

Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

**ELABORAZIONE DI IMMAGINI
ECOGRAFICHE ACQUISITE IN CONDIZIONI
DI MICROGRAVITÀ**

Tesi di Laurea di:

SAMUELE ORTOLANI

Relatore:

Prof. Ing. **CLAUDIO LAMBERTI**

Automazione ed Organizzazione Sanitaria

Correlatore:

Dott. Ing. **CRISTIANA CORSI**

Anno Accademico 2002/2003

Parole chiave:

Microgravità

Intolleranza Ortostatica

Ecografia

Level Set

LBNP

Sommario

Introduzione	1
Capitolo1	
FISIOLOGIA IN MICROGRAVITÀ	7
1.1 La microgravità	7
1.1.1 Applicazioni della microgravità	11
1.2 Fisiologia in microgravità	12
1.2.1 Effetti dell'assenza della forza di gravità	12
Osso e metabolismo minerale	13
Muscolo	14
Cuore e circolazione	14
1.2.2 Influenza della gravità sul sistema cardiocircolatorio	15
1.2.3 Fisiologia cardiovascolare dopo i voli e Intolleranza Ortostatica	31
1.2.4 Contromisure in volo	36
1.2.4.1 Low Body Negative Pressure (LBNP)	40
1.2.4.2 Assunzione di soluzioni saline ed idratazione	42
1.2.4.3 Tute Anti g	44
1.2.4.4 Esercizi aerobici ed uso del LBNP	45
1.2.4.5 Assunzione di farmaci e sviluppi futuri	48
1.3 Metodi per ottenere la microgravità	50
1.3.1 L'assenza di peso ottenuta attraverso una caduta libera	51
1.3.2 I voli parabolici dell'ESA	53
1.3.2.1 Le caratteristiche dell'Airbus A-300 "Zero G"	57
1.3.2.2 Manovra di volo parabolico	58
1.3.2.3 Organizzazione di una campagna di voli parabolici	60
1.3.2.4 Norme di sicurezza	61

Capitolo 2
ECOGRAFIA E METODI LEVEL SET DI EVOLUZIONE DI CURVE
E SUPERFICI NELLO SPAZIO 67

2.1	Introduzione all'ecografia	67
2.1.1	Cenni storici	70
2.1.2	Ultrasuoni e loro caratteristiche fisiche	72
2.1.2.1	Onde elastiche	75
2.1.2.2	Impedenza acustica	82
2.1.2.3	Riflessione e rifrazione	83
2.1.2.4	Assorbimento ed attenuazione	89
2.1.3	Trasduttori	93
2.1.4	Elementi funzionali di un ecografo	97
2.1.5	Ecocardiografia e tecniche di visualizzazione	100
2.2	Metodi "Level set" di evoluzione di curve e superfici nello spazio	107

Capitolo 3
ELABORAZIONE DI IMMAGINI ECOGRAFICHE ACQUISITE IN
MICROGRAVITÀ 115

3.1	Obiettivi delle elaborazioni	115
3.2	Descrizione del Data Set	118
3.3	Panoramica su Matlab	128
3.4	Procedura di segmentazione	132
3.5	Determinazione dei coefficienti di conversione per le aree	136
3.6	Script "TrovareaMT.m"	145
3.7	Calcolo delle distanze tra i contorni	156

3.7.1 Script “trecontorni.m”	156
3.7.2 Script “Confronto.m”	162
Capitolo 4	
ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI OTTENUTI	169
4.1 Analisi statistica stime script metodo Level set e manual tracing	170
4.2 Analisi statistica stime script “TrovareaMT”	178
4.3 Variabilità Interoperatore	185
4.4 Analisi Morfologica	190
4.5 Conclusioni e osservazioni	193
Conclusioni	195
Bibliografia	197
Articoli	197
Tesi di Laurea	198
Riferimenti Web	199
Ringraziamenti	201
Appendice Codici Matlab	

Introduzione

Il continuo sviluppo tecnologico che caratterizza la società moderna interessa tutti i settori della nostra vita. Questa grande spinta innovativa risulta essere determinante nello sviluppo della ricerca soprattutto in uno dei settori strategicamente più importanti ovvero quello medico-sanitario. In particolare, negli ultimi decenni, si è assistito ad una crescente integrazione tra conoscenze di carattere prettamente medico e biomedico e conoscenze di tipo ingegneristico. L'introduzione dell'informatica in ambito biomedico rientra in questa vasta gamma di sinergie risultando esserne spesso la forza trainante dal punto di vista applicativo. In particolar modo l'uso di tecnologie informatiche afferenti al ramo della visualizzazione scientifica costituisce oggi il mezzo più idoneo per una rapida ed esauriente rappresentazione dei dati biomedici.

Nell'ambito della diagnostica per immagini l'ecografia ricopre un posto di primaria importanza. Tra i vantaggi derivanti dal suo utilizzo ricordiamo brevemente che si tratta di una tecnica non invasiva, che non usa radiazioni ionizzanti, estremamente portatile facile da utilizzare e relativamente economica rispetto alle altre tecniche di acquisizione di immagini. Le tecniche ad ultrasuoni hanno dato soprattutto un notevole impulso allo studio e alla ricerca clinica della funzionalità cardiaca assumendo una importanza fondamentale sia in fase diagnostica che prognostica. La tecnica ecocardiografica risulta particolarmente affidabile per la valutazione delle modificazioni morfologiche e funzionali del miocardio. L'ecografia cardiaca infatti rappresenta una metodica non invasiva e di facile impiego

per visualizzare il cuore durante lo svolgimento della sua funzione fisiologica. Grazie al grande progresso tecnologico che ha interessato negli ultimi anni il campo della microelettronica, si hanno ora a disposizione degli strumenti in grado di acquisire in tempo reale l'intero volume del cuore durante il ciclo cardiaco. In questo importante settore della ricerca opera da anni il laboratorio di Bioimmagini del Dipartimento di Elettronica Informatica e Sistemistica dell'Università degli Studi di Bologna presso il quale sono stati messi a punto degli algoritmi in grado di individuare i contorni endocardici per l'estrazione dell'area e del volume del ventricolo sinistro. L'obiettivo di questa tesi è di verificare l'efficacia di tale procedura e in particolar modo ci siamo posti due obiettivi principali:

- la validazione della procedura semi-automatica basata sul "modello Level-Set" in grado di individuare i contorni endocardici per l'estrazione dell'area del ventricolo sinistro.
- la valutazione degli effetti dell'assenza di peso indotti dalla microgravità sulle dimensioni del ventricolo sinistro (LV) e dell'efficacia dell'applicazione LBNP (Low Body Negative Pressure) come contromisura .

Per fare questo abbiamo analizzato un data set di immagini ecocardiografiche acquisite durante una campagna di voli parabolici dell'ESA (Agenzia Spaziale Europea) l'unico sistema che consente di condurre esperimenti medico-scientifici sull'uomo in condizioni di assenza di peso, completando gli studi effettuati nello spazio e sulla terra.

L'apparato cardiovascolare risulta essere, come vedremo, fortemente influenzato dalla forza di gravità. E in particolare le alterazioni emodinamiche che si vengono a creare in questa nuova situazione sono responsabili di molte delle conseguenze associate all'intolleranza ortostatica

(una serie di disturbi quali vertigini e nausea riconducibili ad una insufficiente circolazione di sangue alla testa e al cervello cui segue, dopo pochi minuti di stazione eretta, un senso di svenimento che costringe ad assumere la posizione orizzontale.) sperimentata dagli astronauti al loro rientro nel campo gravitazionale terrestre dopo i voli spaziali.

Poiché l'adattamento alla microgravità provoca nell'organismo delle modificazioni simili alle conseguenze dell'invecchiamento, lo sviluppo di nuovi metodi per prevenire gli effetti negativi dell'esposizione all'assenza di peso può trovare applicazioni importanti nelle azioni di promozione della salute e di medicina preventiva sulla Terra.

Questa tesi consta di 4 capitoli e di una appendice di cui si riporta una breve descrizione:

Capitolo primo - Fisiologia in microgravità.

In questo capitolo verrà brevemente introdotto il concetto di microgravità come condizione straordinaria per effettuare esperimenti scientifici. Successivamente verranno descritti gli effetti dell'assenza di peso sulla fisiologia umana ed in particolare sul sistema cardiocircolatorio. Quindi descriveremo le tecniche comunemente utilizzate per contrastare e limitare gli effetti negativi indotti dall'assenza di peso sull'uomo. Infine illustreremo i diversi metodi utilizzati per ottenere condizioni di microgravità soffermandoci in particolare sui voli parabolici.

Capitolo secondo – Ecografia e Metodi Level Set di evoluzione di curve e superfici nello spazio.

Viene descritta l'ecografia come tecnica di acquisizione di bioimmagini evidenziandone i vantaggi ed i limiti. Poi passeremo a descrivere i metodi Level set, basati su equazioni differenziali alle derivate parziali, per l'estrazione di contorni cardiaci alla base della procedura utilizzata per segmentare le immagini ecocardiografiche oggetto del nostro studio.

Capitolo III – Elaborazione di immagini acquisite in microgravità.

Viene presentata la procedura di elaborazione applicata ad immagini ecocardiografiche acquisite durante due campagne di voli parabolici in condizioni di microgravità.

Inoltre in questo capitolo descriviamo la procedura di validazione del metodo semiautomatico di detezione dei contorni endocarditi, confrontando attraverso analisi di regressione e di Bland-Altman, i contorni ottenuti da tale procedura con quelli tracciati manualmente da due esperti cardiologi.

Capitolo IV – Analisi statistica dei risultati ottenuti.

In questo capitolo effettueremo un'analisi dei risultati ottenuti compiendo le elaborazioni statistiche.

Le conclusioni e una breve indicazione degli sviluppi futuri chiudono la tesi. In appendice viene riportato il codice degli script realizzati in Matlab.

Capitolo primo

FISIOLOGIA IN MICROGRAVITÀ

In questo capitolo verrà brevemente introdotto il concetto di microgravità come importante condizione per effettuare esperimenti scientifici. Successivamente verranno descritti gli effetti dell'assenza di peso sulla fisiologia umana ed in particolare sul sistema cardiocircolatorio. Quindi descriveremo le tecniche comunemente utilizzate per contrastare e limitare gli effetti negativi indotti dall'assenza di peso sull'uomo. Infine illustreremo i diversi metodi utilizzati per ottenere condizioni di microgravità soffermandoci in particolare sui voli parabolici.

1.1 La microgravità

La gravità è una delle quattro forze fisiche fondamentali. Le altre tre sono la forza elettromagnetica, la forza di interazione nucleare debole e la forza di interazione nucleare forte. E' una proprietà dell'intero universo che permette alla luna di ruotare intorno alla Terra e mantiene la Terra stessa su un'orbita intorno al sole; sulla terra essa interessa tutti i processi fisici, chimici e biologici e l'effetto più evidente e più immediatamente apprezzabile della gravità è l'attrazione che sulla Terra ci dà la sensazione

di peso e che tiene tutto quanto, noi compresi, saldamente attaccati alla superficie terrestre.

Dipende dalla massa dei corpi ed è inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra essi:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

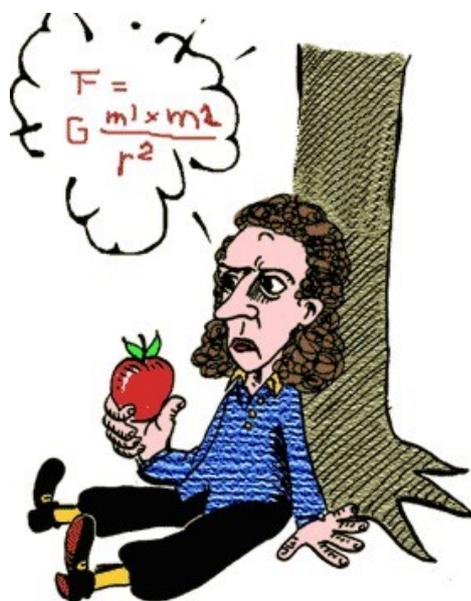


Figura 1-1

Le leggi del moto sono strettamente dipendenti dal campo gravitazionale in cui il moto si compie: la caduta dei gravi, il moto di un proiettile, la rivoluzione dei pianeti sono tutti governati dalle leggi della gravità.

La forza di gravità è responsabile anche di un gran numero di fenomeni fisici, il cui rapporto con essa è meno intuitivo come ad esempio la convezione termica, la spinta idrostatica (galleggiamento) e la pressione

idrostatica . Inoltre permette di separare, attraverso il processo di sedimentazione, i costituenti più pesanti da quelli più leggeri ed è alla base dei fenomeni per il trasporto di liquidi. La gravità influenza anche molti dei processi che hanno un qualche impatto nelle scienze della vita, come ad esempio la capillarità, i flussi laminari, l'osmosi, i fenomeni di interfaccia, la crescita di cristalli, e così via. La dinamica dei fluidi sulla Terra è fortemente condizionata dalla gravità.

Per una miglior comprensione di certi fenomeni fisici, chimici o biologici o per lo studio delle interazioni complesse di forze di natura diversa coinvolte in certi processi nei liquidi e nei gas è talvolta utile eliminare l'effetto della gravità. Infatti la gravità può mascherare il nostro punto di vista sull'insieme completo dei parametri che influenzano un processo fisico, chimico o biologico. La gravità può anche essere indesiderabile in determinati processi di produzione industriale. Per esempio i processi di diffusione e di trasporto o lo sviluppo di cristalli in condizioni normali di gravità sono dominati da effetti quali la galleggiabilità, la convezione termica e la sedimentazione.

