta d'aria, presentato in fig. 4.2, nel quale si ha una pressione negativa grazie all'ausilio di una pompa a vuoto [1]. La pressione all'interno del dispositivo varia tra i -40 e i -60 mmHg [11]. L'effetto immediato di questo gradiente di pressione indotto sul corpo è il movimento del sangue verso la periferia inferiore, che porta a una distribuzione paragonabile a quanto si osserva sulla Terra.

La configurazione del LBNP può prevedere o meno un sellino [11]. La differenza sostanziale tra i due sistemi è che il dispositivo sprovvisto di seduta spinge maggiormente il corpo verso il fondo del macchinario, portando i piedi a stretto contatto col fondo e causando una pressione di contatto maggiore. A questo meccanismo è associata una contrazione dei muscoli degli arti inferiori che impedisce il ristagno venoso tipico della posizione eretta.

Il grande vantaggio di questo sistema è che permette di ottenere una distribuzione adeguata del sangue indipendentemente dalla gravità e che allo stesso tempo i suoi effetti possono essere modulati in base alle necessità del momento andando a modificare il setting della pompa [1].

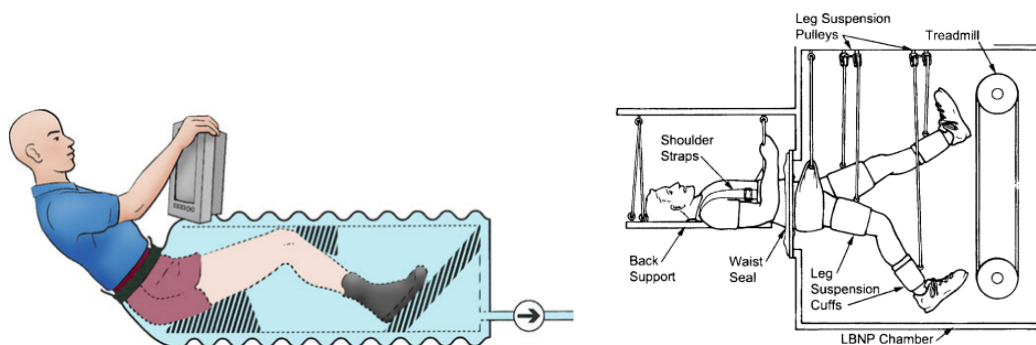


Figura 4.2: (sx) Schema semplificato della LBNP, che sfrutta un macchinario a forma di tubo contenente la metà inferiore del corpo [1]. (dx) Schema che mostra l'utilizzo della LBNP in combinazione con un tapis-roulant, in posizione supina, per simulazioni cardiovascolari e muscolo-scheletriche contemporanee [25].

Va notato che la LBNP non può da sola contrastare gli effetti dell'intolleranza ortostatica, in quanto per farlo prevederebbe tempi e frequenze di utilizzo impraticabili. Per questo motivo si associa a questo metodo l'utilizzo di tapis roulant, secondo un meccanismo mostrato in fig. 4.2 [1], in modo da combinare gli effetti benefici del gradiente di pressione e del movimento con modalità più comode per l'utilizzatore e utili per la simulazione di svariate attività abituali nello spazio, come quelle extraveicolari ¹. È stato possibile, in una serie di esperimenti basati sull'HDT della durata rispettivamente di 30 e 60 giorni [6], mantenere la tolleranza ortostatica entro limiti accettabili alternando quotidianamente 5-10 min di LBNP a riposo a 40 min di LBNP in corsa, con effetti positivi anche sul recupero del tessuto muscolare, l'arresto del degrado osseo e il mantenimento della massa cardiaca.

In alternativa all'esercizio fisico si è associato al LBNP l'assunzione di soluzioni saline [11] nei giorni precedenti il rientro per alcuni astronauti in orbita. I risultati hanno mostrato che in questo caso sono necessarie 4 ore di LBNP a riposo per contrastare a sufficienza l'intolleranza ortostatica grazie a un incremento del volume di fluidi sia vascolare che extra-vascolare [25], ma si tratta di tempi eccessivamente lunghi.

