

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**Studio delle forze e degli angoli articolari
durante l'esecuzione della posizione yoga
"cane a testa in giù" (e le sue varianti) in
soggetti di esperienza diversa**

Relatore:
Prof. Armando Bazzani

Presentata da:
Lorenzo Chapel

Correlatore:
Prof. Laura Bragonzoni

Correlatore:
Dott. Stefano Di Paolo

Anno Accademico 2018/2019

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
CAPITOLO 1 – YOGA.....	5
1.1 L’induismo.....	5
1.2 Lo yoga.....	6
1.3 Le asana	7
1.4 La posizione “adho mukha svanasana”	10
CAPITOLO 2 – BIOMECCANICA	12
2.1 Dalla meccanica alla biomeccanica	12
2.2 L’anatomia di base dell’apparato locomotore	13
2.3 L’anatomia di Adho mukha svanasana.....	14
2.4 Il modello muscoloscheletrico.....	15
CAPITOLO 3 – MOTION CAPTURE.....	19
3.1 Pedana di forza	19
3.1.1 La pedana di forza P-6000 BTS Bioengineering	21
3.2 Sensori inerziali	22
3.2.1 Accelerometro	23
3.2.2 Giroscopio	23
3.2.3 Magnetometro	25
3.2.4 Il sistema di sensori inerziali MVN-Awinda Xsens.....	26
CAPITOLO 4 – MATERIALI E METODI.....	27
4.1 Soggetti.....	27
4.2 Strumentazione	28
4.2.1 Struttura per effettuare le posizioni.....	28
4.2.2 Sistema di sensori inerziali.....	30
4.3 Acquisizione dati	34
4.4 Catalogazione dati	41
4.5 Analisi dati.....	43
CAPITOLO 5 – RISULTATI	47
5.1 Confronti intra-soggetto.....	47
5.1.1 Variazione dell’altezza dell’appoggio delle mani sulla struttura: angoli articolazione spalle – esperto	47
5.1.2 Variazione dell’altezza dell’appoggio delle mani sulla struttura: angoli articolazione spalle – intermedio.....	52

5.1.3	Variazione dell'altezza dell'appoggio delle mani sulla struttura: angoli articolazione spalle – principiante.....	56
5.1.4	Variazione dell'altezza e dell'inclinazione dell'appoggio delle mani sulla struttura: forze – soggetto esperto	60
5.2	Confronti inter-soggetto.....	66
5.2.1	Variazione dell'altezza dell'appoggio delle mani sulla struttura: forze	66
5.2.2	Variazione dell'altezza dell'appoggio delle mani sulla struttura: angoli articolazione lombosacrale.....	71
5.2.3	Variazione dell'altezza dell'appoggio dei piedi sulla struttura: forze..	73
CAPITOLO 6 – DISCUSSIONE		79
6.1	Confronti intra-soggetto.....	79
6.1.1	Variazione dell'altezza dell'appoggio delle mani sulla struttura: angoli articolazione spalle.....	79
6.1.2	Variazione dell'altezza e dell'inclinazione dell'appoggio delle mani sulla struttura: forze – soggetto esperto	81
6.2	Confronti inter-soggetto.....	82
6.2.1	Variazione dell'altezza dell'appoggio delle mani sulla struttura: forze	82
CONCLUSIONE		86
BIBLIOGRAFIA		88

INTRODUZIONE

Nella letteratura scientifica biomedica dedicata allo yoga sono presenti solo ricerche e articoli che indagano gli effetti di questa disciplina su tematiche estremamente particolari. Argomenti comuni sono, per esempio, l'utilizzo di determinati muscoli durante l'esecuzione di una posizione yoga, o i benefici che a soggetti con specifiche patologie possono derivare da una pratica costante. Non sono presenti, quindi, studi che analizzano l'importanza dell'esperienza di un praticante e dei suoi effetti nell'esecuzione di una posizione. Mancano inoltre ricerche che approfondiscono un altro aspetto fondamentale della pratica yoga: le varianti. Quest'ultime sono variazioni della posizione originale ed il loro scopo è quello di facilitarne l'esecuzione (per i soggetti con difficoltà, ad esempio) o di permettere al praticante esperto di affinare la pratica.

Lo scopo del presente studio, quindi, è quello di osservare come tre praticanti con esperienza diversa eseguono una determinata posizione yoga, nel nostro caso Adho Mukha Svanasana, (dal sanscrito: "posizione del cane a testa in giù") e le sue varianti. Queste consistono nelle variazioni di altezza ed inclinazione della superficie in cui poggiano gli arti superiori o inferiori.

I capitoli introduttivi sono dedicati alla presentazione della disciplina dello yoga, dei concetti base della biomeccanica e degli strumenti utilizzati comunemente per studiare dinamicamente e cinematicamente il movimento umano. Segue, quindi, il capitolo dedicato all'esposizione dei materiali e dei metodi utilizzati per acquisire i dati e quello in cui sono mostrati i risultati, ovvero i grafici e le tabelle che confrontano le misure di ogni soggetto e variante. Infine, un ultimo capitolo è dedicato alla discussione qualitativa dei risultati ottenuti.

CAPITOLO 1 – YOGA

1.1 L'INDUISMO¹

Prima di introdurre la filosofia dello yoga, conviene parlare brevemente del substrato sociale e religioso indiano: l'Induismo. Questo può essere indicato come un complesso organismo formato da numerose sette e filosofie che comprendono diverse cerimonie e il culto di divinità. Questa sfaccettata tradizione spirituale rispecchia la complessità geografica, razziale, linguistica e culturale del vasto subcontinente indiano. La fonte teorica dell'Induismo sono i *Veda*, una raccolta di antiche scritture composte tra il 1500 e il 500 a.C. in sanscrito, il linguaggio sacro dell'India. Tuttavia le masse indiane nei secoli non hanno conosciuto i precetti dell'Induismo grazie ai *Veda*, ma attraverso un gran numero di racconti popolari raccolti in componimenti epici. Uno di questi, il *Mahabharata*, contiene il famoso poema della *Bhagavadgītā*, il testo religioso più amato di tutta l'India, con un'importanza paragonabile a quella del *Vangelo*. Si tratta di un dialogo tra il guerriero *Arjuna* e il dio *Krsna*, il quale spiega, camuffato da auriga, le verità dell'Induismo al suo compagno sconvolto dalla guerra familiare che è costretto a combattere. L'esortazione che segue, pronunciata dal dio ad *Arjuna*, svela che lo sfondo della battaglia tra clan non è altro che una metafora della battaglia dell'uomo in cerca dell'illuminazione:

Così dunque, con la spada della tua propria conoscenza, tronca questo dubbio nato dall'ignoranza che risiede nel tuo cuore, fai ricorso allo yoga, disciplina pratica: in piedi, o discendente di Bharata! (Bhagavadgītā 4, 42)

Il significato di questo messaggio riassume l'idea centrale dell'Induismo: la moltitudine di cose ed eventi che ci circondano non sono altro che differenti manifestazioni della stessa realtà ultima ed indescrivibile, detta Spirito Universale (in sanscrito, *Brahman*). L'uomo però confonde questa miriade di forme per la verità, quindi la liberazione da questa illusione di frammentarietà è diventata lo scopo di tutte

¹ [1] Fritjof CAPRA, *Il Tao della fisica*, Adelphi, 1989; [2] *Bhagavadgītā*, a cura di Anne-Marie ESNOUIL, Adelphi, 1991.

le filosofie induiste. Ognuna di queste affina da secoli concetti ed esercizi per raggiungere la meta; ed il fatto che spesso emergano contraddizioni tra le diverse scuole non turba gli Indù, poiché la realtà ultima trascende per definizione la logica umana. Esistono sei scuole di pensiero ortodosse indiane, ed una di queste è lo yoga.

1.2 LO YOGA²

Il pensiero dello yoga fu collezionato, coordinato e ridotto in cento-novantasei aforismi da *Patanjali*, una figura avvolta dal mistero vissuta tra il 500 e il 200 a.C.. Le prime massime di questa raccolta, intitolata *Yoga Sutra*, descrivono subito cosa sia lo yoga e quale ne sia lo scopo.

Lo yoga è la soppressione dei movimenti nella coscienza [I.2]

La parola Yoga deriva dalla radice sanscrita “Yug” che significa *unire, soggiogare*. La sua funzione infatti è quella di impedire alla mente inquieta di riconoscersi nelle varie forme della molteplicità terrena.

Allora il veggente dimora nello splendore suo proprio [I.3]

Una volta che l'uomo non è più disturbato da una mente irrequieta può contemplare la sua vera natura, ovvero l'anima, e scoprire che essa coincide con lo Spirito Universale. Raggiunta la comunione tra corpo, mente e anima (detta anche Illuminazione), l'uomo è ora capace di guardare alla vita con equanimità in tutti i suoi aspetti.

Dalla *Bhagavadgītā*, infatti:

L'asceta nel quale ogni male è scomparso, che continuamente si disciplina e si unifica, attinge agevolmente la felicità infinita: confondersi col Brahman [Spirito Universale] (6, 28).

² [3] B.K.S IYENGAR, *Commento agli yoga sutra di Patanjali*, Edizioni Mediterranee, 2010; [2] *Bhagavadgītā*, a cura di Anne-Marie ESNOUIL, Adelphi, 1991.

Sè stesso residente in tutti gli esseri, tutti gli esseri residenti in lui: ecco ciò che contempla chi ha l'essere unificato dallo yoga e volge a tutte le cose uno sguardo uguale (6, 29).

Compreso il punto di partenza e quello di arrivo, non rimane che capire la strada da percorrere. Essendo per lo yoga i giusti mezzi importanti quanto il fine, poco distante dai precedenti viene enunciato l'aforisma di cui sotto.

*La pratica e il distacco sono i mezzi per calmare i movimenti della coscienza
[I.12]*

La pratica consiste nello sforzo di ridurre la mente al silenzio stabile e contemplativo. Il distacco è la rinuncia delle molteplicità che sono riconosciute come effimere. Questi due aspetti dello yoga possono essere interpretati rispettivamente come il percorso evolutivo e il percorso involutivo. Derivano dal primo: *yama*, *niyama*, *asana* e *pranayama*; mentre dal secondo: *pratyahara*, *dharana*, *dhyana* e *samadhi*. Queste discipline sono dette gli "otto petali" dello yoga. *Yama* consiste nei comandamenti morali universali; *niyama* nelle pratiche e osservanze; *asana* nella posizione stabile del corpo; *pranayama* nel controllo ritmico del respiro; *pratyahara* nel controllo dei sensi; *dharana* nella concentrazione; *dhyana* nella meditazione; e infine, *samadhi* nello stato di assorbimento totale in cui colui che medita diventa uno con l'oggetto della meditazione, ovvero lo Spirito Universale. Di particolare interesse per il nostro studio è la disciplina *asana*.

1.3 LE ASANA³

Patanjali, negli *Yoga Sutra*, dedica alla definizione di *asana* solo un aforisma:

L'asana è perfetta stabilità del corpo, costanza dell'intelligenza e buona disposizione dello spirito [II.46].

³ [3] B.K.S IYENGAR, *Commento agli yoga sutra di Patanjali*, Edizioni Mediterranee, 2010.

Asana, che significa posizione, ha due aspetti: la posa che è l'assunzione di una postura; e il ri-posizionamento della posa che significa riflettere su di essa per raggiungere la perfezione e mantenerla. E' importante sottolineare che negli *Yoga Sutra* non è presente nessun riferimento a posizioni particolari. Questo perché sono *asana* tutte le posizioni che permettono al praticante di vivere nel momento presente svolgendo la funzione di ponte tra corpo, mente ed anima. Le numerose posizioni attuali, che si contano a centinaia, sono per la maggior parte invenzioni recenti e si distinguono tra loro grazie a nomi che richiamano la natura o la mitologia induista. Le *asana* non necessitano di strumenti in quanto gli arti del corpo forniscono i pesi e i contrappesi necessari, ma è molto comune nelle palestre l'utilizzo di attrezzature che permettono di eseguire le varianti, ovvero le posizioni alternative o semplificate. Segue una galleria con alcune delle posizioni yoga più famose e importanti eseguite dal famoso maestro yoga B.K.S Iyengar (Figure da 1 a 10)⁴.



Figura 1 – Tadasana, Tada significa montagna. E' la posizione in piedi di base.



Figura 2 – Vrksasana, Vrksa significa albero.



Figura 3 – Utthita Trikonasana, Utthita significa esteso, trikona triangolo.

⁴ Le immagini riprodotte provengono tutte dall'opera di B.K.S IYENGAR, *Teoria e pratica dello Yoga*, Edizioni Mediterranee, 2003.



Figura 4 –
Virabhadrasana I,
Virabhadra è un
personaggio eroico della
mitologia induista.

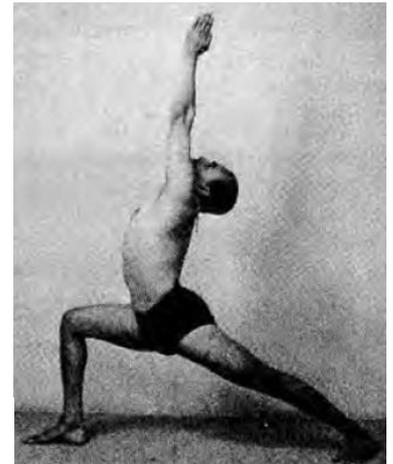


Figura 5 –
Virabhadrasana II.



Figura 6 – Padmasana,
Padma significa loto.
Questa posizione è una
delle più importanti
poiché è associata alla
meditazione. Buddha
viene spesso
rappresentato in questa
posizione.



Figura 7 – Urdhva
Dhanurasana, Urdhva
significa in su, Dhanu
arco.



