



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E  
DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"

CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA BIOMEDICA

**SOLUZIONI INGEGNERISTICHE PER LA  
MICROGRAVITÀ: LE TUTE SPAZIALI A  
DISTRIBUZIONE DI CARICO E APPLICAZIONI  
TERRESTRI PER LA SALUTE E LA  
RIABILITAZIONE**

TESI DI LAUREA IN "ADATTAMENTI CORPOREI IN PARTICOLARI  
SITUAZIONI FISILOGICHE: FISIOLOGIA DELL'ALTITUDINE, DELLE  
IMMERSIONI, FISIOLOGIA AEROSPAZIALE"

Relatrice  
Prof.ssa Rossella Breveglieri

Presentata da  
Tommaso Camaggi

---

Settembre 2025  
Anno Accademico 2024/2025



*A mamma e babbo*



# Indice

<b>1. Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>2. Fisiologia umana in condizioni di microgravità</b>	<b>5</b>
2.1 Microgravità . . . . .	5
2.1.1 Microgravità e suoi effetti fisiologici globali . . . . .	5
2.1.2 Microgravità simulata . . . . .	7
2.2 Adattamenti fisiologici alla microgravità . . . . .	11
2.2.1 Sistema cardiovascolare . . . . .	11
2.2.2 Apparato ematopoietico . . . . .	14
2.2.3 Apparato visivo . . . . .	14
2.2.4 Funzionalità polmonare . . . . .	16
2.2.5 Sistema neurovestibolare . . . . .	16
2.2.6 Sistemi immunitario e neuroendocrino . . . . .	18
2.2.7 Adattamenti muscolari . . . . .	19
2.2.8 Modificazioni del tessuto osseo . . . . .	21
<b>3. Contromisure e tute a distribuzione di carico</b>	<b>26</b>
3.1 Contromisure . . . . .	26
3.1.1 Cicloergometro . . . . .	27
3.1.2 Tapis roulant . . . . .	28
3.1.3 Lower Body Negative Pressure (LBNP) . . . . .	30
3.1.4 Advanced Resistive Exercise Device (ARED) . . . . .	31
3.1.5 Neuromuscular Electrical Stimulation / Functional Electrical Stimulation (NMES/FES) . . . . .	32
3.1.6 Tute a distribuzione di carico . . . . .	33
3.2 Penguin Suit . . . . .	36
3.3 Gravity Loading Countermeasure Skinsuit (GLCS) . . . . .	39

<b>4. Applicazioni alla medicina terrestre: tute ortopediche di supporto alla riabilitazione neuromotoria</b>	<b>56</b>
4.1 Adeli Suit . . . . .	57
4.2 TheraSuit . . . . .	64
<b>5. Conclusioni</b>	<b>70</b>
<b>6. Bibliografia</b>	<b>73</b>





# 1. Introduzione

Fin dalle sue origini, la scienza ha seguito percorsi che spesso si sono rivelati tortuosi, non lineari, addirittura misteriosi agli occhi dei contemporanei. È una storia fatta di intuizioni, di ipotesi arditamente formulate e di esperimenti che sembravano, a prima vista, privi di senso pratico. Eppure, se si volge lo sguardo al passato, ci si accorge che molte delle scoperte considerate inizialmente inutili o astratte si sono rivelate poi fondamentali per il progresso dell'umanità. La storia della scienza è infatti costellata di esempi in cui il sapere, anche quello apparentemente più lontano dalla quotidianità, ha finito per trovare una sua applicazione concreta, spesso in modi inaspettati e rivoluzionari.

Si pensi, ad esempio, al caso affascinante dei numeri primi. Per secoli, la loro natura enigmatica ha attratto matematici di tutto il mondo, senza che vi fosse alcuna applicazione concreta in vista. Era un sapere puro, coltivato per il solo gusto della scoperta intellettuale. Eppure, oggi i numeri primi sono il fondamento della crittografia moderna, quella stessa crittografia che protegge le comunicazioni digitali, le transazioni bancarie e le informazioni sensibili custodite negli smartphone. Un'intera infrastruttura informatica si regge su una conoscenza matematica nata più di due millenni fa senza alcuna apparente aspirazione di utilizzo pratico.

Si potrebbe poi dire della meccanica quantistica. Inizialmente era quasi una filosofia della natura, uno sforzo di comprendere l'infinitamente piccolo, le particelle subatomiche, il mondo al di là dei nostri sensi. Era un sapere che sfidava l'intuizione, difficile da accettare anche per gli stessi scienziati che la proponevano. Oggi, l'intero mondo dell'elettronica (dai computer ai telefoni cellulari, dai LED ai laser) si fonda su principi quantistici, a lampante dimostrazione di come anche le teorie più astratte possano diventare pilastri della vita quotidiana.

Ancora, si pensi alla teoria della relatività. Quando Einstein la formulò, sembrava un'impresa del pensiero, una visione quasi poetica e profondamente astratta del funzionamento dell'universo, in apparenza del tutto scollegata dalla realtà concreta e dalla vita di tutti i giorni. Oggi, però, è proprio grazie a quella teoria che i sistemi GPS riescono a funzionare con precisione. I satelliti in orbita si muovono ad alta velocità e si trovano in un campo gravitazionale diverso da quello terrestre: due condizioni che alterano lo scorrere

del tempo. Senza tener conto di questi effetti relativistici, le indicazioni fornite dai GPS sarebbero imprecise, causando addirittura errori di chilometri. Anche in questo caso, una teoria nata per rispondere a domande puramente scientifiche si è rivelata indispensabile nella tecnologia che usiamo quotidianamente, spesso senza nemmeno rendercene conto.

In tutti questi casi, ciò che colpisce è la distanza, temporale e concettuale, tra il momento della scoperta e quello dell'applicazione. Spesso, le idee nate in un contesto di pura ricerca teorica restano per anni, a volte addirittura decenni, lontane dalla nostra vita quotidiana e dai bisogni immediati della società. È come se la scienza spargesse oggi i semi di conoscenze e tecnologie che solo in un futuro più o meno lontano potranno germogliare e portare i loro frutti, contribuendo in modo significativo al progresso e al benessere collettivo.

È questo il paradigma che ha ispirato questa tesi. Quello che emerge chiaramente dalla storia della scienza è che spesso le conoscenze più innovative nascono in ambiti molto specializzati, apparentemente lontani dalla vita di tutti i giorni. Il processo con cui il sapere si trasforma da pura astrazione a soluzione applicata è spesso lungo e complesso, ma rappresenta una delle dinamiche più affascinanti dell'avanzamento scientifico, dimostrando che nulla è davvero inutile quando si tratta di comprendere il mondo che ci circonda.

Tra le molte frontiere della scienza moderna, lo spazio rappresenta forse l'esempio più emblematico di come tecnologie nate per condizioni estremamente particolari possano avere un impatto significativo sulla vita quotidiana. I materiali innovativi sviluppati per resistere alle condizioni estreme dello spazio sono stati adattati per migliorare l'isolamento termico nelle abitazioni o per realizzare tessuti tecnici nell'abbigliamento sportivo. La tecnologia delle fotocamere digitali ad alta risoluzione, che ha avuto origine nei programmi di esplorazione planetaria, ha rivoluzionato il mondo della telefonia. Anche nell'ambito della comunicazione, l'innovazione spaziale ha lasciato il segno. Nel 1962, un astronauta della NASA utilizzò per la prima volta un auricolare leggero e senza fili: un'idea pionieristica che ha ispirato lo sviluppo delle cuffie wireless moderne, oggi ampiamente diffuse. Non meno importante è il contributo della ricerca spaziale nel campo dei materiali per il comfort e la sicurezza. Negli anni '70, la NASA sviluppò il memory foam con l'obiettivo di migliorare la sicurezza degli astronauti durante i lanci, grazie alla sua capacità di assorbire gli urti e adattarsi alla forma del corpo. Oggi, questo materiale è diventato comune in materassi, cuscini e scarpe, offrendo un comfort superiore. Ancora, sistemi avanzati come i filtri per l'acqua, originariamente ideati per garantire la purezza e il riciclo delle

risorse nelle missioni spaziali, sono stati adattati per l'uso quotidiano in aree a rischio idrico in quanto capaci di offrire soluzioni altamente efficienti, compatte e affidabili per trattare anche acque molto contaminate. Persino i sensori per il monitoraggio fisiologico continuo, sviluppati per tenere sotto controllo la salute degli astronauti in tempo reale, trovano oggi impiego crescente nella telemedicina e nello sport.

Allo stesso modo, i dispositivi e le soluzioni sviluppati per sostenere il corpo umano in assenza di gravità nascondono un potenziale straordinario che va ben oltre le missioni spaziali. Tra queste, le tute a distribuzione di carico sono una tecnologia che, pur essendo stata ideata per proteggere e supportare gli astronauti durante le lunghe permanenze in orbita, offre oggi interessanti prospettive anche in ambito medico e riabilitativo. Il mio studio nasce proprio da questo proposito: capire come una tecnologia apparentemente lontana dall'ambito clinico possa diventare uno strumento concreto di supporto per chi affronta percorsi di recupero motorio o è costretto a convivere con limitazioni della mobilità.

L'obiettivo di questa tesi è presentare gli adattamenti fisiologici che l'organismo umano sperimenta in condizioni di microgravità, con particolare attenzione agli effetti che l'assenza di peso ha su sistemi cruciali come quelli muscoloscheletrico e cardiovascolare. Tali adattamenti, sebbene in parte reversibili, rappresentano un limite significativo alla durata e alla sicurezza delle missioni spaziali, motivo per cui nel tempo sono state sviluppate diverse strategie di contromisura volte a contrastare il decondizionamento fisiologico. Tra queste, le tute a distribuzione di carico rappresentano una delle soluzioni più promettenti: progettate per riprodurre parzialmente gli effetti della gravità terrestre sul corpo degli astronauti, mirano a stimolare in modo più fisiologico la muscolatura e il sistema scheletrico durante la permanenza in orbita.

In questa tesi, si è scelto di approfondire lo stato dell'arte relativo alla progettazione di tali dispositivi, analizzando sia i principi ingegneristici su cui si basano, sia le principali soluzioni tecniche adottate fino ad oggi. Questo passaggio risulta fondamentale per comprendere non solo le potenzialità delle tute, ma anche le sfide ancora aperte nella loro ottimizzazione e nella loro applicabilità a diversi contesti d'uso.

A partire da questa base, la tesi si propone di esplorare come alcune delle tecnologie sviluppate per lo spazio possano essere efficacemente trasferite all'ambito clinico, in particolare nella riabilitazione neuromotoria. A tal fine, viene presentata una rassegna di studi che indagano l'impiego delle tute a distribuzione di carico in contesti terapeutici terrestri, evidenziandone il potenziale e i limiti.

Le informazioni presentate sono state raccolte e analizzate attingendo da una vasta gamma di fonti, tra cui libri, articoli scientifici e risorse web. In particolare, lo studio si è concentrato su un'accurata analisi di 13 fonti principali, che includono 2 volumi specialistici, 4 articoli di revisione, 6 articoli scientifici originali e un brevetto. Oltre a ciò, sono stati citati i risultati di ulteriori 12 prodotti, prevalentemente articoli scientifici, che hanno contribuito a integrare e arricchire il quadro conoscitivo globale. Infine, l'approfondimento di queste fonti ha permesso di considerare anche i risultati di altri 20 studi, rintracciati attraverso le citazioni presenti negli articoli e nei testi esaminati. Complessivamente, la bibliografia di questa tesi comprende quindi 45 riferimenti, la cui analisi combinata ha consentito un confronto critico e un'implementazione piuttosto esaustiva dello stato dell'arte relativo all'argomento trattato.

## 2. Fisiologia umana in condizioni di microgravità

### 2.1 Microgravità

#### 2.1.1 Microgravità e suoi effetti fisiologici globali

La permanenza nello spazio sottopone l'organismo ad innumerevoli stress ambientali, tra i quali il più rilevante e costante è sicuramente l'assenza di gravità. L'evoluzione dell'organismo umano è stata pienamente guidata dalla gravità presente sulla Terra: crescita, sviluppo e funzioni degli apparati fisiologici, disposizione degli organi, tipologie dei tessuti organici e controllo motorio si sono ottimizzati in modo da adeguarsi alle forze generate dal campo gravitazionale terrestre.

Per *microgravità* si intende la condizione nella quale un corpo è soggetto ad un campo gravitazionale di intensità estremamente minore rispetto a quello sperimentato sulla Terra. Il termine “microgravità” contiene il prefisso “micro-”, che si riferisce ad un'accelerazione gravitazionale molto inferiore a quella terrestre, tipicamente dell'ordine di un milionesimo di  $g^1$  ( $10^{-6} g$ ). Sebbene spesso questa condizione venga descritta come *assenza di gravità* o *zero-g*, in realtà la gravità non è completamente assente, ma ci si trova piuttosto in uno stato di caduta libera continua. È esattamente il caso della Stazione Spaziale Internazionale<sup>2</sup> (ISS, International Space Station) in orbita attorno alla Terra. Essa si trova ad una altitudine tra i 370 e i 460 km, dove il campo gravitazionale è approssimativamente il 90% rispetto al valore sulla superficie terrestre. La gravità terrestre, dunque, attrae anche la Stazione stessa; di conseguenza, essa sta costantemente cadendo verso la superficie della Terra. Tuttavia, si muove con una velocità tangenziale di circa 28 000 km/h, tale da seguire esattamente la curvatura della Terra. Si consideri una persona che lancia una palla da

---

<sup>1</sup>Il simbolo “g” rappresenta l'accelerazione di gravità terrestre a livello del mare (gravità normale, normogravità) ed è una costante fisica utilizzata per misurare l'effetto della gravità sulla massa:  $g \approx 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

<sup>2</sup>La Stazione Spaziale Internazionale è una stazione spaziale orbitante, operativa dal 1998, che funge da laboratorio scientifico, dove scienziati e astronauti da diverse nazioni conducono esperimenti in microgravità.

baseball; la gravità fa sì che la traiettoria di quest'ultima curvi verso il basso, colpendo infine il suolo. La Stazione Spaziale Internazionale si muove dunque alla velocità giusta affinché la sua traiettoria corrisponda esattamente alla curvatura della Terra. Per questo motivo, la struttura continua a cadere verso la superficie, ma non la colpisce mai. Si può dire che la Stazione Spaziale Internazionale cade "attorno" al pianeta. Ciò, di fatto, si traduce in una continua caduta libera, che coinvolge la struttura e gli astronauti all'interno di essa. In caduta libera, il corpo sperimenta assenza di peso: le forze apparenti dovute al moto accelerato del corpo si bilanciano con la forza di gravità, cosicché la risultante delle forze è nulla. È proprio questa quasi totale assenza di peso il fattore principale che determina la maggior parte delle modificazioni biologiche riscontrate durante le missioni spaziali.

Per affrontare il tema degli adattamenti fisiologici umani in condizioni di microgravità, si è fatto principalmente riferimento al volume *Dagli abissi allo spazio. Ambienti e limiti umani* di Ferretti e Capelli (2008) [1]. Il testo si è rivelato particolarmente utile per inquadrare i principali meccanismi di adattamento dell'organismo umano in ambiente spaziale.

La microgravità produce effetti significativi su numerosi sistemi funzionali dell'organismo, che risponde attraverso vari processi di adattamento. La velocità e la modalità con cui questi adattamenti si instaurano dipendono dalla complessità dei meccanismi coinvolti. La *Figura 2.1.a* illustra la cinetica di adattamento dei principali sistemi fisiologici in condizioni di microgravità, assumendo che, prima del volo, l'organismo si trovi in perfetto equilibrio omeostatico. Il sistema cardiovascolare, tramite la dislocazione diffusa dei fluidi corporei, si adatta con rapidità. Similmente, il sistema neurovestibolare attua compensazioni pressoché immediate. Altri sistemi, come gli apparati muscolare e scheletrico, richiedono tempi più lunghi e mostrano cambiamenti progressivi. Gli adattamenti sono generalmente valutati prendendo come riferimento la postura ortostatica terrestre<sup>3</sup>. Al termine della missione, il ritorno alla gravità terrestre richiede un periodo di riadattamento, la cui durata è variabile e dipende da fattori individuali, dalla durata del volo e dall'efficacia delle contromisure adottate in orbita. Anche in questo caso, i diversi sistemi fisiologici recuperano con tempi diversi, seguendo una direttrice opposta, ma simile per tempistiche, a quella osservata in microgravità (*Figura 2.1.b*).

Il rientro sulla Terra può provocare brusche e temporanee perturbazioni nei sistemi

---

<sup>3</sup>La postura ortostatica terrestre si riferisce alla posizione eretta del corpo umano quando si sta in piedi sulla superficie terrestre, in equilibrio statico sotto l'effetto della gravità.

fisiologici di controllo che si erano stabilizzati nello stato di microgravità. Il riadattamento neurovestibolare, ad esempio, è spesso preceduto da difficoltà posturali e da alterazioni del controllo motorio, anch'esse variabili. Ad ogni modo, la maggior parte dei parametri torna gradualmente nella norma. L'organismo umano, dunque, dimostra una buona capacità di adattamento alla microgravità e, soprattutto, un'adeguata capacità di recupero funzionale al ritorno sulla Terra. Ciò è anche testimoniato dal fatto che molti astronauti hanno partecipato a più missioni spaziali, anche di lunga durata, senza conseguenze debilitanti a lungo termine.

Oltre alla microgravità, i voli spaziali espongono l'organismo ad altri stress ambientali. Durante il lancio e il rientro, il corpo è sottoposto ad accelerazioni superiori a quella terrestre e a forti stimoli meccanico-vibrazionali. Per di più, la permanenza al di fuori delle fasce di Van Allen<sup>4</sup> comporta un'esposizione significativa a radiazioni ionizzanti e a campi geomagnetici ed elettrici alterati, con possibili conseguenze sul lungo termine per la salute.

Si consideri infine che gli astronauti della ISS vivono per alcuni mesi in condizioni di isolamento e confinamento, lontani dal resto dell'umanità e dalle persone care. Tale situazione può profondamente influenzare il benessere psicologico. A questo aspetto si aggiungono altri fattori di stress legati all'ambiente in cui vivono: intensi carichi di lavoro, livelli elevati di rumore e vibrazioni, dieta poco varia e necessità di utilizzare aria ed acqua riciclate.

### **2.1.2 Microgravità simulata**

L'organizzazione di missioni spaziali e il mantenimento degli equipaggi in condizioni di microgravità rappresenta un'impresa estremamente onerosa, sia economicamente che dal punto di vista logistico e tecnologico. Si tratta di un impegno che solamente una superpotenza o un consorzio internazionale è in grado di sostenere. Le missioni a scopo scientifico, in particolare quelle rivolte agli studi biomedici, vengono spesso pianificate parallelamente ad altre missioni con finalità tecnologiche o militari. Questo contesto ha portato alla necessità di sviluppare sulla Terra metodologie in grado di simulare gli effetti della microgravità sui sistemi biologici, con l'obiettivo di ampliare la base di conoscenze

---

<sup>4</sup>Le fasce di Van Allen sono zone toroidali che circondano la Terra, composte da particelle cariche (protoni ed elettroni) ad alta energia intrappolate dal campo magnetico terrestre. Queste fasce fanno parte della magnetosfera, cioè la regione di spazio dominata dal campo magnetico terrestre, che agisce come uno scudo naturale contro le radiazioni cosmiche e solari.

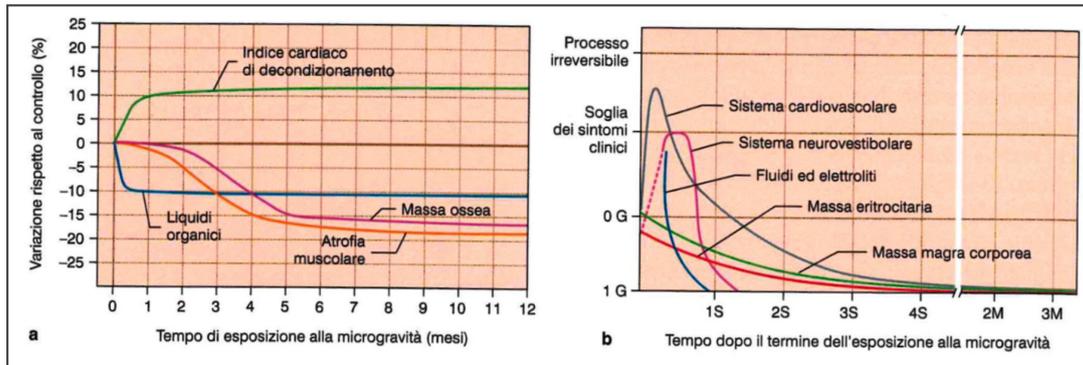


Figura 2.1: Cinetica delle modificazioni fisiologiche causate dall'esposizione alla microgravità (a) e successivo riadattamento alla normogravit  (b).

Tratta da: Ferretti, G., Capelli, C. (2008). *Dagli abissi allo spazio. Ambienti e limiti umani.* [1].

ed incrementare la disponibilit  di dati sperimentali.

Il metodo pi  impiegato per simulare gli effetti della microgravit    l'allettamento prolungato (*bed rest*). Sebbene in questa condizione la forza di gravit  sia ancora presente, l'immobilit  forzata induce una serie di adattamenti fisiologici che risultano sorprendentemente simili a quelli osservati durante i soggiorni spaziali. Tra questi si annoverano: ipotrofia muscolare, demineralizzazione ossea, redistribuzione dei fluidi corporei, variazioni nella composizione della massa corporea, riduzione del volume plasmatico e della massa cellulare dei globuli rossi, indebolimento del sistema immunitario. Uno degli effetti pi  evidenti rilevati al termine del periodo di allettamento   la riduzione della tolleranza ortostatica, un fenomeno che rispecchia quanto riportato dagli astronauti al rientro sulla Terra.

Una variante del *bed rest* particolarmente efficace   il cosiddetto *head-down tilt bed rest (HDTBR)*, che prevede il posizionamento del soggetto a letto ad un'inclinazione di circa 6 , con la testa pi  in basso rispetto al piano orizzontale (Figura 2.2). Questa configurazione permette una simulazione pi  accurata degli effetti della microgravit , in quanto favorisce uno spostamento pi  rapido e marcato dei fluidi verso la parte superiore del corpo, provocando segni e sintomi analoghi a quelli riscontrati negli astronauti: edema facciale, congestione nasale, sensazione di pesantezza alla testa. Rispetto al semplice allettamento in posizione supina, l'HDTBR comporta un maggiore decondizionamento cardiovascolare e una pi  significativa perdita di massa muscolare e ossea, in particolare a livello degli arti inferiori.

Durante i protocolli di *bed rest*, si possono inserire periodi di attivit  fisica controllata,

concepiti come contromisure per contrastare gli effetti negativi dell'inattività prolungata. L'ottimizzazione di questi interventi in termini di tipo, intensità e durata degli esercizi fisici ha inoltre importanti ricadute anche in ambito terrestre, ad esempio nella prevenzione della sarcopenia<sup>5</sup> e del decondizionamento cardiovascolare negli anziani, condizioni spesso aggravate dalla ridotta mobilità e che possono instaurare un pericoloso circolo vizioso invalidante.

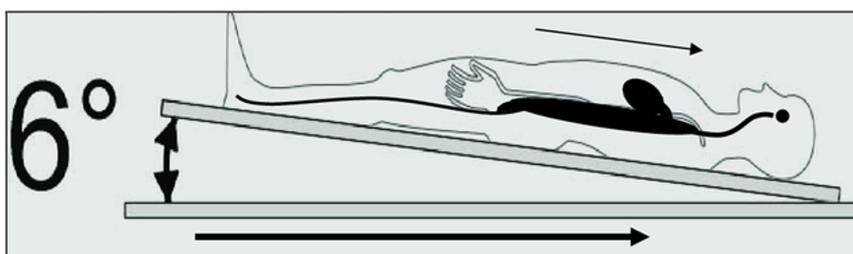


Figura 2.2: Head-down tilt bed rest.  
Tratta da: Blottner et al. (2006), [2].

Oltre all'allettamento, sono stati sviluppati altri metodi terrestri per simulare la microgravità. Uno di questi è l'immersione in acqua, che induce una rapida redistribuzione dei fluidi verso i distretti toracici e cefalici, grazie ai cambiamenti nei gradienti idrostatici. Durante l'immersione, infatti, la pressione esercitata dall'acqua comprime i tessuti del corpo, causando uno spostamento dei liquidi presenti negli spazi extracellulari verso la circolazione sanguigna. Questo processo determina un aumento del volume di sangue che ritorna al cuore (aumento del volume sanguigno centrale) e, di conseguenza, la pressione nelle vene centrali si eleva, imponendo un carico maggiore sul cuore. In risposta a questo aumento di volume e pressione, il sistema renale viene stimolato a produrre più urine, favorendo l'eliminazione dell'eccesso di liquidi corporei in modo da mantenere l'equilibrio idrico. Questo metodo riproduce fedelmente gli effetti della microgravità sui sistemi cardiovascolare e renale. Tuttavia, la permanenza prolungata in acqua comporta problemi cutanei, come la macerazione, che ne limitano l'utilizzo a meno di 24 ore.