Un altro analogo col quale è stata testata la validità del LBNP, ma per contrastare gli effetti acuti della microgravità, è il volo parabolico [1].

¹Extra-Vehicular Activity (EVA)

4.4 Gravity Suits

Le tute gravitazionali sono equipaggiamenti speciali indossabili dagli astronauti che inducono sforzi sul corpo simili a quelli presenti sulla Terra.

Alcuni esempi, di invenzione russa, sono delle bande elastiche chiamate *Braslets* [1] che stringono la coscia e riducono, ma solo parzialmente, l'afflusso di sangue alla parte superiore del corpo. Tra gli effetti benefici, si segnala [25] una riduzione del mal di testa dovuto al *fluid shift* e della tachicardia, insieme a una limitazione della perdita di volume del plasma. Si sono dimostrate tuttavia inefficaci contro il decondizionamento a lungo termine. Un possibile utilizzo di simili accessori si può inserire nel rientro, in cui sono i valori di accelerazione intermedi tra 0 e 1 g a essere padroni [21]: per questo motivo l'analogo più consigliato per testare le capacità di questi dispositivi e scegliere i valori di compressione ideali è il volo parabolico.



Figura 4.3: Rappresentazione di una Penguin Suit [1]

Hanno riscontrato un maggiore successo le *Penguin Suits*, di cui si ha una rappresentazione in fig. 4.3 [1], sempre di ideazione russa e introdotte negli anni '70 nella loro prima versione, che comprendeva una tuta intera simile a quelle utilizzate normalmente dagli astronauti con l'aggiunta di elastici posizionati strategicamente e agganciati in modo tale da esercitare sul corpo una forza contro cui dovesse lavorare.

Attualmente sono in fase di sviluppo nuove tute aderenti [1] che simulino in modo più adeguato le limitazioni poste al movimento da un campo gravitazionale. Allo stesso tempo si lavora in modo tale che queste tute siano abbastanza comode da non portare a sensazioni di malessere prolungato. Lo sviluppo di contromisure di questo tipo ha dunque implicazioni fondamentali per lo svolgimento efficiente delle attività in orbita, in quanto un equipaggiamento ideale permetterebbe di ridurre la necessità di esercizio fisico e aumentare le ore a disposizione degli astronauti per compiere i propri esperimenti.

4.5 Gravità artificiale

La gravità artificiale ha suscitato in diverse occasioni l'interesse degli esperti per la sua presunta capacità di alleviare gli effetti della microgravità simulando nello spazio le condizioni di carico esercitato sul corpo in condizioni normali; questo dovrebbe valere per tutti i sistemi e gli apparati fin'ora discussi contemporaneamente, a differenza delle contromisure fin'ora analizzate [25]. L'uso della gravità artificiale ha in passato permesso di capire l'influenza, oggi data per scontata, della gravità sulla distribuzione sanguigna nel corpo [1]: è infatti possibile comprendere questa relazione non solo studiando la microgravità, ma anche il suo opposto.

Da un punto di vista tecnico, la gravità artificiale può essere ricreata per mezzo di centrifughe a braccio corto [1], nelle quali gli astronauti dovrebbero passare un tempo prefissato subendo accelerazioni di intensità prefissata. Una comune procedura prevede un'ora di centrifuga a $2.5 g$ [14], ma variando opportunamente lunghezza del braccio e velocità angolare si possono ottenere svariate combinazioni le quali hanno come risultato accelerazioni comprese tra 1 e $4 g$ [25].