Figura 8 – Salamba
Sirsasana I, Salamba
significa sostenuto, Sirsa
testa. E' una delle più
importanti posizioni
dello yoga.

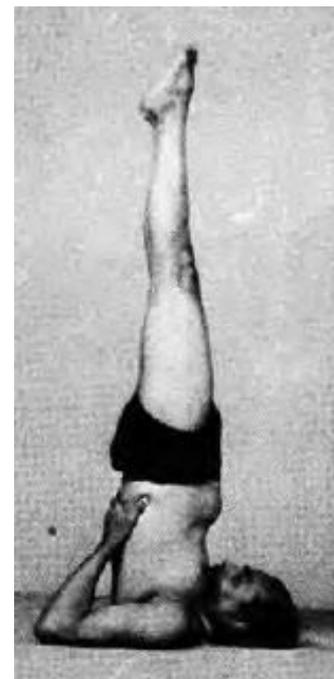


Figura 9 – Salamba
Sarvangasana I -
Salamba significa
sostenuto, Sarvanga
tutto il corpo.



Figura 10 – Savasana, Sava significa cadavere. E' la posizione conclusiva di ogni pratica.

1.4 LA POSIZIONE “ADHO MUKHA SVANASANA”⁵

Nel nostro caso, la posizione yoga studiata è chiamata in *sanscrito* “Adho Mukha Svanasana”, che in italiano significa “posa del cane con il viso rivolto verso il basso”. La postura ricorda infatti quella di un cane che si sgranchisce tenendo la testa china tra le zampe anteriori allungate. In un estratto del libro “Teoria e pratica dello yoga”, B.K.S. Iyengar, uno dei più importanti maestri yoga del XX secolo, espone la tecnica di esecuzione:

Stendersi sullo stomaco, col viso rivolto a terra. I piedi devono essere tenuti tra loro a distanza di 30 cm. Appoggiare le palme delle mani di lato al torace con le dita dritte e rivolte in direzione della testa. Espirare e sollevare il tronco da terra. Raddrizzare le braccia, portare la testa indietro verso i piedi e poggiare la parte superiore della testa sul pavimento, tenendo i gomiti diritti e tendendo la schiena. Tenere le gambe ben tese e non piegarle alle ginocchia. Le piante dei piedi devono poggiare completamente sul pavimento, mentre i piedi devono essere paralleli l'uno all'altro, con le dita diritte rivolte in avanti. Tenere questa posizione per un minuto circa respirando profondamente. [...] (figura 11) [Teoria e pratica dello yoga, p. 99]

⁵ [4] B.K.S IYENGAR, Teoria e pratica dello yoga, Edizioni Mediterranee, 2003.

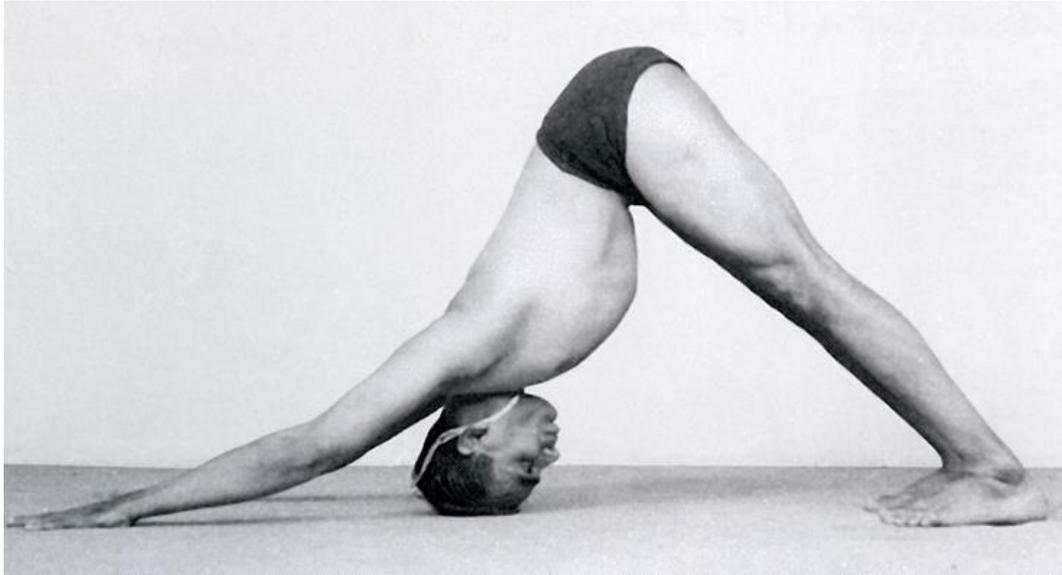


Figura 11 – Foto di B.K.S Iyengar mentre esegue la posizione Adho Mukha Svanasana. © B.K.S IYENGAR, Teoria e pratica dello yoga, Edizioni Mediterranee, 2003.

CAPITOLO 2 – BIOMECCANICA

2.1 DALLA MECCANICA ALLA BIOMECCANICA⁶

La meccanica, basandosi sulla statica, la cinematica e la dinamica, studia il movimento e l'equilibrio dei corpi in relazione alle forze che agiscono su di essi. I suoi principi base nascono dalla fisica, i suoi teoremi generali vengono studiati dalla meccanica razionale e le sue applicazioni pratiche sono sviluppate da altre scienze. Queste ultime sono numerose e spaziano da campi che possono coinvolgere dimensioni minuscole come l'elettronica, a campi completamente opposti, come l'astronomia. Una scienza sviluppatasi molto recentemente, che sarà alla base dello studio di questa tesi, è la biomeccanica, definita come lo studio degli aspetti meccanici del comportamento degli esseri viventi. Tra le sue molteplici applicazioni si possono ricordare gli ambiti medici (protesi, ausili robotici per la chirurgia, ecc.), sportivi (attrezzature sportive, prevenzione infortuni, ecc.) e perfino ludici (per esempio, industria cinematografica e grafica computerizzata). Quello più antico e sviluppato rimane però lo studio del movimento umano e dell'anatomia che lo rende possibile. Gli organi studiati si dividono in:

- *attivi*, ovvero i muscoli che producono il movimento;
- *passivi*: ossa, articolazioni, tendini e legamenti che trasmettono o rendono possibile il movimento;
- *di comando*: che permettono la generazione ed il controllo del movimento, come il cervello ed il sistema nervoso.

⁶ [5] Giovanni LEGNANI, Giacomo PALMIERI, *Fondamenti di meccanica e biomeccanica del movimento*, Città studi edizioni, 2016.

2.2 L'ANATOMIA DI BASE DELL'APPARATO LOCOMOTORE⁷

Comprendere i processi biomeccanici è la chiave per capire le forze in gioco durante la pratica fisica, soprattutto per lo yoga che ha come scopo quello di bilanciare l'esercizio delle forze in ogni parte dell'organismo.

Il movimento umano è reso possibile dall'apparato locomotore, il quale coinvolge diverse strutture anatomiche. Prime fra tutte, le **articolazioni** sono adibite al collegamento delle ossa. La loro maggior o minor mobilità, inversamente proporzionale alla loro stabilità, dipende da tre fattori: la *forma dell'osso*, i *muscoli* che le avvolgono e le *strutture capsuloligamentose* (ovvero l'insieme delle *capsule* e dei *legamenti* intorno alle articolazioni).

Più nello specifico, queste capsule sono delle guaine del tessuto connettivo (adibito quest'ultimo al collegamento, sostegno e nutrimento degli altri tessuti) che circondano e sigillano particolari articolazioni. Esse contengono un liquido, il cosiddetto liquido sinoviale, il quale svolge il ruolo di lubrificante viscoso al fine di ridurre l'attrito durante il movimento di queste articolazioni, che prendono appunto il nome di sinoviali.

I legamenti, invece, sono strutture fibrose del tessuto connettivo che collegano un osso all'altro a livello dell'articolazione. Robusti e spessi, o sottili e flessibili, il loro compito è quello di stabilizzarla, garantendone allo stesso tempo una maggiore o minore mobilità. Attraverso i nervi sensoriali, i legamenti partecipano ai movimenti dell'articolazione trasmettendo informazioni sulla sua posizione al midollo spinale e al cervello.

Attraverso le articolazioni, i movimenti sono determinati da forze variabili esercitate su di esse dai muscoli. In funzione della loro forma e dei loro punti di attacco (chiamati origine e inserimento) a livello delle ossa, i muscoli influenzano diversamente il movimento del corpo. Essi si distinguono in tre categorie. I muscoli agonisti sono quelli che si contraggono per applicare una determinata forza su un'articolazione. A tale contrazione corrisponde un rilassamento parallelo dei muscoli antagonisti, che esercitano una forza opposta sull'articolazione. Infine si definiscono muscoli sinergisti quelli che assistono i muscoli agonisti nella loro azione. I muscoli sono anche definiti monoarticolari o poliarticolari in base al numero di articolazioni che attraversano dalla loro origine al loro inserimento.

⁷ [6] Ray LONG, *The Key Muscles of Hatha Yoga*, Bandha Yoga Publications, 2009.

Le forze esercitate dai muscoli si trasmettono alle articolazioni grazie ai tendini, che garantiscono l'attacco dei muscoli alle ossa. I tendini possiedono anche dei nervi sensoriali, che comunicano al cervello informazioni sulla tensione muscolare e sulla posizione articolare.

Nella pratica dello yoga, questi tre fattori (forma dell'osso, muscoli e strutture capsuloligamentose) possono implicare delle limitazioni alla mobilità delle articolazioni durante l'esecuzione di una posizione. Le strutture capsuloligamentose e i tendini hanno per natura una limitata capacità di allungamento. Se consideriamo poi i soggetti adulti – esempio che ci interessa in questa sede –, per i quali il percorso di crescita è concluso, le ossa presentano ormai una conformazione permanente. Nel loro caso, l'unico modo di intervenire per modificare e migliorare la mobilità articolare è agire sull'apparato muscolatorio.

Attraverso lo stretching, lo yoga cerca di aumentare la gamma di movimenti a cui può accedere il corpo allontanando, stirandoli, i due capi dei muscoli (origine e inserimento).

2.3 L'ANATOMIA DI ADHO MUKHA SVANASANA⁸

Adho Mukha Svanasana è una posizione di equilibrio sulle mani e di inversione parziale del corpo (ovvero di capovolgimento parziale in avanti). Durante la pratica, essa può essere svolta come posizione attiva per allungare diverse regioni del corpo oppure come posizione di riposo temporaneo. Dal punto di vista biomeccanico si possono così descrivere le azioni dei muscoli più coinvolti (Figura 12):

- *Braccia e spalle*: i tricipiti raddrizzano i gomiti; i deltoidi anteriori sollevano le spalle e le braccia sopra la testa; l'infraspinato ed il piccolo rotondo ruotano le spalle verso l'esterno; i romboidi ed il trapezio medio tirano le scapole verso il centro; il trapezio inferiore allontana le spalle dal collo.

⁸ [7] Ray LONG, *The Key Poses of Yoga*, Bandha Yoga Publications, 2009.

- *Tronco*: gli erettori spinali inarcano leggermente la schiena; il quadrato dei lombi insieme agli psoas arcua la zona lombare; gli addominali si contraggono per ritrarre gli organi interni e flettere il tronco.

- *Bacino e gambe*: gli psoas, il pettineo, il sartorio e il retto femorale flettono insieme i fianchi ed il tronco; i quadricipiti raddrizzano le ginocchia, allungano i muscoli posteriori della coscia, il gastrocnemio e il soleo; il muscolo tensore della fascia lata aiuta ad estendere le ginocchia e con la parte anteriore del gluteo medio ruota le cosce verso l'interno; il tibiale anteriore e l'estensore lungo dell'alluce estendono la parte superiore del piede verso l'alto, facendo affondare il tallone a terra, radicando così la posizione.



Figura 12 – Adho Mukha Svanasana, i muscoli agonisti e sinergisti sono in blu, quelli antagonisti in rosso. © Ray LONG, *The Key Poses of Yoga*, Bandha Yoga Publications, 2009.

2.4 IL MODELLO MUSCOLOSCHELETRICO⁹

Conviene ora interpretare i concetti precedentemente osservati in chiave anatomica dal punto di vista meccanico. Come ogni altra scienza, la biomeccanica si

⁹ [5] Giovanni LEGNANI, Giacomo PALMIERI, *Fondamenti di meccanica e biomeccanica del movimento*, Città studi edizioni, 2016; [8] Michael W. WHITTLE, *An Introduction to Gait Analysis*, Butterworth-Heinemann, 2007.

deve basare su modelli per descrivere la realtà attraverso dati oggettivi e misurabili, al fine di comprendere i fenomeni presenti e futuri grazie a metodi matematici. Uno dei modelli più diffusi, quello *muscoloscheletrico* (*musculoskeletal*), interpreta il corpo umano come un sistema di segmenti rigidi, detti articolari, connessi tra loro da strutture interne (articolazioni, muscoli, ecc.) schematizzate come vincoli semplici (cerniere, teste sferiche, ecc.). Nonostante la loro efficacia, sviluppare e utilizzare simili modelli si rivela un processo molto difficile, a causa delle semplificazioni necessarie a tradurre la complessità delle strutture anatomiche adibite al movimento in linguaggio matematico. Per questo motivo, prima di sviluppare un modello del genere, è fondamentale scegliere il grado di approssimazione in base alla natura dell'obiettivo della ricerca. Per descrivere il comportamento dinamico del corpo tramite questo modello, bisogna individuare le grandezze caratteristiche dei diversi segmenti, ovvero la dimensione, la posizione del centro di massa e i momenti di inerzia. Essendo molti di questi dati difficili da misurare in soggetti vivi, si sono sviluppati diversi metodi di stima, che dipendono da parametri facilmente ottenibili (per esempio l'altezza ed il peso). Tra questi metodi, si distingue per la sua semplicità quello di Drillis e Contini rappresentato nella figura seguente (Figura 13).