La gravità non può essere semplicemente annullata, ma i relativi effetti possono essere compensati con l'aiuto di una appropriata forza di accelerazione. Questa forza di accelerazione deve avere esattamente lo stesso valore assoluto (eguale modulo) e verso opposto a quello del vettore di gravità locale. L'equilibrio di forze risultante è definito nel linguaggio comune assenza di gravità o assenza di peso ("weightlessness"). In pratica, tuttavia, una condizione esatta di equilibrio è difficile da verificarsi e una forza di gravità molto piccola è sempre presente. Pertanto gli addetti ai lavori parlano di microgravità (μg) piuttosto che di assenza di peso .

In microgravità i vari fenomeni fisici fondamentali sono alterati significativamente o persino completamente stravolti, in particolare la convezione, la galleggiabilità, la pressione idrostatica e la sedimentazione.

Vi sono in letteratura molte ricerche sull'influenza esercitata dall'assenza di gravità su certe funzioni biologiche e biochimiche. Le osservazioni più numerose e consolidate riguardano il campo della fisiologia. Uno dei dati più importanti è la notevole tolleranza degli organismi superiori alla microgravità, anche per periodi di tempo prolungati. Le ragioni di questa tolleranza sono probabilmente da ricercarsi nei meccanismi omeostatici di compensazione e di adattamento in grado di stabilire un nuovo equilibrio in risposta alle mutate condizioni ambientali. Pur tuttavia, negli astronauti sono state osservate alterazioni indotte dalla assenza di gravità. Alcune di queste, come vedremo meglio nel seguito di questo capitolo, si manifestano in pochi minuti, come ad esempio il senso di disorientamento rispetto all'ambiente, o il rapido spostamento dei fluidi corporei dalle parti basse al torace e alla testa. Per esposizioni alla microgravità più prolungate, si producono cambiamenti ancor più significativi, quali riduzione della massa e della forza muscolare, decondizionamento cardiovascolare, demineralizzazione e degradazione della struttura delle ossa, alterazioni dell'adattamento neurosensoriale e neurovestibolare. Sono inoltre noti gli effetti della assenza di gravità sull'apice radicale delle piante, struttura che contiene verosimilmente sistemi (statoliti) deputati alla percezione della gravità.

Ad un livello di organizzazione inferiore, quello cellulare, la microgravità sembra ancora avere un certo impatto. L'inibizione o la stimolazione della divisione e della crescita cellulare, l'aumento delle capacità biosintetiche, il rallentamento della via glicolitica e l'incremento della resistenza agli antibiotici di alcuni batteri sono solo alcuni esempi dei diversi effetti osservati in risposta alla microgravità. Ciò che ancora non è del tutto chiaro sono le reali basi di questo effetto e, soprattutto, qual è il limite inferiore di organizzazione della materia al quale vi è ancora sensibilità a variazioni del campo gravitazionale.

In conclusione si può dire che la compensazione della forza di gravità può contribuire a osservare e controllare meglio i fenomeni fisici, i processi chimici e biologici che sono oscurati o dominati dai suoi effetti.

1.1.1 Applicazioni della microgravità

Le costose missioni sulle stazioni spaziali per lo studio della microgravità trovano una loro valida giustificazione nel fatto che gli astronauti, gli ingegneri e gli scienziati utilizzano questa particolare ed unica situazione come uno speciale strumento per comprendere meglio i fenomeni che si verificano in presenza di gravità e trovare soluzioni. Questo consente di migliorare e ottimizzare i processi fisici, chimici e biologici sulla Terra importanti per la scienza, per la medicina e per lo sviluppo tecnologico.

In condizioni di assenza di peso gli scienziati ed i ricercatori biomedici possono osservare i cambiamenti funzionali nelle cellule, nelle piante, negli animali e negli esseri umani quando l'effetto della gravità è rimosso. Ciò può rivelare il funzionamento di processi basilari che sulla Terra sono confusi a causa della gravità. Gli esperimenti riguardanti la fisiologia umana hanno consentito di comprendere meglio il funzionamento del sistema cardiocircolatorio e del sistema di regolazione dei fluidi fisiologici. Questi risultati consentono di capire come gli astronauti si adattano alle condizioni di assenza di peso nello spazio e possono anche avere un effetto considerevole sul trattamento futuro dei pazienti sulla Terra.

La microgravità offre straordinarie opportunità per la ricerca di base, per la ricerca applicata o per i test tecnologici. Questo eccezionale ambiente di sperimentazione è un indispensabile strumento per contribuire al miglioramento della qualità della vita di ognuno di noi.

1.2 Fisiologia in microgravità

Le esperienze di permanenza di mesi nello spazio e le previsioni di voli interplanetari della durata di alcuni anni nel prossimo futuro, pongono alla fisiologia umana e alla medicina dell'esercizio fisico una serie di difficili interrogativi.

Dalla capacità dei ricercatori di rispondere in modo adeguato alle esigenze dell'astronauta, dipenderà il mantenimento nella navicella spaziale di condizioni fisiche accettabili, anche dopo anni di permanenza nello spazio, e un pronto riadeguamento alle caratteristiche terrestri al momento del rientro.

Durante la permanenza nello spazio l'organismo va incontro a tali e tante alterazioni (molto simili a quelle cui va incontro l'anziano, il disabile, il soggetto che rimane lungamente allettato) che il rientro a terra richiede una notevole capacità di riadattamento alla forza di gravità e un lungo periodo di riabilitazione. In questo paragrafo esamineremo alcune di queste alterazioni soffermandoci soprattutto su quelle che interessano il sistema cardiocircolatorio oggetto del nostro studio, unitamente alle contromisure. Queste ultime possono essere considerate come una sorta di "riabilitazione preventiva", che deve essere messa in atto durante il periodo di assenza di gravità, nel tentativo di rendere meno dannosa la permanenza nel cosmo. La ricerca medica nello spazio, molto probabilmente, produrrà insegnamenti che saranno anche utilizzabili sulla terra nel settore della riabilitazione.

1.2.1 Effetti dell'assenza della forza di gravità

La forza di gravità alla quale sono sottoposti sulla terra gli esseri viventi e non, regola in modo determinante la funzionalità di tutti gli apparati del nostro organismo. Il funzionamento del sistema cardiocircolatorio e

respiratorio, la distribuzione dei liquidi corporei nei vari tessuti e nei vasi sanguigni, la struttura dell'osso e la sua possibilità di mantenerne elevato il contenuto minerale, la composizione del muscolo, il complesso controllo dei movimenti corporei, risultato dell'integrazione di stimoli provenienti da recettori situati alla periferia e nel vestibolo, tutto ciò è stato per millenni condizionato dalla forza di gravità. Pertanto, la permanenza per periodi più o meno lunghi nello spazio, in condizioni di assenza di gravità, provoca una serie di squilibri, ad un organismo perfettamente adattato alla gravità terrestre.

Osso e metabolismo minerale. Sulla terra l'osso è costantemente sottoposto a processi di decalcificazione e ricalcificazione, regolati da numerosi fattori, tra cui è essenziale la contrazione muscolare. Il mantenimento della stazione eretta sulla terra dipende da continue contrazioni dei muscoli che impediscono al corpo di cadere in avanti. Tali muscoli sono per questo chiamati antigravitari (muscoli della colonna vertebrale, della parte anteriore della coscia e posteriore della gamba.). Le continue contrazioni muscolari, del tutto inavvertite, necessarie alla stazione eretta, provocano continue sollecitazioni sull'osso, sollecitazioni che rappresentano lo stimolo alla deposizione di calcio. L'attività fisica, poi, più o meno accentuata e intensa, della quotidiana vita di relazione, rappresentano un secondo stimolo fondamentale. Nello spazio, non esistendo la stazione eretta, così come nella lunga permanenza a letto, o in condizioni di scarso movimento fisico, (anziani, disabili, ecc.), l'osso perde la sua capacità di rigenerarsi, e la decalcificazione (osteoporosi) prevale sulla deposizione di minerali di calcio. Al rientro dalle missioni spaziali di media e lunga durata sono necessari mesi affinché il contenuto minerale osseo possa recuperare appieno, e non è affatto certo che ciò possa avvenire dopo una permanenza di qualche anno nello spazio.

Muscolo. La contrazione muscolare, lo sforzo fisico, l'esercizio, il movimento contro resistenza, le stesse continue contrazioni per mantenere la stazione eretta sono i mezzi che permettono al muscolo di mantenersi efficiente. Un aumento dell'attività fisica, del carico abituale cui il muscolo è sottoposto, rappresenta lo stimolo ad aumentarne il volume (ipertrofia muscolare). Nello spazio, l'assenza di gravità non richiede il mantenimento della posizione eretta e la contrazione muscolare avviene, se non in condizioni particolari e in rari momenti, con uno sforzo minimo. Ciò comporta una riduzione della massa muscolare del 20-30% già dopo poche settimane di permanenza in quota, così come la massa muscolare tende a ridursi sulla terra con l'avanzare dell'età, con la sedentarietà e con la disabilità di qualunque tipo. Alla riduzione della massa muscolare si associa una perdita di forza e soprattutto di forza esplosiva (massima potenza muscolare), che richiede una fine coordinazione dell'attivazione di più muscoli. Dopo un anno di permanenza nello spazio la riduzione della forza e della potenza muscolare arriva fino al 40-60% del valore prevolo. Il tempo di recupero, al ritorno sulla terra, pare sia tanto più lungo quanto maggiore è stata la durata del volo. Recenti studi indicano che dopo 450 giorni di volo spaziale, pur essendo gli astronauti perfettamente sani e in piena forma fisica, è necessario un periodo anche di un anno per il completo recupero. Ed è ancora incerto cosa succederà nei voli pluriennali.

Cuore e circolazione. Nell'uomo in piedi sulla terra, la forza di gravità sposta una considerevole massa di sangue negli arti inferiori. Nello spazio vi è tendenza ad accumulare massa sanguigna nei grossi vasi del torace. Tale situazione, a causa di un meccanismo riflesso innato, provoca, come vedremo meglio nel paragrafo successivo, un abbondante aumento della diuresi per alcuni giorni, e di conseguenza una diminuzione di massa sanguigna, che si assesta successivamente su valori inferiori del 10-20%

rispetto a quanto si riscontra sulla terra. Ciò tuttavia non causa alcun danno all'organismo. Lo studio degli effetti dell'assenza di peso sul sistema cardiocircolatorio è molto complesso e di difficile valutazione e ancora non tutto è stato chiarito, cuore e circolo sembrano adattarsi rapidamente alla nuova condizione di microgravità (μg), dopo un periodo di solo una decina di giorni. In effetti, nel sistema circolatorio le pressioni sono le stesse che sulla terra, la frequenza cardiaca rimane sostanzialmente eguale, e il lavoro del muscolo cardiaco, contrariamente ad altri muscoli, è invariato. Il problema insorge al rientro sulla terra. Nei primissimi giorni il mantenimento della stazione eretta è ostacolato da quel fenomeno che è chiamato "ipotensione ortostatica" o "intolleranza ortostatica", come vedremo meglio in seguito, tipico anche delle persone anziane sedentarie e di certe disabilità. L'alzarsi di colpo in piedi, sulla terra, fa sì che il sangue si sposti in quantità significativa negli arti inferiori. Viene improvvisamente ridotta, di conseguenza, la quantità di sangue spinta verso il cervello, cui segue, dopo pochi minuti sempre di stazione eretta, un senso di svenimento che costringe ad assumere nuovamente la posizione orizzontale. Tale fenomeno si riduce gradualmente e sparisce nell'astronauta dopo una decina di giorni dal rientro a terra.

1.2.2 Influenza della gravità sul sistema cardiocircolatorio

Il sistema cardiovascolare, che include il cuore e tutti i vasi sanguigni del corpo umano, è responsabile del trasporto dell'ossigeno a tutti i tessuti del corpo ed inoltre fornisce il sistema di trasporto per i residui metabolici ripuliti da altri sistemi come i reni i polmoni e alcune parti del tratto gastrointestinale.

La funzione principale del sistema cardio-circolatorio è quella di trasportare in ogni punto dell'organismo le sostanze utili al metabolismo delle cellule e di asportare da ogni punto le sostanze di scarto. Le principali sostanze utili sono l'ossigeno, il glucosio, gli amminoacidi, gli acidi grassi, le vitamine, l'acqua, che sono essenziali per la vita delle cellule, e gli ormoni, che sono parte essenziale del sistema di regolazione del metabolismo cellulare. Il trasporto di tutte queste sostanze non si può fondare esclusivamente sulla diffusione passiva per gradiente di concentrazione negli organismi, come quello umano, che hanno dimensioni superiori al millimetro. Infatti una particella in soluzione, che si muove solo per diffusione, percorre una certa distanza in una certa direzione, in un tempo proporzionale al quadrato della distanza stessa. Per distanze dell'ordine del cm il tempo di percorrenza è dell'ordine delle ore. E' quindi necessario un sistema ad hoc, come appunto il sistema cardiocircolatorio, per trasportare rapidamente le sostanze dai punti di produzione o di entrata nell'organismo alle immediate vicinanze dei punti di utilizzazione o di eliminazione. Il mezzo trasportatore è costituito da un tessuto particolare, il sangue, che viene fatto circolare in un complesso sistema di condotti, i vasi sanguigni, sotto la spinta di una pompa, il cuore, capace di trasformare energia chimica in energia meccanica. La capacità del sistema venoso è grande, almeno il 70% del volume di sangue negli esseri umani si trova nelle vene. Tutti i componenti del sistema cardiovascolare hanno sia meccanismi di controllo esterni ed interni, un'ampia e distribuita rete di recettori di allungamento e stiramento (piccole fibre nervose nelle pareti dei vasi che rispondono allo stiramento) che forniscono informazioni sulla pressione e sul volume del sangue, così come sulla funzione cardiaca. Il sistema cardiovascolare come quello polmonare è collegato agli altri sistemi per controllare il volume del plasma e la massa dei globuli rossi attraverso segnalazioni autonome, e anche attraverso sostanze neuroormonali rilasciate in risposta a distensioni di

camere e vasi, alle variazioni del flusso ematico, e alla richiesta di ossigeno degli altri distretti del corpo umano.