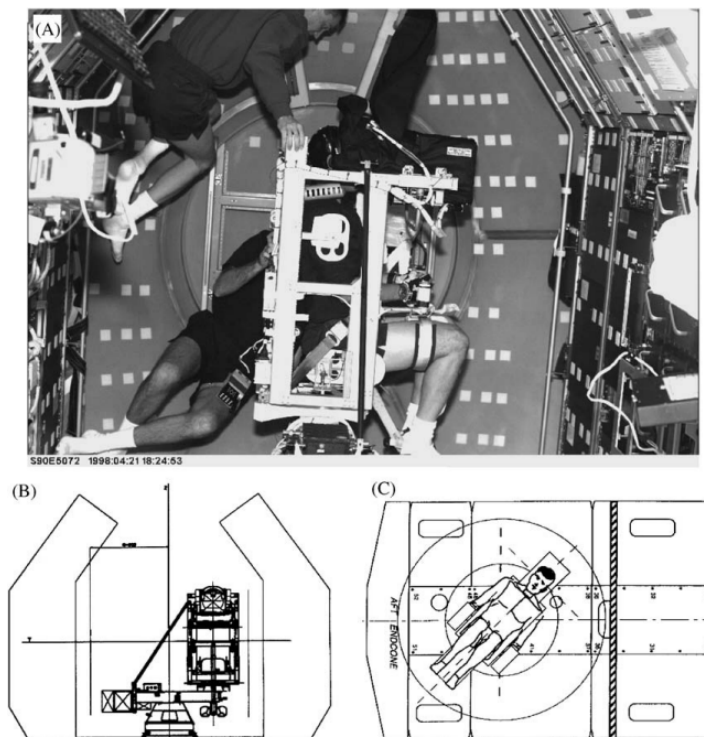


Figura 4.4: La centrifuga utilizzata durante i test a bordo dello Space Shuttle Columbia [8].

Una configurazione popolare nei test effettuati in merito consiste nel posizionare il soggetto supino con la testa vicina all'asse di rotazione e i piedi disposti verso l'esterno [25].

A differenza delle altre contromisure analizzate fino a questo momento, la gravità artificiale sembra essere l'unica in grado di agire sul decadimento delle funzioni degli

organi otolitici, con un possibile miglioramento della capacità del corpo nel mantenere la tolleranza ortostatica. Si sono confrontate a proposito le condizioni fisiche di una serie di astronauti in rientro dalla missione *Neurolab* a bordo dello Space Shuttle Columbia [8], alcuni dei quali erano stati sottoposti ad accelerazioni centripete pari a $1 g$ o $0.5 g$ durante il volo per mezzo della centrifuga raffigurata in fig. 4.4. La posizione dell'occhio è stata monitorata in 3D per mezzo di apposite apparecchiature.

L'analisi emodinamica è stata effettuata per mezzo di lettini motorizzati in grado di passare da una posizione orizzontale a una inclinazione di 60° . La misura della resistenza dei vasi sanguigni, effettuata mediante elettrodi strategicamente piazzati in diversi segmenti del corpo e di cui si può vedere l'andamento in fig. 4.5, ha permesso di determinare la variazione in termini di volume del sangue nel segmento stesso. Il giorno del rientro, è stato confermato che, mentre nei soggetti non sottoposti a centrifugazione si sono verificati con una maggiore incidenza i sintomi tipici dell'intolleranza ortostatica, coloro che avevano preso parte all'esperimento hanno mostrato sempre una risposta emodinamica adeguata all'inclinazione e dei riflessi vestibolo-oculari simili a quelli pre-volo. Si possono riscontrare i risultati della prova nelle fig. 4.6.

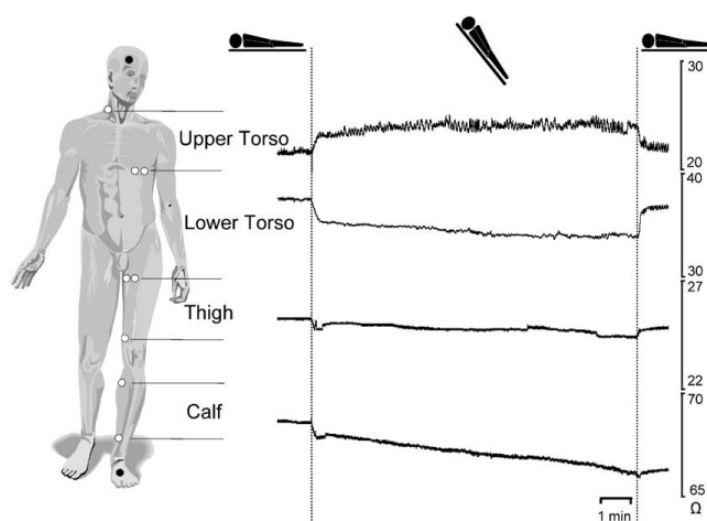


Figura 4.5: Schema che illustra la disposizione degli elettrodi nel corpo e la resistenza opposta al flusso sanguigno dalle vene nei vari segmenti in cui è stato suddiviso: una variazione positiva della resistenza è direttamente collegata a una perdita di fluidi nel segmento considerato [8].