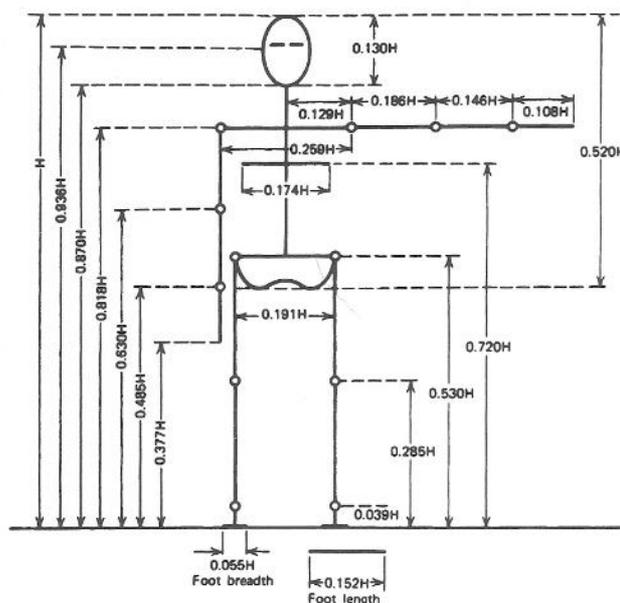


Figura 13 – Rapporti antropometrici medi indicativi per soggetti adulti, la lunghezza dei segmenti corporei è espressa come frazione dell'altezza del corpo H .

Le articolazioni del corpo umano, come anticipato prima, possono essere paragonate a vincoli, in particolare a coppie rotoidali o sferiche, il cui movimento dipende dal momento delle forze agenti sui segmenti corporei. La forma di un'articolazione riflette la sua funzione ed esistono numerose forme dipendenti dalla mobilità e stabilità necessarie. Si mostra, a titolo di esempio, l'approssimazione a vincolo dell'articolazione del ginocchio e dell'anca (Figure 14 e 15).



Figura 14 – Un'articolazione a cerniera, come quella del ginocchio, offre una maggiore stabilità ed è utile per spingere il corpo in avanti (o per attirare un oggetto verso il corpo con il gomito, che ha una conformazione analoga).



Figura 15 – Un'articolazione a giunto sferico, come quella dell'anca, conferisce una grande mobilità su tutti i piani. Ciò è fondamentale per numerose attività, come cambiare direzione mentre si cammina e si corre (anche la spalla condivide questa conformazione).

In maniera più approssimativa, il corpo umano può essere quindi interpretato come un sistema di leve di diverso tipo, in maggior parte svantaggiose. Tra le forze in gioco si possono elencare la forza peso, la forza muscolare, la forza di contatto tra le ossa e quella generata dai legamenti. Le posizioni di yoga sono tanto meglio eseguite quanto minore è lo sforzo necessario; per questo motivo si cerca di diminuire la forza muscolare portando il più possibile il carico sulle ossa allineate con il loro l'asse più lungo alla direzione di gravità. In questo modo si massimizzano le forze di contatto tra le ossa, interpretabili come forze di reazione.

Dato che lo scopo di questa tesi è studiare dal punto di vista biomeccanico una posizione di yoga, sarà sufficiente basarsi sugli strumenti della statica. Le grandezze fisiche fondamentali da considerare saranno dunque le forze ed i momenti delle forze. In particolare, ci interessano le reazioni vincolari articolari, quindi presenti in corrispondenza di due segmenti articolari adiacenti, generate da una contrazione

muscolare o dalla gravità. Conviene ricordare, inoltre, le leggi che governano un corpo in equilibrio stazionario:

$$\Sigma \mathbf{F}_i = 0, \Sigma \mathbf{M}_i = 0$$

che affermano che la sommatoria delle forze e la sommatoria dei momenti delle forze applicate al corpo devono essere nulle. Per descrivere quindi una posizione di yoga è necessario conoscere le reazioni vincolari del pavimento su mani e piedi (misurabili attraverso una pedana dinamometrica), le forze interne (per esempio quelle generate dai muscoli, non considerati dal nostro studio) e gli angoli tra i segmenti corporei, detti articolari (misurabili grazie a sensori inerziali).

CAPITOLO 3 – MOTION CAPTURE

In questo capitolo sono introdotti i principali strumenti utilizzati per l'analisi del movimento, i quali sono quindi in grado di tradurre le grandezze fisiche di interesse in segnali elettrici computabili. In particolare, si studiano la dinamica attraverso la pedana di forza, e la cinematica grazie alla famiglia dei sensori inerziali.

3.1 PEDANA DI FORZA¹⁰

La pedana di forza, detta anche pedana dinamometrica, è uno strumento di misura basato sul principio dinamico di azione e reazione utilizzato soprattutto in ambito medico e sportivo. Attraverso la misura della reazione vincolare del suolo generata da un corpo la pedana è in grado di quantificare i seguenti parametri biomeccanici: le tre componenti spaziali ed il centro di pressione della forza applicata. Si definiscono quindi i tre assi spaziali rispetto all'individuo: sull'asse x, parallelo al suolo e diretto dalla superficie posteriore a quella anteriore del corpo, misuriamo la componente antero-posteriore (o sagittale); sull'asse y, parallelo al suolo e diretto da sinistra a destra (o da destra a sinistra), misuriamo la componente trasversale (o orizzontale); sull'asse z, perpendicolare alla base di appoggio e diretto dalla testa ai piedi, misuriamo la componente longitudinale (o verticale). Da questi assi è possibile definire tre piani anatomici: trasversale, frontale e sagittale (Figura 16).

¹⁰ [8] Michael W. WHITTLE, *An Introduction to Gait Analysis*, Butterworth-Heinemann, 2007.

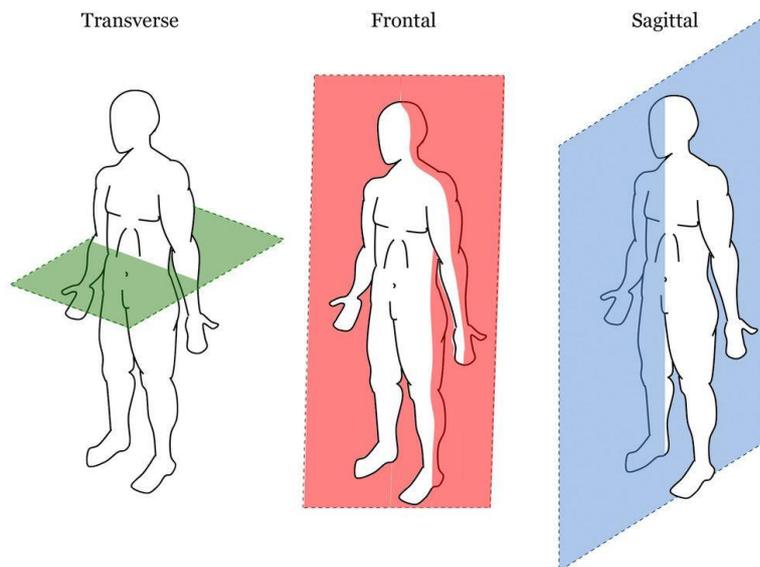


Figura 16 – I tre piani anatomici:

- Il piano trasversale, parallelo al terreno, separa il corpo umano in parte superiore ed inferiore.
- Il piano frontale, perpendicolare al terreno, separa il corpo in parte posteriore ed anteriore.
- Il piano sagittale, perpendicolare al terreno, divide il corpo in parte sinistra e destra.

Per quanto riguarda il centro di pressione, bisogna specificare che la forza applicata dal corpo è distribuita su una superficie, per esempio la pianta del piede o il palmo della mano; ed è la pedana che approssima la forza concentrandola in un punto e semplificando così il successivo utilizzo dei modelli matematici. Attraverso la deformazione meccanica dei sensori che compongono la pedana, si ottiene una variazione misurabile delle loro proprietà elettriche, proporzionale all'intensità della forza applicata. A seconda del tipo di sensori utilizzati per tradurre le forze in segnali elettrici possiamo avere due tipi di pedana: *estensimetrica* e *piezoelettrica*.

Il primo tipo di pedana utilizza come sensori degli estensimetri. Un estensimetro è un dispositivo capace di misurare una piccola deformazione meccanica in un corpo. Le sue componenti più comuni sono fili o lamine di metallo o materiali semiconduttori (ad esempio, un singolo cristallo di silicio), che sono fissati agli elementi strutturali del sensore. Quando gli elementi sono sottoposti ad una trazione, aumenta la resistenza dell'elemento metallico o semiconduttore: quest'ultima, infatti, è proporzionale alla lunghezza del materiale. Introducendo questo elemento resistivo

in un circuito a ponte di Wheatstone, è possibile amplificare le piccole variazioni di resistenza e tradurle in differenza di potenziale.

Il secondo tipo di pedana sfrutta invece l'effetto piezoelettrico. Questo consiste nella generazione di una differenza di potenziale tra le facce opposte di particolari cristalli non conduttivi, detti piezoelettrici, come risultato dell'applicazione di una deformazione tra queste facce.

3.1.1 LA PEDANA DI FORZA P-6000 BTS BIOENGINEERING

Per valutare le forze di reazioni al suolo è stata utilizzata la pedana di forza (P6000 BTS Bioengineering) (Figura 17). Questo strumento, ad alte prestazioni e completamente digitale, è provvisto di 12 sensori (trasduttori) che scompongono le componenti delle forze applicate e ne permettono l'analisi accurata. La capacità per ogni sensore su X-Y è fino a ± 200 N, mentre su Z fino a 200 N. Il campionamento impostato nella nostra esperienza è di 100 Hz.



Figura 17 – Pedana di forza

3.2 SENSORI INERZIALI¹¹

Definito un sistema di riferimento con condizioni iniziali note, è possibile studiare il moto di un corpo, e quindi conoscerne la posizione, la velocità e l'accelerazione, grazie a sensori inerziali. Quelli ritenuti fondamentali sono l'*accelerometro* ed il *giroscopio*; nel caso siano necessarie misure più precise è spesso aggiunto il *magnetometro*. I sensori appena nominati misurano rispettivamente l'accelerazione, la velocità angolare ed il campo magnetico terrestre, e li convertono in grandezze di natura elettrica, facilmente acquisibili ed elaborabili attraverso calcolatori. Si può definire IMU (*inertial measurement unit*, unità di misura inerziale) un sistema elettronico composto da questi sensori, generalmente uno per asse cartesiano. Grazie ai recenti progressi nella produzione di dispositivi MEMS (*micro electro-mechanical systems*, microsistemi elettromeccanici,) è possibile ottenere piccole e leggere IMUs utilizzabili per lo studio del movimento umano. In particolare, l'uso di molteplici IMUs posizionate in punti strategici misurano la posizione, la velocità e l'accelerazione di ogni segmento corporeo, quindi gli angoli tra di essi, detti articolari, e la posizione del centro di massa. Le IMUs possono essere classificate in base al sistema di riferimento in cui operano i sensori. Possiamo avere sistemi a piattaforma fissa in cui l'IMU è montata su una base isolata dalle rotazioni esterne, e sistemi *strapdown* in cui l'unità è semplicemente fissata al corpo. I principi fisici su cui operano le due configurazioni sono gli stessi. Tuttavia, il sistema *strapdown*, che non necessita di una base che annulli le rotazioni esterne, vanta una minore complessità meccanica, quindi dimensioni ridotte, pur comportando un aumento dell'elaborazione computazionale. Per studiare il moto del corpo umano sono quindi utilizzate IMUs di tipo MEMS in configurazione *strapdown*. I vantaggi di tali dispositivi sono: la taglia e il peso ridotti, la struttura resistente, il basso consumo energetico, il breve tempo di accensione, nonché i modesti costi di produzione. Nonostante non forniscano misure precise come i dispositivi a piattaforma fissa, le loro prestazioni aumentano parallelamente ai progressi nel campo dei MEMS, ovvero piuttosto rapidamente.

¹¹ [9] *Xsens MVN User Manual*; [10] Oliver J. WOODMAN, "An Introduction to inertial navigation", *Technical Report*, 696, 2007, consultato online [<http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/>].

3.2.1 ACCELEROMETRO¹²

Tipicamente un accelerometro è schematizzabile in un corpo di massa m vincolato ad una molla il cui comportamento è governato dalla legge di Hooke:

$$\mathbf{F} = k \mathbf{x}$$

dove k è la costante elastica della molla e \mathbf{x} lo spostamento del corpo. La misura di tale spostamento, interpretato con la seconda legge di Newton $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$, ci fornisce l'accelerazione alla quale è soggetto il corpo.

Secondo la schematizzazione precedente si distinguono diversi tipi di accelerometri in base al principio fisico utilizzato: *resistivi*, *piezoresistivi* e *piezoelettrici*.

Un accelerometro *resistivo*, detto anche ad *estensimetri*, consiste in una trave a sbalzo avente un'estremità fissa e l'altra libera di muoversi con una massa collegata ad essa. Quando viene applicata una forza, si verifica uno spostamento vibrazionale della massa e una flessione della trave alla quale sono fissati gli estensimetri, i quali variano così la loro resistenza.

Negli accelerometri *piezoresistivi* gli elementi sensibili, nel caso precedente gli estensimetri, vengono sostituiti da cristalli piezoresistivi, capaci quindi di variare la loro resistenza in seguito ad una deformazione.

Negli accelerometri *piezoelettrici* la trave a sbalzo viene sostituita da un cristallo piezoelettrico capace di generare una differenza di potenziale ai suoi capi in base alla deformazione.

3.2.2 GIROSCOPIO¹³

I giroscopi si distinguono in *meccanici*, *ottici* e di tipo *MEMS*.