Data la forte dipendenza del sistema cardiovascolare e polmonare dalla forza di gravità, non è sorprendente che gli uomini esposti ad un campo gravitazionale alterato rispetto a quello terrestre mostrino soprattutto cambiamenti significativi a carico di questi due sistemi.

Per far fronte alla pressione idrostatica e a causa della variabilità della domanda associata all'esercizio e al cambiamento del vettore gravità dovuto alle diverse posizioni assunte dal corpo, il sistema cardiovascolare ha sviluppato una gamma di risposte e di sensibilità non rilevate in altri sistemi. Per soddisfare le normali sfide fisiologiche sono richieste complesse funzioni di monitoraggio e controllo: **. ad esempio sono necessari meccanismi di autoregolazione per prevenire edemi nelle estremità basse e allo stesso tempo per fornire un adeguato flusso sanguigno al cervello quando si assume la stazione eretta e particolari accorgimenti si rendono necessari per ovviare ai cambiamenti nella postura che possono eliminare o completamente invertire il gradiente di pressione idrostatica nel corpo. Questo complesso meccanismo non è ancora completamente noto e l'adattamento alle straordinarie condizioni di un lungo periodo di assenza di peso e di una repentina ed improvvisa reimposizione della gravità associata alle missioni spaziali e al seguente atterraggio, presenta delle sfide quindi ancora più grandi per il sistema fisiologico umano e, allo stesso tempo, per la comprensione dei suoi sistemi di adattamento.**

A causa della neutralizzazione del tradizionale campo gravitazionale gli effetti predominanti sull'organismo durante i voli spaziali sono l'assenza di peso, la scomparsa dei segnali gravitazionali vestibolari, e l'annullamento dei gradienti di pressione idrostatica. Studieremo

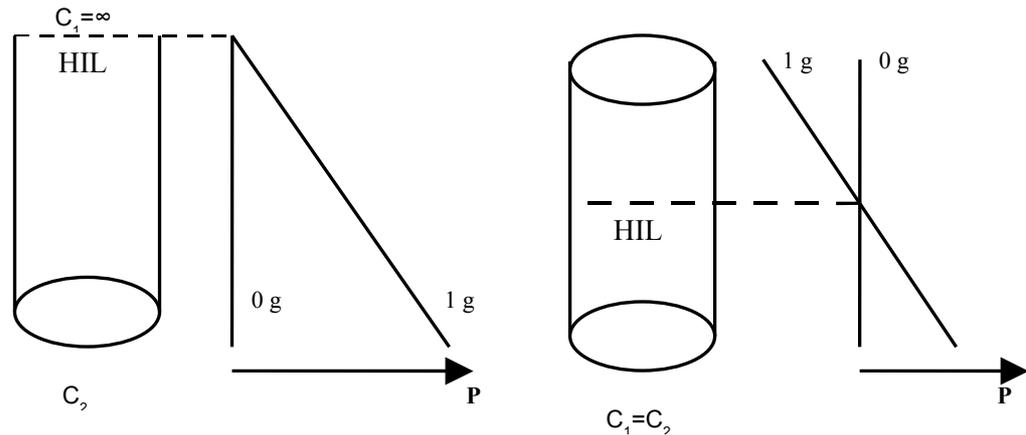
soprattutto le conseguenze indotte sull'organismo dalla scomparsa del gradiente di pressione idrostatica in condizioni di assenza di peso.

Dapprima consideriamo un fluido newtoniano in condizioni statiche in un contenitore. In presenza di una accelerazione di gravità allineata con l'asse verticale del contenitore il gradiente di pressione è dato da $dP/dz = -\rho g$ dove con la z indichiamo la coordinata verticale con verso positivo verso l'alto, ρ è la densità del fluido mentre g è l'accelerazione di gravità. Assumiamo per ipotesi che il fluido circostante il contenitore abbia una densità trascurabile altrimenti al posto della ρ dovremmo usare la differenza fra le densità del fluido all'interno del contenitore e quello posto all'esterno. La pressione presente all'interno del fluido ad un certo valore della coordinata z è determinabile integrando l'equazione vista in precedenza. Nel caso in cui il fluido presenti una densità costante (condizione più stringente della incomprimibilità), la pressione è data da $P=P_o-\rho g(z-z_o)$, dove P_o rappresenta la pressione nota presente alla quota z_o ed è funzione della distensione delle due complianze finite.

I cambiamenti nella pressione dovuti all'alterazione dell'accelerazione gravitazionale si trovano eguagliando lo spostamento del volume all'interno da una parte all'altra del contenitore. Scegliendo z_o in modo tale che $P_o(z_o)=0$, una rimozione della gravità dal sistema porta tutti i valori di pressione a

$$P_{0g} = -\rho g(z_2 c_2 + z_1 c_1) / (c_1 + c_2)$$

Dove c_1 e c_2 sono le complianze rispettivamente in cima (a quota z_1) ed in fondo (a quota z_2) al contenitore. Si noti che un contenitore aperto è modellato con c_1 tendente ad ∞ e in questo caso $P_{0g}=0$ (la pressione sulla superficie libera)



Per $c_1 > c_2$ la pressione a 0g P_{0g} coincide con la pressione che si ha con 1g di gravità in cima al contenitore. Per complianze uguali, invece, P_{0g} la pressione a 0g si ha alla quota data dalla media tra le quote relative alla pressione massima e minima ottenuta in condizioni di gravità (1g). Così la quota in cui non si ha nessun cambiamento di pressione al variare della gravità da 0g a 1g (ovvero la quota dell'hydrostatic indifference level HIL) è a metà altezza del contenitore nel caso di $c_1 = c_2$ ma si alza per un incremento del rapporto c_1/c_2 e si abbassa per un decremento nel rapporto c_1/c_2 . L'HIL è lo stesso al cambiare dell'orientamento o del modulo del vettore gravitazionale. La circolazione sanguigna risponde in maniera analoga al cambiamento del vettore gravità ad eccezione del fatto che la complianza non è concentrata ma distribuita e non lineare e inoltre, come vedremo in seguito, bisognerà considerare anche altri fenomeni.

La risposta cardiovascolare può essere classificata prendendo come riferimento il tempo e considerando la risposta:

- 1) acuta o nel breve periodo (secondi o ore);**
- 2) nel medio periodo (da qualche ora a pochi giorni);**
- 3) nel lungo periodo o cronica (da molti giorni fino a settimane e mesi)**

Le risposte si susseguono approssimativamente seguendo un ordine cronologico.

Una caratteristica del sistema circolatorio umano fondamentale è data dal fatto che normalmente l'HIL è situato vicino al cuore. A causa della sensibilità del cuore alla variazione dei carichi, perfino piccoli cambiamenti nella pressione sanguigna portano a grandi variazioni nella portata cardiaca ($CO=HR*SV$ ovvero frequenza cardiaca moltiplicata per la quantità di sangue eiettata ad ogni battito). Generalmente in posizione eretta l'HIL si trova alcuni centimetri al di sotto degli atri e quindi la pressione di riempimento o pressione centrale venosa (CVP) si incrementa quando la gravità si riduce. Visto che la pressione pericardica è meno sensibile alle variazioni di gravità di conseguenza avremo un immediato incremento dello di SV e CO, con un conseguente incremento nella pressione cardiaca trasmurale e un incremento nelle dimensioni del cuore. Ad esempio negli astronauti che si posizionano all'interno dell'astronave nella classica posizione di lancio con i piedi rivolti verso l'alto, lo spostamento dei fluidi in realtà ha inizio prima del lancio.



Figura 1-3: Posizione di lancio

La forza di gravità terrestre provoca uno spostamento dei fluidi dalle gambe verso il torace e la testa. Questa posizione induce negli astronauti un incremento nell'uscita dei reni ed un conseguente incremento del volume di urina nella vescica.

L'accelerazione dell'entità di diversi g, durante il decollo, incrementa la CVP e l'entrata in orbita a 0 g riduce questa pressione di riempimento. Ma i dati sperimentali rilevati indicano che la pressione di riempimento si riduce rispetto alla posizione supina che si ha in condizioni di gravità terrestre: probabilmente vi è un legame tra la posizione assunta prima di entrare in microgravità e una differente risposta del sistema cardiovascolare.

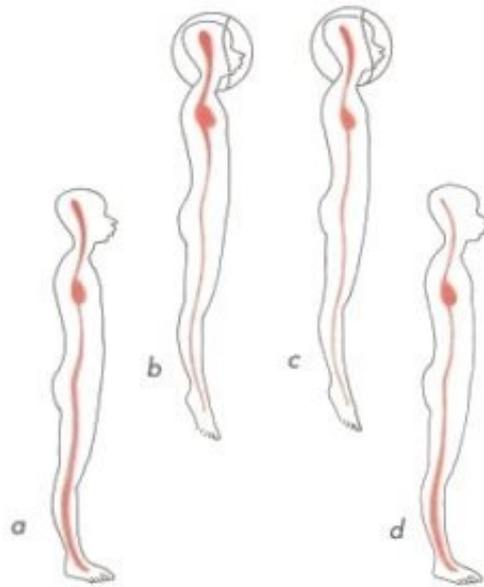


Figura 1-4: Il fenomeno dello spostamento dei fluidi corporei nel volo spaziale. (a) Sulla Terra, la gravità esercita una forza che concentra i liquidi del corpo nelle zone basse. (b) Nello spazio, il liquido tende a ridistribuirsi verso il torace e la parte superiore del corpo. A questo punto, l'organismo rileva un eccesso di fluidi in ed intorno al cuore. (c) Il corpo si libera di questo liquido percepito come "eccedente". L'organismo "funziona" con meno liquido ed il cuore diventa più piccolo. (d) Al ritorno sulla Terra, la gravità nuovamente spinge il liquido verso il basso, ma non ce ne è abbastanza per far sì che si abbia un normale funzionamento dell'organismo (e si ha l'intolleranza ortostatica).

L'eliminazione della pressione idrostatica interessa anche la dinamica dei fluidi all'interno del cuore riducendo la pressione trasmurale. Quasi istantaneamente il sangue circolante si sposta verso l'alto incrementando la distensione di tutti i vasi al di sopra della posizione in cui si trova l'HIL e riducendo le dimensioni di tutti i vasi al di sotto di quest'ultimo. Questo spostamento inoltre decrementa la pressione di riempimento .

L'eliminazione della pressione idrostatica all'interno della colonna del fluido del sistema circolatorio è parzialmente compensata dalla simile eliminazione della pressione idrostatica nelle regioni extravascolari dell'organismo. Nel caso in cui la densità dei due fluidi intravascolare ed extravascolare fosse la stessa non si avrebbero cambiamenti nella pressione trasmurale infatti i fluidi all'interno della cavità pericardica rispondono alla diminuzione di gravità come quelli presenti nell'addome, nella cavità cranica e negli spazi dei tessuti extravascolari caudali. Una eccezione significativa è costituita dai polmoni a causa della presenza al loro interno di gas che presentano una densità molto minore (circa 0.33 g/cm^3 contro $1,06 \text{ g/cm}^3$ del sangue).

La gravità oltre ad influenzare i fluidi carica le strutture elastiche della cassa toracica e del torace e della cavità addominale. L'eliminazione della gravità consente alla gabbia toracica di espandersi ma allo stesso modo consente all'intestino di sollevarsi e di spingere sul diaframma. Questa risposta, che è probabilmente coincidente o addirittura precedente allo spostamento del volume del sangue nei vasi, tenderebbe ad incrementare la pressione trasmurale in entrambi gli atri e i ventricoli allo stesso modo, approssimativamente, della pressione extracardiaca.

Considerando solamente la caratteristica passiva diastolica degli atri e dei ventricoli, la risposta dovrebbe essere una maggiore distensione degli atri rispetto ai ventricoli, ma nessun cambiamento si ha nella differenza di pressione tra le valvole di flusso e nessun effetto netto sulla CO. Comunque, considerando la pompa attiva di entrambi gli atri e i ventricoli (con la contrazione di entrambi siamo in grado di sovrastare il relativamente piccolo incremento nella pressione trasmurale) l'effetto finale è un maggiore riempimento diastolico di

entrambe le camere cardiache e un conseguente incremento della portata cardiaca.

I cambiamenti nel breve periodo dello spostamento dei volumi e del cambiamento della pressione del sangue dipendono fortemente dalla compliance non solo dei vasi sanguigni, ma di tutte le strutture e i tessuti circostanti, compresa la cassa toracica e l'addome. Virtualmente tutti i tessuti biologici hanno una compliance non lineare, perciò per essere studiati richiedono l'introduzione di modelli numerici.