Per ovviare a questi limiti, è stata sviluppata in Russia la tecnica della *dry immersion*, ovvero l'immersione a secco. In questo caso, il soggetto viene separato fisicamente dall'acqua tramite una sottile pellicola plastica, che consente di ottenere gli stessi effetti fisiologici dell'immersione tradizionale, ma per periodi prolungati. La *dry immersion* si è

<sup>5</sup>La sarcopenia è la perdita progressiva e generalizzata della massa e della forza muscolare associata all'invecchiamento del corpo umano.

dimostrata particolarmente efficace nel simulare gli effetti della microgravità, soprattutto in relazione alla redistribuzione dei fluidi corporei.

Tra le metodiche più singolari si può citare il supporto meccanico di un solo arto inferiore, che consente di escludere parzialmente il carico gravitazionale su una gamba. Questo approccio, sebbene limitato alla sfera muscoloscheletrica dell'arto sospeso, si è rivelato utile per lo studio della perdita di massa muscolare e della demineralizzazione ossea, pur non permettendo di indagare gli effetti sistemici della microgravità sull'intero organismo.

Un ulteriore metodo impiegato per lo studio degli adattamenti acuti alla microgravità è rappresentato dai voli parabolici. Durante questi voli, un aeroplano segue una traiettoria balistica, detta *traiettoria kepleriana*<sup>6</sup>, che consente di ottenere brevi periodi di microgravità (*Figura 2.3*). Ogni parabola genera una fase di caduta libera della durata di circa mezzo minuto, preceduta e seguita da fasi di ipergravità (pari a circa 1,8 g), rispettivamente nella fase di cabrata<sup>7</sup> e in quella di picchiata<sup>8</sup>. Nello specifico, durante un volo parabolico, l'aereo inizialmente vola parallelamente alla superficie terrestre, poi esegue una cabrata con un'inclinazione di circa 45°, raggiungendo un'accelerazione pari a circa 1,8 g. Quando la spinta viene interrotta, l'aeromobile entra in una traiettoria balistica e inizia a cadere liberamente. In questa fase, sia l'aereo che gli oggetti al suo interno sono soggetti alla medesima accelerazione gravitazionale e quindi non vi è accelerazione relativa tra di essi: si realizza una condizione di assenza di peso paragonabile alla microgravità. Questa condizione si protrae per circa 20-30 secondi, fino a quando l'aereo raggiunge nuovamente un'inclinazione di circa 45° verso il basso e viene accelerato in picchiata per ritornare alla traiettoria orizzontale. Un volo standard può includere fino a quaranta parabole, garantendo complessivamente circa 15 minuti di microgravità simulata.

Sebbene la breve durata della condizione di assenza di peso e la presenza di fasi ipergravitazionali rendano talvolta complessa l'interpretazione dei dati, i voli parabolici hanno permesso importanti osservazioni sui meccanismi fisiologici a risposta rapida, come i fenomeni meccanici respiratori, quelli emodinamici e i riflessi cardiovascolari a rapida insorgenza.

---

<sup>6</sup>Il volo parabolico viene spesso definito come una traiettoria kepleriana poiché, durante la fase di caduta libera, l'aereo segue un tratto di traiettoria che obbedisce alle stesse leggi che regolano il moto dei corpi celesti secondo Keplero. In questa fase, infatti, l'unica forza agente è la gravità.

<sup>7</sup>La cabrata è la manovra aeronautica che consente al velivolo di alzare il muso, generando normalmente un aumento di quota.

<sup>8</sup>La picchiata è la manovra opposta alla cabrata e consente al velivolo di scendere di quota.

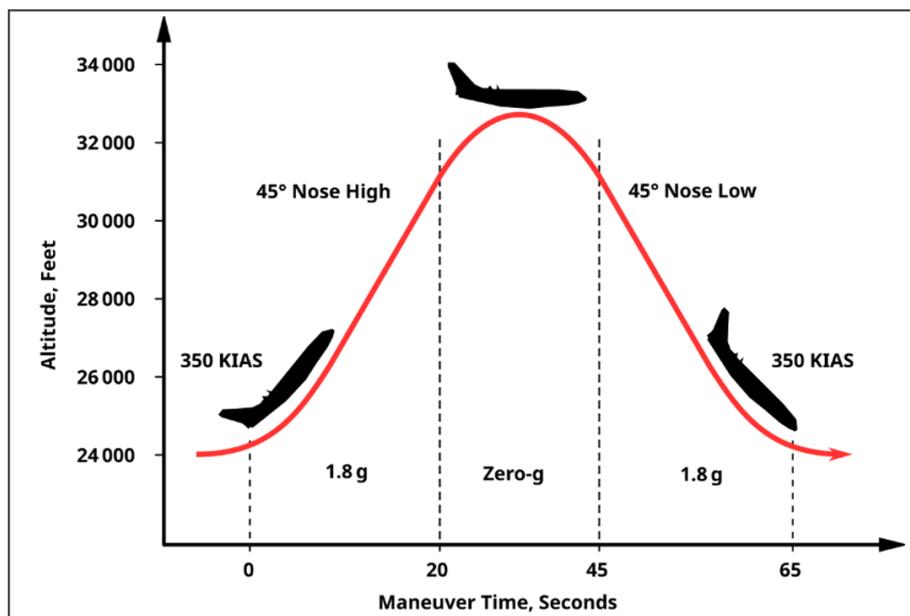


Figura 2.3: Rappresentazione schematica di altitudine, tempistiche e forze gravitazionali sperimentate durante un volo parabolico. “Knots-Indicated Air Speed” (abbreviato come KIAS) è una misura della velocità dell’aereo rispetto all’aria circostante, espressa in nodi (1 nodo = 1,852 km/h).  
Tratta da: “Reduced-gravity aircraft”. Wikipedia. [3].

## 2.2 Adattamenti fisiologici alla microgravità

### 2.2.1 Sistema cardiovascolare

L’assenza di gravità induce nel corpo umano significative variazioni nella distribuzione dei liquidi. In particolare, il sangue non viene più attratto verso i piedi, ma si accumula maggiormente nella regione cranica. Come rappresentato in *Figura 2.4*, questo spostamento comincia già nei minuti successivi all’ingresso in microgravità e si manifesta fin da subito con i tipici gonfiore del volto (*edema facciale*) e assottigliamento delle gambe (*gambe da uccello*). In assenza dei normali gradienti pressori, la pressione arteriosa risulta pressoché uniforme in ogni punto del corpo. Tra gli altri effetti, come già accennato, si riscontrano anche congestione nasale (dovuta all’aumento del volume sanguigno nelle mucose nasali) e sensazione di pesantezza alla testa.

Un concetto fondamentale per comprendere le modificazioni indotte sul sistema cardiovascolare è quello di *punto indifferente idrostatico (HIP, Hydrostatic Indifferent Point)*. Esso rappresenta la quota corporea alla quale la pressione ematica rimane immutata al

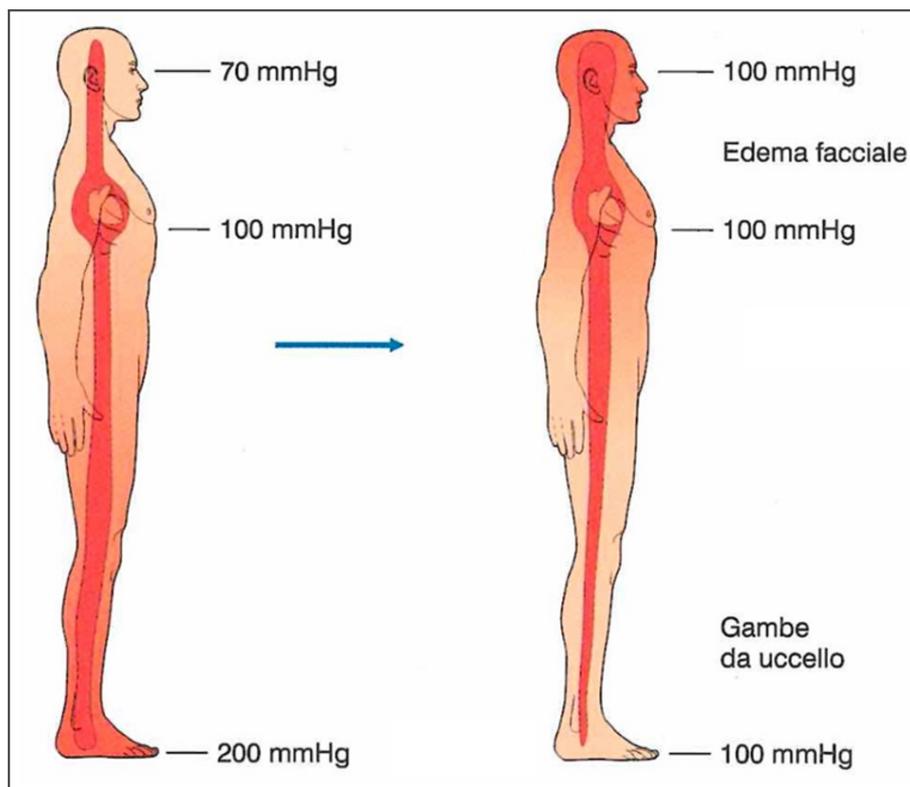


Figura 2.4: Distribuzione dei fluidi e della pressione arteriosa media prima del volo in posizione ortostatica (normogravità) e in volo (microgravità).  
Modificata da: Ferretti, G., Capelli, C. (2008). *Dagli abissi allo spazio. Ambienti e limiti umani.* [1].

variare dell'orientamento del corpo rispetto al vettore di accelerazione. Sulla Terra, l'HIP si trova all'incirca all'altezza del cuore, mentre in microgravità si sposta verso il basso. Questo avviene perché, in condizioni normali, le vene degli arti inferiori sono relativamente rigide, mentre l'esposizione prolungata all'assenza di gravità rende la compliance<sup>9</sup> del sistema vascolare più omogenea lungo tutto il corpo, abbassando di conseguenza il punto indifferente idrostatico.

Tali adattamenti provocano conseguenze significative al rientro in atmosfera terrestre. Quando un astronauta torna in posizione eretta sulla Terra, la pressione arteriosa subisce una caduta improvvisa (*ipotensione ortostatica*) dovuta al fatto che il cuore fatica a riempirsi di sangue: il ritorno venoso risulta più difficoltoso e la gittata sistolica diminuisce. Inoltre, il fatto che l'HIP sia stato spostato verso il basso rende ancor più onerosa la fase

<sup>9</sup>La compliance vascolare è la grandezza che descrive la capacità delle pareti dei vasi sanguigni di espandersi al variare della pressione interna.

di riattivazione del normale flusso sanguigno, poiché il cuore si trova a dover fronteggiare gradienti pressori alterati.

In microgravità, l'aumento della pressione venosa centrale porta ad un maggior volume telediastolico, che a sua volta accresce la gittata sistolica e quindi la pressione arteriosa. Questa elevazione viene rilevata dai barocettori, i quali reagiscono diminuendo la pressione grazie all'azionamento dei meccanismi renali e cardiaci che favoriscono un aumento della diuresi e della natriuresi<sup>10</sup>. Come diretta conseguenza, la volemia complessiva dell'organismo si riduce.

Anche la funzionalità cardiaca subisce mutamenti: l'atrofia del muscolo cardiaco, associata alla diminuzione del carico di lavoro richiesto per pompare il sangue, riduce la forza di contrazione e contribuisce ulteriormente all'accumulo di sangue nella regione cranica. Al rientro, i barocettori si mostrano ipersensibili, attivandosi a pressioni inferiori rispetto alla norma. Questa doppia alterazione (minore contrattilità cardiaca e maggiore sensibilità barocettiva) determina una diminuzione della gittata cardiaca e del massimo consumo di ossigeno. Va inoltre osservato che, in microgravità, si registra una riduzione della concentrazione ematica di emoglobina; ciò spiega come, a parità di potenza meccanica dell'esercizio, il consumo di ossigeno risulti inferiore, limitando la capacità di sforzo prolungato da parte degli astronauti. Per comprendere appieno questi fenomeni, è utile riferirsi ad alcuni parametri cardiocircolatori:

- la gittata pulsatoria (o gittata sistolica) indica il volume di sangue espulso in una singola contrazione ed è quindi un indicatore diretto della forza contrattile del cuore;
- la frequenza cardiaca misura il numero di battiti al minuto;
- la gittata cardiaca è il volume di sangue pompato dal cuore in un minuto, ottenibile moltiplicando il volume espulso a ogni battito (gittata pulsatoria) per il numero di battiti al minuto (frequenza cardiaca).

Sulla Terra, durante l'esercizio, la gittata pulsatoria aumenta proporzionalmente all'intensità dello sforzo, mentre in microgravità rimane sostanzialmente invariata. In ogni caso, la frequenza cardiaca, e di conseguenza la gittata cardiaca, salgono sia a Terra che nello spazio. Tuttavia, nello spazio, non subendo variazioni significative la gittata pulsatoria, l'aumento della gittata cardiaca dipende quasi esclusivamente dall'incremento della frequenza cardiaca. Questo spiega perché gli astronauti siano meno performanti nelle attività di endurance: i migliori sportivi di resistenza, infatti, sono quelli capaci di

---

<sup>10</sup>La natriuresi è il processo fisiologico attraverso cui i reni eliminano sodio nelle urine, regolando l'equilibrio idro-elettrolitico e la pressione arteriosa.

sviluppare un'elevata gittata sistolica, mantenendo contemporaneamente una frequenza cardiaca relativamente bassa.

Il termine *intolleranza ortostatica* descrive l'incapacità del sistema cardiovascolare di mantenere adeguati livelli di pressione arteriosa e flusso ematico cerebrale quando si passa dalla posizione supina a quella eretta. Gli astronauti spesso sperimentano questa condizione al rientro: i sintomi più comuni includono capogiri, visione offuscata, affaticamento e, nei casi più gravi, sincope. Fortunatamente, dopo alcuni giorni dal ritorno, la gittata pulsatoria tende a ristabilire i valori pre-volo, grazie al progressivo recupero dei normali gradienti pressori e alla riacquisizione della massa cardiaca.

### **2.2.2 Apparato ematopoietico**

Durante l'esposizione a condizioni di microgravità, a causa della redistribuzione dei fluidi corporei e delle derivanti risposte fisiologiche descritte nel paragrafo precedente, si osserva una riduzione del volume plasmatico, ovvero della componente liquida del sangue, con conseguente un aumento relativo dell'ematocrito (percentuale del volume di sangue occupata dagli eritrociti). L'organismo, interpretando erroneamente questo incremento dell'ematocrito come un eccesso di globuli rossi, riduce la produzione di eritropoietina, ormone fondamentale per la stimolazione del midollo osseo a produrre nuove emazie. Ne consegue una diminuzione della produzione di nuove cellule del sangue. Inoltre, alcuni dei globuli rossi appena formati vengono distrutti prematuramente attraverso un processo chiamato emolisi, che contribuisce ulteriormente alla riduzione del numero complessivo di eritrociti in circolo. Questo insieme di meccanismi porta a una condizione nota come *anemia spaziale*, comune tra gli astronauti.

### **2.2.3 Apparato visivo**

Come mostrato da Lee et al. (2020) [4], l'esposizione prolungata alla microgravità durante i voli spaziali di lunga durata provoca l'insorgenza di effetti neuro-oftalmologici fisiologici e patologici negli astronauti. Questi riscontri associati alla microgravità definiscono collettivamente la cosiddetta *SANS* (*Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome*, traducibile come "*sindrome neuro-oculare associata ai voli spaziali*"), i cui sintomi comprendono: riduzione dell'acuità visiva, visione offuscata, mal di testa e sensazione di pressione agli occhi.

Sebbene non si conosca ancora con precisione quale sia l'esatta causa della SANS,

sono state avanzate due principali teorie che potrebbero spiegare i cambiamenti osservati negli astronauti durante missioni spaziali di lunga durata. Queste due spiegazioni non si escludono a vicenda, ma anzi potrebbero coesistere o contribuire insieme allo sviluppo della sindrome.

La prima teoria si basa sul ruolo della pressione intracranica, cioè la pressione esercitata all'interno del cranio dai tessuti cerebrali, dal sangue e dal liquido cerebrospinale. Durante un soggiorno prolungato in microgravità, come visto nei paragrafi precedenti, i fluidi corporei tendono a spostarsi verso la testa, provocando un evidente aumento della pressione intracranica. Il liquido cerebrospinale è il fluido che circonda cervello e midollo spinale per proteggerli e nutrirli. Prodotto dal plesso coroideo, viene drenato nel sistema venoso del collo, che normalmente ha una pressione più bassa rispetto al liquido stesso. Tuttavia, a causa dell'azzeramento dei gradienti pressori in condizioni di microgravità, questo drenaggio risulta inefficace. Inoltre, il sistema vascolare presenta dei meccanismi di autoregolazione che mantengono stabili il diametro e il flusso sanguigno delle arterie che portano sangue al cervello e al disco ottico (emergenza del nervo ottico all'interno del bulbo oculare), in modo da garantire un corretto apporto di ossigeno e nutrienti. Marshall-Goebel et al. (2018) [5] hanno però documentato che, sia inclinando la testa verso il basso sulla Terra (HDTBR) sia in condizioni di microgravità, le vene giugulari, che sono le principali vene che drenano il sangue dalla testa, tendono a dilatarsi. Questa dilatazione suggerisce che in microgravità possa verificarsi una congestione venosa, ovvero un ristagno di sangue nelle vene cerebrali e giugulari, che potrebbe contribuire ad aumentare ulteriormente la pressione intracranica. La combinazione di un ridotto drenaggio del liquido cerebrospinale nel sistema venoso e della congestione venosa determina un aumento della pressione intracranica complessiva. Questa pressione elevata può propagarsi lungo la guaina che avvolge il nervo ottico, causandone l'espansione e quindi un rallentamento del flusso assonale, con conseguente insorgenza dei sintomi precedentemente descritti.

Una seconda possibile spiegazione riguarda il fenomeno della compartimentalizzazione del liquido cerebrospinale all'interno della guaina del nervo ottico. Tradizionalmente, si è sempre pensato che la pressione e la composizione chimica del liquido cerebrospinale fossero uniformi in tutto il sistema nervoso centrale (cervello, midollo spinale e anche nella guaina che circonda il nervo ottico). Tuttavia, la struttura anatomica che collega il cervello all'orbita attraverso la guaina del nervo ottico è molto particolare: è un passaggio stretto, confinato e termina a fondo cieco, cioè non si collega ad altre vie di drenaggio aperte. Questo crea una situazione delicata per il flusso del liquido cerebrospinale. A

causa di questa conformazione, potrebbe infatti verificarsi un equilibrio instabile nel movimento del liquido, con un effetto simile a una valvola unidirezionale che permette al liquido di entrare ma non di uscire facilmente. Questo meccanismo potrebbe portare ad un aumento localizzato della pressione all'interno della guaina del nervo ottico orbitale, anche in assenza di un aumento generalizzato della pressione del liquido cerebrospinale attorno al cervello, contribuendo all'instaurarsi dei sintomi caratteristici della SANS.

#### **2.2.4 Funzionalità polmonare**

Per comprendere gli effetti della microgravità sulla funzionalità polmonare, si è fatto riferimento alla review di John B. West (2000) [6]. Il polmone è estremamente sensibile alla gravità, la quale in condizioni normali determina variazioni regionali nella ventilazione, nel flusso ematico, nello scambio gassoso, nelle dimensioni alveolari, nella pressione intrapleurica e nelle sollecitazioni del tessuto polmonare. Pertanto, non è sorprendente che siano stati descritti vari adattamenti della funzione respiratoria. Le distribuzioni della ventilazione e del flusso sanguigno diventano più uniformi, sebbene non completamente, e si assiste alla riduzione dei valori di alcuni parametri polmonari, tra cui la capacità funzionale residua e il volume residuo. Tuttavia, nel complesso, lo scambio gassoso risulta poco influenzato.

#### **2.2.5 Sistema neurovestibolare**

Il sistema neurovestibolare rappresenta un caso particolare in quanto propriamente deputato alla rilevazione degli stimoli meccanici provocati dalla forza di gravità e dalle accelerazioni lineari e angolari. I recettori vestibolari trasformano queste informazioni in segnali nervosi che, attraversando i nuclei bulbari e le vie nervose ascendenti e discendenti, si integrano con le afferenze di altri recettori e dei relativi circuiti nervosi, garantendo la sensibilità spaziale e la regolazione dell'equilibrio.

Dal punto di vista anatomico-funzionale, il sistema vestibolare si divide in una porzione periferica, deputata alla ricezione dello stimolo, e una centrale, dedicata all'elaborazione e alla trasmissione nervosa dell'informazione. La parte periferica comprende due tipi di organi sensoriali: i canali semicircolari e gli organi otolitici. I canali semicircolari sono sensibili principalmente alla direzione e all'entità delle accelerazioni angolari, cioè ai cambiamenti della velocità di rotazione della testa nello spazio; mentre gli organi otolitici risentono dell'accelerazione lineare e, conseguentemente, della gravità. L'azione combi-

nata di questi sensori permette di ottenere informazioni sul moto e sull'orientamento della testa, in modo da permettere il controllo della postura, della locomozione, dei movimenti oculari, della percezione dell'orientamento e del moto del corpo rispetto all'ambiente circostante. Pertanto, un malfunzionamento del sistema vestibolare può causare la comparsa di vertigini, nausea, disequilibrio e disturbi nel controllo dei movimenti.

Sulla Terra, gli otoliti forniscono costantemente due tipi di informazioni fondamentali: l'orientamento statico della testa rispetto alla verticale gravitazionale e le accelerazioni lineari durante i movimenti traslazionali della testa. In condizioni di microgravità, invece, essi rispondono solamente al moto traslazionale, poiché non vi è alcuna componente di gravità da rilevare. Al contrario, è stato osservato come i canali semicircolari continuino a funzionare in modo simile sia in normogravità che in microgravità, poiché la percezione delle accelerazioni angolari non dipende direttamente dalla forza gravitazionale.

Il disturbo neurologico causato dal conflitto tra le informazioni sensoriali che il cervello riceve da occhi, orecchio interno e organi propriocettivi è detto *cinetosi*. Si manifesta principalmente durante spostamenti ritmici o irregolari del corpo e i suoi sintomi comuni includono: nausea, vomito, vertigini, sudorazione, pallore e mal di testa. L'instaurarsi delle condizioni di microgravità determina l'immediata insorgenza della cosiddetta *space motion sickness (cinetosi spaziale)*. Il processo di adattamento alle condizioni spaziali si origina a causa della discrepanza tra le informazioni sensoriali realmente percepite e quelle attese dal sistema neurovestibolare, che si basa sull'esperienza accumulata in ambiente gravitazionale terrestre. In questa fase iniziale, le informazioni afferenti non risultano compromesse, ma sono i programmi sensomotori appresi in precedenza a rivelarsi inadeguati rispetto alle nuove condizioni. Nonostante questa incoerenza iniziale, la plasticità del sistema nervoso centrale consente agli individui di adattarsi progressivamente all'ambiente alterato. Grazie a questo meccanismo, i sintomi della cinetosi spaziale (malessere, mancanza di motivazione, nausea, disorientamento e vomito) tendono a scomparire nel giro di pochi giorni.

Tuttavia, l'adattamento alla microgravità comporta delle conseguenze al momento del rientro sulla Terra. Si assiste infatti alla ricomparsa dei sintomi a causa del decondizionamento delle risposte antigravitarie ottenuto durante la permanenza nello spazio. Gli astronauti percepiscono questi cambiamenti non appena la gravità viene reintrodotta: anche semplici movimenti della testa possono provocare vertigini e instabilità. Generalmente, in seguito a missioni di breve durata (circa due settimane), il riadattamento al contesto terrestre avviene nell'arco di un giorno. Al contrario, dopo periodi più lunghi in

microgravità, i sintomi al rientro possono essere molto più intensi. In questi casi, alcuni astronauti riportano una compromissione tale da non riuscire a lasciare autonomamente la capsula spaziale a causa di difficoltà di equilibrio, ridotta acuità visiva e problematiche nella deambulazione.

### **2.2.6 Sistemi immunitario e neuroendocrino**

Nell'organismo degli astronauti si verificano anche alterazioni del sistema immunitario, con una minore resistenza alle infezioni e un rischio più elevato di sviluppare tumori, entrambi probabilmente legati all'intensa esposizione alle radiazioni spaziali.