Un giroscopio *meccanico* consiste in una ruota girevole montata su due giunti cardanici che gli permettono di ruotare su tutti e tre gli assi cartesiani. Grazie alla

¹² [10] Oliver J. WOODMAN, "An Introduction to inertial navigation", *Technical Report*, 696, 2007, consultato on line [<http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/>].

¹³ [10] Oliver J. WOODMAN, "An Introduction to inertial navigation", *Technical Report*, 696, 2007, consultato on line [<http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/>].

conservazione del momento angolare, la ruota resiste ai cambiamenti di orientamento, mentre gli angoli dei giunti cardanici variano, indicandoci quindi l'orientazione del dispositivo. Nei giroscopi meccanici moderni quest'ultima viene invece misurata attraverso la velocità angolare. Lo svantaggio principale di questi giroscopi è che contengono parti mobili che causano attrito e quindi usura nel tempo. Ma questo problema può essere parzialmente risolto utilizzando cuscinetti o lubrificanti speciali, aumentando però il prezzo complessivo, già elevato, dello strumento. Inoltre, i giroscopi meccanici richiedono qualche minuto per essere pronti all'utilizzo, aspetto che potrebbe risultare scomodo.

Un giroscopio *ottico* sfrutta l'interferenza della luce per misurare la velocità angolare. Ne esistono di due tipi: il primo è detto a fibra ottica (FOG), il secondo a laser ad anello (RLG, ring laser gyroscope). Nel primo caso, due fasci di luce vengono rilasciati in una larga bobina di fibra ottica in direzioni opposte. Se il giroscopio sta ruotando, allora il fascio che viaggia nella stessa direzione percorrerà una distanza maggiore per raggiungere il capo opposto della fibra rispetto al fascio opposto alla rotazione: questo fenomeno è noto come effetto di Sagnac. Una volta che i due fasci si incontrano alla fine della fibra, essi si uniscono e lo sfasamento dovuto all'effetto di Sagnac darà luogo ad un'interferenza. Questo nuovo fascio risultante avrà intensità totale dipendente dalla velocità angolare. Il secondo tipo si differenzia dal primo in quanto utilizza specchi al posto della fibra ottica. A differenza dei giroscopi meccanici, i giroscopi ottici non contengono parti mobili e richiedono solo pochi secondi per avviarsi. La precisione di un giroscopio ottico dipende in gran parte dalla distanza che può percorrere la luce, quindi con l'aumentare della dimensione del dispositivo cresce la sua precisione.

Un giroscopio *MEMS* contiene elementi vibranti in grado di misurare l'effetto di Coriolis, il quale afferma che in un sistema di riferimento rotante con velocità angolare ω , un corpo di massa m con velocità v è soggetto ad una forza:

$$\mathbf{F}_c = - 2 m (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v})$$

Esistono numerose geometrie di elementi vibranti, come i giroscopi a diapason, ma la più semplice tra queste consiste in una massa vibrante vincolata lungo l'asse del moto. Quando un giroscopio di questo tipo è soggetto ad una rotazione, una vibrazione

secondaria è indotta lungo l'asse perpendicolare dall'effetto di Coriolis, ed è quindi possibile ricavare la velocità angolare.

Il principale problema dei giroscopi si verifica quando si integra la velocità angolare per ottenere l'orientamento, poiché si genera una deriva non trascurabile dovuta all'errore della misura e all'offset. Per risolvere questo problema è stata introdotta la tecnica della Sensor Fusion che consiste nell'utilizzo simultaneo di diversi dispositivi, in modo da ottenere misure più precise. In particolare, nelle IMUs più diffuse, ovvero quelle contenenti una terna di accelerometri, giroscopi e magnetometri, le componenti spaziali della deriva giroscopica vengono compensate nell'asse verticale dagli accelerometri e nel piano orizzontale dai magnetometri.

3.2.3 MAGNETOMETRO¹⁴

Quando la precisione delle misure degli accelerometri e dei giroscopi non risultano sufficienti, si aggiungono tre magnetometri alla IMU, uno per asse ortogonale, in grado di misurare la forza e la direzione del campo magnetico locale. Nonostante non siano abbastanza precisi da sostituire i giroscopi, a causa dei possibili disturbi causati da oggetti magnetici prossimi, i loro dati possono essere fusi con quelli dei giroscopi al fine di migliorare l'accuratezza dell'orientamento.

Esistono tre tipi di magnetometri: i *magnetoresistori*, *ad induzione* e *ad effetto Hall*.

I *magnetoresistori* sono sensori costituiti da materiale la cui resistività dipende fortemente dall'intensità del campo magnetico che altera il percorso degli elettroni.

I magnetometri *ad induzione*, invece, sfruttano la differenza di potenziale indotta in una bobina in movimento per quantificare il flusso del campo magnetico.

I magnetometri *ad effetto Hall*, infine, si basano appunto sulla manifestazione di questo fenomeno su un cristallo semiconduttore e risultano, rispetto ai precedenti magnetometri, più versatili e precisi. Si ricorda che l'effetto Hall consiste nella produzione di una forza elettromotrice all'interno di un conduttore o semiconduttore attraverso il quale scorre una corrente in presenza di un campo magnetico trasversale.

¹⁴ [10] Oliver J. WOODMAN, "An Introduction to inertial navigation", *Technical Report*, 696, 2007, consultato on line [<http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/>].

La differenza potenziale si sviluppa ad angolo retto rispetto alla corrente e al campo, ed è causata dalla deflessione dei portatori di carica da parte del campo.

3.2.4 IL SISTEMA DI SENSORI INERZIALI MVN-AWINDA XSENS¹⁵

Tra i sistemi di sensori inerziali attualmente in commercio, il sistema Xsens (MVN-Awinda), risulta essere uno dei più utilizzati sia in ambito di ricerca sia in ambito clinico, dato le alte performance e la facilità di utilizzo. Questi sensori fanno parte di un sistema di analisi del movimento wireless e portatile composto da diverse IMUs MEMS in configurazione strapdown (ciascuna delle quali comprende accelerometri, giroscopi e magnetometri), e da una stazione fissa che sincronizza e colleziona i dati acquisiti (Figura 18). Questo tipo di sistema è particolarmente indicato per misurare l'orientazione dei segmenti corporei grazie agli algoritmi implementati adibiti alla correzione della deriva spaziale e all'elevata sincronizzazione temporale dei sensori individuali ($\leq 10 \mu\text{s}$), essenziale quest'ultima per la misura degli angoli articolari. Le IMUs hanno dimensione 47 x 30 x 13 mm, peso 16 g, frequenza di campionamento interna fino a 1000 Hz e intervalli di misura di velocità angolare, accelerazione e intensità del campo magnetico spaziali rispettivamente di $\pm 2000 \text{ deg/s}$, $\pm 160 \text{ m/s}^2$, $\pm 1.9 \text{ Gauss}$.



Figura 18 – A sinistra: un sensore inerziale. A destra: la stazione fissa di sincronizzazione. Entrambi appartengono al sistema di cattura del movimento MVN-Awinda Xsens.

¹⁵ [9] Xsens MVN User Manual

CAPITOLO 4 – MATERIALI E METODI

Lo scopo del presente studio è valutare i possibili cambiamenti delle pressioni di mani e piedi, nonché quelli degli angoli articolari, durante l'esecuzione della posizione yoga "Adho Mukha Svanasana" e delle sue varianti, effettuata da tre soggetti con diversi livelli di esperienza nella pratica dello yoga: esperto, intermedio e principiante.

4.1 SOGGETTI

Per gli scopi di questo studio, si è scelto classificare il livello di esperienza nella pratica dello yoga in tre categorie: esperto, intermedio, principiante. Il primo soggetto, classificato nella categoria esperto, è insegnante certificato Iyengar Yoga dal 2005; il secondo soggetto, classificato nella categoria intermedio, pratica yoga dal 2014; l'ultimo soggetto, classificato nella categoria principiante, è un soggetto attivo ma che non ha mai praticato yoga. Tutti i soggetti non presentavano problemi di salute o pregressi infortuni all'apparato muscolo-scheletrico al momento delle acquisizioni. La scelta di questi candidati è stata effettuata anche sulla base dei loro parametri antropometrici, in quanto questi presentavano minime differenze tra loro (Tabella 1). Questo ci ha permesso di interpretare le misure finali senza la necessità di scalare gli output dello studio per tali parametri, ad eccezione della variabile peso.

DATI	ESPERTO	INTERMEDIO	PRINCIPIANTE
<i>Età</i>	52	22	24
<i>Massa (kg)</i>	74	70	78
<i>Altezza (cm)</i>	183.0	180.5	178
<i>Altezza spalle (cm)</i>	152.4	147.3	148
<i>Larghezza spalle (cm)</i>	47.8	41.8	41
<i>Apertura alare (cm)</i>	193.5	189.5	182
<i>Altezza anche (cm)</i>	95.5	87.8	96
<i>Larghezza anche (cm)</i>	31.1	26.3	28
<i>Altezza ginocchia (cm)</i>	52.3	51.5	53
<i>Altezza caviglie (cm)</i>	10.0	6.5	12
<i>Lunghezza piedi (cm)</i>	27.1	27.3	28

Tabella 1 – Dati antropometrici dei soggetti. Tali valori saranno necessari per la sincronizzazione dei sensori inerziali utilizzati per l’analisi cinematica.

4.2 STRUMENTAZIONE

4.2.1 STRUTTURA PER EFFETTUARE LE POSIZIONI

Come definito in precedenza, le varianti sono variazioni della posizione originale (per noi Adho Mukha Svanasana) e consistono, nel nostro caso, nella modifica di altezza ed inclinazione di mani e piedi. Per permettere al corpo di eseguire le varianti, ho progettato e costruito, grazie all’aiuto di mio padre (artigiano falegname e restauratore), una struttura in legno capace di offrire una superficie di altezza ed inclinazione variabile. Oltre ad offrire un’adeguata area di appoggio per le mani e i piedi e a reggere il peso distribuito del praticante, dovrà anche permettere il sostegno

della pedana di forza. La struttura è composta da due sottostrutture. La prima è dedicata alla modifica dell'altezza degli arti. La seconda è dedicata invece alla modifica dell'inclinazione degli stessi. La prima parte ci permette di spostare la piattaforma centrale di appoggio ad altezze comprese tra 0 cm e 90 cm, con step di 10 cm. La seconda parte, indipendente dalla prima, può essere introdotta sopra la piattaforma centrale e può assumere valori di inclinazione compresi tra 0° e 45°, a step di 5°. Una foto chiarirà immediatamente la natura della struttura (Figura 19).



Figura 19 – Foto della struttura utilizzate per effettuare la posizioni. E' composta da una prima sottostruttura [1] in grado di modificare l'altezza della piattaforma di appoggio centrale [2] e da una seconda sottostruttura [3], indipendente dalla prima, capace di modificare la propria l'inclinazione.

Il nome che ho scelto per questa struttura in legno è “Kapi Dhwaja”, come il carro da guerra di *Arjuna*, protagonista del poema epico indiano *Bhagavad gītā* (vedi capitolo 1). Tale carro fu donato ad *Arjuna* dal dio del fuoco *Agni*, e nella simbologia induista il carro è un’allegoria del corpo, strumento fisico attraverso il quale può avvenire l’azione.

Nella posizione originale “Adha Mukha Svanasana” mani e piedi sono al livello del terreno, quindi ad una altezza di 0 cm; ragionamento analogo per l’inclinazione, dove mani e piedi appoggiano parallelamente al pavimento, quindi 0°. Oltre alla posizione originale, la struttura ci permette di eseguire le varianti che necessitano delle seguenti modifiche:

- Variazioni di altezza dell’appoggio di mani e piedi: da 0 ad 90 cm con intervalli di 10 cm
- Variazione di inclinazione dell’appoggio di mani e piedi: da 0 a 45° con intervalli di 5°

4.2.2 SISTEMA DI SENSORI INERZIALI⁹

Per la valutazione degli angoli di articolari è stata utilizzato un sistema di sensori inerziali indossabili Xsens (MVN-Awinda). Per il presente studio è stato utilizzato un set di 15 sensori inerziali in configurazione “Full body no hands”. I sensori sono stati posizione sui punti di reperi anatomici o sulla maglietta in dotazione. I sensori sono stati posizionati nei seguenti punti di repere anatomici:

- Al centro della fronte
- A metà della parte laterale dell’omero
- A livello della radiocarpica distale
- A livello dell’angolo superiore della scapola
- A livello sternale
- A livello di L5
- A 1/3 prossimale del margine mediale della coscia
- Sotto il piatto tibiale mediale
- Sotto il malleolo laterale

Prima dell'acquisizione è necessario effettuare una calibrazione statica e dinamica. Questa procedura serve definire la posizione dei centri articolari che verranno successivamente nell'acquisizione. Una volta posizionato e calibrato, il sistema è pronto alla raccolta dati. Il campionamento impostato nel nostro studio è di 60 Hz.

Il software del sistema di cattura del movimento “MVN Fusion Engine” calcola la posizione, l'orientamento e gli altri dati cinematici di ciascun segmento del corpo, rispetto a un sistema di riferimento globale G. Tale sistema G è definito nel seguente modo: X positivo quando indica il Nord magnetico locale; Y orientato secondo la convenzione della mano destra (ovest); Z positivo quando rivolto verso l'alto. A noi interessa, però, esclusivamente la misura degli angoli articolari, infatti studiamo posizioni statiche. Per il calcolo degli angoli articolari, vengono definiti altri sistemi di riferimento, che a loro volta definiscono i segmenti corporei con cui è “modellato” il soggetto studiato. Questi sistemi hanno infatti: l'origine nel centro di rotazione di ogni articolazione, tra un segmento e l'altro; l'asse X diretto in avanti; l'asse Y diretto in alto; e infine l'asse Z diretto a destra (Figura 21).