Molte vene nella parte superiore del corpo sono leggermente compresse (piccola pressione trasmurale negativa) in condizioni di gravità normale, quindi la loro compliance è abbastanza grande. Le stesse vene, comunque, riducono notevolmente la loro compliance quando sono distese (in presenza di una pressione trasmurale positiva relativamente grande). La compliance è inoltre ridotta quando i vasi diventano quasi completamente collassati a causa di una grande pressione trasmurale negativa.

Le arterie risultano essere molto meno elastiche e richiedono una maggiore pressione trasmurale per presentare gli stessi effetti visti nelle vene. In microgravità le vene nel collo e nella testa (che sono normalmente compresse ad un 1 g), si distendono. In questo modo si assiste al fenomeno chiamato "puffy face" che consiste in un notevole rigonfiamento dei lineamenti del viso (diffuso edema facciale) che interessa gli astronauti appena entrano in microgravità



Figura 1-5: Effetto puffy-face, a sinistra il viso dell'astronauta sulla terra prima del lancio e sulla destra il viso dell'astronauta in orbita

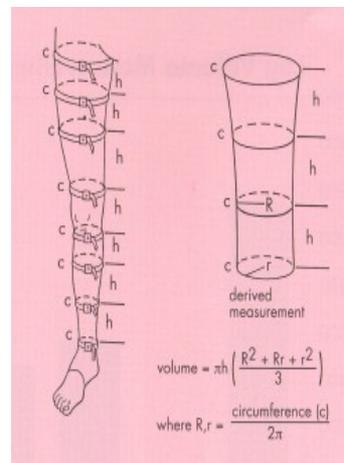


Figura 1-6: Misurazione del volume delle gambe in orbita

Contrariamente i vasi delle gambe che sono distesi ad 1 g diventano parzialmente collassati e danno luogo al fenomeno delle “chicken leg”

(gambe da pollo) con ovvero una apprezzabile riduzione del volume delle gambe. Quindi lo spostamento del volume circolante causa uno spostamento nelle relative complianze.

I meccanismi di autoregolazione del sistema cardiovascolare hanno un effetto sulla risposta alla microgravità nel breve, medio e lungo periodo.

Diverse regioni dell'organismo incorporano dei meccanismi di autoregolazione del flusso sanguigno che utilizzano dei barorecettori per rilevare le variazioni della pressione vascolare.

Una delle più importanti è quella relativa alla circolazione cerebrale.

La circolazione cerebrale infatti assorbe circa il 15% della portata cardiaca totale a riposo, la sua regolazione è fondamentale per le funzioni di tutto l'organismo ed è ovviamente critica per le capacità operative complessive del soggetto. La pressione trasmurale nei vasi sanguigni rimane relativamente costante a causa della scarsa complianza della cavità cranica. Quindi la colonna dei fluidi intravascolari risponde allo stesso modo di quella dei fluidi extravascolari alle variazioni della forza di gravità. Si è visto sperimentalmente che non si hanno cambiamenti sistematici nel flusso sanguigno cerebrale. Ma la pulsatilità e la resistenza si incrementano.

Altri sistemi di regolazione interessano la circolazione locale nell'arco di pochi minuti dall'entrata in condizioni di microgravità.

I barorecettori posti nell'aorta e nella carotide rispondono ad un incremento della pressione nel breve periodo diminuendo la frequenza cardiaca attraverso una inibizione parasimpatica. L'adattamento nel medio periodo ai voli spaziali include aggiustamenti nel bilanciamento dei fluidi del corpo e nel volume dei fluidi circolanti.

Appena si entra in condizioni di assenza di peso la diuresi aumenta per ridurre i fluidi in eccesso che si sono accumulati nella zona toracica e

nella testa, ma già durante il primo giorno di volo si assiste ad una riduzione della produzione di urina. Infatti l'assunzione di liquidi si riduce drasticamente, lo stimolo della sete è quasi assente, e questo spiega la veloce diminuzione della diuresi. Studi condotti sugli equipaggi dello Shuttle indicano una perdita dei fluidi durante i primi due giorni di missione imputabile al mal di spazio (che si manifesta con nausea e vomito). Allo stesso tempo i fluidi persi con la sudorazione si riducono. La complessiva riduzione nei fluidi circolanti è un importante fattore nella riduzione della CVP e dello SV. Coerentemente con la diminuzione della CVP, ma contrario allo spostamento dei fluidi e all'incremento nella distensione dei vasi, l'ormone antidiuretico del plasma (ADH), un ormone responsabile della ritenzione idrica, incrementa notevolmente la sua presenza nell'organismo durante il primo giorno di volo per poi tornare a valori normali in seguito.

Similmente l'ANP, una peptide coinvolta nella riduzione del volume di liquidi corporei, diminuisce durante il primo giorno per poi incrementarsi il secondo per poi diminuire di nuovo dal terzo e rimanere stabile a valori leggermente inferiori rispetto ai valori che si hanno nella posizione supina ad 1 g. La renina (PRA) e il fluido extracellulare si riducono notevolmente durante i primi giorni di volo ma ritornano a livelli leggermente inferiori al normale in seguito. L'adattamento a lungo termine alla microgravità include l'estensione della colonna vertebrale di 4-7 cm. Questo potrebbe essere sufficiente per avere effetti sulla pressione toracica e addominale. L'atrofia muscolare, inoltre, potrebbe contribuire allo spostamento di fluidi a lungo termine. Qualsiasi cambiamento nel tono muscolare, infatti, può avere effetti sulla pressione vascolare trasmurale. L'esercizio fisico, come vedremo in seguito, provvede a mantenere il tono muscolare e un

buon condizionamento vascolare e contribuisce anche all'attivazione della funzione di pompa delle vene. Gli esercizi per le gambe stimolano il flusso di sangue locale riducendo, temporaneamente, la congestione alla testa e l'ipertensione che interessa la parte superiore del corpo.

Un adattamento che potrebbe dar luogo a serie conseguenze durante i voli di lunga durata è la documentata riduzione della massa dei globuli rossi in microgravità. Infatti si è visto che la massa dei globuli rossi si riduce del 10% durante la prima settimana mentre il numero di reticulociti (globuli rossi non ancora completamente sviluppati) circolante si riduce di circa la metà. Inoltre vi è un notevole aumento del numero di globuli rossi con forme anomale. Questo fenomeno sembra legato all'incremento della percentuale di ematocrito nel sangue in microgravità conseguente alla riduzione del sangue circolante. Tale aumento porta ad un valore della viscosità del sangue più alto che sottopone il cuore ad un carico di lavoro maggiore nel caso in cui la vasodilatazione periferica non sia sufficiente.

L'anemia che si registra dopo i voli è legata a questo problema. In molti astronauti al rientro sulla Terra si assiste ad ipotensione e tachicardia. Circa la metà di essi non può tollerare un test di 10 minuti in piedi subito dopo l'atterraggio. L'intolleranza ortostatica dopo i voli è stata registrata per la prima volta dopo il primo volo del programma americano "Mercury" con un equipaggio umano a bordo. La missione prevedeva 4 orbite attorno al nostro pianeta per un totale di 34 ore di volo. L'intolleranza ortostatica avvertita dall'equipaggio durò per 9 ore dopo il rientro a terra.

Ovviamente l'adattamento alla microgravità nel lungo periodo influenza notevolmente la tolleranza ortostatica ma anche brevi periodi trascorsi in condizioni di assenza di peso hanno degli effetti importanti sull'organismo.

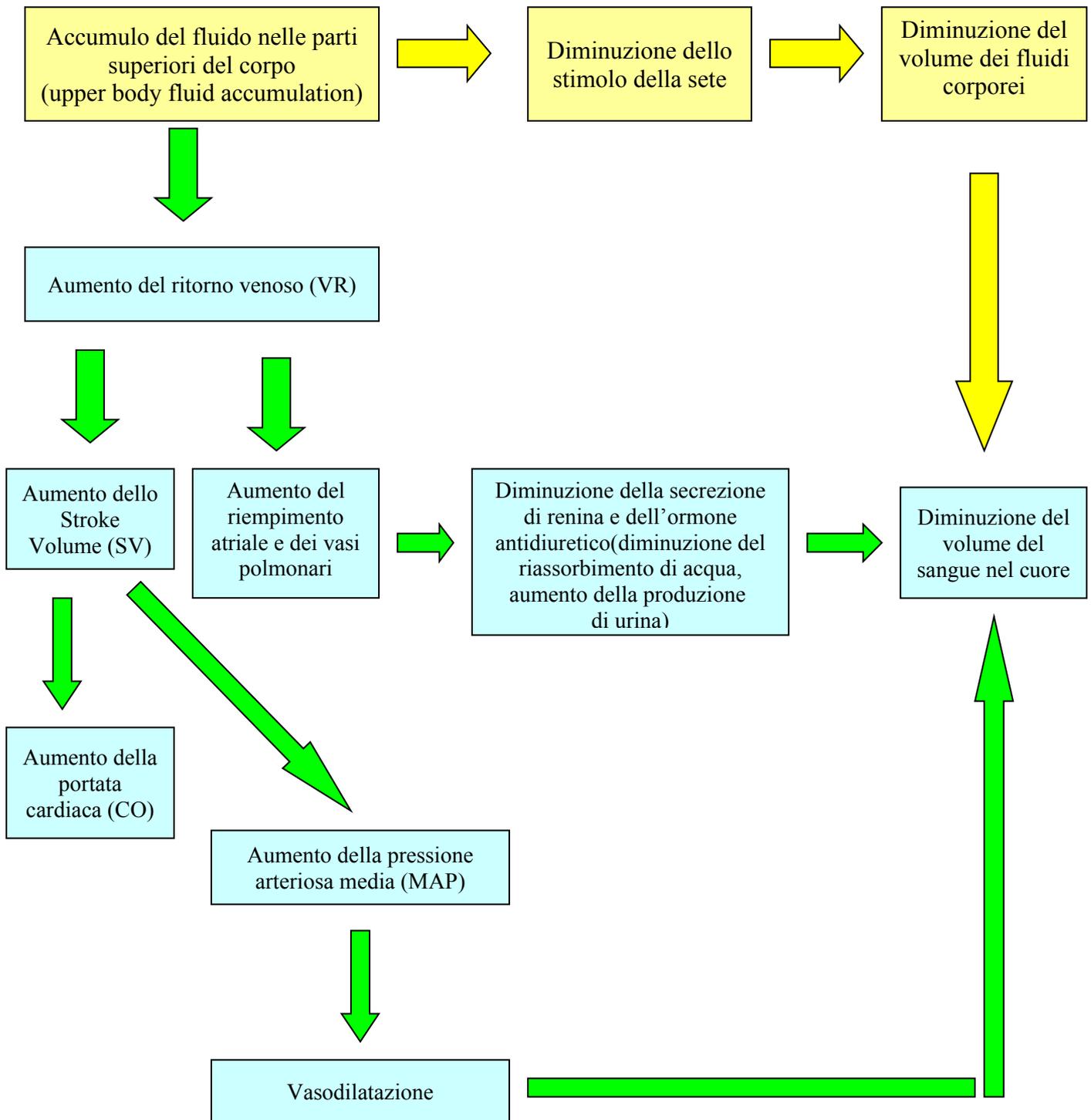


Figura 1-7: Uno dei principali fattori che influenzano i cambiamenti cardiovascolari che si osservano nei voli spaziali e più in generale in condizioni

di microgravità è il cambiamento del volume e della distribuzione dei liquidi corporei. In particolare lo spostamento dei fluidi dal basso verso l'alto innesca una serie di modificazioni successive, come ad esempio il gonfiore del viso (puffy face) o edema facciale e la diminuzione del volume delle gambe (chicken legs). Questo accumulo di fluidi stimola i recettori ipotalmici che fanno diminuire la sete. Ciò determina una diminuzione del volume di fluidi nel corpo e a una diminuzione di volume di sangue nel cuore. L'aumento dei fluidi nella parte alta del corpo fa aumentare il ritorno venoso. L'aumento del ritorno venoso ha effetti sul riempimento maggiore degli atri e dei vasi polmonari e sull'incremento dello SV

Il primo effetto stimola i recettori di volume atriale che contribuiscono a diminuire il volume di sangue nel cuore e diminuisce pure la secrezione di renina e dell'ormone anti diuretico (collegati alla diminuzione del riassorbimento di acqua e all'aumento della produzione di urina)

Un aumento dello SV contribuisce ad un aumento della CO e della pressione media di sangue in arteria. Tale variazione nella pressione media arteriosa stimola i barorecettori posti nel nodo senoatriale e nell'arco aortico che modificano la frequenza cardiaca (facendola diminuire) e provocano una vasodilatazione. Questa vasodilatazione compensativa contribuisce ulteriormente alla diminuzione del volume di sangue al cuore e, associata alla minore frequenza cardiaca, fa diminuire la pressione media arteriosa del sangue.

1.2.3 Fisiologia cardiovascolare dopo i voli e Intolleranza Ortostatica

L' intolleranza ortostatica, ovvero l'incapacità da parte dell'organismo di garantire una adeguata pressione sanguigna alla testa e alle parti superiori del corpo mentre si assume la stazione eretta, si presenta in tutti gli astronauti al momento del ritorno da voli spaziali anche di breve durata.