La maggior parte degli studi in merito ha utilizzato le centrifughe in seguito a lunghi esperimenti su lettini inclinati [1] per contrastare l'intolleranza ortostatica da essi indotta.

Nello studio dei valori più adeguati di g per controbilanciare gli effetti della microgravità assume inoltre un ruolo di importanza crescente il volo parabolico [22], grazie al quale è possibile considerare rapidamente e all'interno dello stesso volo un range di g compresi tra 0 e 1.8.

Le promesse in termini di efficacia e assistenza agli astronauti della gravità artificiale si scontrano purtroppo con diverse difficoltà tecniche e operative: in primo luogo, la combinazione di velocità di rotazione, braccio della centrifuga e tempo di utilizzo ideali non è

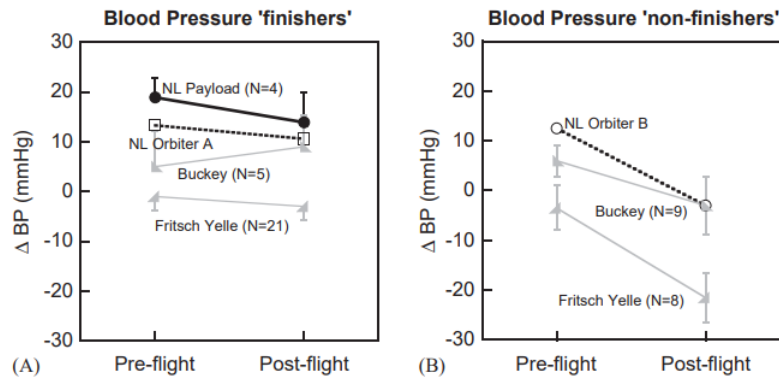


Figura 4.6: Grafico che mostra la variazione della pressione sanguigna (ΔBP) tra prima e dopo il volo spaziale: con *finishers* si intendono gli astronauti che sono riusciti a restare coscienti dopo 10 minuti di posizione eretta. Tra essi ci sono coloro che avevano effettuato le prove di centrifugazione (linea nera) e la loro pressione sanguigna si è mantenuta entro ± 5 mmHg rispetto a prima del volo. La linea tratteggiata indica invece i membri della missione che non hanno effettuato esperimenti in centrifuga, e si nota come uno dei due sia *non finisher*, cioè è svenuto. Le linee grigie indicano studi precedenti [8].

stata ancora determinata [1], soprattutto perché è stato notato che diverse condizioni fisiche da controbilanciare necessitano di diversi parametri. Inoltre, si hanno preoccupazioni riguardanti la sicurezza di simili apparati [14].

Idealmente la preservazione del controllo del moto e dei feedback sensoriali necessita di esercizi effettuati all'interno di un ambiente nel quale si abbia la sensazione di essere sottoposti alla gravità [6]: in tal senso l'uso della gravità artificiale avrebbe un suo senso. Ciononostante, la deambulazione dentro strutture rotanti è molto complicata e al momento l'unione di simulazione della gravità ed esercizio, che teoricamente potrebbe risolvere buona parte dei problemi delle attuali contromisure, è irrealizzabile. Una possibile soluzione potrebbe essere quella di aumentare il braccio della centrifuga [14], ma la sua collocazione all'interno delle strutture orbitanti sarebbe un rompicapo non trascurabile. Una proposta spesso menzionata è la costruzione di stazioni spaziali che siano messe in rotazione per avere effetti simili a quelli della gravità terrestre con bracci maggiori e di conseguenza velocità di rotazione inferiori [25]. Le metodologie con cui queste stazioni andrebbero costruite e alimentate sono tuttavia ancora oggi argomento di dibattito.