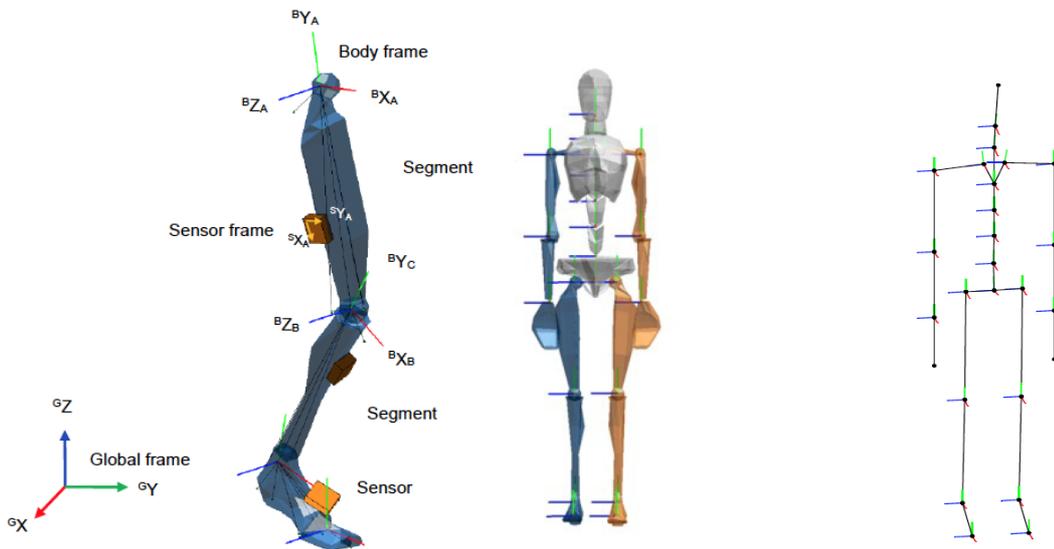


Figura 21 – Nelle immagini è mostrato il sistema di riferimento globale a confronto con i sistemi di riferimento definiti per il calcolo degli angoli articolari. E' mostrato inoltre il modello muscoloscheletrico adottato dal software in seguito all'inserimento dei parametri antropometrici.
 Legenda: asse X (rosso), asse Y (verde), asse Z (blu).

Per descrivere gli angoli articolari in modo preciso, bisogna conoscere esattamente la posizione di ogni segmento corporeo. Grazie ai dati acquisiti durante la calibrazione sul soggetto, il software riesce a determinare la direzione degli assi di ciascun segmento. Successivamente, durante l'acquisizione, le posizioni dei punti di riferimento anatomici, necessari per il calcolo degli angoli articolari, non vengono misurati direttamente (come potrebbe essere possibile, ad esempio, utilizzando uno strumento di misura ottico), ma sono calcolate, invece, usando le accelerazioni, le velocità angolari e le rotazioni in combinazione con il modello biomeccanico. L'algoritmo utilizzato da un sistema di cattura del movimento, in configurazione strapdown, per il calcolo della posizione seguirà la seguente logica (Figura 22). Se introduco anche il modello muscoloscheletrico, posso convertire i dati della posizione dei sensori inerziali nei dati che mi indicano la posizione dei segmenti corporei, e quindi gli angoli articolari tra di loro.

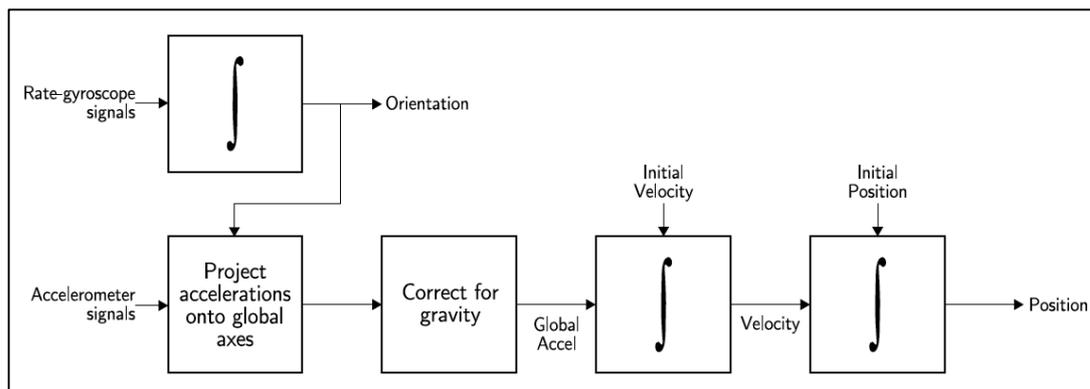


Figura 22 – Algoritmo per il calcolo della posizione di un sensore inerziale in configurazione strapdown.

Grazie ai sensori inerziali, disposti nei punti strategici del corpo elencati prima, siamo in grado di misurare i seguenti angoli articolari (Tabella 2). Gli angoli della colonna dorsale sono calcolati indirettamente dal software: non abbiamo, infatti, disposto sensori inerziali lungo la colonna.

ANGOLO ARTICOLARE		DESCRIZIONE
<i>jL5S1</i>		Angolo articolare tra la vertebra 5 della colonna lombare e la vertebra 1 della colonna sacrale
<i>jL4L3</i>		Angolo articolare tra la vertebra 4 della colonna lombare e il segmento 3 della colonna lombare
<i>jL1T12</i>		Angolo articolare tra la vertebra 1 della colonna lombare e la vertebra 12 della colonna toracica
<i>jT9T8</i>		Angolo articolare tra la vertebra 9 della colonna toracica e la vertebra 8 della colonna toracica
<i>jT1C7</i>		Angolo articolare tra la vertebra 1 della colonna toracica e la vertebra 7 della colonna cervicale
<i>jC1Head</i>		Angolo articolare tra la vertebra 1 della colonna cervicale e il segmento della testa
<i>jRightShoulder</i>	<i>jLeftShoulder</i>	Angolo articolare tra il segmento spalla e la parte superiore del braccio
<i>jRightElbow</i>	<i>jLeftElbow</i>	Angolo articolare tra la parte superiore del braccio e l'avambraccio
<i>jRightWrist</i>	<i>jLeftWrist</i>	Angolo articolare tra l'avambraccio e la mano
<i>jRightHip</i>	<i>jLeftHip</i>	Angolo articolare tra il bacino e la parte superiore della gamba
<i>jRightKnee</i>	<i>jLeftKnee</i>	Angolo articolare tra la parte superiore della gamba e la parte inferiore della gamba
<i>jRightAnkle</i>	<i>jLeftAnkle</i>	Angolo articolare tra la parte inferiore della gamba e il piede
<i>jRightBallFoot</i>	<i>jLeftBallFoot</i>	Angolo articolare tra il piede e l'alluce

Tabella 2 – Lista degli angoli articolari misurabili attraverso la configurazione dei sensori inerziali scelta per il nostro studio. Ad ogni angolo articolare è associata una descrizione che spiega la sua posizione nel modello muscoloscheletrico.

Segue una foto riassuntiva che mostra tutta la strumentazione utilizzata per l'acquisizione dati durante l'esecuzione di una variante (Figura 20).



Figura 20 – Foto in cui il candidato con esperienza intermedia esegue una variante che modifica sia l'altezza che l'inclinazione dei piedi grazie alla struttura in legno. La pedana dinamometrica, in questo caso, registra i dati relativi alle forze applicate dalle mani, mentre i sensori, disposti in punti strategici del corpo, acquisiscono i dati relativi agli angoli articolari. In alto a destra, inoltre, è mostrata la stessa posizione interpretata dal software del sistema di cattura del movimento.

4.3 ACQUISIZIONE DATI

In base alle diverse configurazioni assunte dalla struttura in legno in funzione delle varianti studiate, ho realizzato due tabelle (Tabella 3 e 4) nelle quali ogni coppia altezza-inclinazione rappresenta una variante differente. La prima tabella colleziona le varianti che modificano solamente la posizione delle mani; in maniera analoga, la seconda contiene quelle che riguardano i piedi. Ad ogni coppia di coordinate (altezza-inclinazione) corrisponde una variante, alla quale sono riservate due celle. In totale, quindi, avremo 48 varianti: 26 dove si modifica, in altezza ed inclinazione, la posizione delle mani e 22 dove si modifica la posizione dei piedi.

ABILITA' SOGGETTO													
MODIFICA DI ALTEZZA E INCLINAZIONE DEGLI ARTI SUPERIORI													
		INCLINAZIONE (°)											
		0		15		25		35		45			
A L T E Z Z A (cm)	0												
	10												
	20												
	30												
	40												
	50												
	60												
	70												
	80												
	90												

Tabella 3 – Tabella che colleziona le varianti che modificano gli arti superiori.

ABILITA' SOGGETTO													
MODIFICA DI ALTEZZA E INCLINAZIONE DEGLI ARTI INFERIORI													
		INCLINAZIONE (°)											
		0		15		25		35		45			
A L T E ... (cm)	0												
	10												
	20												
	30												
	40												
	50												

Tabella 4 – Tabella che colleziona le varianti che modificano gli arti inferiori.

La suddivisione in due celle è dovuta al fatto che si è avuta a disposizione una sola pedana dinamometrica. Per ottenere tutte le forze relative alle differenti varianti, la pedana doveva dunque essere spostata e le varianti essere eseguite ciascuna per due volte: una prima volta per registrare le misure delle mani, una seconda volta per quelle dei piedi. Al fine di impedire che tra due esecuzioni della stessa variante fossero

presenti differenze di altezza ed inclinazione dovute allo spostamento della pedana, è stata realizzata una sua riproduzione, una leggera piattaforma in legno con le sue stesse dimensioni. La sua funzione è stata appunto quella di sostenere le mani quando la pedana di forza era sotto i piedi, e viceversa. Poiché in questa sede non si poteva scendere eccessivamente nel dettaglio, sono state escluse le inclinazioni pari a 5°, 10°, 20°, 30° e 40°.

Per quanto riguarda la prima tabella si osserva che sono considerate le varianti con inclinazione nulla delle mani ed altezza delle stesse compresa tra 0 e 90 cm, mentre per le inclinazioni successive l'intervallo è tra i 0 e 30 cm. Discorso analogo per la seconda tabella: i piedi, se non sono inclinati, hanno altezze comprese tra i 0 e 50 cm; se sono inclinati hanno un'altezza tra gli 0 e 30 cm, estremi sempre compresi. Per quanto riguarda l'intervallo delle altezze, quello delle mani (0-90 cm) è maggiore di quello dei piedi (0-60 cm). Queste scelte sono giustificate dal fatto che si è preferito studiare più in dettaglio le varianti maggiormente proposte durante le lezioni di yoga.

Presentate le varianti ritenute interessanti per il nostro studio non resta che procedere all'acquisizione dei dati. Prima di tutto si indossano la tuta e le fasce del kit dei sensori inerziali, applicando questi ultimi nelle loro rispettive posizioni. Quindi si procede all'inserimento dei parametri antropometrici nel software di acquisizione e alla calibrazione. Una volta che i sensori inerziali e la pedana dinamometrica sono pronti si può procedere alla presa dati.

Le due tabelle, una per la modifica degli arti superiori ed una per quella degli arti inferiori, sono quasi simmetriche: l'unica differenza consiste nell'intervallo di altezze da 60 a 90 cm a 0°. Questa simmetria può essere sfruttata per ridurre i tempi dell'acquisizione. Per ogni coppia altezza-inclinazione sono infatti possibili due varianti (una con le mani sulla struttura ed una con i piedi sulla struttura), il che permette un minor numero di spostamenti della struttura in legno per la modifica di altezza ed inclinazione. Quando infatti si è acquisito, per esempio, una variante con le mani sulla struttura, prima di modificare l'impostazione della struttura in legno, il praticante può girarsi su sé stesso ed eseguire la variante con i piedi sulla stessa. Queste due varianti infatti, anche se diverse, condividono le stesse impostazioni di altezza ed inclinazione della struttura. Questa simmetria quindi ci permette di ridurre quasi della metà il numero di spostamenti della struttura in legno: questo aspetto non è da sottovalutare, soprattutto nei casi in cui la pedana è sulla struttura, dato il suo notevole peso.

Conviene presentare le piccole convenzioni utilizzate durante la presa dati. Come detto prima, in presenza di una sola pedana, ad ogni variante corrispondono due distinte esecuzioni che distingueremo attraverso le iniziali M e P. M indica l'esecuzione con la pedana di forza sotto le mani, mentre P rappresenta l'esecuzione con la stessa sotto i piedi. In particolare, la cella di sinistra è riservata alle esecuzioni classificate come P, mentre quella di destra è riservata alle esecuzioni classificate come M. Definito come distinguere le due esecuzioni per ogni variante, non resta che definire come distinguere le diverse varianti. In teoria, le tabelle ci permettono già di farlo grazie alle coordinate altezza-inclinazione, ma conviene introdurre un altro particolare in grado di comunicarci l'ordine cronologico con cui esse sono state svolte. Questo per esigenze di archiviazione dei file di dati e la loro successiva elaborazione. A tale scopo, ad ogni esecuzione è stato assegnato anche un numero.

Si definisce blocco di varianti l'insieme di diverse esecuzioni appartenenti ad un intervallo di altezze successive mantenendo costante l'inclinazione e viceversa. E' possibile eseguire in rapida sequenza un insieme di esecuzioni che costituiscono un blocco grazie alla presenza di uno o più assistenti che modificano la configurazione della struttura in legno, monitorano l'acquisizione digitale e scandiscono il tempo tra una esecuzione e l'altra. L'unità elementare di cui è composta la sequenza di acquisizione di un blocco di varianti è un ciclo, definito come l'unione dei seguenti intervalli di tempo: 15 secondi per sistemare la struttura in altezza o inclinazione, 15 secondi in cui il candidato assume la variante e la mantiene, 15 secondi in cui lo stesso la interrompe e si riposa, ed altri 15 in cui esegue un'altra variante invertendo la posizione delle mani e dei piedi.