Una volta che il corpo viene nuovamente esposto ad un campo gravitazionale il volume di sangue rimanente è nuovamente distribuito verso il basso. Questo fenomeno conduce ad una relativa diminuzione nella pressione del sangue nelle parti superiori del corpo e nella testa. Infatti questo decremento di pressione può superare facilmente l'abilità dei barorecettori di rispondere mantenendo la pressione del cervello a livelli normali. Per questo motivo si ha una importante ipotensione che interessa soprattutto la testa durante il mantenimento della stazione eretta. I risultati sono debolezza, nausea e, in casi estremi, perdita di conoscenza. Allo stesso tempo mentre il corpo tenta di mantenere la pressione sanguigna ai valori normali, si possono avere palpitazioni e conseguente "sudorazione a freddo". Attente misure sugli astronauti immediatamente dopo il rientro a Terra mostrano che la frequenza cardiaca e lo stroke volume sono relativamente ben mantenuti inizialmente, ma un problema nell'incrementare adeguatamente la resistenza periferica totale conduce ad una caduta della pressione arteriosa, ad un flusso sanguigno cerebrale insufficiente, e una incapacità di rimanere in piedi per più di 5 – 10 minuti consecutivi. Molti di questi effetti sono stati riscontrati soprattutto nei voli di durata superiore alle 5 ore e alcuni sintomi si presentano in molti astronauti nonostante siano state attuate le contromisure.

I primi voli dimostrarono che l'intolleranza ortostatica peggiorava all'aumentare della loro durata inducendo notevoli preoccupazioni sul fatto che tali effetti potessero severamente limitare le operazioni di rientro.

In particolare le preoccupazioni riguardavano i piloti di astronavi come lo Space Shuttle che generano forze g dal basso verso l'alto (+g) al rientro nell'atmosfera terrestre e sulle capacità dell'equipaggio di abbandonare rapidamente l'astronave in condizioni di emergenza dopo l'atterraggio.

Generalmente, circa due terzi degli astronauti esaminati subito dopo il ritorno sulla Terra presenta una significativa intolleranza ortostatica emodinamica. L'estensione della intolleranza ortostatica dopo i voli è variabile e dipende dalla durata della missione nello spazio, dalle differenze delle funzioni cardiovascolari degli astronauti, e dai tempi e dai metodi usati per effettuare i test dopo il volo.

Vi sono diversi tipi di test per valutare il grado di intolleranza raggiunto. Ad esempio gli astronauti americani delle missioni "Gemini" venivano adagiati su un tavolo inclinato che veniva alzato fino a raggiungere il grado in cui si presentavano i primi sintomi di svenimento (di circa 70 gradi). Quelli delle missioni "Apollo" erano sottoposti ad un test che consisteva nell'appoggiarsi ad una parete con i talloni a 15 cm di distanza dalla sua base. Nelle missioni dello Shuttle il test è effettuato misurando la frequenza cardiaca e la pressione sanguigna in posizione orizzontale supina e poi in quella eretta.

L'intolleranza ortostatica colpisce tutti gli astronauti: ad esempio su 14 astronauti di ritorno da missioni della durata di due settimane a bordo dello Shuttle sottoposti ad un test di mantenimento della posizione eretta per 10 minuti ben il 64% non è riuscito a portarlo a termine.

Questo significa che vi è una tendenza alla diminuzione del ritorno venoso, del riempimento cardiaco (volume di fine diastole) e dello stroke volume al ritorno sulla terra. Il decremento della massa dei globuli rossi e del volume

del plasma è uno dei fattori principali ma non spiega completamente l'estensione del decondizionamento cardiovascolare visto dopo i voli.

La diminuzione del volume del sangue è resa ancora più evidente, come abbiamo detto, a causa della ridotta abilità del sistema cardiocircolatorio di riportare la pressione a valori normali. Questo significa che la ridotta sensibilità dei barorecettori di rilevare cambiamenti nella pressione sanguigna è una delle cause principali dell'intolleranza ortostatica. Allo stesso modo il decondizionamento del cuore e della muscolatura liscia dei vasi sanguigni rende più difficile per l'organismo aumentare la resistenza periferica e la portata cardiaca. Infine l'atrofia dei muscoli delle gambe impedisce alla "pompa dei muscoli scheletrici" di spingere, come avviene normalmente sulla terra, il sangue durante i movimenti dalle gambe verso la testa.

Un altro fenomeno legato al decremento della massa e del tono nei muscoli posturali, che si verifica al ritorno sulla Terra, è l'eccessivo accumulo di sangue nelle estremità inferiori.

Quasi tutto il volume delle gambe, infatti, viene recuperato velocemente una volta tornati sulla Terra. Nonostante la variabilità dei dati sperimentali, spesso si riscontra una tendenza per il fluido nelle gambe ad essere maggiore della situazione prima dei voli. Infatti il sangue ristagna più facilmente nelle vene che presentano una compliance maggiore durante e dopo i voli spaziali. Altri fattori influenzano le dimensioni delle gambe, l'atrofia dei muscoli scheletrici per essere recuperata necessita di periodi di tempo abbastanza lunghi per questo le gambe risultano essere piuttosto piccole per un pò di tempo.



Figura 1-8: Cosmonauti russi al rientro su carrozzine

Il peso del corpo al ritorno a Terra aumenta nell'arco di poche ore dall'atterraggio. Questo perché si ha un aumento dello stimolo della sete che induce ad assumere considerevoli quantità di liquidi. Inoltre si ha un incremento della secrezione dell'ormone ADH e dell'aldosterone (che aiuta la ritenzione idrica) e un decremento della produzione di urina. Questi fenomeni derivano dal fatto che in microgravità si perde circa il 10-15% del volume del plasma e dei liquidi corporei e una volta tornati in condizioni normali l'organismo innesca una serie di reazioni per riguadagnare i fluidi perduti.

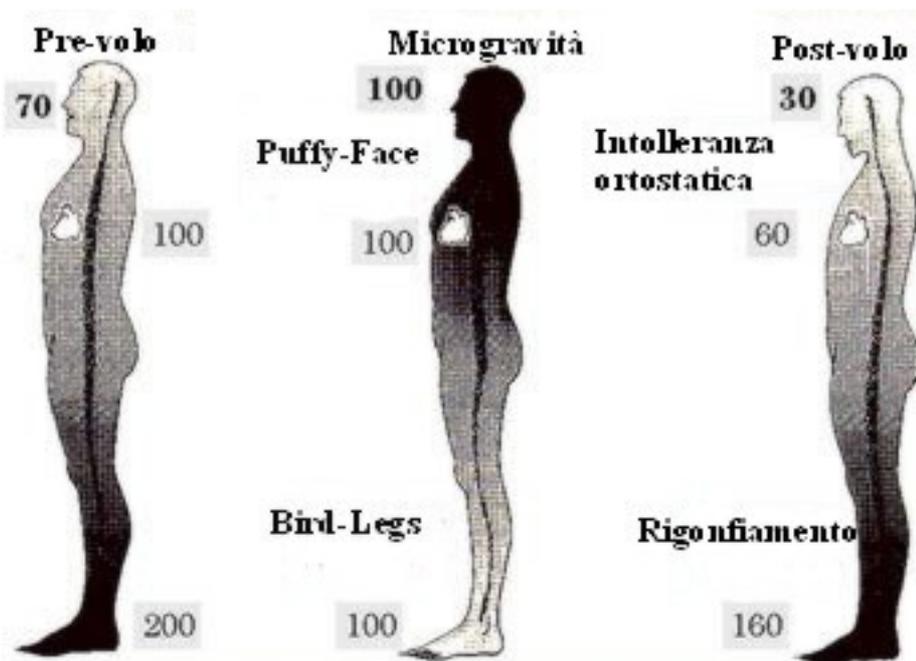


Figura 1-9: La distribuzione dei fluidi rispettivamente in condizioni di prevolo, di microgravità e di postvolo con indicati i valori della pressione arteriosa media. In assenza di peso la redistribuzione dei liquidi fa sì che la pressione arteriosa media sia praticamente la stessa in ogni punto del corpo (nello spazio la pressione a livello dei piedi non supera quella della testa). Durante questo periodo il volume del plasma diminuisce a causa di processi di adattamento alle mutate condizioni ambientali. Dopo il volo nella posizione eretta il sangue nuovamente si accumula nelle gambe e nelle estremità basse a causa della gravità ma vi è meno sangue da distribuire rispetto alla condizione di partenza e per questo si ha l'intolleranza ortostatica.

1.2.4 Contromisure in volo

La preparazione fisica, le contromisure durante il volo e la riabilitazione dopo il volo stanno gradualmente diventando aspetti basilari della medicina spaziale. Infatti a causa del progressivo incremento in durata ed in complessità delle missioni, la medicina spaziale si è trovata nella necessità di incorporare elementi da discipline mediche diverse, allontanandosi dagli spazi ristretti della medicina aeronautica.

A parte gli effetti acuti della microgravità (spostamento dei fluidi corporei, ed intolleranza ortostatica), le alterazioni cardiovascolari, il decremento delle capacità neuro-muscolari, la perdita di massa muscolare e la diminuzione del tessuto osseo rappresentano i veri fattori limitanti i voli spaziali di lunga durata e richiedono misure preventive complesse.

I metodi sviluppati ed utilizzati fino ad ora hanno offerto una protezione solo parziale verso gli effetti negativi dell'esposizione all'assenza di gravità.

Poiché l'adattamento alla microgravità, come abbiamo visto in precedenza, provoca nell'organismo delle modificazioni simili alle conseguenze dell'invecchiamento a terra, lo sviluppo di nuovi metodi per prevenire gli effetti dell'assenza di gravità può trovare applicazioni importanti nelle azioni di promozione della salute e di medicina preventiva sulla Terra.

In questo senso recentemente l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) hanno avviato una serie di attività per incrementare il livello di interventi preventivi sugli astronauti specialmente nelle aree di:

- uso a lungo termine dell'esercizio fisico;
- valutazione funzionale;
- monitoraggio dell'adattamento neuro-muscolare all'allenamento;

- nuove metodologie di allenamento (Whole body Vibration per muscoli ed ossa).

Inoltre in occasione della missione Italiana “Marco Polo” è stato avviato da ESA ed ASI un progetto di promozione della salute denominato “Space for Health”. In collaborazione con L’Organizzazione Mondiale della Sanità e la Commissione Europea si intende usare l’astronauta come testimonial per la promozione della salute ed allo stesso tempo favorire la diffusione di metodologie e tecnologie per la salute sviluppate grazie alle attività spaziali. Come l'uomo si adatta alla vita nel deserto, al freddo polare, all'alta montagna, così due o tre mesi di permanenza nello spazio sembrano provocare una sorta di adattamento alla nuova condizione di vita in assenza di gravità. Al rientro a terra tali adattamenti impediscono un pronto recupero ad una attività quotidiana in presenza di forza di gravità. Per ovviare a tali inconvenienti e sulla base del fatto che voli di durata pluriennale potrebbero provocare danni irreparabili, sono state studiate e suggerite contromisure da adottare durante la permanenza nello spazio. Tali contromisure consistono essenzialmente nel garantire agli astronauti, mediante opportuni attrezzi e dispositivi, una attività fisica intensa per qualche ora al giorno. Studi preliminari sembrerebbero indicare essere questa la via giusta per limitare la perdita di forza e l'ipertensione ortostatica. Pesanti allenamenti fisici prevolo, età giovanile, genere maschile o femminile, non sembrano giocare quel ruolo determinante che si ipotizzava fino a qualche anno fa. Lo spazio sembra potenzialmente essere aperto a tutti.

Molti dei cambiamenti che si verificano durante i voli spaziali rimangono fonte di dibattito. Infatti ci si chiede quali di questi possano essere considerati normali adattamenti senza particolari effetti negativi per gli equipaggi in orbita e quali invece dovrebbero essere evitati con una

opportuna prevenzione. Molto di quello che accade al sistema cardiocircolatorio e al volume dei fluidi corporei durante i voli spaziali è da considerarsi come una risposta dell'organismo a mutate condizioni dovute ad un nuovo ambiente.

L'obiettivo primario è riuscire a fare tutto il possibile affinché le condizioni di microgravità durante i voli spaziali limitino al massimo il loro impatto sugli astronauti soprattutto durante le delicate operazioni di rientro sulla Terra. Per raggiungere questo scopo sono stati sviluppati, negli ultimi decenni, numerosi accorgimenti per evitare o ridurre al minimo eventuali inconvenienti al rientro nel campo gravitazionale terrestre dopo un periodo più o meno lungo passato in condizioni di assenza di peso.

In particolare tali accorgimenti tendono a ridurre negli astronauti gli effetti dello spostamento di fluidi e del conseguente decondizionamento vascolare. L'efficacia di una contromisura è tanto maggiore tanto più risulta essere in grado di far aumentare soprattutto la pressione sanguigna e la tolleranza ortostatica al momento del rientro nell'atmosfera terrestre e nei primi minuti dopo l'atterraggio, quando potrebbe essere necessario effettuare un'uscita di emergenza o comunque far fronte a situazioni che richiedono la massima operatività da parte dell'equipaggio.

Infatti, come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, è proprio al momento del rientro nel campo gravitazionale terrestre che appare subito chiaro che il periodo trascorso in condizioni di assenza di peso ha causato importanti modifiche all'organismo degli astronauti. Il cuore risulta essere più piccolo e debole ed ha subito un decondizionamento vascolare rispetto alle nuove esigenze fisiologiche imposte dal campo gravitazionale terrestre. Il volume dei fluidi corporei è diminuito, i muscoli sono atrofizzati e le ossa decalcificate. Inoltre il sistema vestibolare si è adattato ad un ambiente completamente diverso, condizione "spazio-normale", ed ora deve tornare a gestire una condizione "terra normale".