Nonostante le difficoltà incontrate nella loro possibile implementazione in orbita, le centrifughe restano uno strumento adeguato per studiare a terra gli effetti della gravità sul corpo, specie per quelle fasi del volo spaziale nelle quali si raggiungono accelerazioni di vari g [1], come lift-off e rientro.

Capitolo 5

Conclusioni

L'utilizzo di analoghi terrestri per la riproduzione della microgravità ha permesso negli ultimi decenni uno studio approfondito degli effetti sul corpo umano della permanenza più o meno duratura nello spazio e dei meccanismi sottostanti le sensazioni riscontrate dagli astronauti nel corso delle varie missioni. In particolare, questi risultati sono stati raggiunti in modo decisamente più economico e con la possibilità di maggiori controlli di quanto sarebbe stato possibile attraverso l'osservazione diretta nello spazio stesso.

Partendo dal punto di vista fisiologico, sono stati analizzati i meccanismi di decondizionamento e indebolimento di alcune delle funzioni di tre sistemi fondamentali dell'organismo: sistema circolatorio, apparato locomotore e apparato vestibolare. La condizione riscontrata in generale è quella di una progressiva perdita di determinate funzioni di questi sistemi o un deterioramento delle stesse, causato dal fatto che la scomparsa della sensazione di trovarsi sotto l'influenza di un campo gravitazionale porta a una serie di meccanismi di adattamento che tendono a escludere quei processi che vengono reputati inutili ai fini del mantenimento dell'equilibrio omeostatico.

Tra le condizioni analizzate, quelle di maggiore rilievo si sono dimostrate l'intolleranza ortostatica, causata dall'ipovolemia (a sua volta condizionata dalla redistribuzione del sangue alla parte superiore del corpo), l'atrofia muscolare e l'osteoporosi, oltre a una perdita dei riferimenti inerziali da parte degli organi otolitici, che basano il loro funzionamento sulla direzione dell'accelerazione gravitazionale.

Sono stati analizzati in seguito una serie di analoghi tra quelli più comuni in utilizzo al giorno d'oggi, ragionando per ognuno sulle opportunità da esso apportate, ma tenendo in mente le possibili minacce alla correttezza dei risultati ottenuti.

Tra gli analoghi proposti quello che si è rivelato più completo per una serie di applicazioni fisiologiche è sicuramente l'Head Down Tilt. Esso ha permesso nel tempo di far avanzare la comprensione intorno all'evoluzione del sistema circolatorio in $0 g$, ma anche di individuare in modo accurato le zone dello scheletro più colpite in seguito a lunghe esposizioni.

Le immersioni hanno dimostrato una buona affidabilità nello studio degli stessi fenomeni, in particolare nella loro versione *dry*, basandosi sulla pressione che un liquido esercita sul corpo col quale è a contatto. Questo fatto, che supera le difficoltà legate alla presenza di pressioni di contatto con supporti rigidi trovate nell'HDT, ha come svantaggio una ridotta mobilità per il soggetto.

La Unilateral Lower Limb Suspension è a sua volta un analogo conveniente per la sua versatilità e i costi contenuti, soprattutto nello studio della mancanza di carichi agenti sulla muscolatura e ossatura di un arto, benché questo sia esclusivamente a livello locale. A scapito dei suoi punti di forza tuttavia va riconosciuto che si tratta dell'analogo nel quale il controllo sul partecipante è inferiore, il che potrebbe portare a dover considerare molte più variabili nella stima degli errori nei dati ricevuti.

Per quanto riguarda i voli parabolici, essi hanno mostrato una grande efficacia nella comprensione dell'adattamento dell'apparato vestibolare nello spazio, in particolare di come la percezione del sopra e del sotto sia pesantemente modificata dagli input agenti sugli organi otolitici. Ciononostante, la breve durata delle esperienze di caduta libera porta inevitabilmente questo analogo a essere utilizzato solo per gli effetti acuti riscontrati in microgravità.