A titolo di esempio, si esporranno nel dettaglio i passaggi della raccolta dati del soggetto esperto; per il soggetto intermedio e principiante varranno gli stessi principi. Per prima cosa si può considerare l'acquisizione delle varianti con la pedana sul pavimento, successivamente si vedrà la seconda metà, ovvero quella con la pedana sulla struttura. Per la prima tabella quindi si hanno esecuzioni codificate con la lettera P (mani sulla struttura, quindi piedi a terra sulla pedana) e per la seconda tabella quelle con la lettera M.

Si può considerare ad esempio il blocco composto dalle quattro varianti con intervallo di altezze 90 e 60 cm ed inclinazione 0° presente nella prima tabella. In questo caso particolare non essendoci simmetria tra le due tabelle si eseguono solo le

varianti con le mani sulla struttura. Grazie a quattro cicli in successione si riescono ad acquisire in breve tempo le misure di forze ed angoli articolari. Queste sono salvate in due file, uno per la pedana ed uno per i sensori. Se eseguiamo il flusso di posizioni in ordine decrescente di altezza, compiliamo nel modo seguente la tabella 5.

ESPERTO													
MODIFICA DI ALTEZZA E INCLINAZIONE DEGLI ARTI SUPERIORI													
		INCLINAZIONE (°)											
		0		15		25		35		45			
A L T E Z Z A (cm)	0												
	10												
	20												
	30												
	40												
	50												
	60	P4											
	70	P3											
	80	P2											
	90	P1											

Tabella 5 – Tabella che colleziona le varianti che modificano gli arti superiori del soggetto esperto in seguito all’acquisizione di 4 esecuzioni.

Si ricorda che per le quattro varianti appena svolte mancano ancora le esecuzioni con la pedana sulla struttura sotto le mani. Se ora per esempio si vuole completare la colonna delle varianti con altezza compresa tra 0 e 50 cm ed inclinazione 0°, bisogna ricordare che si possono eseguire anche quelle della seconda tabella. Se si parte dalla prima tabella, si procede in ordine crescente di altezza e si “salta” tra una tabella e l’altra si ottengono le seguenti misure:

ESPERTO											
MODIFICA DI ALTEZZA E INCLINAZIONE DEGLI ARTI SUPERIORI											
		INCLINAZIONE (°)									
		0		15		25		35		45	
A L T E Z Z A (cm)	0	P5									
	10	P7									
	20	P9									
	30	P11									
	40	P13									
	50	P15									
	60	P4									
	70	P3									
	80	P2									
	90	P1									

Tabella 6 – Tabella che colleziona le varianti che modificano gli arti superiori del soggetto esperto in seguito all'acquisizione di 10 esecuzioni (4+6).

ESPERTO											
MODIFICA DI ALTEZZA E INCLINAZIONE DEGLI ARTI INFERIORI											
		INCLINAZIONE (°)									
		0		15		25		35		45	
A L T E Z Z A ... (cm)	0		M6								
	10		M8								
	20		M10								
	30		M12								
	40		M14								
	50		M16								

Tabella 7 – Tabella che colleziona le varianti che modificano gli arti inferiori del soggetto esperto in seguito all'acquisizione di 6 esecuzioni.

Attraverso 6 cicli si ottengono i dati parziali di 12 varianti. Si procede in modo analogo per tutte le posizioni da eseguire con la pedana sul pavimento e si conclude quindi la prima metà dell'acquisizione. D'ora in poi non è più necessario indossare i

sensori inerziali poiché tutte le possibili varianti e i loro caratteristici angoli articolari sono stati registrati. Spostata la pedana sulla struttura, si decide di procedere in maniera leggermente differente da prima: invece di modificare l'altezza della struttura durante una sequenza di esecuzioni, si modifica l'inclinazione. Questo perché risulta più veloce e comodo modificare il piano inclinato quando è appoggiata sopra la pedana dinamometrica. Eseguite tutte le varianti le due tabelle hanno il seguente aspetto:

ESPERTO												
MODIFICA DI ALTEZZA E INCLINAZIONE DEGLI ARTI SUPERIORI												
		INCLINAZIONE (°)										
		0		15		25		35		45		
A L T E Z Z A (cm)	0	P5	M49	P17	M51	P25	M53	P33	M55	P41	M57	
	10	P7	M59	P19	M61	P27	M63	P35	M65	P43	M67	
	20	P9	M69	P21	M71	P29	M73	P37	M75	P45	M77	
	30	P11	M79	P23	M81	P31	M83	P39	M85	P47	M87	
	40	P13	M94									
	50	P15	M93									
	60	P4	M92									
	70	P3	M91									
	80	P2	M90									
	90	P1	M89									

Tabella 8 – Tabella che colleziona tutte le varianti che modificano gli arti superiori del soggetto esperto.

ESPERTO												
MODIFICA DI ALTEZZA E INCLINAZIONE DEGLI ARTI INFERIORI												
		INCLINAZIONE (°)										
		0		15		25		35		45		
A L T E Z Z A ... (cm)	0	P50	M6	P52	M18	P54	M26	P56	M34	P58	M42	
	10	P60	M8	P62	M20	P64	M28	P66	M36	P68	M44	
	20	P70	M10	P72	M22	P74	M30	P76	M38	P78	M46	
	30	P80	M12	P82	M24	P84	M32	P86	M40	P88	M48	
	40	P95	M14									
	50	P96	M16									

Tabella 9 – Tabella che colleziona tutte le varianti che modificano gli arti inferiori del soggetto esperto.

I colori servono per fare intuire al lettore i diversi blocchi di varianti considerati, si possono distinguere 12 blocchi di varianti. Si sono ottenuti, quindi, i dati delle forze e degli angoli articolari di 48 varianti distribuiti in 24 file, due per blocco di varianti (pedana + sensori). Per quanto riguarda i dati del soggetto intermedio si è proceduto in maniera analoga, per quello principiante invece, data la sua esperienza, sono state escluse alcune varianti al fine di diminuire il carico di lavoro. La distanza tra l'appoggio delle mani e quello dei piedi (circa 1.2 m) è stata mantenuta costante per tutte le varianti e per ogni candidato, data la loro altezza simile.

4.4 CATALOGAZIONE DATI

Si comincia ad esaminare i file della pedana dinamometrica. Come affermato prima, si è deciso di svolgere l'acquisizione attraverso l'esecuzione di blocchi di varianti al fine di abbreviare i tempi. Ad ognuno di questi blocchi corrisponde quindi un file della pedana in cui sono presenti i dati relativi alle forze in gioco durante le diverse esecuzioni. All'analisi dati deve perciò precedere un lavoro di catalogazione, ovvero di riconoscimento di ogni esecuzione all'interno dei file. Un file del genere si

presenta come una collezione di dati distribuiti in una tabella a quattro colonne: una per i tempi e tre per la terna di forze. Il numero di righe della tabella corrisponde di conseguenza al numero di rilevamenti effettuate dallo strumento di acquisizione. Nel macro-intervallo temporale corrispondente alla durata dell'esecuzione del blocco di varianti si possono distinguere dei micro-intervalli contenenti le singole esecuzioni. All'inizio del file (tempo 0 s) e per i primi secondi non vengono registrate forze dalla pedana. Si tratta infatti degli istanti in cui il candidato si prepara all'esecuzione dell'esercizio. Successivamente si osservano i valori delle forze crescere e stabilizzarsi ad una determinata terna di valori, caratteristici del soggetto in quella determinata variante. Questi valori si mantengono costanti per circa 12 secondi: per gli scopi dei nostri studi si è deciso di selezionare solo 6 di questi secondi che, ricordando la frequenza di campionamento della pedana di 100 Hz, corrispondono a 600 misure. Successivamente si riconosce l'uscita dalla posizione da un abbassamento dei valori delle forze, fino al loro annullamento. Si passa in seguito all'esecuzione di una nuova variante, scambiando posizione di mani e piedi, o procedendo direttamente alla modifica dell'altezza/inclinazione della struttura se non si è nel caso di simmetria tra le due tabelle. In base al numero di varianti appartenenti al blocco da eseguire si possono distinguere altrettanti dei precedenti intervalli temporali in cui le forze da nulle crescono, trovano valori costanti e si annullano di nuovo. Per ognuno degli intervalli di 6 s selezionati si fa una media delle 600 misure e si calcola la deviazione standard. Questa è il risultato delle inevitabili variazioni della terna di forze ed è più che sufficiente per i nostri studi, considerare gli errori propri degli strumenti, infatti, non sarebbe di alcuna utilità data la loro notevole precisione ed essendo la posizione statica. Come si è detto, durante l'acquisizione le forze partono sempre da valori nulli, ciononostante durante l'esecuzione di un blocco, in particolare in seguito ad una variazione dell'inclinazione della pedana, è possibile che questi valori invece di tornare a zero rimangano costanti a valori dipendenti dall'inclinazione. Si ottengono quindi dei nuovi offset che devono essere sottratti dalle misure coinvolte al fine di rendere possibile il confronto con le altre forze.

Calcolati i valori dinamici caratteristici per ogni variante (per ognuna due medie e relative dev. std.: una per le mani e una per i piedi), non resta che procedere in modo analogo per i file dei sensori inerziali. La natura di questi è analoga ai precedenti, l'unica differenza è che qui sono presenti molteplici tabelle di dati: una per il centro di massa e quattro per la posizione, velocità, accelerazione e angoli articolari

di ogni segmento corporeo. Per i nostri studi ci si è limitati a quest'ultima collezione di dati. Data una coppia di file pedana-sensori contenenti le stesse esecuzioni, questi non sono sincronizzati, infatti le acquisizioni dei due strumenti non sono partite, e nemmeno concluse, contemporaneamente. Ciò non è un grave problema, poiché anche se distinguere le posizioni attraverso gli angoli articolari è meno intuitivo, si possono utilizzare le tabelle delle accelerazioni e velocità per riconoscere gli intervalli temporali desiderati. Nel caso ci siano altri dubbi, si può sempre derivare lo scarto tra la partenza delle due acquisizioni confrontando i tempi dell'inizio della prima esecuzione per la pedana e i sensori. Per queste misure non è stato riscontrato l'insorgere di offset, come ci si poteva giustamente aspettare dalla natura dei sensori. Distinti gli intervalli temporali in cui si eseguono le varianti e selezionati per ognuno di essi 6 secondi, si procede al calcolo della media e della dev. std. degli angoli articolari. Si associano, infine, i valori della pedana con i corrispondenti valori dei sensori inerziali. Ogni variante è quindi completamente descritta dinamicamente e cinematicamente dalle medie e dev. std. calcolate. Conclusa la catalogazione, si è pronti per analizzare i dati.

4.5 ANALISI DATI

Se si osservano i dati relativi alle forze si nota che solo due delle tre componenti delle forze sono di interesse per i nostri studi: si può escludere la componente applicata da mani e piedi alla loro sinistra/destra. Questo perché la posizione studiata distribuisce tutto il peso corporeo e le forze muscolari lungo l'asse sagittale (parallelo al suolo e diretto dalla parte posteriore a quella anteriore del corpo) e quello verticale (perpendicolare al suolo). Inoltre, per rendere le forze indipendenti dalla massa del candidato si è deciso di convertirle in unità di "percentuale di peso corporeo". Data la misura di una forza in Newton, si divide tale numero per il peso del candidato. Successivamente si moltiplica per 100 questo numero per ottenere un'interpretazione della misura più immediata (percentuale di peso corporeo). Questo valore indica approssimativamente la percentuale del peso corporeo esercitato da mani e piedi.

Per quanto riguarda gli angoli articolari anche qui si è deciso di escludere alcuni dati. Ci interessa infatti studiare gli angoli articolari dei segmenti corporei più

coinvolti durante la posizione studiata. Poiché in Adho Mukha Svanasana il modo in cui si flette la colonna vertebrale è fondamentale, sono considerati i seguenti angoli: jL5S1, jL4L3, jL1T12, jT9T8. L'angolo jT1C7 è stato escluso perché la posizione prescrive l'allungamento del capo in linea col torace e quest'angolo risulta dipendente dall'inclinazione del collo: non ci aspettiamo quindi dati rilevanti. Sono poi studiati gli angoli relativi all'articolazioni delle spalle (jRightShoulder / jLeftShoulder), a causa della loro elevata mobilità e notevole importanza per la corretta esecuzione della posizione. Non si considerano invece gli angoli: delle anche (jRightHip / jLeftHip) – infatti la posizione non richiede movimenti particolari in questa articolazione –, delle ginocchia (jRightKnee / jLeftKnee) e del gomito (jRightElbow / jLeftElbow) – perché la posizione prescrive, indipendentemente dalla variante, l'estensione di braccia e gambe –, l'angolo tra la testa e la prima colonna cervicale (jC1Head) – per gli stessi motivi dell'angolo jT1C7 –, ed infine gli angoli restanti jRightWrist / jLeftWrist (polso), jRightAnkle / jLeftAnkle (caviglia) e jRightBallFoot / jLeftBallFoot (piede) – che non ci danno informazioni rilevanti sull'esecuzione della posizione.

Filtrati i dati che risultano veramente utili per lo studio della nostra posizione, non rimane che confrontarli tra di loro. La logica dietro all'analisi dei dati e ai confronti tra essi è esposta in quest'ultime righe; i risultati finali saranno esposti nel capitolo successivo.

L'analisi è suddivisa in due sottoparti: intra-soggetto e inter-soggetto. La prima, come suggeriscono i prefissi latini, è dedicata al confronto tra i dati appartenenti allo stesso soggetto. La seconda, invece, confronta contemporaneamente i dati dei tre candidati: si osservano come reagiscono tre persone con corporature simili, ma con esperienza dello yoga differente, durante l'esecuzione di una stessa variante.