Un ulteriore cambiamento significativo riguarda i cicli sonno-veglia: sulla Stazione Spaziale Internazionale, infatti, gli astronauti assistono a un'alba ogni 90 minuti. Questa particolare esposizione alla luce influenza profondamente i ritmi circadiani, con conseguenti modificazioni del sistema neuroendocrino. In particolare, si riscontra un aumento del cortisolo, ormone legato allo stress, che indebolisce le difese immunitarie, rendendo l'organismo più vulnerabile alle infezioni. A questi squilibri si aggiunge un aumento della secrezione di catecolammine (adrenalina e noradrenalina), anch'esso legato allo stress continuo causato dalle condizioni di microgravità, che comporta un aumento della frequenza cardiaca.

Come riportato nel lavoro di Hicks et al. (2023) [7], gli stati immunologici che si sviluppano a seguito dell'esposizione all'ambiente di microgravità mostrano somiglianze con un sistema immunitario invecchiato. In linea con questo, è stata descritta anche un'accelerazione dell'invecchiamento cellulare dopo l'esposizione all'ambiente del volo spaziale. Gli stati immunologici associati all'invecchiamento includono caratteristiche di esaurimento immunitario, senescenza e inflamming. L'esaurimento immunitario è il risultato di una stimolazione continua dei leucociti che porta ad una riduzione della loro proliferazione e ad un aumento dei programmi inibitori dei corecettori (molecole presenti sulla superficie delle cellule del sistema immunitario che modulano la risposta immunitaria). La senescenza immunitaria coinvolge anch'essa programmi inibitori sui leucociti, con ridotta proliferazione, ed è associata a disfunzioni mitocondriali. Infine, l'inflamming (infiammazione cronica di basso grado) è un processo di infiammazione persistente e lieve, tipicamente associato ai sistemi immunitari invecchiati.

### 2.2.7 Adattamenti muscolari

Come riportato da Lee et al. (2022) [8], l'assenza di peso nello spazio porta a un fenomeno noto come *muscle unloading (disuso muscolare)*: i muscoli antigravitari (muscoli intrinseci del dorso, glutei medi e massimi, quadricipiti femorali, gastrocnemi, solei e tibiali anteriori), che sulla Terra lavorano costantemente per mantenere il corpo in posizione eretta, in microgravità non sono più sollecitati allo stesso modo. Di conseguenza, questi muscoli posturali si trovano in uno stato di scarico e inattività continuativi, che ne causano la progressiva perdita di tono e massa. Studi precedenti di Lee et al. (2013) [9] su modelli sperimentali in vitro hanno infatti mostrato come la riduzione di tensione e stiramento sia sufficiente ad innescare l'atrofia muscolare.

Secondo Ferretti e Capelli (2008) [1], in condizioni di microgravità, dunque, i muscoli scheletrici subiscono una serie di cambiamenti noti complessivamente come *decondizionamento osteomuscolare*. Tali modificazioni includono una riduzione della massa muscolare, una diminuzione della forza e della potenza, un aumento dell'affaticabilità, una compromissione della coordinazione motoria e la comparsa di alterazioni nei riflessi neuromuscolari. A ciò si aggiungono modificazioni del metabolismo, in particolare del metabolismo proteico, che contribuiscono all'alterazione del quadro clinico generale. La perdita di massa muscolare osservata nello spazio ricorda quella che si verifica durante l'invecchiamento ed è infatti assimilabile a una forma di *sarcopenia para-fisiologica*.

Il tempo necessario affinché si sviluppi pienamente l'ipotrofia muscolare non è del tutto accertato. Tuttavia, nelle simulazioni di lunga durata (270 giorni) svolte da Di Prampero et al. (2003) [10] è stato osservato che la massa muscolare può ridursi fino a due terzi del valore iniziale, per poi tendere ad un plateau.

Tutte le tipologie di fibre muscolari sembrano essere suscettibili a questa ipotrofia, ma la microgravità sembra anche influenzare l'espressione genica, favorendo un passaggio dalle fibrocellule muscolari dal tipo I verso i tipi II (Trappe et al., 2004 [11]). Le fibre di tipo I, note anche come lente o ossidative lente (slow oxidative), sono caratterizzate da una contrazione lenta, un'elevata densità di mitocondri e un ricco contenuto di mioglobina. Grazie alla loro ampia rete capillare e alla prevalente dipendenza dal metabolismo aerobico per la produzione di ATP, queste fibre sono particolarmente resistenti alla fatica. Le fibre di tipo IIa, dette ossidative-glicolitiche rapide (fast oxidative-glycolytic), combinano caratteristiche di resistenza e velocità. Presentano una velocità di contrazione superiore rispetto alle fibre di tipo I, un buon contenuto mitocondriale e sono in grado di generare

energia sia attraverso la via aerobica che tramite la glicolisi anaerobica. Infine, le fibre di tipo IIX, dette glicolitiche rapide (fast glycolytic), sono specializzate nella produzione di forza esplosiva. Generano contrazioni molto rapide, ma si affaticano velocemente poiché dipendono quasi esclusivamente dal metabolismo anaerobico. Gli studi effettuati da Widrick et al. (1999) [12] sui muscoli antigravitari hanno dimostrato come le fibre lente del soleo subiscano un'atrofia più marcata rispetto a quelle rapide del tibiale anteriore. Il calo del contenuto di proteine miofibrillari è stato attribuito ad una riduzione delle proteine di miosina presenti nelle fibre muscolari lente (tipo I) e intermedie (tipo IIA). Inoltre, anche la diminuzione della forza per unità di area nelle fibre lente di tipo I suggerisce che la miosina lenta sia stata persa in modo selettivo.

L'atrofia selettiva delle fibre lente in microgravità è dovuta principalmente alla mancanza di carico meccanico e alla conseguente riduzione del reclutamento tonico delle fibre posturali, accompagnata da un bilancio proteico negativo dovuto alla combinazione di sintesi proteica inibita e degradazione aumentata. Con la perdita di proteine contrattili, le fibre muscolari si accorciano e riducono il proprio spessore. Ciò comporta una diminuzione della sezione fisiologica delle fibre e quindi della loro capacità di generare forza.

La diminuzione della forza volontaria massima varia a seconda dei gruppi muscolari coinvolti e peggiora con il perdurare dell'esposizione all'assenza di gravità. Questo calo è tuttavia maggiore rispetto alla perdita di massa muscolare. Una parte di perdita di forza è spiegabile con l'ipotrofia muscolare, ma la riduzione della forza osservata è comunque superiore a quanto ipotizzabile. Ciò ha portato alcuni ricercatori (Antonutto et al., 1999 [13]; Ferretti et al., 2001 [14]) ad ipotizzare un coinvolgimento del sistema nervoso, suggerendo un calo dell'attività neuromotoria. È stato così ripreso il termine *atassia ipogravitazionale* introdotto da Grigoriev et al. (1991) [15] per descrivere i deficit motori che si osservano negli astronauti al rientro, come l'aumento del costo energetico della deambulazione a parità di lavoro meccanico svolto. Come osservato da Goubel (1997) [16], cambiamenti di questo tipo si verificano anche nei tendini, che diventano più deformabili e meno elastici. Un tendine più deformabile impone alle fibre muscolari un accorciamento maggiore, portando i sarcomeri a lavorare in condizioni sfavorevoli rispetto alla normale relazione tensione-lunghezza.

Riprendendo quanto discusso da Lee et al. (2022) [8], un ulteriore aspetto di cui tenere conto riguarda le arterie che irrorano i muscoli: in condizioni di mancanza di carico sugli arti inferiori e di irradiazione corporea totale, infatti, la risposta vasomotoria di questi

vasi si indebolisce in modo significativo, alterando ulteriormente la circolazione locale e compromettendo di conseguenza la funzionalità muscolare.

Gli studi di simulazione di voli spaziali condotti da Trappe et al. (2023) [17] indicano che le donne potrebbero essere più vulnerabili degli uomini all'atrofia muscolare indotta dall'assenza di peso. Gli esperimenti si sono concentrati in particolare sul quadricipite e sul tricipite surale, muscoli fondamentali sia per camminare che per le attività extraveicolari che gli astronauti impegnati in missioni lunari o marziane dovranno svolgere. In entrambi i sessi, l'esposizione alla microgravità provoca una riduzione della massa muscolare di entità rilevante, ma nel primo mese di simulazione le donne mostrano una perdita ancora maggiore di massa quadricipitale rispetto agli uomini.

Va poi considerato un aspetto spesso trascurato: oltre alla semplice funzione meccanica, il muscolo rappresenta il più grande serbatoio di aminoacidi destinati al sistema immunitario. Avere una massa muscolare ridotta implica quindi non soltanto minori prestazioni fisiche, ma anche un rischio più alto in caso di problemi sanitari durante la missione, rendendo più difficile affrontare eventuali emergenze mediche con un patrimonio proteico già compromesso.

In generale, il recupero della forza muscolare dopo voli spaziali di lunga durata è lento e spesso non completo neppure dopo quattro settimane. Si stima che per un recupero completo possa essere necessario un periodo di riadattamento pari all'intera durata della permanenza nello spazio.

### **2.2.8 Modificazioni del tessuto osseo**

Come riportato da Ferretti e Capelli (2008) [1], è noto da tempo che i segmenti ossei privati del loro normale carico meccanico subiscono fenomeni di demineralizzazione. Ciò risulta particolarmente evidente nelle strutture scheletriche progettate per sostenere il peso del corpo umano: vertebre lombari, cingolo pelvico, femori e tibie. In condizioni di microgravità, a causa dello *skeletal unloading (disuso osseo)*, questa perdita di massa ossea diventa ancora più marcata, con una riduzione della densità minerale che può raggiungere il 3% mensile, a seconda dei segmenti scheletrici coinvolti.

La demineralizzazione ossea nello spazio è causata principalmente dalla perdita della componente minerale e colpisce in modo differenziato le varie parti dello scheletro, a seconda della loro posizione rispetto al vettore di gravità. Le ossa dell'estremità inferiore del corpo, che normalmente sopportano il carico del peso corporeo, sono le più colpite, con

una marcata riduzione della densità delle loro strutture trabecolari: si parla di *osteopenia locale*. Al contrario, nelle ossa della parte superiore del corpo si osserva un aumento del contenuto minerale, effetto attribuito alla redistribuzione dei fluidi corporei verso la testa, tipica della microgravità. A tal proposito, la *Figura 2.5* riporta le modificazioni dello scheletro rispetto alla situazione pre-volo rilevate in cosmonauti dopo missioni di lunga durata a bordo della stazione spaziale Mir<sup>11</sup>. Si può notare come le ossa del cingolo pelvico siano le più sensibili alla microgravità.

Tuttavia, non è ancora chiaro se questa perdita ossea raggiunga un livello di stabilizzazione (plateau) durante lunghi periodi in microgravità o se continui indefinitamente. Ad ogni modo, il recupero della densità ossea al rientro è completo, anche se impiega circa un anno per gli astronauti che hanno preso parte a missioni della durata di circa sei mesi. Inoltre, è emerso che la perdita di calcio continua anche nel semestre successivo al rientro sulla Terra, confermando che il tempo necessario per un pieno recupero della densità ossea potrebbe essere superiore a quello trascorso in microgravità.

La perdita di massa ossea non è solo un problema per la salute scheletrica, ma è anche associata a un aumento del rischio di calcolosi renale. La maggiore escrezione urinaria di calcio (iper calciuria), conseguenza diretta della demineralizzazione ossea, combinata a una ridotta eliminazione di citrato (un composto che normalmente inibisce la formazione di calcoli) e ad un abbassamento del pH urinario, favorisce la formazione di cristalli di calcio. In particolare, il rischio di formazione di calcoli di ossalato di calcio aumenta significativamente dopo il volo. Per questi motivi, la NASA monitora attentamente il rischio di calcolosi renale negli astronauti, sia durante il volo che dopo il rientro sulla Terra.

A livello cellulare, la demineralizzazione ossea sembra essere legata a uno squilibrio tra l'attività delle cellule responsabili della formazione ossea (osteoblasti) e quelle che ne determinano il riassorbimento (osteoclasti). Gli studi condotti da Baecker et al. (2003) [18] mostrano come già nelle prime 48 ore di bed rest si assista ad un incremento dell'attività osteoclastica, mentre l'attività osteoblastica risulta inadeguata a compensare la perdita. Questo squilibrio potrebbe essere causato da alterazioni del bilancio ormonale,

---

<sup>11</sup>La stazione spaziale Mir (traducibile dal russo come “pace” o “mondo”) è stato il primo avamposto modulare abitato in orbita terrestre bassa, operato dall'Unione Sovietica e poi dalla Federazione Russa dal 1986 al 2001. Mir offriva un laboratorio spaziale permanente per esperimenti scientifici e ospitava equipaggi di lunga durata. Con oltre 15 anni di servizio, ha dimostrato la fattibilità di una presenza umana continuativa nello spazio, aprendo la strada alla cooperazione internazionale che ha portato alla realizzazione della Stazione Spaziale Internazionale.

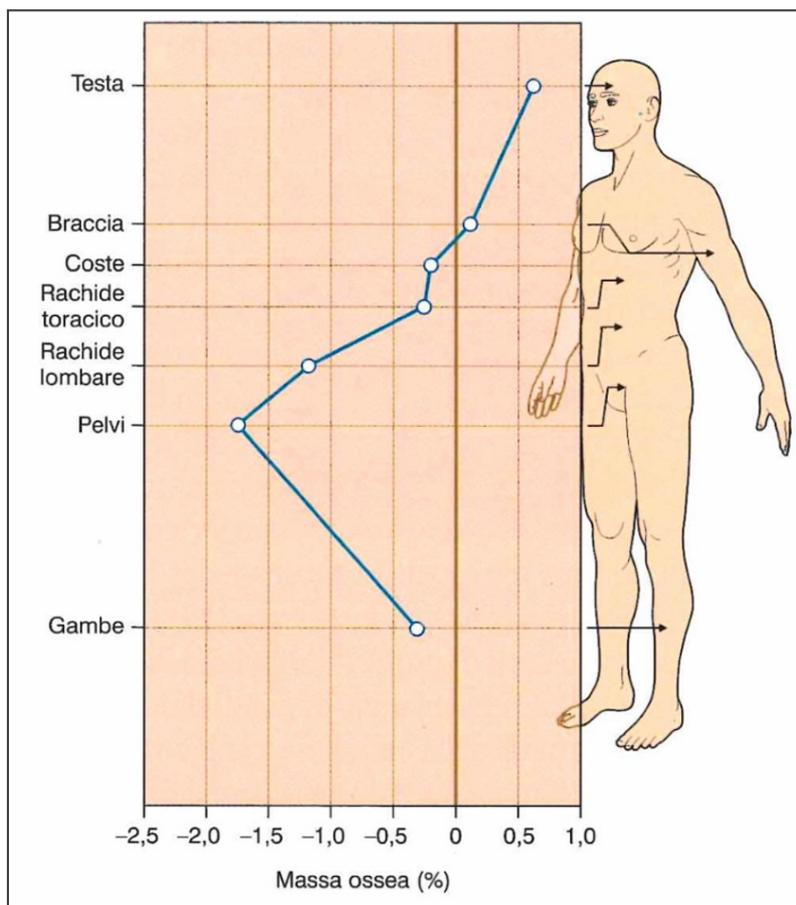


Figura 2.5: Modificazioni dello scheletro rispetto alla situazione pre-volo rilevate in cosmonauti dopo missioni di lunga durata a bordo della stazione spaziale Mir.

Tratta da: Ferretti, G., Capelli, C. (2008). *Dagli abissi allo spazio. Ambienti e limiti umani.* [1].

coinvolgendo ormoni come il paratormone e la calcitonina. Il primo viene secreto dalle paratiroidi per aumentare i livelli di calcio nel sangue e stimolare quindi il riassorbimento osseo; il secondo, invece, è prodotto dalla tiroide per indurre i processi inversi.

La perdita ossea legata al disuso è caratterizzata quindi da un aumento del riassorbimento osseo e da una riduzione della formazione di nuovo osso, una combinazione particolarmente dannosa. Questo meccanismo è diverso da quello che si osserva nell'osteoporosi post-menopausale femminile, ove sia il riassorbimento che la formazione ossea aumentano, ma il riassorbimento supera la formazione.

Gli astronauti, inoltre, sono particolarmente a rischio di carenza di vitamina D, sia a causa dell'assenza di questa vitamina nelle loro fonti alimentari che per effetto della minima

esposizione alla luce ultravioletta all'interno delle navette schermate. Per prevenire questa carenza, è diventata una prassi fornire specifici integratori di vitamina D a tutti gli equipaggi della Stazione Spaziale Internazionale.

La perdita di calcio non si limita a compromettere la robustezza ossea, ma aumenta anche il rischio di fratture patologiche dopo il rientro sulla Terra. Sebbene fino ad oggi non siano stati documentati casi confermati di fratture spontanee negli astronauti, il problema diventa rilevante per future missioni di lunga durata, come quelle previste verso Marte, dove la prolungata esposizione alla microgravità potrebbe esporre gli astronauti a un elevato rischio di sviluppare non solo calcolosi renale, ma anche osteoporosi e fratture ossee spontanee, con gravi conseguenze per la sicurezza dell'equipaggio.

Uno studio di Smith et al. (2014) [19] ha permesso di osservare come la risposta dell'osso alla microgravità si manifesti in modo simile sia negli uomini che nelle donne: gli indicatori biochimici del metabolismo osseo, come i marker di formazione e riassorbimento osseo, mostrano infatti comportamenti comparabili tra i due sessi. È interessante notare che, sebbene sulla Terra esistano differenze tra uomini e donne nella densità minerale ossea e nel rischio di calcolosi renale, durante i voli spaziali queste differenze risultano attenuate.

Come ormai noto, il danno osseo è un effetto cronico ben documentato dell'esposizione a radiazioni terapeutiche, utilizzate in oncologia per il trattamento dei tumori. Vari studi, come riportato dalla review di Willey et al. (2011) [20], hanno evidenziato come l'esposizione alle radiazioni comporti una riduzione persistente del volume osseo. Tuttavia, nonostante i progressi nella comprensione del fenomeno, i meccanismi molecolari alla base della perdita ossea indotta dalle radiazioni non sono ancora completamente chiariti. Per gli astronauti impegnati in missioni spaziali di lunga durata, dunque, l'esposizione alle radiazioni rappresenta un rischio significativo per la salute delle ossa. A bordo delle navette spaziali e della Stazione Spaziale Internazionale, gli equipaggi sono esposti ad elevate dosi di radiazioni cosmiche e solari, che potrebbero indebolire il tessuto osseo e aumentare il rischio di fratture, soprattutto se combinate con la perdita ossea già in corso dovuta alla microgravità.

Sulla base della trattazione effettuata da Khan et al. (2024) [21], tra i numerosi cambiamenti che interessano lo scheletro umano in condizioni di microgravità, uno dei più evidenti ed incisivi è sicuramente l'allungamento della colonna vertebrale, che può aumentare anche fino a 7 cm. Questa modificazione, apparentemente innocua, può avere conseguenze significative sulla salute degli astronauti. L'aumento di altezza è dovuto prin-

principalmente all'espansione dei dischi intervertebrali e alla perdita della naturale curvatura spinale, causati principalmente dall'assenza di peso sulla colonna vertebrale. Chiaramente, la ridotta stabilità della colonna vertebrale è in parte dovuta all'atrofia dei muscoli antigravitari del tronco.

Uno degli effetti collaterali più comuni di questi cambiamenti è il mal di schiena, riportato dal 52% degli astronauti. Questo disturbo, noto come *Space Adaptation Back Pain (SABP)*, non solo influisce sull'umore e sulla concentrazione degli astronauti, ma compromette anche le loro prestazioni. La causa principale del dolore sembra essere legata alla tensione cui sono sottoposte le radici nervose dorsali nella regione lombare, provocata dall'allungamento della colonna vertebrale. Esiste anche una preoccupante conseguenza a lungo termine: gli astronauti hanno un rischio quattro volte maggiore di sviluppare ernie del disco rispetto alla popolazione normale. Per alleviare il dolore, gli astronauti utilizzano diverse strategie. La posizione *fetal tuck* (ginocchia al petto) è risultata particolarmente efficace nel ridurre i sintomi. Anche l'attività fisica in microgravità e l'uso di farmaci analgesici hanno mostrato benefici. Tuttavia, questi rimedi agiscono solo sui sintomi senza risolvere le cause profonde del problema.

Le immagini ottenute tramite risonanza magnetica e fluoroscopia dinamica hanno rivelato ulteriori dettagli sui cambiamenti spinali indotti dalla microgravità. Gli studi svolti da Bailey et al. (2017) [22] hanno mostrato una significativa riduzione dei muscoli paraspinali, con una perdita della normale curvatura (lordosi) lombare e una riduzione della mobilità del tratto L2-L5. In particolare, l'atrofia del muscolo multifido è stata identificata come la principale causa delle lesioni post-volo. La perdita di forza e stabilità muscolare, infatti, rende la colonna più vulnerabile, esponendo gli astronauti ad un maggiore rischio di microfratture e altri danni strutturali.

## 3. Contromisure e tute a distribuzione di carico

### 3.1 Contromisure

Come già esposto, il corpo umano si è evoluto per funzionare all'interno del campo gravitazionale terrestre. In un ambiente di microgravità, come quello sperimentato dagli astronauti nello spazio, questa condizione viene meno, portando ad un decondizionamento fisiologico. Tale fenomeno è un processo naturale con cui il corpo umano si adatta all'assenza di gravità; nondimeno, tali adattamenti possono avere effetti negativi sulla salute, compromettendo la capacità degli astronauti di svolgere attività fisiche e cognitive durante le missioni e causando conseguenze anche dopo il ritorno sulla Terra.

Attualmente, sono state sviluppate diverse contromisure per mitigare gli effetti dannosi della microgravità. Per affrontare la discussione di questo aspetto, si è fatto riferimento al trattato di Susanne E. Churchill *“Fundamentals of space life sciences”* (1997) [23], in particolare al capitolo *“Countermeasures and artificial gravity”* scritto da Peter H. Diamandis. Sebbene pubblicato nel 1997, il testo rappresenta un'ampia ed approfondita rassegna di tutti gli aspetti biomedici legati alla microgravità, offrendo un quadro sistematico della gran parte delle contromisure utilizzate nelle missioni spaziali. A supporto della trattazione, verranno poi riportati anche studi più recenti sull'argomento, al fine di migliorarne l'attualità e la completezza.

Le principali strategie di contromisura in microgravità comprendono l'esercizio fisico, la pressione negativa sugli arti inferiori e apposite terapie fisiche. Di queste, l'esercizio fisico è risultato il metodo più efficace. Sia durante le missioni Skylab<sup>12</sup> 4 che sullo Space Shuttle<sup>13</sup>, gli astronauti seguivano un programma di esercizi giornalieri di circa due

---

<sup>12</sup>Skylab fu la prima stazione spaziale statunitense, lanciata dalla NASA il 14 maggio 1973. Progettata come laboratorio orbitante, aveva l'obiettivo di dimostrare che gli astronauti potessero vivere e lavorare in orbita terrestre per lunghi periodi ed effettuare esperimenti di osservazione astronomica e ricerche nelle scienze della vita. Nel corso di quattro missioni (Skylab 1, 2, 3 e 4) rimase occupata per circa 24 settimane tra maggio 1973 e febbraio 1974, conducendo un totale di oltre 270 esperimenti.

<sup>13</sup>Lo Space Shuttle era un veicolo spaziale orbitale parzialmente riutilizzabile sviluppato dalla NASA, ufficialmente chiamato Space Transportation System (STS), operativo dal 1981 al 2011. Costituito da

ore, utilizzando un tapis roulant, un ergometro a bicicletta e svolgendo esercizi isometrici. Questo programma era progettato principalmente per mantenere il sistema cardiovascolare in salute, ma non era sufficiente a prevenire problemi come l'osteoporosi, lo spostamento dei fluidi verso la testa o l'immunosoppressione. Inoltre, queste attività richiedevano una parte significativa del tempo degli astronauti, un bene prezioso durante le missioni spaziali. Essendo il problema derivante dall'assenza di gravità, si potrebbe pensare che il metodo più efficace per prevenire il decondizionamento fisiologico sia quello di fornire agli astronauti una forma di gravità artificiale, come quella ottenuta per mezzo di strutture spaziali rotanti. Ciononostante, la creazione di gravità artificiale presenta notevoli sfide tecnologiche ed economiche, rendendo questa opzione ad oggi pressoché inattuabile.