L'utilizzo degli analoghi ha messo in luce nel tempo nuovi metodi per controbilanciare gli effetti indesiderati della microgravità. In tal senso, è stato analizzato il processo che ha visto l'ideazione e il perfezionamento di svariate contromisure legate ai meccanismi sopracitati, tra le quali quelle attive (che riguardano l'esercizio fisico) e quelle passive, come l'assunzione di sostanze saline o farmaci, la LBNP, le tute gravitazionali e la gravità artificiale. In generale, dopo aver analizzato singolarmente punti di forza e debolezze di ogni contromisura, è emerso un quadro generale in cui si evince che nessuna di queste, allo stato attuale, può contrastare da sola gli effetti della microgravità, ed è necessaria una loro combinazione per ottenere un approccio globale al problema. Questo fatto è sostanzialmente causato dalla necessità di permettere il movimento del corpo per evitare il degrado dell'apparato locomotore e allo stesso tempo simulare le condizioni di pressione agenti sul corpo a Terra per contrastare il movimento di fluidi e la loro perdita progressiva.

In vista delle missioni del futuro, che vedranno equipaggi umani coinvolti in viaggi di durate e distanze sempre maggiori, questo testo vuole sottolineare la necessità di proseguire nella ricerca fin'ora compiuta con l'obiettivo di comprendere meglio alcuni aspetti al momento poco compresi o sui quali si è rivolta meno attenzione di quanto meriterebbero. Si può citare in tal senso il meccanismo che porta la circolazione ad assumere un nuovo stato di equilibrio nelle prime ore di microgravità, ma anche l'adattamento a lungo termine del sistema scheletrico all'assenza di carichi esterni e in generale le strategie da mettere in atto per contrastare questi fenomeni al rientro sulla Terra. Si possono auspicare inoltre ricerche più approfondite nel range temporale che va dalle poche settimane ai mesi. Allo stesso tempo sono necessari approfondimenti che tengano in considerazione tutti gli effetti della microgravità in contemporanea e non separatamente come fatto spesso fin'ora; ciò tuttavia si scontra inevitabilmente con grosse problematiche organizzative e logistiche. Infine, va sottolineata anche la necessità di aumentare il campione statistico a disposizione, in particolare in questo periodo storico in cui la composizione degli equipaggi è diventata progressivamente più diversificata che mai, e anche in vista dell'aumento previsto nel numero di persone presenti nello spazio per motivi di commercio o turismo.

Bibliografia

- [1] Hanns-Christian Gunga, Victoria Weller von Ahlefeld, Hans-Joachim Appell Coriolano, Andreas Werner, and Uwe Hoffmann. *Cardiovascular system, red blood cells, and oxygen transport in microgravity*. Springer, 2016.
- [2] Patrik Sundblad and G Kim Prisk. Something from nothing? space research without leaving the planet. *Journal of Applied Physiology*, 120(8):889–890, 2016.
- [3] Bruce M Koeppen and Bruce A Stanton. *Berne and levy physiology e-book*. Elsevier Health Sciences, 2017.
- [4] John E Hall and Michael E Hall. *Guyton and Hall textbook of medical physiology e-Book*. Elsevier Health Sciences, 2020.
- [5] J. Gordon Betts et al. *Anatomy and Physiology 2e*. OpenStax, 2022.
- [6] Alan R Hargens and Sara Richardson. Cardiovascular adaptations, fluid shifts, and countermeasures related to space flight. *Respiratory physiology & neurobiology*, 169:S30–S33, 2009.
- [7] Benjamin D Levine, Julie H Zuckerman, and James A Pawelczyk. Cardiac atrophy after bed-rest deconditioning: a nonneural mechanism for orthostatic intolerance. *Circulation*, 96(2):517–525, 1997.
- [8] Steven T Moore, André Diedrich, Italo Biaggioni, Horacio Kaufmann, Theodore Raphan, and Bernard Cohen. Artificial gravity: a possible countermeasure for post-flight orthostatic intolerance. *Acta Astronautica*, 56(9-12):867–876, 2005.
- [9] Anna-Maria Liphardt, Rodrigo Fernandez-Gonzalo, Kirsten Albracht, Jörn Rittweger, and Laurence Vico. Musculoskeletal research in human space flight—unmet needs for the success of crewed deep space exploration. *npj Microgravity*, 9(1):9, 2023.
- [10] Per A Tesch, Tommy R Lundberg, and Rodrigo Fernandez-Gonzalo. Unilateral lower limb suspension: From subject selection to “omic” responses. *Journal of Applied Physiology*, 120(10):1207–1214, 2016.
- [11] Kunihiko Tanaka, Naoki Nishimura, and Yasuaki Kawai. Adaptation to microgravity, deconditioning, and countermeasures. *The Journal of Physiological Sciences*, 67(2):271–281, 2017.
- [12] Laurence Vico, Philippe Collet, Alain Guignandon, Marie-Hélène Lafage-Proust, Thierry Thomas, Mohamed Rehaïlia, and Christian Alexandre. Effects of long-term