Per i confronti intra-soggetto si è deciso di studiare, per le varianti che modificano solo l'altezza dell'appoggio delle mani (l'inclinazione quindi è costante a 0°), gli angoli articolari delle spalle per vedere se, e come, componenti angolari analoghe tra spalla sinistra e destra assumono valori simili in base all'altezza. La spalla ha accesso ad un ampio intervallo di movimenti: estensione / flessione (l'arto superiore si muove rispettivamente indietro o avanti nel piano sagittale), abduzione / adduzione (l'arto superiore, dal lato del corpo, si porta perpendicolare alla colonna vertebrale nel piano frontale, o viceversa nel secondo caso) e rotazione interna / esterna (l'arto superiore ruota verso l'interno / esterno con il gomito piegato a 90° e la mano parallela al suolo). L'immagine seguente riassume quanto appena detto (Figura 21).

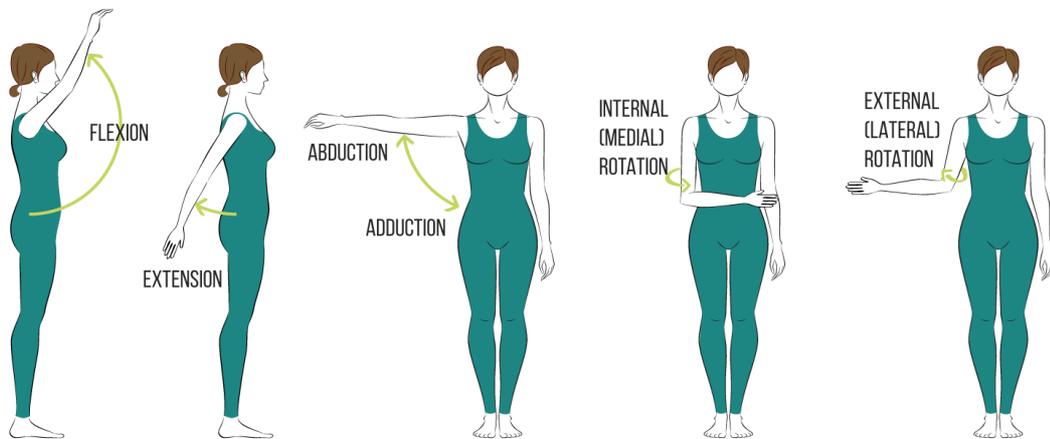


Figura 21 – Elenco dei movimenti accessibili all'articolazione delle spalle.

Vogliamo vedere, quindi, se in base all'altezza, le spalle tendono ad essere simmetriche tra loro. Inoltre, sempre per queste le varianti, ma esclusivamente per il soggetto esperto, si studiano come cambiano le forze antero-posteriori e verticali di mani e piedi in base alle diverse inclinazioni delle mani: 0°, 15°, 25°, 35°, 45°.

Per i confronti inter-soggetto, invece, si confrontano, nei tre soggetti in esame, e per le varianti che modificano solo l'altezza dell'appoggio delle mani e dei piedi, le componenti delle forze e il movimento di antiversione/retroversione relativo all'angolo articolare L5S1 della colonna vertebrale (si considera solo questo angolo della colonna poiché si è osservato che tutti condividono lo stesso andamento rispetto all'aumentare dell'altezza), per vedere come l'esperienza influenza l'esecuzione delle posizioni. Nella posizione la colonna vertebrale esegue esclusivamente piegamenti in avanti e indietro nel piano sagittale (movimenti di antiversione e retroversione, appunto) (Figura 22), possiamo quindi escludere i piegamenti laterali e le rotazioni.

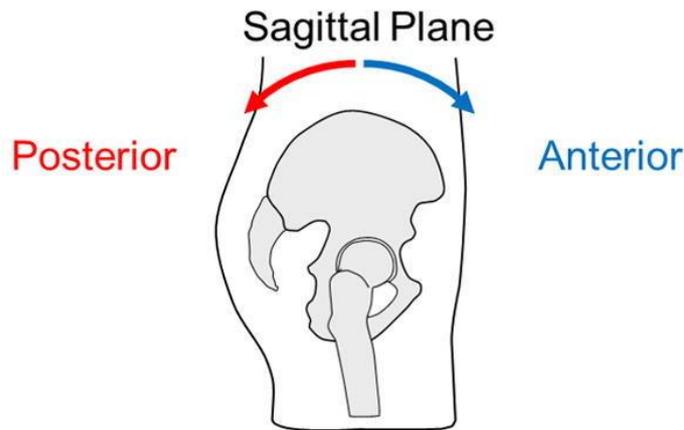


Figura 22 – Movimento di antiversione e retroversione dell'articolazione lombosacrale.

Si è deciso di impostare ogni grafico nel seguente modo: sull'asse x sono collezionati i valori delle altezze dell'appoggio di mani e piedi, sull'asse y, invece, i valori delle forze o degli angoli articolari, a seconda del tipo di confronto.

Le forze sono espresse in percentuale di peso corporeo e sono studiate le componenti verticali (ovvero quelle perpendicolari al piano della pedana) e quelle antero-posteriori (ovvero quelle disposte lungo l'asse sagittale). Si ricorda che quest'ultimo, parallelo alla superficie di appoggio, è diretto dalla parte posteriore a quella anteriore della pedana: le forze positive quindi saranno quelle dirette come l'asse. Gli angoli articolari sono espressi in gradi e sono studiati solamente nelle varianti che coinvolgono la modifica dell'appoggio delle mani: in questi casi infatti, la colonna e le spalle non sono sottoposte ad elevati stress ed hanno quindi più libertà di movimento.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard nel caso delle forze perché sono estremamente piccole rispetto alle misure; nel caso degli angoli articolari invece sono state considerate.

CAPITOLO 5 – RISULTATI

5.1 CONFRONTI INTRA-SOGGETTO

5.1.1 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: ANGOLI ARTICOLAZIONE SPALLE – ESPERTO

Il grafico 1 e la tabella 10 riportano i dati inerenti i movimenti di abduzione ed adduzione (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto esperto mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

All'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani, i movimenti della spalla destra e sinistra tendono ad assumere valori sempre più simili: in particolare a 60 cm e a 90 cm si ha lo stesso angolo articolare in posizione quasi neutra.

La spalla sinistra si mantiene quasi sempre in movimento di abduzione in tutte le altezze delle mani, tranne a 60cm di altezza dove si porta leggermente in adduzione. La spalla destra, invece, parte in adduzione per poi portarsi in abduzione all'altezza di 90 cm.

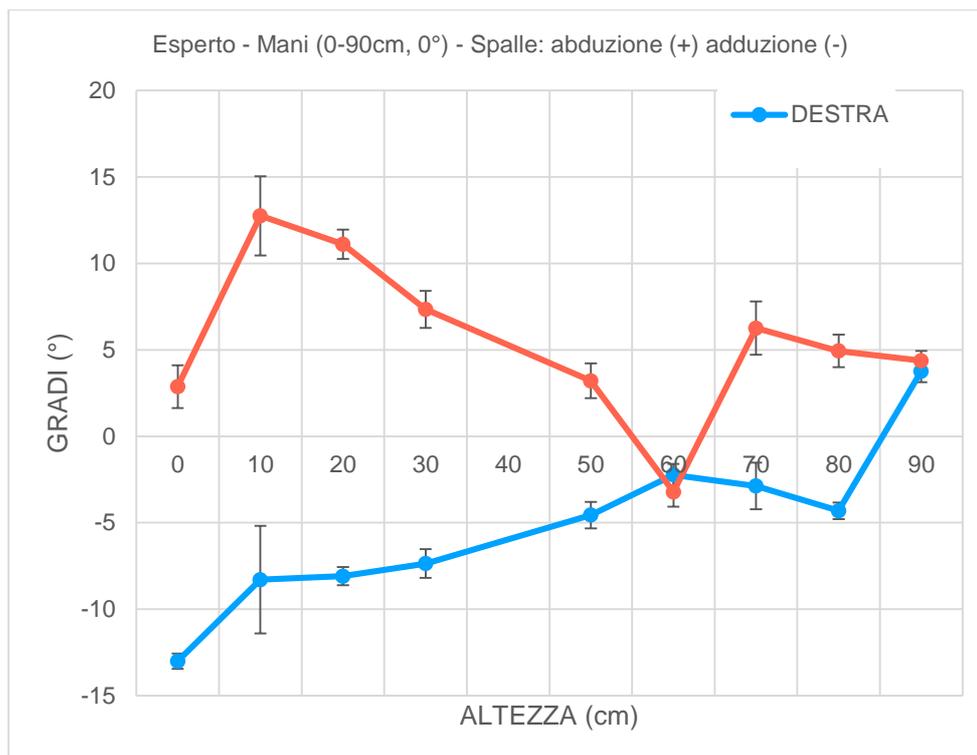


Grafico 1 – Cambiamento degli angoli di abduzione e adduzione della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y). Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

ESPERTO - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: ABDUZIONE (+) ADDUZIONE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	-12.99 ±0.44	-8.29 ±3.11	-8.09 ±0.52	-7.35 ±0.82	/	-4.55 ±0.76	-2.23 ±0.63	-2.88 ±1.35	-4.31 ±0.47	3.76 ±0.63
Sinistra (°)	2.87 ±1.24	12.75 ±2.29	11.10 ±0.85	7.34 ±1.07	/	3.21 ±1.00	-3.22 ±0.85	6.25 ±1.54	4.94 ±0.94	4.37 ±0.57

Tabella 10 – Cambiamento degli angoli di abduzione e adduzione della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard. Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

Il grafico 2 e la tabella 11 riportano i dati inerenti i movimenti di rotazione interna ed esterna (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto esperto mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

Entrambe le spalle si trovano in intrarotazione: la spalla sinistra, in particolare, ha una maggiore rotazione interna rispetto alla destra. All'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani, le spalle tendono a assumere la stessa rotazione interna di circa 90°.

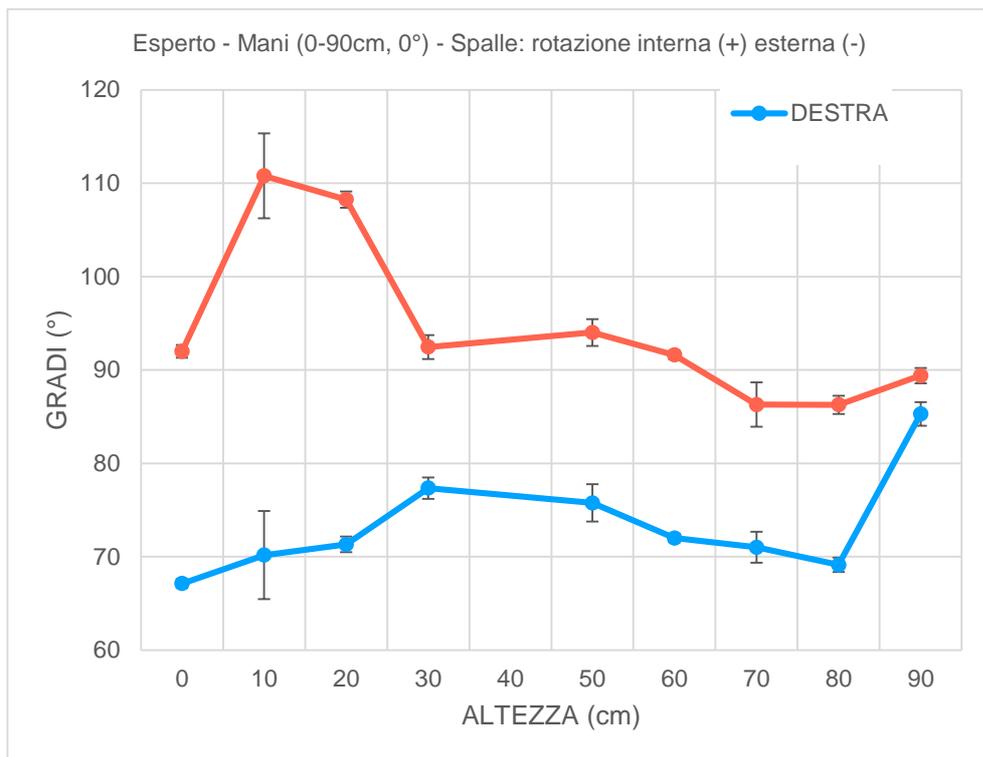


Grafico 2 – Cambiamento degli angoli di rotazione interna ed esterna della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y). Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

ESPERTO - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: ROTAZIONE INTERNA (+) ESTERNA (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	67.13 ±0.47	70.18 ±4.71	71.32 ±0.85	77.36 ±1.15	/	75.77 ±2.00	72.01 ±0.46	71.01 ±1.65	69.13 ±0.77	85.28 ±1.26
Sinistra (°)	92.00 ±0.69	110.79 ±4.54	108.25 ±0.89	92.45 ±1.29	/	94.01 ±1.44	91.60 ±0.46	86.30 ±2.36	86.27 ±0.99	89.39 ±0.82

Tabella 11 – Cambiamento degli angoli di rotazione interna ed esterna della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard. Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

Il grafico 3 e la tabella 12 riportano i dati inerenti i movimenti di flessione ed estensione (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto esperto mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

Entrambe le spalle rimangono in flessione: la spalla sinistra è più flessa rispetto alla destra, si riscontra infatti una differenza iniziale di circa 20°. All'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani, la spalla sinistra diminuisce la flessione (soprattutto a 50cm), mentre la destra ha un leggero aumento (circa 5°).