Le contromisure attualmente adottate mirano quindi a simulare, per quanto possibile, gli effetti della gravità terrestre. L'esercizio fisico rimane il cardine di queste strategie, ma sono in corso ricerche per sviluppare approcci più efficienti e meno dispendiosi in termini di tempo al fine di garantire la salute degli astronauti durante le missioni di lunga durata. Fin dai primi viaggi umani nello spazio, sono state sviluppate e sperimentate numerose contromisure per contrastare gli effetti negativi della microgravità sul corpo umano. Ciascuna di queste soluzioni ha ottenuto risultati diversi in termini di efficacia ed è stata adottata in base alle circostanze specifiche della missione.

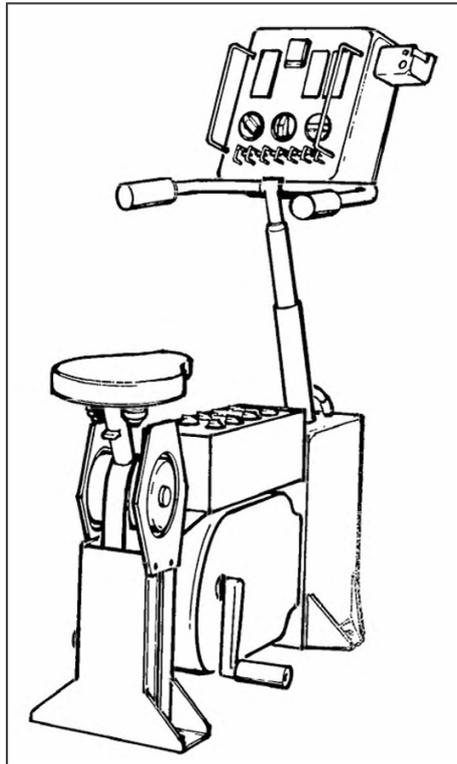
### 3.1.1 Cicloergometro

Il cicloergometro utilizzato a bordo delle missioni Skylab e Space Shuttle (*Figura 3.1*) era un dispositivo simile a una bicicletta, progettato per consentire agli astronauti di esercitarsi utilizzando sia le gambe che le braccia. Questo strumento era dotato di una serie di sensori e strumenti di monitoraggio che registravano parametri cardiovascolari, come la frequenza cardiaca e la pressione arteriosa, oltre a misurare l'attività metabolica degli astronauti durante l'esercizio.

L'uso del cicloergometro nelle missioni spaziali aveva l'obiettivo principale di mantenere il sistema cardiovascolare e muscolare degli astronauti in condizioni ottimali durante la permanenza in microgravità. Attraverso il movimento ciclico, il dispositivo stimolava il cuore e i muscoli, contribuendo a ridurre il rischio di decondizionamento fisico.

---

un orbiter con capacità di trasportare fino a otto astronauti, veniva lanciato affiancato da due booster a propellente solido e un serbatoio esterno monouso, per poi rientrare e atterrare come un aliante su pista. In 30 anni di missioni compì 135 voli, permettendo la costruzione della Stazione Spaziale Internazionale, la manutenzione di satelliti (ad esempio Hubble) e numerosi esperimenti scientifici in microgravità.



*Figura 3.1: Cicloergometro utilizzato a bordo di Skylab.*

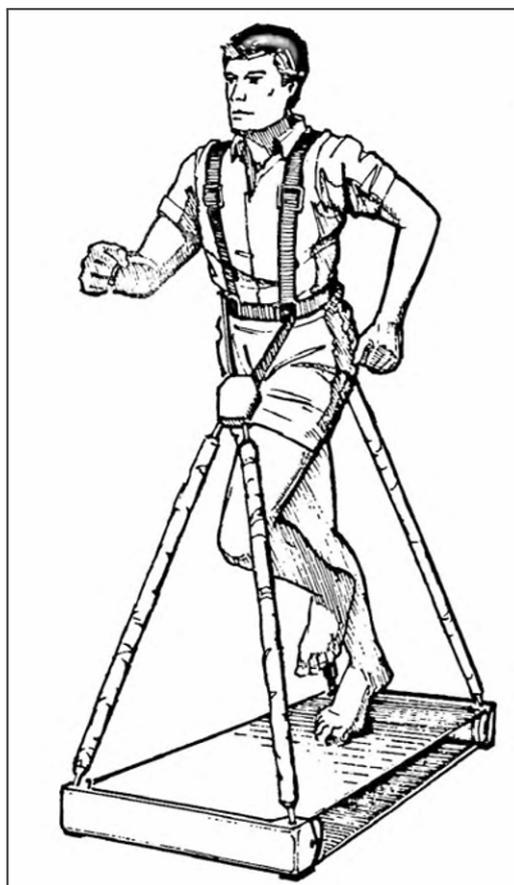
*Tratta da: Churchill, S. E. (1997).  
Fundamentals of Space Life Sciences. [23].*

Tuttavia, nonostante l'efficacia di questo strumento nel monitorare e mantenere la salute cardiovascolare degli astronauti, esso presentava dei limiti. In particolare, non era in grado di generare livelli di forza comparabili a quelli sperimentati durante la deambulazione sulla Terra. Questa limitazione riduceva il suo impatto come contromisura per il mantenimento della forza muscoloscheletrica e della capacità cardiovascolare a lungo termine. Pertanto, pur essendo un valido strumento per il controllo dello stato di salute cardiovascolare, il cicloergometro non poteva essere considerato una soluzione completa per prevenire il decondizionamento fisiologico durante le missioni spaziali di lunga durata.

### **3.1.2 Tapis roulant**

Il tapis roulant passivo utilizzato a bordo delle missioni Skylab (*Figura 3.2*) rappresentava una delle principali contromisure contro il decondizionamento muscolare causato dalla microgravità. Questo dispositivo sfruttava un sistema di cinghie elastiche (*bungee cords*)

per simulare la gravità, tirando gli astronauti verso il “suolo” e creando una resistenza che sollecitava il sistema cardiovascolare e muscoloscheletrico.



*Figura 3.2: Rappresentazione di un tapis roulant passivo utilizzato a bordo di Skylab 4. Tratta da: Churchill, S. E. (1997). Fundamentals of Space Life Sciences. [23].*

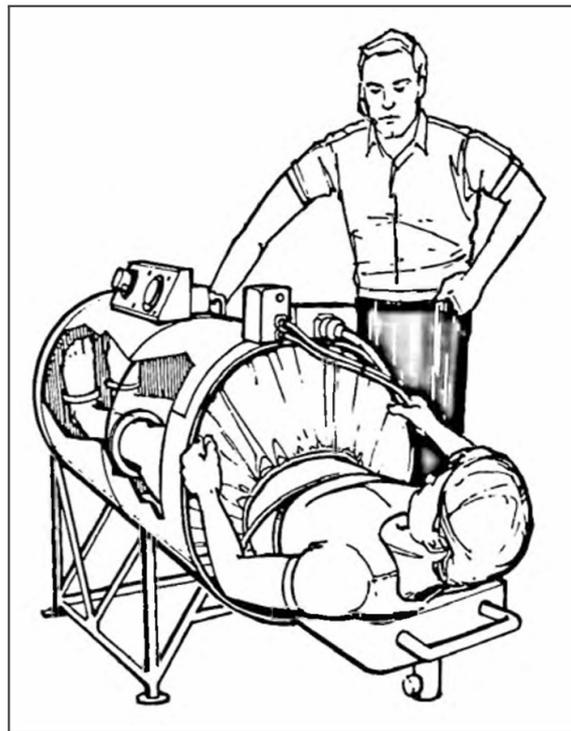
Nello specifico, il tapis roulant a bordo di Skylab era dotato di quattro cinghie elastiche fissate ad una imbracatura sulle spalle e in vita, che fornivano un carico equivalente a circa 80 kg. Questo sistema permetteva di esercitare una pressione costante sulle gambe degli astronauti, stimolando i muscoli (in particolare quelli del polpaccio). Tuttavia, questo intenso carico muscolare portava a un rapido affaticamento, limitando l'uso del dispositivo come strumento per l'esercizio aerobico prolungato.

Nonostante questa limitazione, il tapis roulant passivo si è dimostrato una contromisura significativa contro il decondizionamento muscolare. In particolare, durante la missione

Skylab 4, l'introduzione del tapis roulant ha portato ad una riduzione significativa della perdita di forza muscolare nelle gambe degli astronauti, anche se la durata della missione era superiore rispetto a Skylab 2 e Skylab 3. Questo risultato ha evidenziato l'importanza di esercizi che simulano il carico gravitazionale al fine di preservare la funzionalità muscolare durante le missioni spaziali di lunga durata.

### 3.1.3 Lower Body Negative Pressure (LBNP)

Durante le missioni Skylab, il dispositivo di pressione negativa applicata agli arti inferiori (*LBNP, Lower Body Negative Pressure*) è stato ampiamente utilizzato per studiare il sistema cardiovascolare degli astronauti. Questo strumento, come visibile in *Figura 3.3*, era costituito da un cilindro in alluminio di circa 50 cm di diametro e 120 cm di lunghezza, progettato per generare una pressione negativa regolabile tra 0 e 50 mmHg al di sotto della pressione ambientale.



*Figura 3.3: Il dispositivo di LBNP utilizzato a bordo di Skylab.*

*Tratta da: Churchill, S. E. (1997).  
Fundamentals of Space Life Sciences. [23].*

Il funzionamento del dispositivo prevedeva la creazione di una tenuta a livello della vita dell'astronauta, utilizzando una struttura in alluminio assimilabile ad un diaframma ottico, in combinazione con un tessuto avvolgente fissato saldamente all'altezza della cresta iliaca mediante velcro e una cintura. Una volta all'interno del dispositivo, il soggetto si appoggiava ad un supporto imbottito regolabile ed era mantenuto stabile grazie a un sistema di sostegno per la parte superiore del torso.

Il sistema LBNP è stato utilizzato principalmente per valutare l'entità e la progressione del decondizionamento cardiovascolare durante le missioni e per verificare se i dati raccolti in volo potessero predire l'insorgenza di intolleranza ortostatica dopo il rientro. Sebbene si sia rivelato uno strumento efficace per misurare il decondizionamento cardiovascolare, non ha dimostrato di essere valido per prevenire tale fenomeno, come evidenziato dalle condizioni fisiche degli astronauti al rientro, in particolare nella risposta a sfide ortostatiche.

### **3.1.4 Advanced Resistive Exercise Device (ARED)**

Introdotta per la prima volta nel 2009, l'*Advanced Resistive Exercise Device (ARED)* ha rivoluzionato l'allenamento in assenza di gravità, offrendo agli astronauti la possibilità di contrastare forze che emulano carichi fino a 270 kg grazie a un sistema di cilindri a vuoto e cavi-volano che ricreano la resistenza tipica dei bilancieri terrestri (*Figura 3.4*). Il cuore dell'ARED sono due pistoni inseriti in tubi a vuoto: spingendoli o tirandoli, l'astronauta incontra una forza costante che imita fedelmente il carico di un esercizio libero. In parallelo, un volano accumula energia cinetica durante la fase concentrica e la restituisce in quella eccentrica, garantendo un movimento fluido e controllato senza trasmettere vibrazioni alla struttura grazie a sofisticati sistemi di isolamento.

Come riportato nella trattazione presentata da Khan et al. (2024) [21], il design modulare dell'ARED consente di eseguire oltre trenta diversi esercizi multiarticolari: dagli squat e deadlift per gambe e schiena, ai calf raises per i polpacci, fino alle distensioni sulle spalle e alle trazioni per la parte superiore del corpo. Grazie all'ARED, gli studi indicano che la forza e la densità ossea diminuiscono molto poco rispetto ai livelli pre-volo, limitando drasticamente l'atrofia muscolare e la perdita minerale ossea.

Oltre alla componente muscolare, l'ARED svolge un ruolo indiretto nel mantenimento della salute cardiovascolare: l'intensità degli esercizi resistivi stimola il cuore in modo simile a un allenamento ad alta intensità sulla Terra, riducendo gli effetti dello spostamento

dei fluidi verso la parte superiore del corpo.

Gli astronauti della Stazione Spaziale Internazionale dedicano in media 30-60 minuti giornalieri all'ARED, inserendolo nel programma quotidiano di due ore di esercizi complessivi che comprendono anche tapis roulant e cicloergometro.

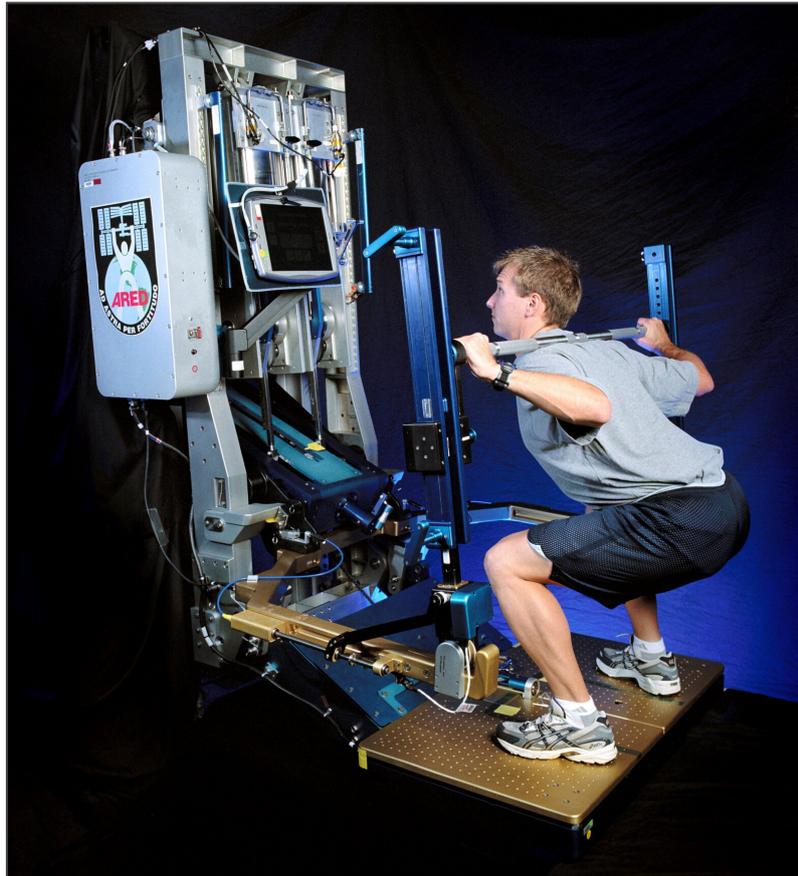


Figura 3.4: ARED

Tratta da: *Advanced Resistive Exercise Device. ESA. [24].*

### 3.1.5 Neuromuscular Electrical Stimulation / Functional Electrical Stimulation (NMES/FES)

Un'ulteriore contromisura presentata nella discussione di Khan et al. (2024) [21] è la stimolazione elettrica neuromuscolare (NMES, *NeuroMuscular Electrical Stimulation*), o stimolazione elettrica funzionale (FES, *Functional Electrical Stimulation*), già ampiamente utilizzata in medicina riabilitativa. Si tratta di un'interessante contromisura per

contrastare l'atrofia muscolare che colpisce gli astronauti durante le missioni in microgravità: sfruttando una tecnica basata sull'applicazione di impulsi elettrici direttamente sui muscoli, se ne provoca la contrazione, simulando così l'attività fisica anche in assenza di movimento volontario.

L'utilizzo della NMES/FES nello spazio è ancora un campo di ricerca relativamente recente, ma i risultati iniziali sono promettenti. Gli studi condotti da Shiba et al. (2015) [25] sul tricipite brachiale hanno mostrato che questo tipo di stimolazione può effettivamente aumentare la massa muscolare, anche se determina miglioramenti significativi della forza muscolare. La stimolazione elettrica può quindi risultare efficace nel preservare la struttura muscolare, ma potrebbe non essere sufficiente a mantenere le capacità funzionali dei muscoli stessi.

Tuttavia, uno degli aspetti più critici dell'applicazione della NMES/FES è la definizione dei protocolli ottimali di stimolazione, come l'intensità degli impulsi, la loro frequenza e la durata delle sessioni. Questi elementi sono ancora oggetto di studio, poiché possono influenzare significativamente l'efficacia del trattamento e la sua capacità di prevenire la perdita di massa muscolare in condizioni di microgravità.

L'interesse verso la NMES/FES come contromisura per l'atrofia muscolare nello spazio sta crescendo, poiché potrebbe rappresentare un'alternativa o un complemento agli esercizi fisici tradizionali, specialmente in contesti dove lo spazio e il tempo per l'allenamento sono limitati. Per di più, apparecchiature di questo tipo sono leggere e di ridotte dimensioni, un aspetto che li rende ideali per le missioni spaziali.

### **3.1.6 Tute a distribuzione di carico**

Nel corso degli ultimi anni si è assistito a un rinnovato interesse nello sviluppo di tute a distribuzione di carico, fra cui spicca in particolare la Gravity Loading Countermeasure Skinsuit (GLCS). Questa nuova tecnologia nasce dall'esigenza di prepararsi alle future missioni sulla Luna e su Marte, dove la permanenza prolungata in condizioni di gravità ridotta, della durata anche di mesi o anni, rende essenziale l'adozione di contromisure efficaci per contrastare gli effetti negativi della microgravità, in particolare la perdita di massa ossea e muscolare.

La presente trattazione introduttiva dell'argomento si basa sui contenuti esposti nel lavoro di Bellisle et al. (2020) [26], che fornisce un inquadramento piuttosto aggiornato e rigoroso del tema. Attualmente, sulla Stazione Spaziale Internazionale, gli astronauti

utilizzano macchinari per l'esercizio fisico allo scopo di contrastare la perdita di massa ossea e muscolare. Tuttavia, queste attrezzature non eliminano completamente gli effetti debilitanti della microgravità e non risultano confacenti alle future missioni di lunga durata verso Marte, dove lo spazio a bordo sarà limitato e la riduzione del peso accessorio determinante. Le contromisure indossabili, come le tute a carico distribuito, offrono una soluzione alternativa o complementare a questo problema. Tra queste, la Penguin Suit, sviluppata dai sovietici negli anni '70, è stata una delle prime soluzioni utilizzate per ridurre la perdita muscolare e ossea nei cosmonauti. In realtà, il suo utilizzo si è spesso rivelato inefficace: il disagio percepito dagli utilizzatori conduceva infatti a una scarsa adesione ai protocolli di utilizzo.

La GLCS rappresenta un'evoluzione delle contromisure indossabili. Si tratta di una tuta aderente progettata per fornire un carico assiale sullo scheletro, simulando l'effetto della gravità e riducendo l'allungamento spinale e la perdita ossea. Numerose revisioni progettuali sono servite per garantire comfort, mobilità e praticità anche per lunghi periodi di utilizzo e la sua efficacia è stata testata attraverso esperimenti a terra, voli parabolici e missioni sulla ISS.

Nel panorama delle contromisure pensate per contrastare gli effetti della microgravità, sono stati proposti diversi progetti innovativi di tute intelligenti, anche se ad oggi nessuno di questi ha ancora raggiunto una fase avanzata di sperimentazione su esseri umani o in condizioni reali di volo spaziale.

Un esempio interessante è rappresentato dalla *Dynasuit*, un concept presentato per la prima volta nel 2012 sotto l'iniziativa dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Si tratta di una tuta attiva e intelligente, progettata per rispondere in tempo reale agli stimoli corporei tramite un sistema di biofeedback. Il progetto prevede l'integrazione di biosensori e attuatori, come polimeri elettroattivi o sistemi pneumatici, capaci di modulare la resistenza al movimento e fornire stimolazione mirata, ad esempio nella zona lombare o sulla pianta del piede. I sensori ipotizzati per il suo funzionamento includono quelli per il monitoraggio della postura, dell'attività muscolare (EMG), della frequenza cardiaca, della temperatura corporea, della ventilazione, della pressione arteriosa e della saturazione di ossigeno. Nonostante la validità teorica del progetto, non sono state rese pubbliche ulteriori fasi di sviluppo o test sperimentali.

Un secondo dispositivo è il *Torso Compression Harness (TCH)*, descritto da Sayson et al. (2013) [27] come un'imbracatura toracica ideata per contrastare la perdita di tono e stabilità a livello della colonna vertebrale. Il TCH agisce fornendo un carico

che promuove l'estensione del rachide, stimolando così una risposta compensatoria in flessione e attivando la muscolatura profonda del tronco. L'obiettivo è quello di mantenere una buona stabilità vertebrale durante le missioni di lunga durata. Anche in questo caso, però, mancano dati quantitativi e sperimentazioni documentate che ne attestino l'efficacia.

Infine, la *Variable Vector Countermeasure Suit (V2Suit)* propone un approccio completamente diverso: fornire una resistenza viscosa durante i movimenti, simulando una direzione verso il basso allo scopo di contrastare i disturbi sensomotori causati dalla microgravità. Il sistema utilizza sensori inerziali IMU (Inertial Measurement Unit) per monitorare il movimento e attivare, di conseguenza, piccoli giroscopi che generano una resistenza meccanica controllata. L'idea è quella di fornire uno stimolo direzionale continuo che riproduca, almeno in parte, la percezione della gravità terrestre. Nonostante sia già stato sviluppato un algoritmo per identificare la direzione simulata della gravità, restano ancora diverse sfide tecniche da affrontare, tra cui la miniaturizzazione dei componenti giroscopici, per rendere questa tecnologia compatibile con un uso operativo di prassi a bordo delle navicelle spaziali.

La microgravità influisce anche sui recettori di carico del corpo, alterando la propriocezione, ovvero la capacità di percepire la posizione e il movimento del corpo. Questi cambiamenti, insieme alle alterazioni del sistema vestibolare, possono compromettere la postura, la locomozione e l'equilibrio al ritorno sulla Terra. Gli studi condotti da Layne et al. (2008) [28] suggeriscono che la stimolazione plantare e la pressione sui piedi in microgravità potrebbero migliorare l'attivazione neuromuscolare, riducendo il degrado neuromuscolare. Infatti, si è osservato che i modelli di attivazione muscolare cambiano in microgravità rispetto ai valori pre-volo, con una riduzione dell'attivazione muscolare preparatoria negli arti inferiori. Ulteriori esperimenti di Layne et al. (1998) [29] hanno dimostrato che l'introduzione della pressione plantare in microgravità per mezzo di speciali calzature pneumatiche migliora l'attivazione muscolare degli arti inferiori.

In conclusione, accertato che l'esercizio fisico rimane fondamentale, lo sviluppo di contromisure indossabili rappresenta un passo cruciale per salvaguardare la salute degli astronauti durante le missioni spaziali di lunga durata. Queste tecnologie potrebbero non solo ridurre la perdita muscoloscheletrica, ma anche preservare la stabilità e la propriocezione, migliorando la sicurezza e il benessere degli astronauti durante e dopo le missioni.

## 3.2 Penguin Suit

Tra le prime contromisure indossabili ideate per contrastare gli effetti deleteri della microgravità sugli astronauti, negli anni '70 i ricercatori sovietici dello Zvezda Design Bureau<sup>14</sup> svilupparono la cosiddetta *Zvezda Pingvin Suit*, o più semplicemente *Penguin Suit*, una tuta elastica speciale dotata di scarpe progettate con l'obiettivo di applicare un carico passivo sui gruppi muscolari antigravitazionali (*Figura 3.5*). Il nome della tuta deriva dal fatto che, indossandola, i cosmonauti assumevano un'andatura più rigida e rallentata, in cui il busto eretto e le gambe leggermente flesse evocavano la camminata "a dondolo" tipica dei pinguini. Inoltre, i cordoni elastici neri applicati sulla tuta chiara creavano un contrasto visivo che richiamava la caratteristica livrea bianca e nera del pennuto.

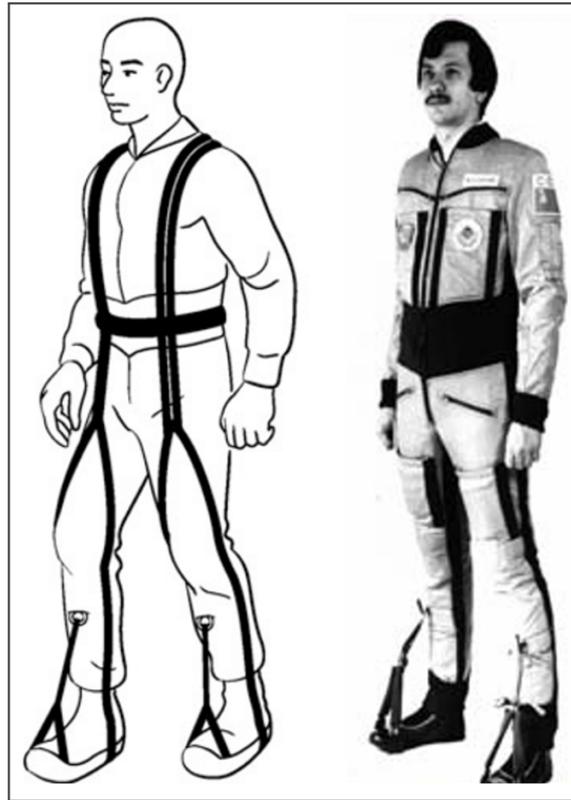
Anche nella presente sezione si fa riferimento ai contenuti approfonditi da Peter H. Diamandis nel contesto delle contromisure per la microgravità, già citati precedentemente e tratti dal volume curato da Susanne E. Churchill (*Fundamentals of Space Life Sciences*, 1997) [23].