Per queste ragioni la ricerca di accorgimenti sempre più efficaci impegna costantemente le agenzie spaziali di tutto il mondo. Attualmente le principali contromisure utilizzate durante i voli sono:

- l'uso del Lower Body Negative Pressure (LBNP) spesso associato ad esercizi;
- esercizi aerobici quotidiani;
- assunzione di soluzione saline prima del rientro nell'atmosfera terrestre e conseguente reidratazione;
- tute anti-g indossate al momento del rientro;
- assunzione di farmaci;

Di seguito riportiamo una breve descrizione di ognuna delle contromisure riportandone l'efficacia.

1.2.4.1 Low Body Negative Pressure (LBNP)

Questa contromisura risulta essere veramente efficace nel bilanciare gli effetti dell'assenza di peso sul sistema cardiocircolatorio.

Il Low Body Negative Pressure può essere utilizzato per ridurre l'intolleranza ortostatica stimolando una risposta fisiologica ad una nuova redistribuzione dei fluidi corporei e anche per testare e trovare il limite superato il quale si ha il condizionamento vascolare. Il periodico utilizzo del LBNP aiuta il deflusso del sangue dalle parti superiori del corpo verso le gambe. In questo modo si ricrea una situazione simile a quella che si ha normalmente sulla terra quando si è nella posizione in piedi (stand). Il cuore viene quindi forzato ad occuparsi di un minor ritorno venoso e si ha di conseguenza una maggiore risposta cardiaca e una regolazione della resistenza vascolare per far fronte a questa nuova condizione.

Questo dispositivo è costituito da una camera cilindrica che cinge il soggetto dalla vita in giù. La pressione negativa all'interno della camera, che provoca lo spostamento del sangue verso i piedi, è indotta attraverso l'applicazione di un vuoto.



Figura 1-10: Astronauta in orbita con LBNP applicato (Nasa)

I livelli della pressione all'interno del LBNP utilizzato in orbita variano da -30 mmHg a -50 mmHg rispetto alla normale pressione atmosferica. Se i livelli di pressione all'interno del LBNP risultano essere troppo alti si possono avere gli stessi effetti indesiderabili che si hanno nel caso di un lungo periodo trascorso mantenendo la stazione eretta (intolleranza ortostatica). Il programma spaziale russo impiega anche come contromisura il Lower Body Negative Pressure (LBNP) associato all'assunzione di soluzioni saline nelle ultime settimane di volo. LBNP viene usato durante i voli della NASA fin dal 1973 quando gli astronauti dello Skylab2 sono stati sottoposti ad un protocollo sperimentale utilizzando la prima generazione di LBNP. Questo primo dispositivo, nonostante sia molto efficace ed ancora utilizzato per gli esperimenti a terra, era troppo grande e pesante per essere utilizzato a bordo dello Space Shuttle. Una seconda generazione di dispositivi LBNP fu sviluppata per lo SpaceLab ma anche questa era troppo ingombrante per il suo utilizzo sullo Shuttle. Era necessario realizzare un dispositivo pieghevole, facile da montare e indossare, che occupasse poco spazio e che fosse possibile riporre in un piccolo armadio. La prima versione di questo sistema pieghevole ha volato sulla missione dello Shuttle Sts-32 nel gennaio del 1990. Da allora la NASA utilizza in tutte le sue missioni versioni aggiornate di questo modello pieghevole e leggero costituito da una struttura di sostegno metallica costituita da sette anelli e quattro barre e circondate da una "sacca" di materiale speciale (Nomex). Per generare la pressione negativa all'interno del cilindro si utilizza una pompa elettrica (alimentata con una tensione di 28 volt in continua). Le operazioni della pompa pneumatica e lo stato delle valvole del LBNP sono monitorate da un sofisticato circuito digitale di controllo. L'uso del LBNP associato ad esercizi cardiovascolari nello spazio, ad esempio ad una pedana mobile, fa sì che si possa avere una maggiore pressione negativa che gravi sulle gambe.

1.2.4.2 Assunzione di soluzioni saline ed idratazione

Studi compiuti alla fine degli anni '70 dimostrano che bere un litro di soluzione salina bilanciata può portare ad un incremento del volume del plasma fino a 400 ml per un periodo di almeno 4 ore.

Il fluido extracellulare è principalmente costituito da uno 0,9% di NaCl (cloruro di sodio) disciolto in acqua ovvero da una soluzione normale salina. Se viene somministrata ad un individuo una soluzione normale salina intramuscolo o per ingestione (come nel caso degli astronauti) il volume si distribuisce principalmente attraverso i compartimenti extracellulari. Visto che il volume del plasma costituisce una minima parte del fluido extracellulare esso trattiene una piccola parte della soluzione salina. Il resto va a riempire gli spazi interstiziali dei tessuti. Eventualmente una parte del fluido può entrare nelle cellule ed una parte ne può uscire.

Studi condotti a metà degli anni '80 hanno verificato che questa tecnica di incremento temporale del volume del plasma poteva essere utilizzata dagli astronauti dello Shuttle per ridurre l'intolleranza ortostatica prima dell'atterraggio.

Numerosi test su un campione di 26 astronauti dimostrarono, infatti, che l'assunzione di soluzioni saline riduceva notevolmente le percentuali di svenimenti e permetteva di mantenere una frequenza cardiaca più bassa e una pressione sanguigna pressoché costante al rientro a Terra.

Fin dal 1984 il protocollo di assunzione di liquidi per gli equipaggi della NASA impone di assumere un litro d'acqua o di spremuta con 8 tavolette di sale circa un'ora prima di lasciare l'orbita per il rientro sulla Terra. In questo modo si produce un litro di soluzione salina isotonica nel tratto digestivo che, una volta assorbito, porta ad un incremento del volume del plasma.

Una variante a questa tecnica è costituita da una combinazione di assunzione di liquidi associata a diverse ore passate all'interno di un LBNP regolato ad una pressione di circa -30 mmHg. LBNP fa sì che vengano caricati più fluidi negli spazi interstiziali quando è applicato; quando viene rimosso (poco prima del rientro nell'atmosfera terrestre) i fluidi si ridistribuiscono attraverso gli spazi extracellulari.

Gli ultimi test indicano che il fluid loading è molto efficace per i voli brevi fino a 10 giorni, infatti l'efficacia di questa contromisura diminuisce mano a mano che il tempo trascorso in orbita aumenta. Questo perché il decondizionamento vascolare diventa sempre più importante nei voli di lunga durata.

Anche nella stazione spaziale russa MIR, cosmonauti ed astronauti oltre ad allenarsi per almeno due ore al giorno durante il volo, ingerivano soluzioni saline e indossavano tute anti-g per ridurre e minimizzare lo stress ortostatico al rientro nell'atmosfera terrestre.

1.2.4.3 Tute antig

Nonostante si adottino tutte le contromisure possibili in orbita per avere un buon condizionamento vascolare al momento del rientro sulla terra, inevitabilmente, l'intolleranza ortostatica, anche se in forma ridotta, si verifica sempre.



Figura 1-11: Tuta anti-g

Nel periodo critico del rientro e dell'atterraggio, gli astronauti dello Shuttle (e di qualsiasi altro velivolo spaziale) devono obbligatoriamente indossare delle tute anti-g. Infatti, alcune parti del corpo più fragili, ad esempio le articolazioni del collo, possono risentire delle sollecitazioni derivanti dagli

elevati valori delle accelerazioni, e anche alcuni organi interni come quelli addominali, possono subire spostamenti, perché male sostenuti anatomicamente.

Più che il valore delle accelerazioni è importante la loro durata. Nei moderni velivoli supersonici militari il pilota può infatti essere sottoposto ad accelerazioni anche di 20 g, ma ciò avviene solo per frazioni di secondo, come quando si è eiettati dal sedile con paracadute.

Questi particolari indumenti si gonfiano automaticamente all'aumentare dell'accelerazione subita dall'astronauta per prevenire il ristagno di fluidi nelle estremità basse del corpo e possono anche, attraverso una vescica addominale, aiutare a mantenere un adeguato ritorno venoso verso il cuore. Con questa tuta, quindi, il corpo del pilota o dell'astronauta viene compresso a livello dell'intestino, delle cosce e delle gambe, impedendo al sangue di accumularsi nelle estremità basse del corpo. Senza tute del genere non è possibile resistere alle accelerazioni, il sangue defluisce dalla testa e si hanno dapprima problemi alla visione arrivando rapidamente alla perdita di conoscenza. Le tute anti-g sono quindi una fondamentale contromisura e versioni meno sofisticate rispetto a quelle utilizzate nei voli spaziali sono utilizzate anche dai piloti degli aerei supersonici.

Importanti al momento del rientro sono anche le cinture di sicurezza, che permettono di distribuire gli sforzi su una vasta superficie del corpo e quindi consentono una maggiore sopportazione delle accelerazioni "lineari", come quelle che si verificano all'atterraggio. Queste cinture di sicurezza sono costituite da fasce larghe di nylon, semirigide e cingono a giubbotto inferiormente le linee inguinali.

1.2.4.4 Esercizi Aerobici ed uso del LBNP

Come accade sulla Terra, una regolare attività fisica aiuta a mantenere il sistema cardiovascolare in buone condizioni anche in assenza di peso. Inoltre, effettuare dei test clinici durante lo svolgimento degli esercizi aerobici aiuta a monitorare lo stato cardiovascolare e il livello di decondizionamento raggiunto da ogni singolo astronauta.

Gli equipaggi della NASA durante i voli dello Shuttle utilizzano principalmente una bicicletta ergometrica e una pedana mobile (treadmill).

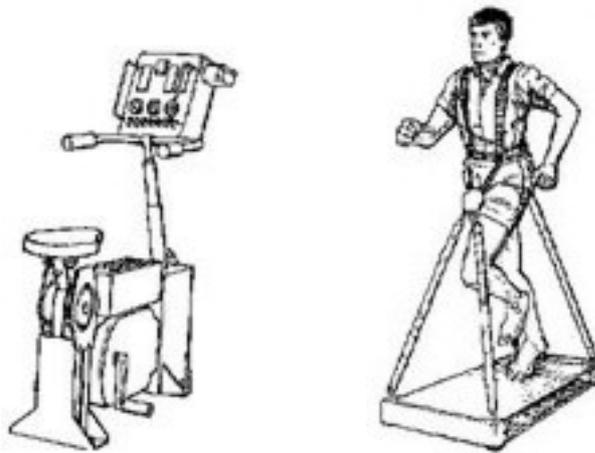


Figura 1-12: Bicicletta ergometrica e pedana mobile

Ovviamente sono necessari degli speciali sistemi di trattenimento, costituiti da cinture e corde elastiche, per impedire agli astronauti di fluttuare mentre svolgono questi esercizi.

Quando qualche membro dell'equipaggio è impegnato a svolgere la propria sessione di allenamento insorge un altro problema pratico. Infatti le vibrazioni prodotte dagli esercizi vengono trasmesse a tutta la struttura dello Shuttle e queste potrebbero interferire con le altre attività programmate della missione. Per questo motivo le sedute di allenamento vengono svolte solo quando non vi sono altre attività previste nel piano di volo.

La durata minima degli esercizi da effettuare quotidianamente dagli equipaggi, affinché gli astronauti siano in grado di mantenere un accettabile

condizionamento vascolare, è ancora fonte di discussione. I cosmonauti russi a bordo della stazione spaziale MIR utilizzavano la pedana mobile per circa 2 ore tutti i giorni. Altre tipiche tabelle di allenamento prevedono un mix di 30 o 40 minuti di allenamento alla bicicletta seguite da 45-80 minuti di corsa sulla pedana mobile (raggiungendo sempre circa due ore di attività aerobica al giorno). Altri tipi di esercizi (ad esempio allenamenti di resistenza) sono impiegati come contromisura per la decalcificazione a cui va incontro in microgravità il sistema scheletrico. Il modo più efficace per mantenere una buona forza muscolare generale risulta essere quello di effettuare degli esercizi con un carico elevato e un numero ridotto di ripetizioni. D'altro canto gli esercizi aerobici con un elevato numero di ripetizioni ed un basso carico sono indispensabili per mantenere la tonicità delle fibre muscolari del cuore. Di conseguenza per ottenere una valida contromisura bisognerebbe utilizzare una tabella di allenamento che preveda entrambi i tipi di esercizi. Un'ottima strategia è data dall'eseguire gli esercizi con carichi elevati e quelli con carichi ridotti a giorni alterni durante i voli.

Recentemente sono stati studiati degli accorgimenti, testati in laboratorio, per associare i benefici del LBNP a quelli indotti dagli esercizi cardiovascolari compiuti nello spazio. Ad esempio una camera LBNP costruita attorno ad una pedana mobile offre diversi benefici. Innanzi tutto i fluidi sono spinti verso le gambe in una quantità perfino superiore a quella richiesta dai muscoli a causa dell'incremento dell'attività fisica. Inoltre la pressione negativa può ricreare una condizione molto simile a quella che si sperimenta sulla terra quando si corre aiutando così gli astronauti a prevenire la decalcificazione delle ossa derivante dai ridotti carichi che gravano sul sistema scheletrico in condizioni di assenza di peso.