- microgravity exposure on cancellous and cortical weight-bearing bones of cosmonauts. *The Lancet*, 355(9215):1607–1611, 2000.
- [13] Roy Yuen-chi Lau and Xia Guo. A review on current osteoporosis research: with special focus on disuse bone loss. *Journal of osteoporosis*, 2011, 2011.
- [14] Alan R Hargens and Laurence Vico. Long-duration bed rest as an analog to microgravity. *Journal of applied physiology*, 120(8):891–903, 2016.
- [15] L Treffel, N Massabuau, K Zuj, M-A Custaud, G Gauquelin-Koch, S Blanc, C Gharib, and C Millet. Pain and vertebral dysfunction in dry immersion: a model of microgravity simulation different from bed rest studies. *Pain Research and Management*, 2017, 2017.
- [16] Heather L Jenkin, Richard T Dyde, James E Zacher, DC Zikovitz, MR Jenkin, RS Allison, IP Howard, and LR Harris. The relative role of visual and non-visual cues in determining the perceived direction of “up”: experiments in parabolic flight. *Acta Astronautica*, 56(9-12):1025–1032, 2005.
- [17] Donald E Watenpaugh. Analogs of microgravity: head-down tilt and water immersion. *Journal of Applied Physiology*, 120(8):904–914, 2016.
- [18] Mehrnaz Hosseini, Saeid Farahani, Mansoureh Adel Ghahraman, Shohreh Jalaie, and Aboulfazl Khademi. Vestibular findings in motion sickness. *Auditory and Vestibular Research*, 24(3):120–127, 2015.
- [19] Faisal Karmali and Mark Shelhamer. The dynamics of parabolic flight: flight characteristics and passenger percepts. *Acta astronautica*, 63(5-6):594–602, 2008.
- [20] Meenakshi Pandiarajan and Alan R Hargens. Ground-based analogs for human spaceflight. *Frontiers in physiology*, page 716, 2020.
- [21] Lori Ploutz-Snyder. Evaluating countermeasures in spaceflight analogs. *Journal of Applied Physiology*, 120(8):915–921, 2016.
- [22] Mark Shelhamer. Parabolic flight as a spaceflight analog. *Journal of applied physiology*, 120(12):1442–1448, 2016.
- [23] IB Kozlovskaya, IV Sayenko, OL Vinogradova, TF Miller, DR Khusnutdinova, KA Melnik, and EN Yarmanova. New approaches to countermeasures of the negative effects of microgravity in long-term space flights. *Acta Astronautica*, 59(1-5):13–19, 2006.
- [24] Deborah W Korth. Exercise countermeasure hardware evolution on iss: the first decade. *Aerospace medicine and human performance*, 86(12):A7–A13, 2015.
- [25] Anne Pavy-Le Traon, Martina Heer, Marco V Narici, Joern Rittweger, and Joan Vernikos. From space to earth: advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986–2006). *European journal of applied physiology*, 101:143–194, 2007.