La tuta utilizza cordoni elastici (*bungee cords*) ancorati ad una cintura di pelle posta attorno alla vita, permettendo due fasi di carico lungo l'asse verticale del corpo: una che va dalle spalle alla cintura e una che va dalla cintura ai piedi. La parte superiore del corpo può sopportare un carico fino a 40 kg, che viene distribuito su tutto il corpo (dalle spalle ai piedi) se la cintura viene allentata. Se invece la cintura viene stretta, in modo che non scivoli verso il basso, il carico può essere concentrato maggiormente sulla parte inferiore del corpo, accorciando i cordoni delle gambe. In questo modo, la tuta crea una compressione continua lungo l'asse verticale, utile per il contenimento dell'allungamento spinale, e una resistenza alla posizione posturale normale al fine di stimolare i muscoli coinvolti nel carico. Il più recente modello Penguin-3 (*Figura 3.6*), in particolare, è in grado di applicare un carico pari al 50% del peso corporeo durante una tensione massima, per un periodo che può variare tra le 6 e le 8 ore al giorno.

Teoricamente, può essere indossata durante le normali attività quotidiane (circa 16 ore al giorno) e durante gli esercizi fisici. Come riportato da Bellisle et al. (2020) [26], nel 2007 è stato implementato un sistema di misurazione del carico all'interno

---

<sup>14</sup>Lo Zvezda Design Bureau è il nome con cui in Russia vengono indicati diversi uffici di progettazione (design bureau) specializzati in ambiti tecnologici avanzati. Il termine *Zvezda* significa letteralmente "stella". L'uso di questo nome sottolinea l'orientamento verso l'eccellenza e l'esplorazione, tanto in campo aerospaziale quanto in altri settori ingegneristici.



*Figura 3.5: Penguin Suit.  
Modificata da: Hunt (2011), [30];  
Bellisle et al. (2020), [26].*

della tuta, utilizzando dinamometri di tensione collegati ai cordoni elastici. Tuttavia, i risultati quantitativi ottenuti con questo sistema non sono stati pubblicati in alcuna fonte accessibile.

La progettazione della tuta prevede un elemento innovativo: una staffa posta sulla punta delle scarpe che aiuta a stimolare la flessione plantare in un movimento che coinvolge i muscoli del polpaccio (muscoli chiave per il supporto alla postura e per il movimento). Inoltre, la tuta è stata progettata in modo che il cosmonauta possa regolare il grado di tensione degli elementi elastici, permettendo di concentrare il carico su gruppi muscolari specifici a seconda delle necessità.

L'idea di fondo, pertanto, è che questa tuta eserciti una tensione continua su tutti i muscoli del corpo durante i movimenti che, in condizioni di gravità normale, sarebbero altrimenti privi di sforzo. In altre parole, la tuta ha lo scopo di simulare l'effetto di una costante gravità, contrastando gli effetti della microgravità sul corpo umano. Un altro



*Figura 3.6: L'astronauta Koichi Wakata indossa la tuta Penguin-3.  
Modificata da: Koichi Wakata wears the Penguin-3 antigravity suit.  
NASA. [31].*

potenziale beneficio della tuta riguarda la redistribuzione dei fluidi corporei, che viene favorita verso le gambe, compensando parzialmente la perdita di gravità e migliorando la circolazione sanguigna.

Durante test di due mesi in condizioni di riposo a letto condotti da Yamashita-Goto et al. (2001) [32], il carico di flessione plantare della Penguin Suit ha dimostrato di mantenere le proprietà contrattili delle fibre muscolari lente del muscolo soleo. Inoltre, la tuta è in grado di stimolare il ritorno venoso grazie all'attivazione dei muscoli delle gambe e anche di ripristinare il feedback proveniente dai meccanorecettori della pelle e dei muscoli, potenzialmente offrendo un beneficio sensomotorio.

Come riportato da Bellisle et al. (2020) [26], un ulteriore vantaggio della tuta è

che richiede sforzi energetici superiori per superare la resistenza dei cordoni elastici, il che può compensare la mancanza di dispendio energetico nelle attività quotidiane in microgravità. La tuta Penguin-3, a suo tempo comunemente utilizzata dai cosmonauti della stazione spaziale Mir, viene ora usata con minore frequenza sulla Stazione Spaziale Internazionale, ad eccezione dei cosmonauti più alti. Questi membri dell'equipaggio, infatti, possono essere a rischio di non riuscire a entrare nei sedili della Soyuz<sup>15</sup> a causa dei cambiamenti di statura indotti dalla microgravità e perciò la indossano durante l'ultimo mese di permanenza sulla ISS.

Nonostante le sue caratteristiche teoricamente vantaggiose, la Penguin Suit è stata segnalata come estremamente scomoda. Alcuni cosmonauti hanno infatti tagliato i cordoni elastici per alleviare il disagio, compromettendo così la funzionalità della tuta. Inoltre, per produrre i carichi adeguati, la cintura della tuta richiederebbe una pressione sulla pelle di circa 50 mmHg, che potrebbe avvicinarsi ai limiti tollerabili, rischiando di danneggiare le terminazioni nervose periferiche.

Inoltre, in volo, la tuta viene utilizzata in combinazione con altre contromisure e i cordoni elastici vengono regolati individualmente per il comfort, senza una calibrazione precisa, creando così variabili incontrollate che hanno ostacolato la raccolta di dati affidabili. Pertanto, come evidenziato da Waldie et al. (2011) [33], nonostante la Penguin Suit sia in uso sin dagli anni '70 e goda della fiducia delle autorità russe, la sua efficacia nel preservare la massa ossea non è mai stata quantificata in modo affidabile.

### 3.3 Gravity Loading Countermeasure Skinsuit (GLCS)

Nel 2011, un gruppo di ricercatori del MIT<sup>16</sup> presentò il progetto della *GLCS (Gravity Loading Countermeasure Skinsuit)*, traducibile in italiano come “tuta di contromisura per il carico gravitazionale”, una tuta, rappresentata in *Figura 3.7*, che correggeva gli errori riscontrati nella sua antesignana Penguin, migliorandone efficacia e affidabilità del design.

Il progetto GLCS pone le sue fondamenta tecnologiche e concettuali nella Gravity Loading Body Suit, oggetto del brevetto US 8,769,712 B2 [35], rilasciato negli Stati Uniti

---

<sup>15</sup>La Soyuz è una navicella spaziale russa, progettata per trasportare esseri umani e carichi nello spazio. È uno dei veicoli spaziali più longevi, affidabili e usati nella storia dell'esplorazione spaziale.

<sup>16</sup>Il Massachusetts Institute of Technology (MIT) è un'università privata statunitense situata a Cambridge, Massachusetts, riconosciuta a livello mondiale per la sua eccellenza nella ricerca e nell'insegnamento nei campi della scienza, tecnologia, ingegneria e matematica.



*Figura 3.7: Gravity Loading Countermeasure Skinsuit. Tratta da: European Space Agency. (2014). Suit up for Skinsuit. [34].*

l'8 luglio 2014. La domanda di brevetto venne presentata il 25 marzo 2011. L'invenzione, sviluppata da James M. Waldie e Dava J. Newman, è stata assegnata al Massachusetts Institute of Technology (MIT), che ne conserva tuttora i diritti di proprietà e sfruttamento.

La GLCS, progettata per uso intraveicolare, ha lo scopo di simulare gli effetti della gravità terrestre applicando un carico statico sul corpo derivante dalla tensione dei materiali che la compongono, ciò indipendentemente dalla posizione spaziale assunta dal soggetto che la indossa. Rappresenta un'evoluzione del concetto della Penguin Suit sovietica, poiché utilizza un materiale elastico aderente al corpo per generare un carico assiale distribuito in modo uniforme, dalle spalle fino ai piedi. Tuttavia, a differenza della Penguin, che si basava su due soli livelli di carico, la Skinsuit applica il carico lungo centinaia di sezioni verticali, garantendo una distribuzione più precisa e confortevole.

La GLCS viene realizzata in un materiale che presenta due differenti moduli di ela-

sticità in direzioni diverse. Il modulo di elasticità, noto anche come modulo di Young, è una grandezza fisica che misura la rigidità di un materiale quando viene sottoposto a una deformazione elastica lineare. È definito come il rapporto tra la tensione (forza per unità di area) e la deformazione unitaria (variazione relativa di lunghezza) nella regione elastica del materiale. Indica quanto un materiale resiste alla deformazione sotto una forza applicata: più il modulo è elevato, più il materiale è rigido e meno si deforma a parità di forza applicata. Il primo modulo di elasticità, di entità maggiore, è disposto verticalmente lungo l'asse longitudinale, ovvero parallelo all'asse centrale del corpo in posizione eretta. Questo modulo verticale, che ha il compito di simulare il carico gravitazionale, presenta un valore indicativamente dieci volte superiore rispetto al secondo modulo, che è invece orientato orizzontalmente (in direzione circonferenziale) in modo da consentire alla tuta di aderire efficacemente alla pelle del soggetto. La minore rigidità del modulo circonferenziale rispetto a quello verticale permette all'indumento di espandersi più liberamente lungo la circonferenza del corpo, favorendone l'adattamento morfologico. Tuttavia, si rende necessario un preciso dimensionamento dell'elasticità, che permetta di ottenere un coefficiente d'attrito tra tuta e pelle sufficiente a mantenere il materiale distribuito in modo desiderato sul corpo ed evitare raggrinzamenti in alcune zone. Pertanto, il materiale della tuta risulta essere un tessuto formato da fibre di ordito e trama<sup>17</sup> con moduli di elasticità differenti (*Figura 3.8*), in modo tale da offrire un'elasticità che varia spazialmente nel tessuto, con una personalizzazione puntuale su ogni incrocio ordito-trama.

Le fibre circonferenziali sono distribuite ad intervalli regolari di qualche centimetro e ognuna di queste funge da cintura che blocca lo spostamento verticale del tessuto in quel punto. Ogni stadio applica un carico leggermente superiore rispetto al precedente, creando un gradiente continuo di tensione. Il carico graduale viene ottenuto modificando la densità di tessitura, cioè il numero di fili per centimetro in ordito e in trama. Un tessuto più denso è meno deformabile e, applicato alla superficie corporea, esercita una forza compressiva maggiore rispetto alla zona con minore densità.

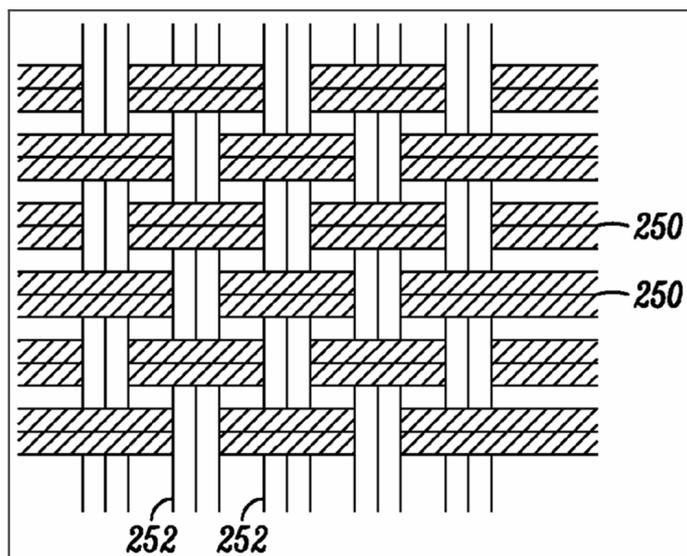
Tra i materiali utilizzati per la realizzazione della GLCS si possono citare i tessuti super elastici<sup>18</sup> o biestensivi<sup>19</sup> in nylon-spandex, caratterizzati da elevate proprietà elastiche

---

<sup>17</sup>Le fibre di ordito e trama sono i due sistemi di fili che si intrecciano per formare un tessuto nei processi di tessitura tradizionale. L'ordito è rappresentato dai fili longitudinali disposti nel senso della lunghezza del tessuto. La trama, invece, è composta dai fili trasversali, intrecciati perpendicolarmente all'ordito.

<sup>18</sup>Un materiale super elastico è in grado di subire grandi deformazioni elastiche (anche superiori al 100%) e ritornare alla forma originaria una volta rimosso il carico.

<sup>19</sup>Un materiale biestensivo (o biestensibile) è un tessuto elastico in due direzioni.



*Figura 3.8: Tessuto elastico formato da fibre di ordito e trama. Il materiale indicato con il numero 252 presenta un modulo di elasticità molto maggiore rispetto al materiale indicato con il numero 250.*

*Tratta da: Waldie et al. (2014), [35].*

e comunemente utilizzati in ambiti quali l'abbigliamento sportivo o la riabilitazione. Solitamente, infatti, si impiegano materiali polimerici o fibre naturali: filati di nylon, poliestere, poliammide, spandex, acrilico, cotone, lana o combinazioni di questi.

Si noti che l'allineamento dei moduli non è sempre preciso e che, con un tessuto elastico aderente al corpo, l'orientamento effettivo delle fibre varia da zona a zona durante l'uso. Perciò, l'orientamento verticale o circonferenziale dei moduli nel materiale elastico deve essere inteso come una disposizione generale e non come un allineamento assoluto e uniforme del materiale a doppio modulo nella tuta.

La tuta può essere realizzata in un solo pezzo, con fibre aventi moduli diversi distribuite in modo non uniforme in modo da fornire una variabilità elastica nella direzione longitudinale. In alternativa, più pezzi di materiale (dello stesso tipo o di tipi diversi) possono essere tagliati e cuciti o assemblati (tramite nastri, adesivi, saldature o una combinazione di questi). I pezzi possono essere tagliati in base alla circonferenza del busto o delle gambe e sagomati per esercitare una pressione progressivamente maggiore verso le parti inferiori del corpo, simulando così il carico gravitazionale.

Come detto, la GLCS può applicare un carico assiale crescente verso le parti inferiori del corpo, fino a raggiungere un valore pari a circa 1 g. Il carico assiale applicato in

qualsiasi punto verticale (o piano verticale) tra l'area ascellare e quella delle caviglie può approssimare il carico che si sperimenta stando in piedi in un ambiente con gravità terrestre.

I termini “*ambiente a 1 g*” o “*carico a 1 g*” sono utilizzati generalmente per riferirsi al tipico carico gravitazionale sperimentato da una persona in piedi sulla superficie terrestre. È facilmente comprensibile che tale carico sia trascurabile nella parte superiore del corpo (ad esempio sulla sommità della testa), dove non vi è massa sovrastante da sostenere, e aumenti gradualmente man mano che si scende verso i piedi che, alla loro base, sopportano l'intero peso del corpo. Le tute descritte potrebbero non riprodurre esattamente un carico a 1 g per l'utente. Ad esempio, il regime di carico può variare mentre alcune parti del corpo si muovono e cambiano forma durante l'uso ordinario. Inoltre, la tuta descritta non consente generalmente una distribuzione variabile del carico al di sopra delle ascelle, dove uno sprone<sup>20</sup> alle spalle può sostenere la tuta a un piano di carico iniziale, o al di sotto delle caviglie, dove staffe o elementi simili sono utilizzati per fissare un piano di carico terminale a ciascuna caviglia, nonostante queste estremità contribuiscano al reale carico gravitazionale di un corpo. Un piano di carico è una superficie rigida e stabile progettata per sostenere e distribuire il peso o la forza di un carico applicato su di essa. In ambito ingegneristico, meccanico o biomeccanico, il piano di carico serve come base di appoggio sulla quale si esercitano forze per misurarne ed analizzarne le sollecitazioni: il piano di carico iniziale è la superficie di contatto in cui il carico (la forza) comincia ad essere applicata; il piano di carico terminale, invece, è la superficie di contatto in cui il carico termina.

Ad ogni modo, fatte salve queste e simili limitazioni fisiche, si comprenderà che la tuta raggiunge generalmente un carico assiale sostanzialmente equivalente a quello di un corpo in piedi in un ambiente a 1 g. Pertanto, si è ottenuta una simulazione migliorata del carico gravitazionale rispetto alla Penguin Suit, anche in condizioni in cui non si riescano a riprodurre esattamente e completamente gli effetti della gravità sull'indossatore. Questa caratteristica è illustrata nella *Figura 3.9*, che mostra un confronto tra i regimi di carico calcolati per la GLCS, per la Penguin Suit e in condizioni di normogravità. Si può notare come il regime di carico calcolato per la GLCS segua da vicino il carico di 1 g, ad eccezione di un carico aumentato sulle spalle e sulla gamba inferiore, che compensano la discontinuità delle fibre circonferenziali sopra le ascelle e sotto la caviglia.

---

<sup>20</sup>In sartoria, lo sprone è il rettangolo di tessuto che copre la parte superiore del busto, fino all'attaccatura delle spalle.

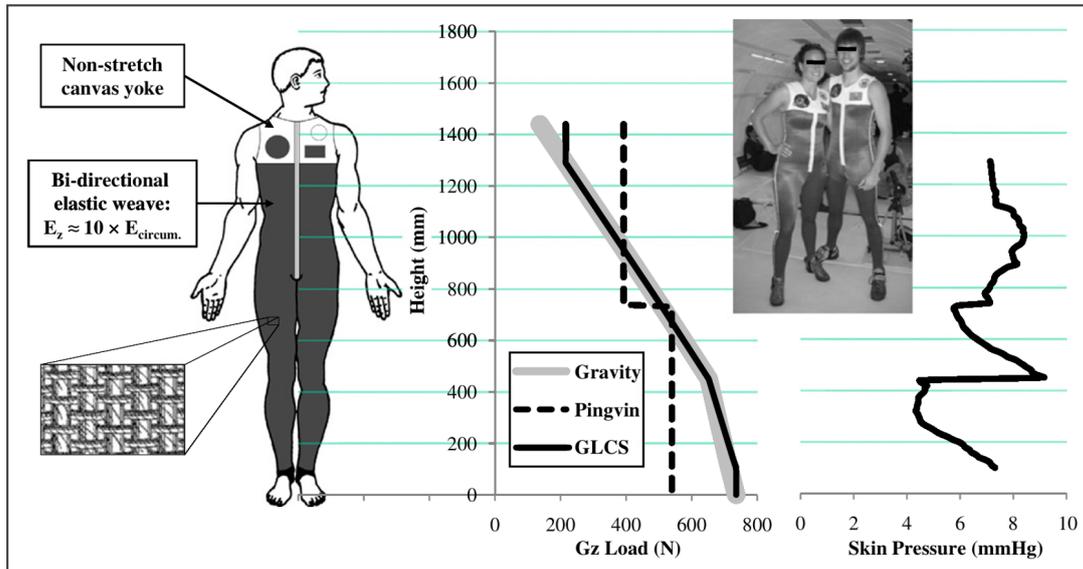


Figura 3.9: Confronto tra i regimi di carico calcolati per la GLCS, per la Penguin Suit e in condizioni di normogravità. Andamento della pressione cutanea applicata dalla GLCS. I dati sono relativi ad un soggetto di caratteristiche (1,7 m; 75 kg) e sono stati ricavati durante test di volo parabolico.

Tratta da: Waldie et al. (2011), [33].

Uno sprone (Figura 3.10, 120), realizzato con materiale inelastico (come tela o simili), viene implementato al fine di mantenere il materiale della tuta in posizione nella parte superiore. Questo elemento viene sagomato per poggiare saldamente su entrambe le spalle del soggetto e si estende da sotto le ascelle fino alla sommità delle spalle. In alternativa, lo sprone può anche includere materiale elastico come quello della tuta stessa. Sebbene tale approccio possa ridurre il numero di fogli di materiale separati utilizzati per realizzare la tuta, si comprenderà che un materiale non elastico può vantaggiosamente definire un piano di carico fisso (trasversale al torso) nella parte superiore, semplificando così i calcoli di carico nella progettazione della tuta. Lo sprone può includere anche un colletto rinforzato per evitare abrasioni durante la vestizione e la svestizione.

Le braccia non sono coperte dalla GLCS poiché queste non subiscono una significativa perdita di massa ossea o muscolare in microgravità, in quanto non sono normalmente utilizzate per il supporto del peso corporeo. Per migliorare ulteriormente il comfort e la praticità d'uso, sono stati aggiunti dei *ribbon arrestors*, ossia nastri non elastici cuciti sull'intera lunghezza della tuta, che impediscono un allungamento eccessivo del materiale e fungono da punti di presa per indossare o rimuovere la tuta.

La chiusura lampo della GLCS (Figura 3.10, 130), posizionata frontalmente, late-

ralmente o posteriormente a seconda del modello, è stata progressivamente perfezionata per semplificare indossamento e rimozione. Anche l'inserimento di zip sulle gambe può agevolare queste operazioni o permettere aperture mirate durante l'uso. Esistono inoltre numerosi sistemi alternativi o complementari alla cerniera, come Velcro, bottoni, automatici, ganci, fibbie e cinturini, tutti adattabili in base alle esigenze funzionali della tuta.

Nelle versioni più recenti e innovative, la GLCS può integrare leghe a memoria di forma (come rame-zinco-alluminio-nichel, rame-alluminio-nichel o nichel-titanio) controllabili per facilitare l'indossamento e la rimozione della tuta. Queste leghe, dotate di memoria di forma unidirezionale, possono espandersi una volta raggiunta la temperatura di transizione, permettendo l'inserimento o l'estrazione di arti e torso. In alternativa, è possibile impiegare polimeri elettroattivi, anch'essi regolabili, per ottenere un effetto simile di espansione controllata.

La GLCS è infine dotata, nella parte inferiore, di staffe (*Figura 3.10, 140*), che possono essere realizzate con materiale non elastico o elastico, progettate per mantenere stabile quella sezione della tuta. Avvolgendo ciascun piede, assicurano il corretto posizionamento e contribuiscono, tramite la tensione esercitata verso lo sprone, ad applicare il carico gravitazionale simulato. È tuttavia importante che gli elementi di collegamento tra tuta e piede garantiscano una forza coerente con la simulazione di gravità terrestre evitando l'applicazione di momenti torcenti alla caviglia che potrebbero causare flessioni o rotazioni indesiderate.

In sunto, la tuta vede ai suoi estremi le staffe e lo sprone, in modo da fornire un doppio ancoraggio: lo sprone distribuisce uniformemente la trazione sulle spalle evitando compressioni localizzate, mentre le staffe garantiscono che la forza venga trasmessa fino ai piedi, impedendo alla tuta di risalire durante il movimento. Le staffe sono progettate per collegarsi facilmente a pedali, piattaforme o attrezzature da esercizio, adattandosi alle diverse configurazioni possibili. La parte inferiore della tuta può poi includere ulteriori sistemi di fissaggio (ganci, bottoni, Velcro) pensati per l'ancoraggio di piastre vibranti (posizionate all'interno o all'esterno delle calzature) che forniscono stimoli propriocettivi alla pianta dei piedi, utili nel contrastare disturbi ossei e muscolari tipici delle condizioni di microgravità.

La tuta può infine includere più punti di ancoraggio per un sistema di contenimento (*Figura 3.10, 137*) che impediscono il movimento involontario del corpo durante il sonno o l'esercizio fisico. Ulteriori elementi di presa (anelli, linguette) per agevolarne l'indos-

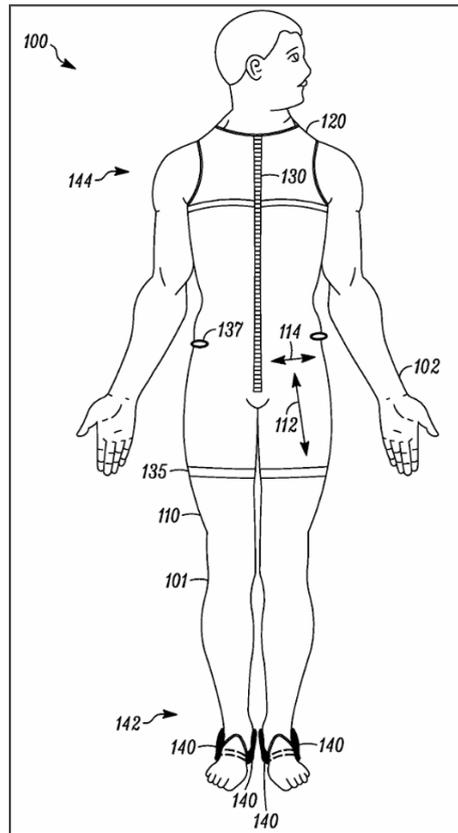


Figura 3.10: Gravity Loading Body  
 Suit su corpo umano.  
 Tratta da: Waldie et al. (2014), [35].

samento o la rimozione sono progettati secondo forme e dimensioni ergonomiche, adatte ad essere facilmente afferrate dalla mano umana.