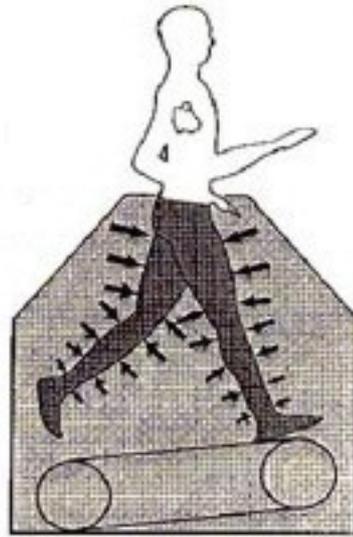


Figura 1-13: Pedana mobile all'interno di una camera LBNP

Sfortunatamente il livello di pressione negativa che ricrea una forza di reazione del terreno simile a quella terrestre è di circa -100 mmHg, un valore troppo al di sotto dei livelli di LBNP meglio sopportati dal corpo. Per questa ragione un indumento elasticizzato, simile alle tute anti-g usate dai piloti degli aerei supersonici, deve essere indossato dagli astronauti mentre compiono esercizi all'interno della camera LBNP con pressioni negative elevate.

1.2.4.5 Assunzione di farmaci e sviluppi futuri

Attualmente non si utilizzano farmaci in orbita per aumentare la pressione sanguigna, indurre la ritenzione idrica e incrementare il volume del plasma prima del rientro. Solo l'uso di alcuni selezionati farmaci con effetti collaterali minimi viene proposto come contromisura in volo. Tra questi la midodrina, l'eritropoietina e l'etilefrina sono state indicate come valide terapie per combattere l'intolleranza ortostatica.

Gli sviluppi futuri nel campo delle contromisure sono legati ai progressi della ricerca per controllare e indagare i cambiamenti cardiovascolari e dei fluidi corporei in condizioni di microgravità. Alcune delle aree di ricerca potrebbero essere quelle dello studio dei barorecettori, dei riflessi del sistema nervoso simpatico, degli effetti ormonali, dei cambiamenti della compliance vascolare, e della permeabilità capillare e delle forze di Starling.

1.3 Metodi per ottenere la microgravità

La gravità non può essere semplicemente annullata, ma i relativi effetti possono essere compensati con l'aiuto di una appropriata forza di accelerazione. Questa forza di accelerazione deve avere esattamente lo stesso valore assoluto (eguale modulo) e verso opposto a quello del vettore di gravità locale. L'equilibrio di forze risultante è definito, come abbiamo visto all'inizio di questo capitolo, assenza di gravità o assenza di peso ("weightlessness"). In pratica una condizione esatta di equilibrio è difficile da verificarsi e una forza di gravità molto piccola è sempre presente. Pertanto si deve parlare di microgravità (μg) piuttosto che di assenza di peso.

La compensazione della forza di gravità mediante una forza di accelerazione eguale e contraria può essere ottenuta con vari mezzi e per differenti durate:

- fino a 10 secondi in torri di caduta (ad esempio torre di caduta di 110 m di ZARM a Brema);
- per circa 20 secondi durante il volo di un aereo impegnato in una traiettoria parabolica, come ad esempio l'Airbus A-300 ZERO-G della Novespace;
- per alcuni minuti durante il volo dei sounding rocket (razzi sonda), quali i MASER e i MAXUS dell'Agenzia Spaziale Svedese;
- per settimane o mesi o (teoricamente) persino per anni sulle capsule senza equipaggio o sui satelliti artificiali;
- per settimane, mesi o anni sui veicoli spaziali e sulle stazioni orbitanti quali ad esempio lo Space Shuttle, la nuova Stazione Spaziale Internazionale (ISS) e nel suo modulo europeo Columbus o nella vecchia e gloriosa MIR Russa;

In alcuni di questi sistemi, la situazione di μg è disturbata dalla resistenza dell'aria che produce una decelerazione, con il risultato di una non completa compensazione della gravità.

1.3.1 L'assenza di peso ottenuta attraverso una caduta libera

Dal punto di vista fisico, la compensazione della forza di gravità attraverso una accelerazione è definita come una situazione di caduta libera.

Tale situazione non si verifica solamente lungo una direzione verticale (come ad esempio nelle torri a caduta) ma può avere anche una componente orizzontale (come nei voli parabolici). Ogni oggetto che vola senza propulsione e senza l'influenza di forze aerodinamiche è in una situazione di assenza di peso, o più correttamente, in una condizione di microgravità.

Un pallone calciato da un'astronauta sulla luna sarebbe soggetto ad una situazione di totale assenza di peso.

Sulla Terra, invece, l'attrito con l'atmosfera mette in gioco una ulteriore forza di decelerazione che disturba l'equilibrio tra le forze. Perciò un aereo impegnato in un volo parabolico deve avere sempre i motori accesi per poter compensare continuamente le forze di decelerazione dovute alla resistenza dell'aria. Il volo di veicoli o stazioni spaziali attorno alla Terra senza forze di propulsione è definibile come una particolare situazione di caduta libera. Infatti, la forza di attrazione della gravità terrestre è compensata permanentemente dalla forza centrifuga della curvatura dell'orbita. Una simile traiettoria di caduta libera attorno alla Terra in linea di principio dovrebbe durare per sempre. In pratica, tuttavia, alla minima quota dell'orbita di una stazione spaziale (in genere circa 400 chilometri sopra la superficie della Terra) ci sono piccoli disturbi derivanti dal fatto

che l'atmosfera della Terra non si arresta bruscamente, ma si diluisce lentamente man mano che si sale verso lo spazio. Ad un'altezza di 400 chilometri, ci sono ancora alcuni atomi di ossigeno che rallentano la stazione e ciò disturba il livello di microgravità a bordo della stazione stessa. Inoltre conduce ad una perdita lenta, ma costante di altezza che deve essere compensata di tanto in tanto da una manovra chiamata "reboost" effettuata accendendo i motori dei razzi della stazione per riportarla ad un'orbita con un'altezza maggiore. Durante queste manovre ovviamente si altera lo stato di microgravità all'interno della stazione.

E' importante capire che l'assenza di peso o la microgravità osservate a bordo di un veicolo o di una stazione spaziale non sono il risultato del fatto di trovarsi semplicemente nello spazio, ma il risultato di una situazione di caduta libera attorno alla Terra. Infatti, gli effetti della gravità su ogni oggetto ad un'altitudine di 400 Km sono soltanto minimamente meno forti di quelli che si hanno sulla superficie della Terra. A quelle altitudini, l'accelerazione di gravità esercitata su un oggetto immobile dal campo gravitazionale terrestre è solo di poco inferiore rispetto a quella esistente sulla superficie della Terra: 8.7 anziché 9.8 m/s^2 , come si può agevolmente calcolare dalla legge di gravità, dato il valore della costante $G = 6.67 \times 10^{-11} N m^2/Kg^2$, la massa della Terra ($5.97 \times 10^{24} Kg$) e il suo raggio (6370 Km). Fino a quando questo oggetto non si muove, tutto quello che si trova al suo interno o sulla sua superficie è attratto verso il centro della Terra. Se si costruisse una torre alta 400 Km i suoi ipotetici abitanti anche all'ultimo piano sarebbero saldamente attirati al pavimento dalla forza di gravità terrestre e non fluttuerebbero come gli abitanti di una stazione spaziale che, a differenza di una torre immobile, si trova in una situazione di caduta libera attorno alla Terra.

1.3.2 I voli parabolici dell'ESA

L'unico modo per evitare gli effetti e la sensazione della gravità, come abbiamo visto, è trovarsi in una situazione di caduta libera.

Per questo motivo l'Airbus A300 "Zero G" utilizzato dall'ESA per i voli parabolici effettua all'apice della parabola una caduta libera, senza nessuna forza a parte quella gravitazionale che agisce su di esso, generando 20 secondi di assenza di peso.



Figura 1-14: Airbus A300 ZERO G durante il volo

La forza di gravità distorce i processi fisici, cambia il modo in cui la materia e l'energia interagiscono e modifica il comportamento dei gas e dei liquidi.

La gravità interessa anche i veicoli spaziali che orbitano attorno alla Terra. Inesorabilmente sono attirati verso il basso ma volano a velocità così elevate (più di 25 volte la velocità del suono) tali da consentire loro di orbitare attorno al nostro pianeta evitando di schiantarsi al suolo. La forza centrifuga annulla la forza gravitazionale e il veicolo spaziale rimane continuamente in caduta libera. Il risultato di questa situazione è l'assenza di peso, chiamata anche microgravità.

Ma ancora oggi risulta essere molto costoso e difficile accelerare un carico utile fino ad una velocità orbitale. Ci sono altri modi per ottenere la microgravità senza dover andare così velocemente e così lontano, almeno per un periodo molto breve.

In uno dei suoi famosi esempi, Albert Einstein, nei primi anni del secolo scorso, realizzò che non c'è nessun modo per una persona in un ascensore sigillato in caduta libera di poter dire se stia cadendo giù verso la Terra o stia fluttuando nello spazio : .

ogni cosa all'interno dell'ascensore in caduta libera diventa senza peso perchè la caduta libera causata dalla forza di gravità cancella ogni altro effetto supplementare.

Oggi le torri a caduta, una versione particolare degli ascensori in caduta libera, sono il modo più accessibile per i ricercatori di effettuare esperimenti in assenza di peso. Sono alte torri (fino a 126 metri) prive di aria al loro interno, che consentono a dei pacchetti sperimentali in caduta di subire alcuni secondi di microgravità.

La durata del periodo di microgravità è molto breve, le dimensioni dei pacchetti molto limitate, e i ricercatori non possono certo intervenire direttamente nell'esperimento durante il periodo di assenza di peso.

La gravità interessa anche i veicoli spaziali che orbitano attorno alla Terra.

L'Airbus A300 "Zero-G", fornito e gestito dalla compagnia francese Novespace all'ESA, è pilotato in modo tale da fornire ai propri passeggeri e al proprio carico più lunghi periodi di assenza di peso in caduta libera.



Figura 1-15: Airbus A 300 ZERO G sulla pista prima di un volo

I voli parabolici sono utilizzati per condurre esperimenti scientifici e tecnologici di breve durata in microgravità, per verificare e testare la strumentazione prima di utilizzarla nello spazio, per validare procedure operative e sperimentali, per addestrare gli astronauti prima dei voli spaziali.

Tali voli sono condotti su velivoli configurati in maniera opportuna e sono in grado di fornire un periodo di microgravità o "assenza di peso" della durata di circa 20 secondi. Durante una campagna, che solitamente comprende tre voli distinti, vengono effettuate circa 30 parabole per ogni missione, cioè circa 90 parabole in totale. Durante ogni parabola si ha un

periodo di ipergravità (1,8 g) di circa 20 secondi immediatamente prima e immediatamente dopo i 20 secondi di microgravità (0,01 g).

I voli parabolici rappresentano l'unica possibilità di effettuare esperimenti medici su soggetti umani in una situazione di microgravità utilizzando un vettore suborbitale, completando gli studi condotti nello spazio e sulla Terra (attraverso le immersioni e gli esperimenti bed-rest con soggetti per settimane distesi su piani inclinati) in condizioni di simulazione di “assenza di peso”.

Una campagna di voli parabolici presenta diversi vantaggi:

- **breve lead time:** tipicamente trascorrono pochi mesi tra la proposta di ricerca ed il volo;
- **bassi costi:** L'ESA copre le spese del volo per gli esperimenti selezionati;
- **flessibilità nell'approccio agli esperimenti:** la strumentazione tipicamente utilizzata durante gli esperimenti è la stessa comunemente utilizzata nei laboratori di ricerca;
- **interventi diretti:** i ricercatori a bordo dell'aereo possono interagire con i loro esperimenti durante ogni parabola e tra una parabola e la successiva;
- **modifiche di set up degli esperimenti:** è possibile modificare la messa a punto di base dell'esperimento poichè i tre voli durante la campagna si effettuano normalmente in tre giorni successivi.



Figura 1-16: Ricercatori all'interno della sezione dedicata agli esperimenti. Si noti la presenza dei corrimano e dei pannelli protettivi.

1.3.2.1 Le caratteristiche dell'Airbus A-300 "ZERO G"

Le caratteristiche tecniche principali della cabina dell'Airbus A-300 destinata agli esperimenti durante il volo parabolico sono:

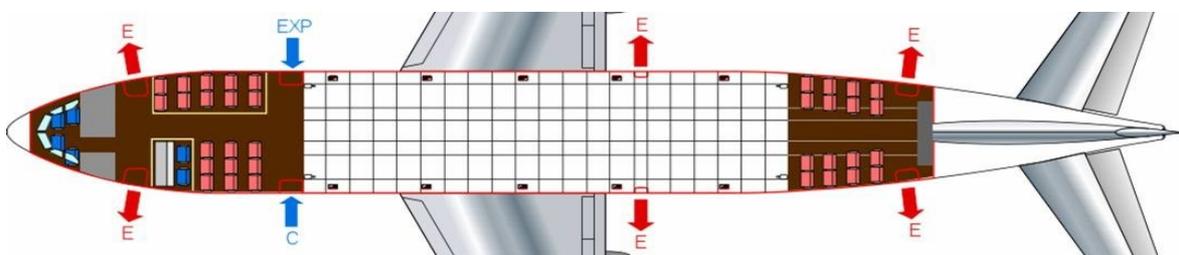


Figura 1-17: Vista dall'alto in sezione dell'Airbus A300 ZERO G

- un'area di prova delle apparecchiature di 20 x 5 x 2,3 m;

- tutte le apparecchiature devono essere caricate attraverso una normale porta passeggeri (1.93 m x 1.07 m);
- una pressione della cabina di 800 mbar e una gamma di temperature da 18 a 25 gradi centigradi;
- energia elettrica disponibile è di 220 V AC ad una frequenza di 50 Hz (monofase); 28 V DC; e 115-200 V AC a 400 Hz (trifase);
- un sistema di ventilazione provvede all'eliminazione e alla depurazione dei gas durante il volo;
- continua illuminazione in volo;
- riempimento delle superfici interne dell'area con speciali protezioni in gomma piuma per prevenire incidenti al personale in volo durante le fasi di microgravità.