In ultimo, si ritiene significativo evidenziare come, secondo la descrizione fornita nel brevetto di Waldie e Newman [35], la tuta per la distribuzione del carico corporeo si presta a numerose applicazioni, che vanno ben oltre il solo contesto spaziale. In ambito medico e riabilitativo, ad esempio, può essere adattata per aiutare pazienti con paralisi cerebrale nel miglioramento del controllo motorio, dello sviluppo posturale e nel sostegno del peso corporeo. La sua sottile vestibilità permette di indossarla sotto l'abbigliamento tradizionale, facilitandone l'uso quotidiano. Gli inventori stessi, sin dall'inizio, avevano dunque previsto che questa tecnologia potesse avere un impiego ampio e trasversale, includendo utilizzi terapeutici e riabilitativi oltre a quelli spaziali.

Per dare seguito al progetto brevettato, Waldie e Newman organizzarono uno studio nel 2011, pubblicato nell'articolo scientifico "A gravity loading countermeasure skinsuit"

[33]. In questa analisi, il regime di carico statico di base sperimentato sulla Terra è noto come dato di riferimento: il carico statico scheletrico per tutti i punti sull'asse longitudinale del corpo può essere infatti calcolato sommando il peso di tutti i segmenti corporei superiori. La massa dei segmenti corporei è stata ampiamente studiata e pubblicata in letteratura e può essere trovata per esseri umani con diverse caratteristiche fisiche (sesso, età, etnia) come percentuale della massa corporea totale. Utilizzando questi dati, è stato quindi possibile calcolare il carico a livello di spalla, anca, ginocchio, caviglia e pianta del piede; mentre il regime di carico continuo è stato stimato interpolando linearmente i valori calcolati. Sfruttando un modello teorico basato su misure antropometriche, proprietà dei materiali e coefficienti di attrito sperimentalmente determinati, è stato così possibile ottenere i valori di carico verticale associati all'indossamento della GLCS.

Il volo parabolico rappresenta attualmente la miglior simulazione disponibile per studiare il comportamento dei materiali in assenza di peso. Questa condizione ha permesso di osservare con precisione le deformazioni del tessuto della tuta, individuare eventuali limitazioni nei movimenti e valutare la facilità di indossamento e rimozione, senza le distorsioni dovute al peso corporeo e all'attrito che si avrebbero in posizione eretta o sdraiata in condizioni di normogravità. Per questi motivi, lo studio del prototipo GLCS è stato effettuato nel corso di una campagna sperimentale composta da venti voli parabolici. A causa delle limitazioni di tempo e budget previste dal programma, è stato possibile testare il prototipo della GLCS su un numero molto ristretto di soggetti: soltanto tre partecipanti hanno preso parte allo studio. Questa coorte ridotta ha imposto di considerare i risultati emersi solamente come prime evidenze promettenti sulle prestazioni del prototipo, senza tuttavia attribuire loro un valore conclusivo o generalizzabile sull'efficacia della GLCS.

Poiché durante le attività condotte all'interno di veicoli o habitat spaziali non è necessario che la tuta eserciti una pressione significativa sul corpo, è importante che la compressione cutanea della GLCS sia mantenuta al minimo. Questo consente non solo un maggiore comfort per l'utente, ma facilita anche le operazioni di indossamento e rimozione. Nei test effettuati, la pressione esercitata sulla pelle è risultata compresa tra 4 e 10 mmHg (*Figura 3.9*), con valori che aumentano in corrispondenza di un maggiore gradiente di carico e diminuiscono in segmenti corporei con un raggio maggiore. Un esempio evidente di questa dinamica è osservabile a livello delle ginocchia, dove la pressione si riduce sensibilmente a causa del minor carico associato al segmento della gamba rispetto alla coscia. Le pressioni rilevate sono paragonabili a quelle esercitate da semplici calze aderenti e risultano inferiori rispetto a quelle prodotte da indumenti sportivi compressivi o

calze da volo a compressione graduata, che normalmente si collocano tra i 14 e i 17 mmHg. Anche le calze da gravidanza, pensate per garantire supporto e contenimento, esercitano pressioni superiori (fino a 20 mmHg). Studi precedenti (Doan et al., 2003 [36]; Bernhardt et al., 2005 [37]) hanno dimostrato che compressioni di questo tipo possono avere effetti positivi sulla circolazione e sulla termoregolazione, oltre a favorire la performance metabolica e la resistenza durante l'attività fisica. Un confronto utile può essere fatto con la Penguin Suit, la cui cintura in cuoio è stimata produrre una pressione cutanea intorno ai 50 mmHg. Tuttavia, è noto che pressioni localizzate superiori ai 40 mmHg, se mantenute per diverse ore, possono compromettere la circolazione sanguigna e, in alcuni casi, portare alla sindrome compartimentale<sup>21</sup>. Per questo motivo, è fondamentale progettare la tuta in modo che eserciti una pressione entro soglie fisiologicamente tollerabili.

Nonostante siano state necessarie alcune semplificazioni progettuali, in particolare a livello delle spalle e delle caviglie, i risultati mostrati nel grafico di *Figura 3.9* evidenziano come la GLCS sia in grado di riprodurre con buona precisione il carico statico che si sperimenta sulla Terra in condizioni di gravità normale. Il design della tuta consente infatti una distribuzione del carico sostanzialmente fedele a quella fisiologica, in particolare dall'area delle ascelle fino alle ginocchia e alla pianta dei piedi. Al contrario, si osservano carichi leggermente superiori nella zona delle spalle, mentre sono inferiori in corrispondenza delle gambe. Va sottolineato che la Penguin Suit non era progettata per replicare fedelmente il carico gravitazionale terrestre, bensì per fornire resistenza posturale alla muscolatura e un certo livello di stimolazione ossea. L'analisi condotta rivela quindi che una tuta a due stadi come la Penguin Suit non è in grado di garantire un carico osseo efficace e confortevole pari a quello sperimentato a 1 g, mentre l'approccio adottato nella GLCS, basato su un sistema continuo e distribuito, appare più promettente in tal senso.

La GLCS è risultata poi particolarmente utile come contromisura contro l'intolleranza ortostatica post-volo spaziale. Durante il volo spaziale, come già detto, i fluidi corporei tendono a redistribuirsi in modo uniforme. Per il cervello, questo si traduce in una maggiore pressione cranica. Al ritorno sulla Terra, di converso, la forza di gravità attira nuovamente i fluidi verso il basso, riducendo la pressione sanguigna cerebrale, con conseguente rischio di svenimento. La tuta elastica può fornire una compressione su torso e gambe, contrastando il flusso discendente dei fluidi e prevenendo lo svenimento. Questo effetto risulta utile

---

<sup>21</sup>La sindrome compartimentale è una condizione medica patologica che si verifica quando la pressione all'interno di un compartimento muscolare aumenta a tal punto da compromettere la circolazione sanguigna e l'apporto di ossigeno ai muscoli e ai nervi presenti in quel compartimento.

nel periodo immediatamente successivo al rientro, mentre il corpo si riadatta alla gravità terrestre.

Durante i voli parabolici, la tuta GLCS è stata indossata con successo, risultando in generale confortevole e poco limitante per la mobilità. Alcuni collaudatori hanno riportato un lieve fastidio nella zona delle ascelle e delle ginocchia. Tuttavia, i partecipanti hanno indicato una buona tollerabilità, anche per un utilizzo prolungato (fino a 16 ore consecutive). Si prevede che ulteriori ottimizzazioni nella vestibilità e nei processi di fabbricazione possano ridurre ulteriormente il disagio percepito. Tutti i soggetti coinvolti hanno confermato che la tuta non ha compromesso in modo significativo la libertà di movimento, suggerendo quindi la possibilità concreta di utilizzarla anche durante attività lavorative quotidiane o sessioni di esercizio fisico a bordo. Inoltre, le operazioni di indossamento e rimozione sono risultate rapide ed efficienti per tutti i partecipanti, confermando la buona ergonomia complessiva del sistema. Le conclusioni degli autori a proposito di questi studi preliminari evidenziano come la GLCS possa essere un indumento pratico per l'uso nello spazio, offrendo buoni livelli di comfort, libertà di movimento, proprietà termiche e facilità nella vestizione. La GLCS rappresenta quindi un concetto promettente per contrastare il decondizionamento fisiologico, in particolare quello a carico dell'apparato scheletrico, durante le future missioni spaziali di lunga durata. Questa tuta potrebbe migliorare in modo significativo l'applicazione di carichi statici e dinamici sul corpo degli astronauti, mantenendoli vicini al livello di 1 g, senza necessità di alimentazione elettrica e con ingombro e massa minimi.

Nel corso degli anni, la tuta è stata oggetto di numerosi miglioramenti riguardanti la distribuzione del carico, la vestibilità e l'ergonomia, nonché gli aspetti termici, di comfort nell'indossamento e di leggerezza. Dal primo prototipo si è arrivati, nel 2022, alla settima versione (*Figura 3.11*).

Bellisle et al. (2022) [39] hanno proposto una valutazione preliminare della GLCS Mk-7<sup>22</sup>, includendo una prima considerazione degli effetti sull'attività neuromuscolare.

Il materiale utilizzato per il carico nelle versioni Mk-1 fino al Mk-4 della GLCS era un tessuto chiamato *jumbo spandex*, facilmente reperibile sul mercato e composto per

---

<sup>22</sup>Il prefisso "Mk" seguito da un numero, come nel caso di Mk-7, sta per "Mark", che indica una versione o una generazione di un prodotto. Il termine "Mark" deriva dall'inglese antico "*mearc*", che significa "confine" o "segno", e si riferisce a un punto di riferimento o a una delimitazione. Nel contesto militare britannico, Mark è stato utilizzato per identificare varianti di armi o equipaggiamenti, come nel caso dei carri armati e delle armi portatili. Successivamente, l'uso di questo termine si è esteso ad altri settori, come l'industria automobilistica, l'elettronica e l'informatica, per indicare versioni successive di un prodotto.



*Figura 3.11: GLCS Mk-7.  
Tratta da: Massachusetts Institute of  
Technology. Gravity Loading Countermeasure  
Skinsuit. Explore Space. [38].*

il 10% da spandex<sup>23</sup> e per il 90% da nylon<sup>24</sup>. Nelle versioni successive, Mk-5 e Mk-6, invece, è stata impiegata una miscela di nylon e spandex di composizione non meglio specificata. Durante i test, si è scoperto che i diversi lotti di questi tessuti si comportavano in modo piuttosto differente, rendendo necessario riesaminare e caratterizzare ogni nuovo lotto di materiale prima di utilizzarlo. Nei primi prototipi, inoltre, sono stati eseguiti pochi test di durabilità, in quanto questo aspetto non era considerato prioritario nel processo di

<sup>23</sup>Lo spandex (conosciuto anche come elastan o Lycra) è una fibra sintetica caratterizzata da un'elevata elasticità. È ampiamente utilizzato nei tessuti tecnici e sportivi per la sua capacità di allungarsi fino a cinque volte la propria lunghezza e ritornare alla forma originale, offrendo comfort, aderenza e libertà di movimento.

<sup>24</sup>Il nylon è una fibra sintetica appartenente alla famiglia delle poliammidi. Leggera, resistente e durevole, è spesso impiegata nei tessuti tecnici, industriali e di abbigliamento per la sua alta tenacità, resistenza all'abrasione e basso assorbimento di umidità.

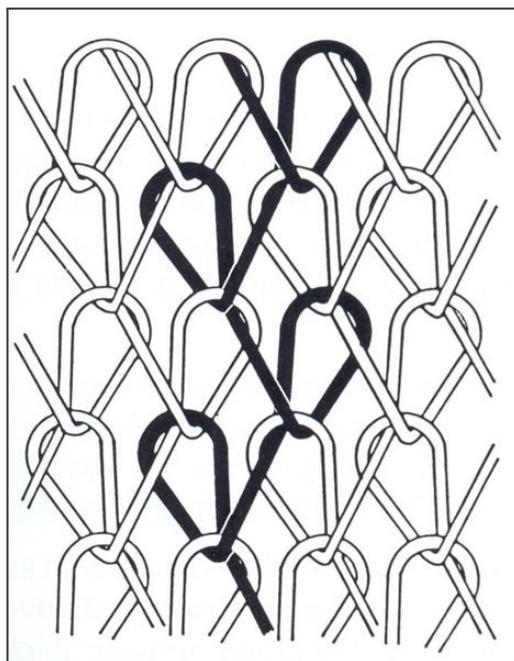
progettazione iniziale. La durabilità è la capacità di un prodotto di mantenere nel tempo le proprie caratteristiche funzionali e strutturali, resistendo all'usura, alle sollecitazioni meccaniche e agli agenti esterni, senza dover ricorrere frequentemente a riparazioni o sostituzioni.

La GLCS Mk-7 rappresenta un'evoluzione significativa rispetto alle versioni precedenti, con l'obiettivo di offrire un carico più stabile e di maggiore intensità sul corpo dell'utilizzatore. Per raggiungere questo traguardo, il team di sviluppo ha adottato un approccio più rigoroso e sistematico nella selezione e nel test dei materiali di carico, rispetto a quanto fatto nei primi prototipi. Per guidare questa fase, è stato definito un primo elenco di requisiti tecnici, pensato per individuare i materiali più adatti alla nuova versione della tuta. Questi criteri sono stati stabiliti considerando l'utilizzo operativo dell'indumento, includendo la massima tensione richiesta al tessuto e la durata prevista di utilizzo, anche in scenari prolungati come quelli delle missioni spaziali. Le tensioni massime attese sono state stimate analizzando modelli storici delle tute GLCS, identificando i valori massimi di tensione sia lungo l'asse del corpo che in senso circonferenziale. A questi valori è stato poi aggiunto un margine di sicurezza del 15% in modo da garantire affidabilità. Per mettere alla prova la resistenza dei materiali candidati, sono stati effettuati test su campioni sottoponendoli a 100 cicli di stiramento fino a raggiungere la massima deformazione prevista, simulando così 100 sessioni di vestizione e svestizione, come potrebbe accadere durante una missione spaziale di lunga durata. I materiali sono stati poi valutati attraverso test di trazione, con particolare attenzione a tre parametri chiave: la diminuzione della tensione dopo 100 cicli, la riduzione della tensione dopo 8 ore di deformazione continua a tensione massima e il valore di tensione massima attesa espresso in percentuale rispetto al punto di rottura del materiale. Grazie a questa metodologia, la selezione del materiale per la Mk-7 si è basata non solo su test quantitativi, ma anche su una comprensione più profonda del comportamento del tessuto nelle condizioni realistiche d'uso. Lo sviluppo della GLCS Mk-7 si è quindi concentrato sull'identificazione di un materiale tessile commerciale pronto all'uso (*commercial off-the-shelf*), con l'obiettivo di contenere gli alti costi normalmente associati alla progettazione e alla produzione di tessuti su misura. I materiali candidati per il sistema di carico sono stati individuati grazie alla collaborazione con esperti dell'industria dell'abbigliamento e successivamente valutati secondo i test tecnici definiti precedentemente. Il materiale scelto al termine delle valutazioni è stato la maglia a ordito (*warp knit*) in poliestere 100% Primeflex™. Il poliestere è una fibra sintetica ampiamente utilizzata nell'industria tessile, derivata dalla polimerizzazione del

polietilene tereftalato (PET), noto per le sue caratteristiche di resistenza, versatilità e basso costo di produzione. Il Primeflex™ è un tessuto tecnico innovativo sviluppato da Toray Industries, noto per la sua combinazione di leggerezza, elasticità e resistenza. Realizzato al 100% in poliestere, offre prestazioni superiori rispetto ai poliesteri tradizionali grazie alle particolari tecniche di tessitura utilizzate per realizzarlo.

La differenza principale tra una maglia a ordito (*warp knit*) e un tessuto intrecciato (*woven*) risiede nella struttura della tessitura. I tessuti a ordito sono formati da fili che si intrecciano creando una serie di anelli collegati tra loro (*Figura 3.12*). Questa struttura conferisce al materiale maggiori elasticità e morbidezza, poiché sia i filati che l'intera struttura a maglia possono deformarsi quando sottoposti a trazione. Al contrario, i tessuti intrecciati sono costituiti da fili disposti in due direzioni ortogonali, dando origine ad una configurazione più rigida e stabile, ideale per applicazioni che richiedono supporto e durabilità. Nei tessuti intrecciati, l'elasticità dipende principalmente dalla capacità di allungamento dei singoli filati, mentre nei tessuti a ordito l'elasticità è data anche dalla deformabilità della struttura ad anelli. Quando vengono stirati, questi anelli si deformano e si allungano, rendendo il tessuto nel complesso molto più elastico e flessibile. Inoltre, rispetto al tessuto intrecciato, la maglia a ordito rende più semplice l'implementazione del carico graduale. Quest'ultimo, infatti, si ottiene variando in modo controllato la tensione del filato e la struttura della maglia durante il processo di produzione, regolando con precisione sia la forza con cui il filato viene teso, sia l'altezza dei punti di maglia, ovvero quanto aperti o compressi sono gli anelli formati dal filo. Dunque, nella parte inferiore della tuta il tessuto è più fitto e stretto, con anelli più piccoli e ravvicinati tra loro, mentre nella parte superiore risulta più morbida e meno densa, con anelli più grandi e meno tirati. Il controllo della tensione e della compressione è particolarmente efficace lungo la direzione verticale, cioè lungo l'asse in cui si sviluppano i fili di ordito. Al contrario, il controllo diretto della tensione lungo la direzione orizzontale è molto più limitato. Nei tessuti a maglia a ordito, infatti, i fili non si muovono lateralmente ma seguono principalmente un percorso verticale, con solo lievi deviazioni oblique. Di conseguenza, la possibilità di modulare attivamente la compressione lungo l'asse trasversale risulta ridotta. Tuttavia, è comunque possibile influenzare l'elasticità e la risposta del tessuto nella direzione orizzontale intervenendo sulla struttura del punto e sulla densità della maglia. Ad esempio, l'utilizzo di punti più aperti o più fitti, oppure la variazione del numero di maglie per centimetro, consente di modificare la capacità del tessuto di deformarsi trasversalmente. Sebbene questi interventi non offrano un controllo diretto e preciso come

nella direzione dell'ordito, rappresentano comunque un utile strumento per progettare tessuti a compressione definita anche sul piano orizzontale.



*Figura 3.12: Schema base della maglia a ordito (warp knit).*

*Tratta da: Wikipedia. Warp knitting. [40].*

Il materiale scelto ha ottenuto punteggi complessivi di utilità superiori rispetto al tessuto originariamente utilizzato per le versioni Mk-1 fino alla Mk-4 della GLCS, ma non è stato in grado di raggiungere le stesse prestazioni meccaniche del tessuto impiegato nelle versioni Mk-5 e Mk-6. I risultati in termini di durabilità sono stati ritenuti comparabili.

Il carico generato dalla tuta è stato monitorato indirettamente attraverso la deformazione del tessuto in varie zone del corpo. Nella prima versione Mk-1, i livelli medi di deformazione raggiungevano circa il 100% a livello del busto, il 96% sulla coscia e il 61% sulla gamba inferiore. La Mk-7 ha mostrato valori inferiori alle aspettative, soprattutto a causa della maggiore rigidità del tessuto. Il tessuto Primeflex™ in poliestere è infatti risultato molto più rigido rispetto a quello utilizzato nella Mk-1. Questo significa che bastano variazioni minime nella lunghezza del tessuto per generare la giusta tensione, rendendo il materiale particolarmente sensibile agli errori nella fabbricazione. Le attuali tecniche di taglio e cucitura offrono una tolleranza di circa 1 mm, che potrebbe essere troppo imprecisa per tessuti così rigidi. Inoltre, materiali troppo rigidi si adattano meno facilmente

alle variazioni morfologiche causate dal movimento o dalle variazioni fisiologiche nello spazio.

Sul fronte del comfort, sono emersi margini di miglioramento. Le aree che hanno causato più fastidio sono state le spalle e i piedi, suggerendo la necessità di interventi progettuali. La Mk-7, rispetto alle versioni precedenti, ha ottenuto punteggi inferiori nei questionari qualitativi, probabilmente a causa del maggiore carico e della maggiore rigidità del tessuto. L'obiettivo di garantire 4 ore di comfort continuativo non è stato raggiunto: il comfort sperimentale è stato ritenuto adeguato solo per 30–60 minuti consecutivi. Tuttavia, il collaudatore ha riferito che la tolleranza alla tuta migliorava nel tempo, suggerendo che l'uso ripetuto potrebbe portare a un miglioramento percepito. I test sono stati condotti tutti in posizione eretta a gravità terrestre, quindi sarà importante valutare in futuro il comfort anche in posizione supina, più rappresentativa dell'uso previsto in microgravità. La rigidità del tessuto ha anche limitato la mobilità, in particolare a livello degli arti inferiori, anche se questo può avere un effetto positivo in quanto aumenta l'attività muscolare. In futuro, modelli computazionali potrebbero aiutare a trovare il giusto compromesso tra mobilità e resistenza al movimento. Per quanto riguarda le spalle, il problema non è tanto il tessuto, quanto il design dello sprone non elastico, che non può essere scaricato completamente: un certo livello di disagio sarà sempre presente, ma è possibile migliorarlo con modifiche mirate. L'indossamento completo richiede circa 4 minuti, un tempo accettabile, ma è necessario ridurre le limitazioni alla mobilità per permettere al soggetto di vestirsi in modo totalmente autonomo.

Per questo studio è stato utilizzato un dispositivo chiamato "Moonwalker", che serve ad alleggerire parte del peso corporeo del partecipante per ricreare una sensazione di gravità ridotta, come quella che si può provare nello spazio. Moonwalker è un sistema che sostiene verticalmente il corpo grazie a una struttura sopraelevata e ad un'imbracatura fissata alla vita della persona. Questa configurazione permette al partecipante di muoversi liberamente con maggiore comodità, in quanto consente anche rotazioni e inclinazioni naturali del corpo durante il cammino, rendendo più semplice muoversi mentre si riduce il carico sulle gambe. L'analisi dell'attività neuromuscolare ha dato risultati incoraggianti. In particolare, durante la corsa con la tuta, si è osservato un aumento dell'attività nei muscoli flessori del ginocchio (come il vasto laterale e il retto femorale) coerente con la maggiore resistenza al movimento. Anche l'attività nei muscoli lombari è aumentata, suggerendo un potenziale beneficio nella prevenzione del mal di schiena e dell'allungamento della colonna vertebrale in microgravità. Tuttavia, è stato identificato anche un effetto indesiderato: in

gravità parziale, l'attività muscolare nella parte inferiore della gamba è risultata diminuita, peggiorando il già noto calo di attivazione muscolare tra la gravità terrestre e quella ridotta. Questo effetto è probabilmente dovuto alla posizione delle staffe, che scaricavano il lavoro dai muscoli della gamba promuovendo la flessione plantare. Gli angoli delle staffe sono quindi oggetto di riprogettazione per opporsi alla flessione plantare e stimolare nuovamente i muscoli della parte inferiore della gamba. Questo potrebbe richiedere un elemento di carico che vada dallo stinco alle dita dei piedi, come già presente nella Penguin Suit.

Ad ogni modo, i risultati ottenuti rappresentano un ulteriore passo significativo e incoraggiano fortemente la prosecuzione degli studi in ambienti a gravità ridotta o simulata, con l'obiettivo di comprendere in modo più approfondito l'influenza della GLCS sul sistema neuromuscolare umano. In questo lavoro, l'attività muscolare è stata attentamente analizzata al fine di valutare il potenziale della GLCS come contromisura efficace contro le alterazioni neuromuscolari indotte dalla microgravità. Nonostante lo studio sia stato condotto su un singolo partecipante, i risultati ottenuti offrono una base solida per la progettazione di ricerche future su campioni più numerosi e in condizioni sperimentali più articolate, come quelle garantite da ambienti di microgravità simulata.

L'approfondimento della risposta fisiologica del sistema muscolare all'uso della GLCS potrà fornire elementi chiave per lo sviluppo di strategie di prevenzione e riabilitazione sempre più efficaci, non solo in ambito spaziale, ma anche terrestre, ad esempio per la gestione dell'allettamento prolungato o delle patologie neuromuscolari. Le prospettive per il futuro sono decisamente promettenti: nuovi esperimenti, condotti con un rigore metodologico ancora maggiore e in condizioni controllate, potrebbero confermare e ampliare le evidenze emerse da questi primi studi, contribuendo in modo significativo alla più profonda comprensione dei meccanismi adattativi del sistema muscolare in assenza di carico gravitazionale. Un'evoluzione in questa direzione potrebbe aprire la strada a importanti progressi in campo clinico, riabilitativo e aerospaziale, rendendo la GLCS una risorsa sempre più concreta, utile ed efficace.

## **4. Applicazioni alla medicina terrestre: tute ortopediche di supporto alla riabilitazione neuromotoria**

Come analizzato nel capitolo precedente, negli ultimi decenni la ricerca spaziale ha portato allo sviluppo di diverse tecnologie indossabili destinate a contrastare gli effetti della microgravità sul corpo umano. Tra queste, la Gravity Loading Countermeasure Skinsuit (GLCS), progettata per simulare sulla Terra il carico gravitazionale assente nello spazio, rappresenta una delle innovazioni più promettenti. Grazie alla sua particolare struttura in tessuto elastico a trama bidirezionale, la GLCS è in grado di applicare un carico assiale graduale dalla testa ai piedi, replicando l'effetto della gravità terrestre in modo più realistico rispetto ai modelli precedenti. Questa capacità la rende potenzialmente utile anche in ambito clinico terrestre. In effetti, sono già emerse ipotesi d'impiego della GLCS in numerosi contesti medici, dalla riabilitazione muscoloscheletrica alla prevenzione dell'osteoporosi, fino al trattamento di patologie neurologiche e linfatiche.

A tal proposito, Attias et al. (2017) [41] osservano che la tuta fornisce un carico assiale statico tollerabile durante l'esercizio, evidenziando il suo possibile impiego come strumento per l'allenamento contro resistenza elastica, con potenziale utilità come modalità riabilitativa. In pratica, applicando costantemente un piccolo peso al corpo, la GLCS può aiutare a preservare massa muscolare e ossea (ad esempio per prevenire o trattare l'osteoporosi), integrandosi in programmi di fisioterapia o riabilitazione. Breen et al. (2023) [42], attraverso studi svolti in ambiente terrestre, hanno mostrato che indossare la GLCS per diverse ore può ripristinare in parte il profilo lombare normale. In particolare, con una prova di 4 ore in una tuta Mk-6 dopo scarico spinale prolungato, è stata osservata una restaurazione della lordosi lombare e della mobilità spinale. Si ritiene perciò che la tuta GLCS sia in grado di ripristinare la mobilità e la lordosi lombare dopo alcuni giorni di scarico, riducendo potenzialmente il rischio di ernie discali. Ancora, l'Agenzia Spaziale Australiana [43] segnala che la struttura a compressione graduale della tuta è paragonabile ai capi terapeutici utilizzati per il trattamento di patologie da edema, dichia-

rando l'applicabilità del progetto a condizioni cliniche come ustioni e linfedemi. In tali casi, la pressione esercitata dalla tuta può favorire la circolazione sanguigna e linfatica e migliorare il recupero tissutale. Inoltre, la compressione mirata potrebbe alleviare edemi cronici. In ambito sportivo, la stessa fonte menziona possibili applicazioni per lesioni da sport e recupero post-gara, sostenendo che la tecnologia della tuta supporti gli atleti nel recupero dopo l'attività. Infine, va notato che anche la tollerabilità a livello cutaneo è buona: lo studio di Stabler et al. (2017) [44] sul microbiota ha rilevato solo modifiche transitorie nella composizione batterica cutanea dopo brevi indossamenti della tuta, senza aumento di microrganismi patogeni, suggerendo che brevi periodi di uso della GLCS non compromettono in alcun modo la salute della pelle.

Nonostante queste premesse incoraggianti, la GLCS rimane attualmente un dispositivo in fase di studio. Le ricerche in corso ne hanno evidenziato il potenziale, ma non esistono ancora protocolli clinici attivi che ne prevedano l'impiego sistematico in ambito medico. Le fonti disponibili presentano proposte teoriche, progetti sperimentali e applicazioni future, ma nessuna iniziativa concreta che ne estenda l'utilizzo fuori dal contesto aerospaziale. Al contrario, la tuta Penguin, suo predecessore concettuale, pur presentando una progettazione meno sofisticata e più scomoda, ha già trovato una consolidata applicazione terapeutica. La sua evoluzione clinica ha infatti portato alla creazione della Adeli Suit, oggi utilizzata in numerosi programmi riabilitativi, soprattutto per bambini affetti da paralisi cerebrale.

## 4.1 Adeli Suit

Per introdurre il metodo Adeli, si fa riferimento alla review di M. Sabbadini (2011) [45], che ne presenta in modo chiaro i principi fondamentali e le principali applicazioni, offrendo un quadro utile per comprenderne il funzionamento e l'efficacia.

Il metodo Adeli ha avuto origine in Russia, dove è stato introdotto e applicato a partire dal 1991. Nel 1997 fu ridefinito dagli studi di K.A. Semenova, che ne perfezionò i principi e le modalità d'uso. Si tratta di un approccio riabilitativo personalizzato e intensivo, sviluppato a partire dalle conoscenze acquisite nell'ambito della medicina spaziale sovietica. La base tecnologica di questo metodo è rappresentata dalla Penguin Suit sovietica, inizialmente pensata come contromisura per i cosmonauti al fine di contrastare la perdita di tono muscolare e la demineralizzazione ossea durante le missioni spaziali in condizioni

di microgravità. Il dispositivo, che oggi si traduce nella cosiddetta *tuta Adeli* (*Adeli Suit*), è stato riadattato in ambito clinico per fornire resistenza esterna al movimento, rendendo possibile una stimolazione controllata della muscolatura e dell'apparato propriocettivo. Il nome di questo metodo è un omaggio alla tuta spaziale sulla base della quale è sviluppato: "Adeli" è infatti un riferimento al pinguino di Adelia<sup>25</sup>, da cui deriva il soprannome "Penguin Suit". Le due tute (Penguin Suit e Adeli Suit) sono rappresentate, una di fianco all'altra, in *Figura 4.1*, fotografia dell'esposizione presente all'Adeli Medical Center di Piestany, in Slovacchia.

Nel contesto terapeutico, il metodo Adeli è utilizzato soprattutto nei bambini affetti da disturbi del movimento, di origine sia centrale che periferica. Il principale ambito di applicazione è rappresentato dalla *paralisi cerebrale infantile* (*PCI*), termine con cui si indica un insieme piuttosto ampio e complesso di disturbi neurologici che derivano da un danno al cervello in via di sviluppo. Questo danno, pur essendo permanente, non peggiora nel tempo ed è quindi detto "non progressivo". Può verificarsi durante la gravidanza, al momento della nascita o nei primi mesi o anni di vita del bambino. La lesione al sistema nervoso centrale può avere effetti molto diversi da persona a persona, ma in generale tende a influenzare soprattutto il modo in cui il bambino si muove e mantiene la postura, cioè la capacità di controllare la posizione delle varie parti del corpo. I disturbi più evidenti riguardano quindi il movimento e la coordinazione, ma spesso sono presenti anche altre difficoltà associate: problemi alla vista, ritardi nello sviluppo intellettuale, difficoltà nella comunicazione (sia nel parlare che nel comprendere il linguaggio), nella deglutizione e nella gestione di emozioni e relazioni sociali. Anche se il danno al cervello non può essere eliminato, le sue conseguenze possono cambiare nel tempo, soprattutto grazie alla crescita e all'intervento precoce. Infatti, prima si agisce con terapie mirate e personalizzate, maggiori sono le possibilità che il bambino sviluppi le proprie abilità e raggiunga una buona qualità di vita. Nei soggetti affetti da questa patologia, l'uso della tuta consente l'esecuzione di esercizi mirati contro resistenza, con un duplice obiettivo: da un lato stimolare la propriocezione e migliorare l'allineamento posturale, dall'altro promuovere un riapprendimento da parte del cervello dei corretti schemi motori. Secondo i sostenitori del metodo, questo approccio sfrutta le afferenze sensoriali statiche e dinamiche per

---

<sup>25</sup>Il pinguino di Adelia (scientificamente *Pygoscelis adeliae*) deve il suo nome a Adèle Dumont d'Urville, moglie dell'esploratore francese Jules Dumont d'Urville. Nel 1840, durante una spedizione in Antartide, egli scoprì la regione che chiamò *Adélie Land* in suo onore. Successivamente, gli uccelli osservati in quella zona furono chiamati "pinguini di Adélie" in riferimento al territorio stesso.



*Figura 4.1: Penguin Suit e Adeli Suit, esposte presso l'Adeli Medical Center di Piestany, Slovacchia.*

*Tratta da: Adeli Medical Center. Die Auswirkungen der Rehabilitation im Adeli-Anzug sind vielfach höher. [46].*

stimolare il sistema nervoso centrale, contribuendo a normalizzare l'attività delle strutture motorie alterate. La stimolazione afferente viene dunque considerata un mezzo per indurre plasticità neurale e favorire il recupero funzionale.

Il metodo Adeli, impiegato in numerosi centri riabilitativi a livello internazionale, sia europei che extraeuropei, trova in ambito italiano il suo principale punto di riferimento nell'Adeli Medical Center di Piestany, in Slovacchia. Il trattamento si basa su esercizi neurofisiologici personalizzati, svolti indossando la tuta Adeli, la quale viene adattata alle caratteristiche individuali del paziente (forma del corpo, stadio della patologia, obiettivi terapeutici). La tuta fornisce una stimolazione sensoriale continua, agendo sulle articolazioni e sui muscoli, che attiva le aree cerebrali coinvolte nel controllo del movimento,

in particolare quelle che risultano meno sviluppate o danneggiate. Le indicazioni terapeutiche del metodo Adeli sono ampie e comprendono, oltre alla paralisi cerebrale, anche lesioni cerebrali traumatiche, patologie neurologiche e neuromuscolari come sclerosi laterale amiotrofica (SLA), sclerosi multipla (SM), spina bifida e morbo di Parkinson. Si tratta quindi di un metodo con un potenziale applicativo esteso a numerosi quadri clinici in cui sia presente un'alterazione del controllo motorio. Non sono state riportate particolari controindicazioni all'uso del metodo Adeli. Le uniche limitazioni riguardano l'altezza minima del paziente, che deve essere di almeno 84 cm (per motivi legati alla struttura della tuta), le forme gravi di epilessia non controllate farmacologicamente e i casi di grave disabilità intellettiva che renderebbero difficoltosa la partecipazione attiva alla terapia.

Come rappresentato in *Figura 4.2*, la tuta Adeli è un sistema composto da diverse unità strutturali (corsetto, mutanda, ginocchiere e scarpe) collegati tra loro da tiranti elastici regolabili che mimano l'azione dei muscoli agonisti e antagonisti del corpo umano e possono essere opportunamente regolati in base alle necessità specifiche del singolo paziente. Questa particolare caratteristica rende la tuta altamente personalizzabile, permettendo un adattamento preciso alle esigenze cliniche individuali.

Nel contesto del Centro Adeli di Piestany, la tuta viene utilizzata esclusivamente durante le sessioni terapeutiche. Non viene fornita alla famiglia né durante il soggiorno né alla dimissione del paziente. Tale approccio mira a garantire che l'utilizzo del dispositivo sia sempre supervisionato da personale specializzato. Secondo i promotori del metodo, l'uso della tuta Adeli durante gli esercizi riabilitativi stimolerebbe il sistema nervoso centrale, migliorando la propriocezione e favorendo l'acquisizione di posture e movimenti più fisiologici. Si ritiene che la tuta fornisca un supporto neuromuscolare virtuale che aiuta a stabilizzare il corpo, riducendo la comparsa di sinergie patologiche, migliorando la qualità del movimento e promuovendo lo sviluppo di schemi motori più vicini alla normalità. Gli obiettivi del metodo Adeli includono: la normalizzazione del tono muscolare, la correzione di atteggiamenti posturali patologici, il miglioramento della deambulazione, della postura e della motricità fine, la prevenzione di interventi chirurgici ortopedici, la riduzione delle contratture articolari e della debolezza muscolare (ipotrofia o atrofia). Inoltre, il metodo punta anche a stimolare le reazioni antigravitazionali e vestibolari, a potenziare l'equilibrio statico e dinamico, la percezione del movimento (cinestesia) e la propriocezione. Non meno importanti sono gli effetti attesi sullo sviluppo delle capacità sensoriali (vista, udito, tatto), delle competenze linguistiche e delle funzioni respiratorie e cardiovascolari. Il programma terapeutico del Centro Adeli prevede una valutazione



*Figura 4.2: Adeli Suit.*

*Tratta da: ABC Law Centers. Adeli Suit Therapy. [47].*

medica iniziale e una permanenza di 2, 3 o 4 settimane, durante le quali il paziente partecipa ad un'intensa attività riabilitativa di 3-5 ore al giorno, sei giorni a settimana. Le sedute includono: esercizi neurofisiologici in tuta Adeli (1-2 ore al giorno), massaggi corporei quotidiani, terapia manuale spinale e degli arti (2-3 volte a settimana), applicazioni di fango sulfureo, crioterapia, riflessoterapia, logopedia (al bisogno), ossigenoterapia, elettrostimolazione transcorticale e brain feedback.

Tuttavia, la letteratura scientifica sul metodo Adeli è ancora piuttosto limitata. Esiste uno studio prospettico randomizzato di Bar-Haim (2006) [48] nel quale vengono confrontati due gruppi di pazienti con paralisi cerebrale infantile (diplegia, triplegia, tetraplegia) sottoposti rispettivamente a terapia con tuta Adeli e a trattamento convenzionale secondo il metodo Bobath. Il metodo Bobath (noto anche come NeuroDevelopmental Treatment, NDT) è un approccio riabilitativo personalizzato e multidisciplinare che mira a promuovere schemi motori funzionali più efficienti, migliorando il controllo posturale, la coordinazio-

ne e la partecipazione nelle attività quotidiane. Si tratta di un approccio flessibile, centrato sul bambino, che utilizza la comprensione della neuroplasticità e dell'apprendimento motorio per migliorare il movimento, la stabilità e la partecipazione funzionale. I risultati hanno mostrato piccoli miglioramenti statisticamente significativi nel breve termine in entrambi i gruppi, ma nessun effetto duraturo a 10 mesi di follow-up.

Secondo quanto riportato da M. Sabbadini, altri articoli, come quello di Anne E. Turner (2006) [49], mettono in evidenza numerose criticità metodologiche negli studi esistenti, segnalando in particolare la mancanza di chiarezza sui protocolli applicati e l'assenza di misurazioni oggettive dei risultati, e invitano pertanto alla prudenza nell'adozione del metodo Adeli nella pratica clinica, sottolineando la necessità di ulteriori ricerche rigorose e ben progettate. Un ulteriore contributo critico è fornito da Weisleder (2009) [50], che analizza il metodo Adeli insieme ad altre terapie alternative (come la delfinoterapia<sup>26</sup> e l'ossigenoterapia iperbarica<sup>27</sup>), sostenendo che tali approcci mancano di un fondamento basato sull'evidenza scientifica. La review di Papavasiliou (2009) [51] conclude che, nonostante alcuni effetti positivi sulla meccanica del movimento, non ci sono prove convincenti che il metodo migliori le capacità motorie globali. Inoltre, il programma richiede un impegno molto intenso da parte della famiglia, il che può avere effetti positivi sul bambino, ma al tempo stesso presenta un carico significativo per i genitori.

Durante una visita al Centro Adeli, M. Sabbadini ha potuto rilevare diversi elementi di forza del programma: l'ambiente accogliente, la buona attrezzatura, la motivazione e la collaborazione tra operatori e famiglie. L'intensità del trattamento, l'uso di dispositivi come il Gavisuit (che consente la verticalizzazione anche nei pazienti più gravi), la possibilità di avere più terapisti su un singolo paziente e i costi relativamente contenuti (circa 3000 € per due settimane) sono tutti fattori che rendono il centro attrattivo per molte famiglie. Tuttavia, non mancano le criticità: l'approccio è spesso centrato esclusivamente sugli aspetti motori, trascurando componenti cognitive e contestuali. In molti esercizi la

---

<sup>26</sup>La delfinoterapia, o Dolphin Assisted Therapy (DAT), è una terapia non convenzionale in cui i bambini con paralisi cerebrale interagiscono con delfini attraverso attività come nuoto, tocco o stimoli sonori per potenziare funzioni motorie, cognitive ed emotive. Tuttavia, le evidenze scientifiche a supporto di tale metodo sono molto limitate, spesso affette da gravi limiti metodologici (campioni ridotti e assenza di gruppo di controllo), rendendo impossibile trarre conclusioni affidabili sulla sua efficacia.

<sup>27</sup>L'ossigenoterapia iperbarica (OTI) consiste nel far respirare ai bambini con paralisi cerebrale ossigeno al 100% a pressioni elevate all'interno di una camera iperbarica, con lo scopo di stimolare potenziali cellule cerebrali "silenti" al fine di migliorare le funzioni motorie o cognitive. Tuttavia, ad oggi, le evidenze di alta qualità indicano che questa terapia non offre benefici maggiori rispetto all'aria pressurizzata (effetto placebo), mentre comporta un maggior rischio di eventi avversi (come barotrauma dell'orecchio medio e talvolta convulsioni), rendendo la sua efficacia non dimostrata scientificamente.

partecipazione attiva del bambino è limitata e la presa in carico appare generica, senza obiettivi specifici condivisi con la famiglia. La tuta non viene personalizzata per ogni esercizio e, in alcuni casi, i tiranti risultano del tutto inattivi. Alcune delle tecniche impiegate (come i fanghi o il brain feedback) mancano di un razionale scientifico solido. Inoltre, il centro non fornisce indicazioni strutturate per il proseguimento del trattamento a domicilio. Nonostante i dubbi sull'efficacia specifica della tuta Adeli, molte famiglie riportano comunque esperienze positive. Ciò è spesso legato non tanto al dispositivo in sé, quanto all'intensità della presa in carico e alla disponibilità di trattamenti non sempre accessibili nei centri convenzionati italiani, specialmente per pazienti con disabilità complesse.

Negli anni successivi al lavoro di M. Sabbadini [45], sono stati condotti ulteriori studi sul metodo Adeli, tra cui quello di Kim et al. (2016) [52], che ha integrato i dati relativi alle esperienze condotte da Bar-Haim (2006) [48] confrontando il trattamento di bambini con paralisi cerebrale infantile trattati con una combinazione di NDT (Neuro-Developmental Treatment) e metodo Adeli (AST, Adeli Suit Treatment), rispetto a quelli sottoposti esclusivamente a NDT secondo il concetto Bobath, per un periodo di 6 settimane. La riabilitazione intensiva con metodo Adeli ha dimostrato una forte correlazione con il miglioramento delle abilità motorie nei bambini affetti da paralisi cerebrale infantile. Indossare la tuta contribuisce a modificare le sensazioni propriocettive, riducendo i riflessi anomali tipici della PCI e favorendo movimenti muscolari più naturali e fluidi; allo stesso tempo, grazie all'aumento degli stimoli sensoriali provenienti dal corpo e dagli organi dell'equilibrio, aiuta a migliorare la postura, la stabilità e il tono muscolare. Grazie alla maggiore stabilità del tronco e alla correzione degli schemi motori alterati, la tuta Adeli favorisce l'allineamento del corpo e facilita uno schema di cammino più regolare. Sebbene la tuta non sia stata concepita specificamente per il rafforzamento muscolare, il suo utilizzo durante l'attività facilita il controllo del movimento e la stabilità corporea, in particolare stimolando l'equilibrio dinamico, che ha dimostrato un impatto più significativo sulla capacità di camminare rispetto all'allenamento statico. Il miglioramento della capacità di controllare l'equilibrio mentre si è in movimento si traduce quindi in una maggiore autonomia funzionale, permettendo ai pazienti di affrontare con più sicurezza le sfide della vita quotidiana e di muoversi in modo più sicuro e indipendente. Inoltre, il trattamento con la tuta influisce positivamente sul tono muscolare durante il movimento, offrendo al paziente una stimolazione tattile e propriocettiva intensa e contribuendo a riallineare le diverse parti del corpo. Infine, si ritiene che la tuta favorisca un miglior equilibrio anche attraverso una distribuzione più uniforme del peso corporeo e il rafforzamento dei muscoli antigravitari,

contribuendo altresì ad aumentare la velocità del cammino. Nei bambini del gruppo sottoposto a terapia combinata con tuta Adeli e NDT (AST/NDT), l'uso ripetuto dei muscoli antigravitari contro resistenza ha comportato miglioramenti significativi nella simmetria del cammino, nella velocità e nella cadenza. Questo risultato si deve al fatto che i vari segmenti corporei, collegati tramite gli elastici alla tuta, vengono stimolati a muoversi in modo più coordinato e armonico. Rispetto al gruppo trattato solo con NDT, nel gruppo AST/NDT sono stati riscontrati miglioramenti più evidenti nei parametri spazio-temporali del cammino (velocità, frequenza e lunghezza del passo), che sono indicatori sensibili anche a piccoli miglioramenti della deambulazione. Tuttavia, è importante interpretare questi dati con cautela, poiché le differenze tra i due gruppi potrebbero anche essere dovute al maggior tempo dedicato al trattamento e alla ripetizione degli esercizi nel gruppo AST/NDT. Sebbene l'uso della tuta Adeli sembri migliorare la postura e l'equilibrio, sono necessari ulteriori studi per capire se questi benefici si mantengono anche una volta che la tuta smette di essere indossata. Per questo, gli autori dello studio raccomandano di condurre ricerche a lungo termine sull'efficacia dell'AST. Va infine considerato che in questo studio ha partecipato un numero piuttosto limitato di bambini affetti da PCI (20 soggetti), per cui i risultati potrebbero non essere generalizzabili a tutta la popolazione. Inoltre, i due gruppi hanno ricevuto trattamenti diversi in termini di durata e intensità: la tuta è stata usata solo nel gruppo AST, mentre l'NDT è una tecnica di riabilitazione ampiamente utilizzata nei bambini con PCI. Di conseguenza, non è stato possibile isolare con certezza gli effetti specifici della sola terapia con metodo Adeli.

## 4.2 TheraSuit

La *TheraSuit*<sup>28</sup> è una tuta ortopedica sviluppata ad inizio anni 2000 da Richard e Izabela Koscielny, entrambi fisioterapisti e genitori di una bambina affetta da paralisi cerebrale. Come descritto dagli stessi coniugi Koscielny nel 2004 [53], avvalendosi delle proprie competenze professionali, hanno avviato un programma terapeutico intensivo fin dalla nascita prematura della figlia, avvenuta alla 28<sup>a</sup> settimana di gestazione. All'età di 6 anni, la bambina si trovava in sedia a rotelle e utilizzava un deambulatore di tipo K-walker<sup>29</sup> per

---

<sup>28</sup>Il nome "TheraSuit" deriva dalla fusione dei termini "Thera", abbreviazione di "therapy" (terapia), e "Suit", che indica una tuta o un indumento.

<sup>29</sup>Il K-walker è un tipo di deambulatore pediatrico, progettato per supportare bambini con difficoltà motorie nella postura eretta e nella deambulazione. Questo dispositivo è caratterizzato da un telaio robusto

brevi spostamenti, senza manifestare significativi progressi verso una maggiore autonomia motoria. Durante un viaggio in Europa finalizzato alla sperimentazione della terapia basata sull'Adeli Suit, la bambina ha compiuto i suoi primi passi immediatamente dopo la prima seduta, evidenziando un importante punto di svolta nel suo percorso riabilitativo. Tuttavia, a causa della difficoltà di reperimento e dell'ingombro del dispositivo originale, i Koscielny decisero di progettarne una versione migliorata e più funzionale, che potesse integrare efficacemente il trattamento terapeutico. Nel 2001 hanno così brevettato la TheraSuit, la prima tuta ortopedica utilizzata negli Stati Uniti pensata per la riabilitazione di disturbi neurologici e sensoriali. La TheraSuit, rappresentata in *Figura 4.3*, è un'ortesi dinamica, morbida e propriocettiva, composta da giubbotto, pantaloncini, ginocchiere e accessori per i piedi realizzati con un tessuto leggero e traspirante (solitamente cotone canvas). La particolarità di questa tuta risiede nelle bande elastiche di gomma che, fissate tramite appositi ganci posizionati strategicamente in corrispondenza di diversi gruppi muscolari, permettono di facilitare o inibire l'attivazione di specifici muscoli, aiutando il corpo del paziente ad assumere una postura più corretta e vicina a quella fisiologica.