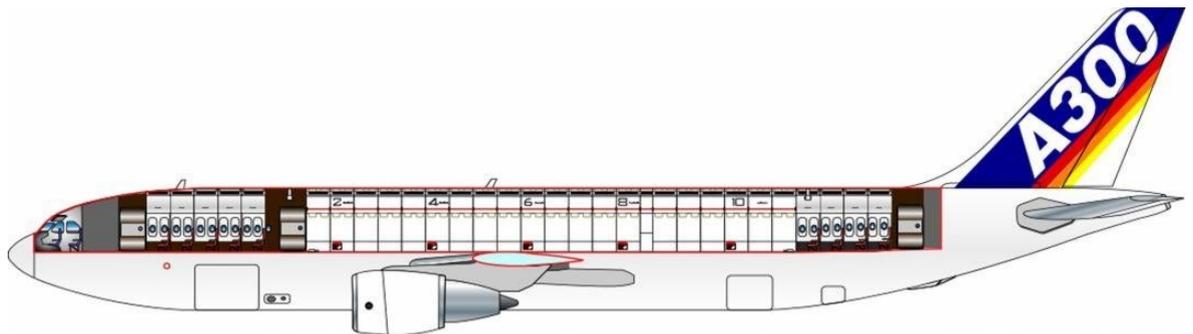


Figura 1-18: Vista laterale in sezione dell' Airbus A300 ZERO G

1.3.2.2 Manovra di volo parabolico

Il velivolo decolla dall'aeroporto di Bordeaux-Mérignac, raggiungendo uno speciale corridoio aereo sopra il Golfo di Gascogne. Arrivati alla quota di circa 6000 metri la manovra per ottenere l'assenza di peso, conosciuta come arco parabolico, inizia con una ripida ascensione (cabrata) di 45° con i motori alla massima potenza.

A questo punto i passeggeri sperimentano una gravità interna di circa 1,8 g per un periodo di 20 secondi, causata dall'accelerazione dei motori che si

somma alla normale forza di gravità. Raggiunta l'altitudine di 7600 metri l'Airbus riduce la potenza dei motori fino ad un livello minimo sufficiente appena a compensare la resistenza opposta dall'aria. Tutte le forze sono annullate a parte la gravità e l'aereo si trova in caduta libera. Da questo istante hanno inizio i 20 secondi di microgravità. La quantità di moto residua trasporta il velivolo fino alla parte superiore dell'arco parabolico. L'Airbus raggiunge l'apice della parabola ad una altitudine di 8500 metri descrivendo con il muso l'arco parabolico e iniziando la caduta libera verso il basso.

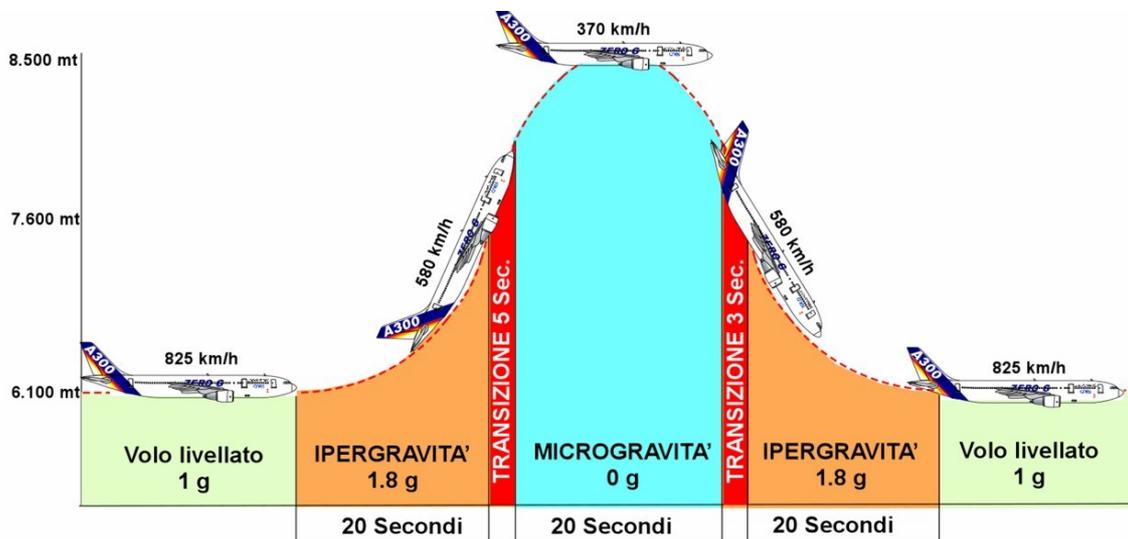


Figura 1-19: Fasi di una manovra di volo parabolico

Quando l'aereo risulta inclinato di 45 gradi sotto l'orizzonte i motori vengono accesi nuovamente alla massima potenza e i passeggeri sperimentano nuovamente una gravità di 1,8 g fino a quando il velivolo non viene livellato orizzontalmente alla quota iniziale di partenza di 6000 metri pronto per la successiva parabola.

Queste manovre sono effettuate ripetutamente, ogni tre minuti tra l'inizio di due parabole consecutive, cioè un minuto di fase parabolica (20 secondi ad 1,8g +20 secondi di microgravità +20 secondi a 1,8g) seguiti da due minuti

di intervallo di volo livellato ad 1g. Dopo la decima e la ventesima parabola l'intervallo di riposo è aumentato a 6 minuti.

Durante il volo, tutto il personale a bordo è tenuto continuamente informato sullo stato della campagna.

Ogni arco parabolico genera circa 20 secondi di microgravità. L'Airbus compie 31 parabole al giorno, per tre giorni per tre campagne all'anno (due campagne professionali ed una per gli studenti) la microgravità ottenuta in un anno è quindi pari a quella di un'orbita attorno alla Terra di 90 minuti.

Realizzare voli parabolici comporta manovre molto complesse e impegnative. Per questo l'Airbus "Zero G" è stato sottoposto ad una speciale opera di rafforzamento ed ogni volo trasporta 5 piloti tutti del Centro Sperimentazione Volo Francese CEV. Tre di questi piloti possono pilotare l'aereo in qualsiasi momento e sorvegliano ognuno un asse di movimento diverso.

1.3.2.3 Organizzazione di una campagna di voli parabolici

L'ESA ha iniziato a compiere campagne di voli parabolici sin dal 1984. Da allora fino al 1988 furono compiute 6 campagne presso il campo di volo di Ellington in Houston (Texas), utilizzando un KC-135 della NASA. Nel 1988 l'agenzia spaziale francese CNES costruì il suo aereo zero-g: il Caravelle mettendolo a disposizione dell'ESA; da allora fino al 1995 si effettuarono 15 campagne di voli parabolici.

Inoltre, nel 1994, l'ESA effettuò una campagna utilizzando un Illyushin IL-76 MDK russo. Nel 1996 l'ESA effettuò la sua ventitreesima campagna di voli parabolici a Bordeaux utilizzando un KC-135 della NASA. Dalla ventiquattresima campagna, nel settembre 1997, un Airbus A300 "Zero-G" della CNES (il più grande aereo utilizzato per voli parabolici) entra in servizio fino ai giorni nostri.

Le campagne dei voli parabolici sono al centro della gamma di possibili accessi alla microgravità, che parte dalle torri a caduta e finisce con i voli a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS).

L'azienda francese Novespace fornisce all'ESA la logistica delle campagne di voli parabolici e supervisiona e controlla la preparazione tecnica degli esperimenti. Il centro sperimentale per il volo francese (CEV) fornisce tutto il personale di volo e di supporto. Il supporto tecnico per il velivolo è fornito dall'azienda Sogerma con sede a Bordeaux.

Una tipica campagna dell'ESA dura normalmente due settimane. La prima settimana è dedicata al ricevimento degli esperimenti, seguito dall'installazione e dalle prove e le calibrazioni all'interno del velivolo. La seconda settimana è dedicata ai voli parabolici. All'inizio della seconda settimana tutte le persone che parteciperanno ai voli partecipano a riunioni sulla sicurezza.

Tre voli di 30 parabole ciascuno sono previsti per le mattine di martedì, di mercoledì e di giovedì, con una durata approssimativa di due ore e mezza. In caso di tempo inclemente o di problemi tecnici con l'aereo il volo è rinviato al pomeriggio o alla mattina seguente.

1.3.2.4 Norme di sicurezza

La sicurezza dell'equipaggio e delle attrezzature durante le campagne di voli parabolici dell'ESA è ovviamente di fondamentale importanza.

I voli parabolici sono considerati come voli sperimentali perciò particolari precauzioni sono prese per far sì che tutte le operazioni in volo siano fatte in sicurezza e che i partecipanti siano adeguatamente preparati alle ripetute fasi di iper- e microgravità.

Prima della campagna ai ricercatori viene fornito un supporto tecnico per progettare le loro attrezzature e per renderle assolutamente sicure. Tutti gli

esperimenti sono rivisti dagli esperti dell'ESA durante la visita ai laboratori di ricerca i cui esperimenti sono stati ammessi alla campagna.

Un mese prima dei voli viene effettuata una revisione di sicurezza durante la quale viene discussa l'integrazione di tutte le attrezzature e valutata l'organizzazione generale della sicurezza dei voli.

Infine una visita di ispezione è condotta nell'aereo prima del primo volo per verificare che tutte le attrezzature imbarcate siano conformi agli standard di sicurezza.

Tutti i ricercatori invitati dall'ESA a partecipare ai voli parabolici devono essere sottoposti ad un esame medico (FAA classe III, valido per un anno) e ad un test fisiologico in una camera ipobarica (valido per tre anni).

I ricercatori a bordo indossano tute di volo speciali dell'ESA.

Per gli esperimenti proposti condotti su soggetti umani, i protocolli medici presentati dai ricercatori sono rivisti per assicurarsi che le ricerche siano condotte rispettando le norme etiche e di sicurezza.

Durante i voli il personale specializzato supervisiona e supporta le operazioni associate ai diversi esperimenti. Un chirurgo di volo partecipa a tutte le missioni per controllare gli aspetti medici delle operazioni e per assistere i partecipanti in caso di malesseri.

A causa del continuo alternarsi di fasi di iper- e microgravità è abbastanza comune tra i partecipanti soffrire di disturbi quali nausea e vomito a tal punto, a volte, di impedire di effettuare gli esperimenti. Per questo prima del volo sono disponibili, a richiesta, farmaci contro il mal d'aria (chiaramente non per i soggetti che si sottoporranno agli esperimenti).



figura 1-20:Fasi di carico dell'Airbus A300 ZERO G prima di un volo

Schema riassuntivo dell'organizzazione di una campagna di voli parabolici

- Voli per campagna: 3 (1 al giorno);
- Costo per campagna: 300.000 €;
- Esperimenti condotti: 30 (in media) all'anno;
- Totale parabole: 279 all'anno;
- Microgravità ottenuta: 1,7 ore annue.
- Campagne all'anno: 3 (2 per ricercatori, 1 per studenti);

Principali piattaforme impiegate per il volo parabolico:

Figura 1-21 Airbus A 300 “ZERO G”

**(Agenzia Spaziale Europea
ESA)**



Figura 1-22 Boeing KC 135

NASA

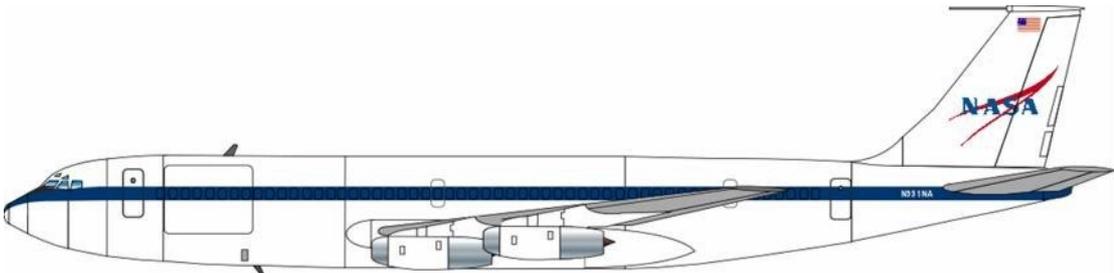


Figura 1-23 Ilyushin IL 76 MDK 2

(Agenzia Spaziale Russa)

RKA

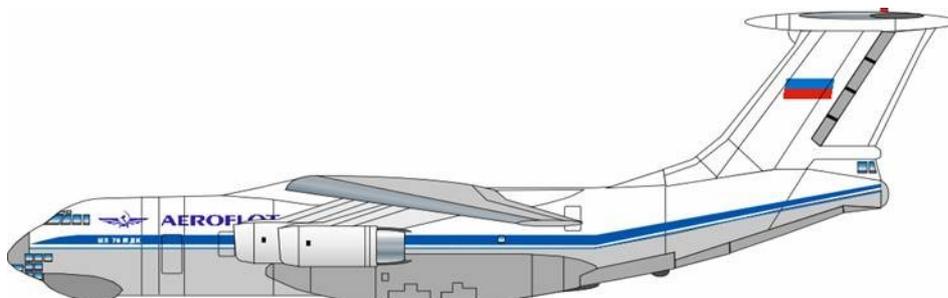




Figura 1-24: Ricercatori e personale di volo durante la fase di microgravità della parabola



Figura 1-25: Airbus A300 ZERO G in manovra sulla pista