La TheraSuit è registrata presso la Food and Drug Administration<sup>30</sup> (FDA) degli Stati Uniti ed è utilizzata in più di 30 cliniche e ospedali, inclusi importanti centri pediatrici. Viene impiegata per trattare pazienti con paralisi cerebrale, emiplegia, ictus, ritardi dello sviluppo, atassia, atetosi, traumi cranici e molte altre condizioni neurologiche, offrendo anche un valido supporto a chi soffre di disturbi sensoriali e autismo. Grazie alla pressione mirata e costante esercitata dalle bande elastiche, la TheraSuit ripristina la propriocezione profonda, cioè la capacità del corpo di percepire la posizione delle articolazioni, dei legamenti e dei muscoli nello spazio. Questa stimolazione aiuta i pazienti a imparare o riapprendere i corretti schemi motori, migliorando la stabilità del tronco e permettendo movimenti più fluidi e coordinati degli arti superiori e inferiori. Il progresso più significativo avviene a livello del sistema vestibolare, che è fondamentale per mantenere l'equilibrio e la postura, in quanto riceve informazioni dalla posizione del corpo nello spazio e regola il tono muscolare necessario per eseguire i movimenti. Nei pazienti con disturbi neurologici spesso si crea un forte squilibrio tra i muscoli anteriori e posteriori del tronco, che porta a processi compensatori che attivano muscoli che normalmente non dovrebbero entrare in

---

con ruote, impugnature regolabili e un supporto posteriore che incoraggia una postura corretta durante il cammino.

<sup>30</sup>La Food and Drug Administration (FDA) è l'agenzia governativa degli Stati Uniti incaricata di regolamentare e controllare la sicurezza e l'efficacia di alimenti, farmaci, dispositivi medici, cosmetici e altri prodotti destinati alla tutela della salute pubblica.



*Figura 4.3: TheraSuit.  
Tratto da: Believe Therapy. TheraSuit. [54].*

gioco in determinate posizioni o movimenti, causando posture anomale. Ad esempio, è frequente osservare bambini con paralisi cerebrale rilassati quando sono sdraiati, ma che si irrigidiscono completamente dalla punta dei piedi alla testa per cercare di mantenere l'equilibrio non appena vengono messi in piedi. Gli arti superiori assumono posizioni patologiche e il tronco debole tende a estendersi eccessivamente, originando una reazione a catena che induce gli arti inferiori a compensare con una flessione plantare rigida, costringendo il peso a poggiare sulle punte dei piedi anziché sui talloni e aumentando così il tono muscolare del polpaccio. Inoltre, quando il corpo si trova in questa posizione, con gli arti superiori sollevati e piegati, tutto il corpo si inclina in avanti, spostando il centro di gravità e rendendo estremamente difficile mantenere un equilibrio stabile e muovere correttamente il peso. La TheraSuit, fornendo una stabilizzazione esterna efficace

e un supporto propriocettivo, aiuta a correggere questi schemi disfunzionali, facilitando movimenti più fluidi e naturali e un miglior controllo posturale.

Nel lavoro condotto da Baptista et al. (2023) [55] è stato indagato l'effetto del metodo TheraSuit sulla funzione motoria grossolana nei bambini affetti da disturbo dello spettro autistico (ASD, Autism Spectrum Disorder). I risultati dello studio hanno evidenziato come questo approccio terapeutico possa avere un impatto positivo e significativo anche in bambini con ASD, suggerendo un potenziale beneficio oltre alle condizioni neuromotorie per cui è già stato impiegato. Il metodo TheraSuit impiegato si basa sull'utilizzo della tuta, talvolta combinata con una struttura modulare detta "gabbia", in modo da fornire un supporto esterno controllato e mirato che stimola attivamente lo sviluppo delle capacità motorie grossolane, favorisce il rafforzamento muscolare, facilita l'allungamento muscolare (stretching) e migliora l'equilibrio e l'esecuzione dei compiti funzionali. Questo tipo di intervento è già stato impiegato con risultati promettenti anche in altri disturbi del neurosviluppo. Lo studio ha coinvolto nove bambini di sesso maschile, con un'età media di circa 42 mesi (3 anni e mezzo), tutti con diagnosi di ASD. I partecipanti hanno seguito il protocollo intensivo TheraSuit per un periodo di quattro settimane, con un totale di venti sedute. Al fine di misurare in maniera oggettiva i cambiamenti nella funzione motoria grossolana prima e dopo il trattamento, è stata utilizzata la scala GMFM-88 (Gross Motor Function Measure), una scala ampiamente validata per la valutazione delle capacità motorie in bambini con disturbi neuromotori. La scala GMFM-88 si basa sull'osservazione diretta delle capacità motorie del bambino e comprende 88 esercizi suddivisi in cinque aree funzionali: controllo del tronco, cambiamenti di posizione, mantenimento della stazione eretta, cammino, corsa e salti. Questa scala consente di monitorare i progressi nel tempo, offrendo una misura affidabile del miglioramento funzionale in seguito a interventi riabilitativi. I dati raccolti hanno evidenziato miglioramenti in diversi parametri della scala. In particolare, nell'area che valuta le abilità legate alla posizione seduta, i bambini hanno mostrato progressi significativi in compiti come il passaggio alla posizione seduta, l'inclinazione del tronco in avanti, il ritorno alla posizione eretta, la rotazione del tronco senza supporto e il passaggio dalla posizione seduta a quella a quattro zampe. Miglioramenti sono stati osservati anche nella dimensione che valuta il controllo posturale e il movimento degli arti superiori, dove i bambini hanno acquisito abilità come il passaggio dalla posizione prona a quella a quattro zampe e la capacità di raggiungere oggetti posti al di sopra delle spalle. In alcuni casi, come nella capacità di sollevarsi da una panca senza assistenza, sono stati raggiunti i punteggi massimi. Le maggiori difficoltà sono emerse

nelle prove che valutano le abilità statiche e dinamiche in ortostatismo, ovvero nella capacità di mantenere la posizione eretta e di muoversi in piedi con stabilità e controllo. Tali aree rappresentano infatti le competenze motorie più complesse e spesso risultano particolarmente compromesse nei bambini con disturbi del neurosviluppo. Nel complesso, i risultati dello studio suggeriscono che il metodo TheraSuit possa rappresentare una risorsa terapeutica promettente per migliorare la funzione motoria grossolana nei bambini con ASD. Tuttavia, gli autori sottolineano la necessità di ulteriori ricerche maggiormente sviluppate e precise al fine di fornire evidenze più robuste sull'efficacia del metodo all'interno di questa specifica popolazione clinica.

Secondo la revisione sistematica condotta da Almeida et al. (2017) [56], l'utilizzo delle tute terapeutiche nei bambini affetti da paralisi cerebrale è stato in generale associato a un miglioramento dell'allineamento posturale e della cinematica del passo, in particolare durante il periodo in cui i dispositivi venivano indossati dai soggetti. Tuttavia, l'analisi complessiva degli studi esaminati ha evidenziato una qualità metodologica complessivamente bassa, rendendo debole la raccomandazione clinica sull'impiego delle tute nel trattamento delle limitazioni motorie e funzionali. In particolare, non sono stati rilevati effetti significativi derivanti dall'uso isolato dell'Adeli Suit o della TheraSuit, ovvero in assenza di un protocollo terapeutico intensivo associato. Al contrario, quando le tute vengono impiegate come parte di programmi riabilitativi ad alta intensità, come i protocolli AST (Adeli Suit Therapy) o TSM (TheraSuit Method), si osservavano risultati decisamente più promettenti. Tuttavia, gli autori puntualizzano come tali miglioramenti potrebbero essere attribuibili non tanto all'uso della tuta in sé, quanto piuttosto all'intensità dell'intervento riabilitativo. La revisione conclude quindi che le evidenze disponibili al momento della redazione non permettono di trarre conclusioni definitive circa l'efficacia specifica delle tute terapeutiche, né di determinare con certezza vantaggi e svantaggi dei protocolli AST e TSM nel miglioramento della funzione motoria grossolana nei bambini con paralisi cerebrale. La principale limitazione metodologica della revisione riguarda la restrizione linguistica adottata per la selezione degli studi: sono stati inclusi solamente articoli redatti in lingua inglese, portoghese o spagnola. Ciò ha comportato l'esclusione di almeno sette studi pubblicati in lingua russa potenzialmente rilevanti, questo nonostante la terapia con tute riabilitative risulti particolarmente diffusa e sviluppata nei Paesi dell'Europa orientale.

In conclusione, sebbene le evidenze scientifiche attualmente disponibili non permettano ancora di affermare con certezza l'efficacia definitiva del metodo TheraSuit, soprattutto in assenza di protocolli intensivi o in presenza di studi con limitazioni metodologiche,

i risultati preliminari ottenuti da ricerche recenti suggeriscono un potenziale terapeutico significativo. La possibilità di intervenire in modo mirato sulla postura, sul tono muscolare e sulla funzione motoria grossolana, anche in gruppi clinici complessi come i bambini con disturbo dello spettro autistico, apre la strada ad interessanti prospettive per il futuro della riabilitazione neurologica pediatrica. Il metodo TheraSuit, infatti, rappresenta oggi una delle proposte più innovative nell'ambito della terapia neuromotoria, grazie alla sua capacità di integrare stimolazione propriocettiva, supporto posturale e attività funzionali all'interno di un unico dispositivo. In un contesto in cui la ricerca scientifica al riguardo è ancora in evoluzione e in cui permangono alcune incertezze metodologiche, è importante accogliere con prudente ottimismo le potenzialità offerte da strumenti come la TheraSuit. Investire in ulteriori studi, con disegni sperimentali rigorosi e campioni più numerosi, sarà fondamentale per confermare l'utilità clinica di questo metodo e per potenziarne l'integrazione nei percorsi riabilitativi di routine.

## 5. Conclusioni

Oggetto della presente tesi è l'affascinante tema degli adattamenti fisiologici sperimentati dall'organismo umano in condizioni di microgravità. Prendendo come riferimento alcuni testi fondamentali, arricchiti da una descrizione aggiornata e completa basata su studi scientifici recenti e review, è stato riservato un particolare approfondimento ai problemi muscolari, ossei e cardiovascolari, e alle strategie di contromisura adottate per affrontarli e limitarne gli effetti negativi. Tra queste, è stato dato risalto alle tute a distribuzione di carico, dispositivi nati con l'obiettivo di riprodurre gli effetti della gravità terrestre e di supportare il sistema muscoloscheletrico degli astronauti. Tali indumenti rappresentano ad oggi una delle soluzioni più promettenti per contrastare il decondizionamento fisiologico in ambiente spaziale. Nello specifico, si è approfondita l'evoluzione tecnica e progettuale delle tute, illustrando le principali soluzioni ingegneristiche adottate per realizzare questi dispositivi. Particolare rilievo è stato dato ai materiali e alle tecniche di realizzazione utilizzati, presentando le tappe fondamentali nel loro sviluppo.

L'analisi ha preso avvio dalla Penguin Suit, la prima tuta a distribuzione di carico ideata in ambito sovietico, che ha rappresentato un importante punto di partenza nella ricerca di contromisure agli effetti della microgravità. Pur con evidenti limiti, questa tuta ha introdotto concetti fondamentali che hanno posto le basi per sviluppi successivi, come la GLCS (Gravity Loading Countermeasure Suit), una versione più moderna ed efficace, progettata per correggere le criticità emerse nei modelli precedenti e valorizzarne gli aspetti positivi. La GLCS, infatti, riesce a combinare al meglio funzionalità, comfort e adattabilità al corpo umano, rappresentando un passo avanti significativo nell'evoluzione di queste tecnologie. Allo stesso tempo, si è cercato di mettere in luce sia i progressi più rilevanti raggiunti nel tempo, sia le criticità ancora presenti, offrendo così una visione equilibrata che apre lo sguardo alle potenzialità di sviluppo e alle sfide che attendono la ricerca futura in questo campo.

Partendo da questa base, la tesi ha quindi approfondito le possibili applicazioni di queste tecnologie nel campo clinico, in particolare nel settore della riabilitazione neuromotoria. L'idea di trasferire strumenti e conoscenze sviluppate per le missioni spaziali al trattamento di patologie terrestri è particolarmente stimolante e apre nuove prospettive per migliorare

la qualità della vita di molte persone. A tal fine, è stata condotta un'indagine accurata e aggiornata di vari studi scientifici, che ha permesso di delineare con chiarezza sia i potenziali benefici che le criticità ancora da superare. L'analisi è partita dalla tuta Adeli, diretta evoluzione della Penguin Suit, descrivendone i principali utilizzi in ambito clinico ed esaminando le evidenze scientifiche disponibili a supporto della sua efficacia. Successivamente, l'attenzione si è spostata sulla TheraSuit, una proposta più recente e innovativa, che sembra offrire risultati più efficaci rispetto al modello precedente. Pur trattandosi di dispositivi ancora oggetto di studio, i primi dati emersi sono incoraggianti e lasciano intravedere sviluppi promettenti, soprattutto se accompagnati da ulteriori ricerche e nuovi approcci progettuali.

Ad ogni modo, molto lavoro rimane da fare. Le sfide sono complesse, sia dal punto di vista tecnologico che clinico, ma il percorso avviato si presenta stimolante e carico di opportunità. La strada da percorrere è ancora lunga e i risultati richiederanno tempo, impegno e collaborazione. Ma la ricerca deve continuare con grande fiducia e speranza, e in ambito spaziale, dove queste tecnologie potranno facilitare le future missioni interplanetarie, e in ambito clinico, dove potrebbero davvero contribuire a migliorare la vita quotidiana di tanti pazienti. Il dialogo tra ricerca spaziale e applicazioni cliniche si configura esempio virtuoso di come la scienza possa trasformare conoscenze e innovazioni nate in contesti estremamente diversi in benefici concreti e diffusi nella vita quotidiana, dimostrando ancora una volta che ogni passo avanti nella comprensione del nostro mondo può aprire porte insospettate per migliorare il benessere di tutti.

A sigillo di questo mio lavoro, una citazione latina raggiunge una sintesi proverbiale e simbolica che vede nelle asperità delle sfide umane il passaggio obbligato per giungere alla meta sublime delle stelle:

*PER ASPERA AD ASTRA*



---

## 6. Bibliografia

### Libri

- [1] Guido Ferretti e Carlo Capelli. *Dagli abissi allo spazio: ambienti e limiti umani*. Edizioni Ermes, 2008.
- [23] S. E. Churchill. *Fundamentals of Space Life Sciences*. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1997.

### Articoli scientifici

- [2] Dieter Blottner et al. «Skeletal muscle deconditioning, nitric oxide (NO) biomarker, and exercise countermeasure-five years of bed rest studies». In: *Journal of gravitational physiology* (2006).
- [4] Andrew G. Lee et al. «Spaceflight associated neuro-ocular syndrome (SANS) and the neuro-ophthalmologic effects of microgravity: a review and an update». In: *NPJ Microgravity* 6.1 (2020).
- [5] Karina Marshall-Goebel et al. «Internal jugular vein volume during head-down tilt and carbon dioxide exposure in the SPACECOT study». In: *Aerospace Medicine and Human Performance* 89.4 (2018).
- [6] John B. West. «Historical perspectives: Physiology in microgravity». In: *Journal of Applied Physiology* 89.1 (2000).
- [7] Janelle Hicks et al. «The impact of microgravity on immunological states». In: *Immunohorizons* 7.10 (2023).
- [8] Peter H. U. Lee et al. «Factors mediating spaceflight-induced skeletal muscle atrophy». In: *American Journal of Physiology-Cell Physiology* 322.3 (2022).
- [9] Peter H. U. Lee e Herman H. Vandenburg. «Skeletal muscle atrophy in bioengineered skeletal muscle: a new model system». In: *Tissue Engineering Part A* 19.19-20 (2013).

- 
- [10] Pietro E. di Prampero e Marco V. Narici. «Muscles in microgravity: from fibres to human motion». In: *Journal of biomechanics* 36.3 (2003).
- [11] Scott Trappe et al. «Human single muscle fibre function with 84 day bed-rest and resistance exercise». In: *The journal of physiology* 557.2 (2004).
- [12] Jeffrey J. Widrick et al. «Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres». In: *The journal of physiology* 516.Pt 3 (1999).
- [13] Guglielmo Antonutto, D. Linnarsson e Pietro E. Di Prampero. «On-Earth evaluation of neurovestibular tolerance to centrifuge simulated artificial gravity in humans». In: *The physiologist* 36.1 Suppl (1993).
- [14] Guido Ferretti et al. «Maximal instantaneous muscular power after prolonged bed rest in humans». In: *Journal of applied physiology* 90.2 (2001).
- [15] A. I. Grigoriev et al. «Medical results of the Mir year-long mission.» In: *The Physiologist* 34.1 Suppl (1991).
- [16] F. Goubel. «Changes in mechanical properties of human muscle as a result of spaceflight». In: *International journal of sports medicine* 18.S 4 (1997).
- [17] Todd A. Trappe et al. «Microgravity-induced skeletal muscle atrophy in women and men: implications for long-duration spaceflights to the Moon and Mars». In: *Journal of Applied Physiology* 135.5 (2023).
- [18] Natalie Baecker et al. «Bone resorption is induced on the second day of bed rest: results of a controlled crossover trial». In: *Journal of applied physiology* 95.3 (2003).
- [19] Scott M. Smith et al. «Men and women in space: bone loss and kidney stone risk after long-duration spaceflight». In: *Journal of Bone and Mineral Research* 29.7 (2014).
- [20] Jeffrey S. Willey et al. «Space radiation and bone loss». In: *Gravitational and space biology bulletin: publication of the American Society for Gravitational and Space Biology* 25.1 (2011).
- [21] Shamas Ul Ebad Khan et al. «Space Physiology and Technology: Musculoskeletal Adaptations, Countermeasures, and Opportunities for Wearable Systems». In: *arXiv* (2024).

- [22] Jeannie F. Bailey et al. «From the international space station to the clinic: how prolonged unloading may disrupt lumbar spine stability». In: *The Spine Journal* 18.1 (2018).
- [25] Naoto Shiba et al. «Electrically stimulated antagonist muscle contraction increased muscle mass and bone mineral density of one astronaut-initial verification on the international space station». In: *PLOS ONE* 10.8 (2015).
- [26] Rachel F. Bellisle e D. Newman. «Countermeasure suits for spaceflight». In: *50th International Conference on Environmental Systems* 315 (2020).
- [27] Jojo V. Sayson et al. «Back pain in space and post-flight spine injury: mechanisms and countermeasure development». In: *Acta Astronautica* 86 (2013).
- [28] Charles S. Layne e Katharine E. Forth. «Plantar stimulation as a possible countermeasure to microgravity-induced neuromotor degradation». In: *Aviation, space, and environmental medicine* 79.8 (2008).
- [29] C. S. Layne et al. «The use of in-flight foot pressure as a countermeasure to neuromuscular degradation». In: *Acta Astronautica* 42.1-8 (1998).
- [30] Rob Hunt. «Human Space Flight - An essay». In: *Scubayorp Outreach, Graduate Certificate in Astronomy* (2011).
- [32] Katsumasa Yamashita-Goto et al. «Maximal and submaximal forces of slow fibers in human soleus after bed rest». In: *Journal of Applied Physiology* 91.1 (2001).
- [33] James M. Waldie e Dava J. Newman. «A gravity loading countermeasure skinsuit». In: *Acta Astronautica* 68.7-8 (2011).
- [36] Brandon Doan et al. «Evaluation of a lower-body compression garment». In: *Journal of sports sciences* 21.8 (2003).
- [37] Theresa Bernhardt e Gregory S. Anderson. «Influence of moderate prophylactic compression on sport performance». In: *The Journal of Strength & Conditioning Research* 19.2 (2005).
- [39] Rachel Bellisle et al. «The Mk-7 gravity loading countermeasure skinsuit: Evaluation and preliminary results». In: *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)* (2022).
- [41] Julia Attias et al. «The Gravity-Loading countermeasure Skinsuit (GLCS) and its effect upon aerobic exercise performance». In: *Acta Astronautica* 132 (2017).

- [42] Alexander Breen et al. «Effects of a microgravity SkinSuit on lumbar geometry and kinematics». In: *European Spine Journal* 32.3 (2023).
- [44] Richard A. Stabler et al. «Impact of the Mk VI SkinSuit on skin microbiota of terrestrial volunteers and an International Space Station-bound astronaut». In: *NPJ Microgravity* 3.1 (2017).
- [45] M. Sabbadini. «Riflessioni sul metodo Adeli e sulla tuta spaziale». In: *Rivista della Società Italiana di Neuropsichiatria dell'Infanzia e dell'Adolescenza* 19.1 (2011).
- [48] Simona Bar-Haim et al. «Comparison of efficacy of Adeli suit and neurodevelopmental treatments in children with cerebral palsy». In: *Developmental Medicine and Child Neurology* 48.5 (2006).
- [49] Anne E. Turner. «The efficacy of Adeli suit treatment in children with cerebral palsy». In: *Developmental medicine and child neurology* 48.5 (2006).
- [50] Pedro Weisleder. «Unethical Prescriptions: Alternative Therapies for Children With Cerebral Palsy». In: *Clinical Pediatrics* 49.1 (2009).
- [51] A. S. Papavasiliou. «Management of motor problems in cerebral palsy: A critical update for the clinician». In: *European Journal of Paediatric Neurology* 13.5 (2009).
- [52] Mi-Ra Kim, Byoung-Hee Lee e Dae-Sung Park. «Effects of combined Adeli suit and neurodevelopmental treatment in children with spastic cerebral palsy with gross motor function classification system levels I and II». In: *Hong Kong Physiotherapy Journal* 34.1 (2016).
- [53] Izabela Koscielny e Richard Koscielny. «TheraSuit - Soft Dynamic Proprioceptive Orthotic». In: *Cerebral Palsy Magazine* (2004).
- [55] Pedro Porto Alegre Baptista et al. «Positive impact of the Therasuit method on gross motor function of children with autism spectrum disorder: Case series». In: *Frontiers in Neurology* 14 (2023).
- [56] Kênea M. Almeida et al. «Effects of interventions with therapeutic suits (clothing) on impairments and functional limitations of children with cerebral palsy: a systematic review». In: *Brazilian Journal of Physical Therapy* 21.6 (2017).

## Brevetti

- [35] James Murray Andrew Waldie e Dava J. Newman. «Gravity-loading body suit». US Patent 8,769,712. Lug. 2014.

## Siti web

- [3] Wikipedia. *Reduced-gravity aircraft*. 2025. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Reduced-gravity\\_aircraft](https://en.wikipedia.org/wiki/Reduced-gravity_aircraft) (visitato il giorno 08/08/2025).
- [24] European Space Agency. *Advanced Resistive Exercise Device (ARED)*. 2025. URL: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Node-3\\_Cupola/advanced\\_Resistive\\_Exercise\\_Device](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Node-3_Cupola/advanced_Resistive_Exercise_Device) (visitato il giorno 08/08/2025).
- [31] National Aeronautics and Space Administration. *Koichi Wakata Wears the Penguin-3 Antigravity Suit*. 2014. URL: <https://www.nasa.gov/image-article/koichi-wakata-wears-penguin-3-antigravity-suit/> (visitato il giorno 08/08/2025).
- [34] European Space Agency. *Suit up for Skinsuit*. 2014. URL: [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Astronauts/Suit\\_up\\_for\\_Skinsuit](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Astronauts/Suit_up_for_Skinsuit) (visitato il giorno 08/08/2025).
- [38] MIT Space Exploration Initiative. *The Gravity Loading Countermeasure Skinsuit*. 2025. URL: <https://www.explore-space.mit.edu/catalog/gravity-loading-countermeasure-skinsuit> (visitato il giorno 08/08/2025).
- [40] Wikipedia. *Warp knitting*. 2025. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Warp\\_knitting](https://en.wikipedia.org/wiki/Warp_knitting) (visitato il giorno 08/08/2025).
- [43] RMIT University. *Locally-designed space suits to support astronauts on mission to Mars*. 2020. URL: <https://www.rmit.edu.au/news/all-news/2020/jun/space-suit-mars> (visitato il giorno 08/08/2025).
- [46] Adeli Medical Center. *Die Auswirkungen der Rehabilitation im ADELI-Anzug sind vielfach höher*. 2023. URL: <https://adelicenter.com/it/informationen/aktuelles/die-auswirkungen-der-rehabilitation-im-adeli-anzug-sind-vielfach-hoehler/> (visitato il giorno 08/08/2025).

- [47] ABC Law Centers. *Treating Cerebral Palsy with Adeli Suit Therapy*. 2025. URL: <https://www.abclawcenters.com/practice-areas/cerebral-palsy/treatments-and-therapies/adeli-suit-therapy/> (visitato il giorno 08/08/2025).
- [54] Believe Pediatric Physical Therapy. *TheraSuit*. 2025. URL: <https://www.believetherapy.com/therasuit> (visitato il giorno 08/08/2025).