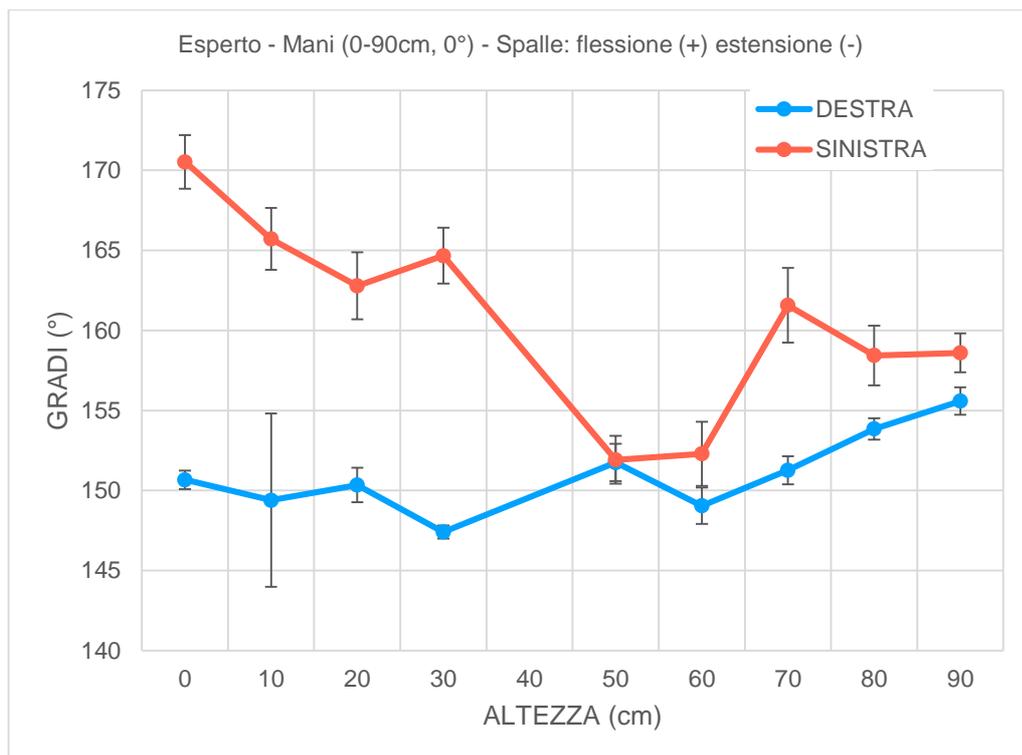


Grafico 3 – Cambiamento degli angoli di flessione ed estensione della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y). Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

ESPERTO - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: FLESSIONE (+) ESTENSIONE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	150.67 ±0.59	149.40 ±5.41	150.35 ±1.08	147.41 ±0.40	/	151.75 ±1.16	149.05 ±1.14	151.27 ±0.88	153.85 ±0.66	155.59 ±0.86
Sinistra (°)	170.53 ±1.68	165.72 ±1.93	162.79 ±2.10	164.67 ±1.74	/	151.92 ±1.50	152.30 ±2.00	161.57 ±2.34	158.43 ±1.86	158.60 ±1.21

Tabella 12 – Cambiamento degli angoli di flessione ed estensione della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard. Mancano i dati relativi alla variante con le mani rialzate di 40 cm a causa di una dimenticanza durante l'acquisizione dei dati.

5.1.2 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: ANGOLI ARTICOLAZIONE SPALLE – INTERMEDIO

Il grafico 10 e la tabella 19 riportano i dati inerenti i movimenti di abduzione ed adduzione (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto intermedio mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Nelle altezze iniziali e finali (0-10 cm, 80-90 cm) i movimenti delle spalle, entrambe in abduzione, sono simili. Nelle altezze intermedie, invece, la spalla sinistra, inizialmente meno abdotta della destra, a 50 cm subisce un notevole cambiamento di inclinazione e diventa più abdotta della destra. All'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani, il movimento di abduzione delle spalle aumenta, anche se in maniera irregolare.

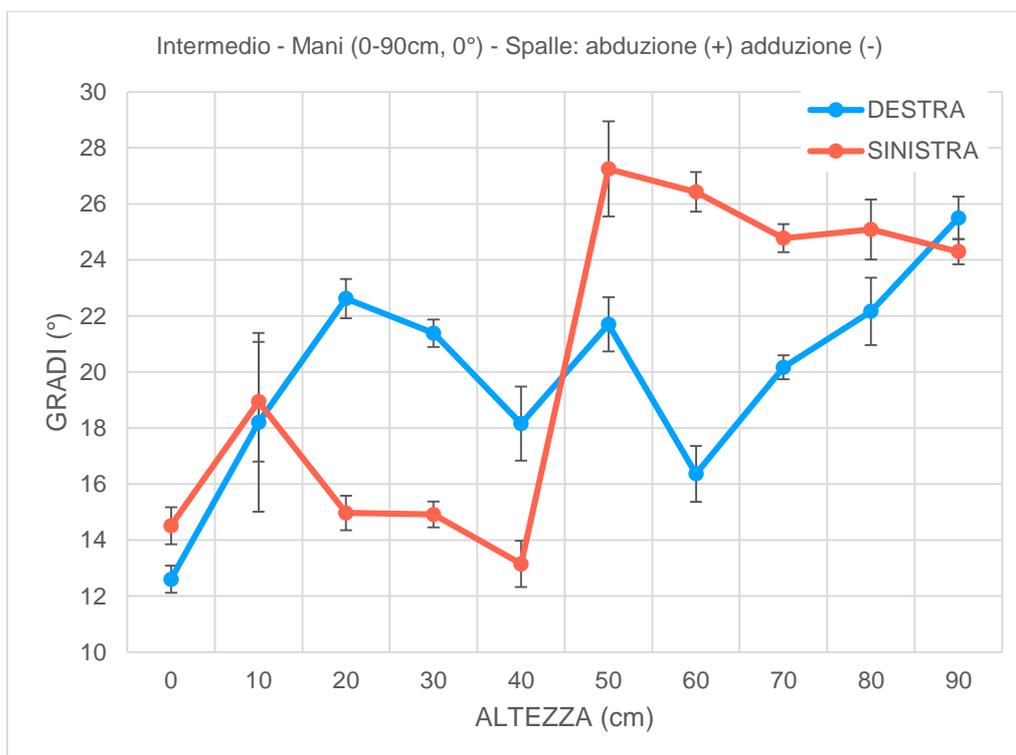


Grafico 4 – Cambiamento degli angoli di abduzione e adduzione della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto intermedio. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y).

INTERMEDIO - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: ABDUZIONE (+) ADDUZIONE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	12.60 ±0.48	18.20 ±3.19	22.62 ±0.70	21.39 ±0.49	18.16 ±1.32	21.70 ±0.97	16.37 ±1.00	20.17 ±0.43	22.16 ±1.20	25.50 ±0.76
Sinistra (°)	14.51 ±0.66	18.94 ±2.14	14.97 ±0.61	14.91 ±0.46	13.15 ±0.83	27.25 ±1.69	26.43 ±0.71	24.78 ±0.50	25.09 ±1.07	24.30 ±0.45

Tabella 13 – Cambiamento degli angoli di abduzione e adduzione della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto intermedio. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard.

Il grafico 5 e la tabella 14 riportano i dati inerenti i movimenti di rotazione interna ed esterna (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto intermedio mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Entrambe le spalle si trovano in intrarotazione: nell'intervallo 0-40 cm la spalla sinistra è maggiormente intraruotata rispetto alla destra, per le altezze successive, al contrario, la spalla destra è maggiormente inclinata. Sono nelle altezze di 0 e 40 cm i movimenti delle spalle sono simili.

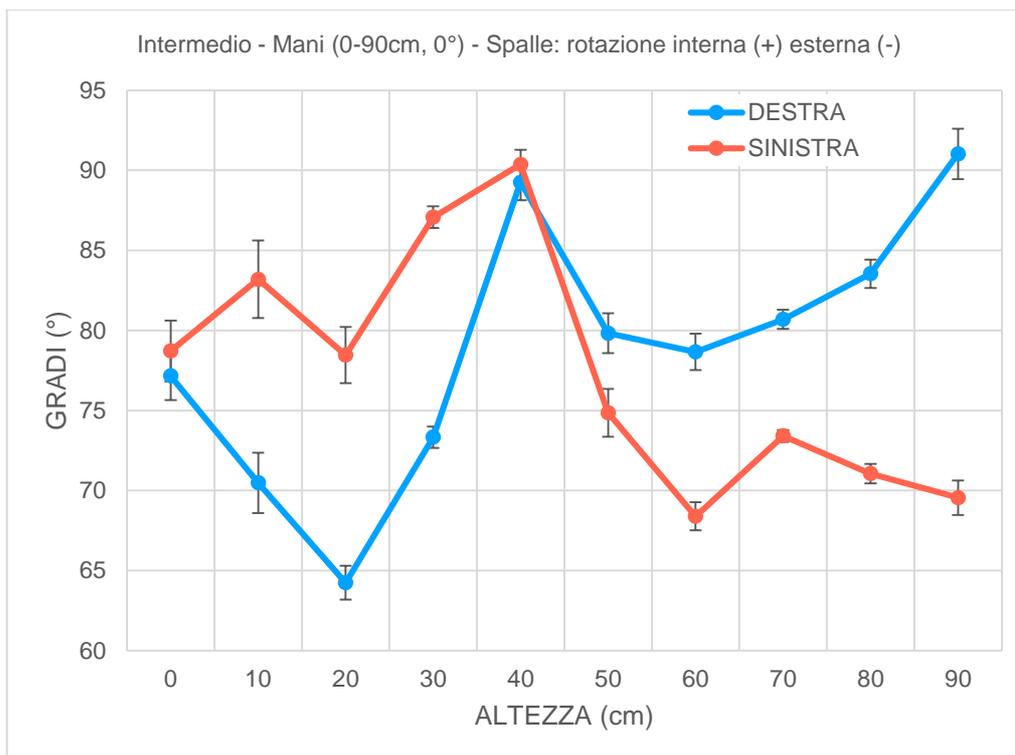


Grafico 5 – Cambiamento degli angoli di rotazione interna ed esterna della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto intermedio. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y).

Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	77.17 ±1.51	70.48 ±1.88	64.24 ±1.06	73.33 ±0.66	89.25 ±1.11	79.83 ±1.25	78.66 ±1.14	80.70 ±0.60	83.54 ±0.88	91.03 ±1.58
Sinistra (°)	78.72 ±1.91	83.20 ±2.42	78.46 ±1.76	87.08 ±0.68	90.37 ±0.91	74.86 ±1.49	68.38 ±0.88	73.41 ±0.36	71.06 ±0.61	69.55 ±1.07

Tabella 14 – Cambiamento degli angoli di rotazione interna ed esterna della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto intermedio. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard.

Il grafico 12 e la tabella 13 riportano i dati inerenti i movimenti di flessione ed estensione (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto intermedio mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Entrambe le spalle rimangono in flessione: La spalla destra è più flessa rispetto alla sinistra, ad eccezione dell'altezza 90 cm. La spalla destra, a 40 cm abbassa notevolmente valore di inclinazione, ma riassume successivamente le inclinazioni

precedenti; la spalla sinistra, invece, aumenta la flessione all'altezza di 50 cm. Solo a 80 cm i movimenti delle spalle possono considerarsi simili.

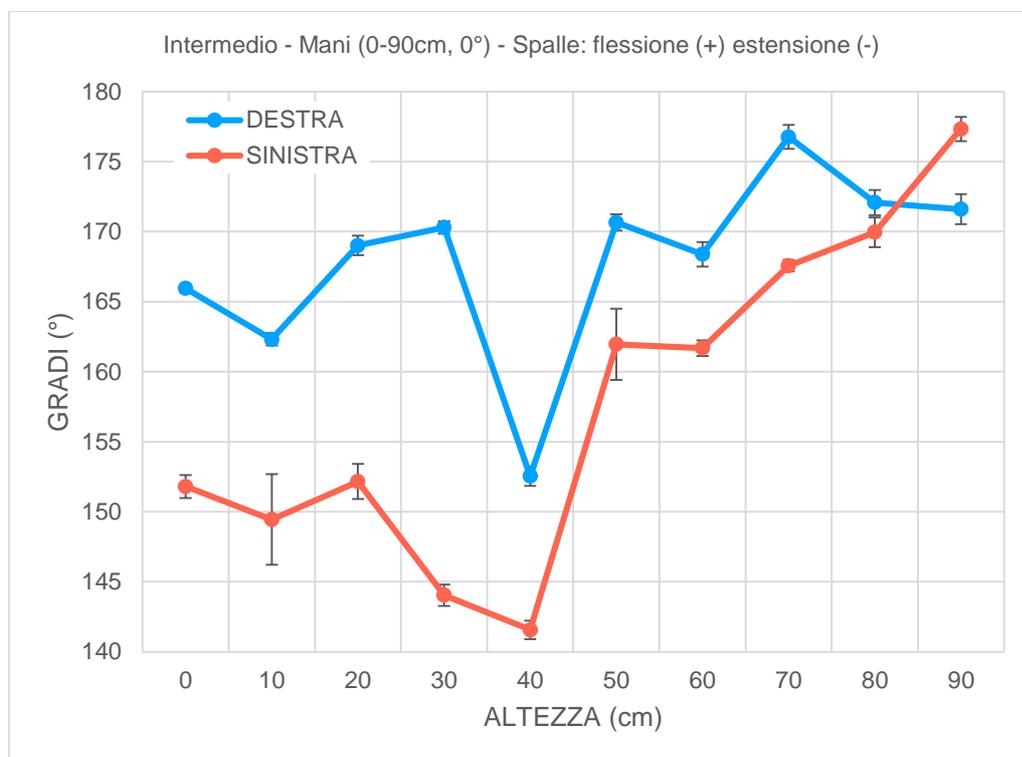


Grafico 6 – Cambiamento degli angoli di flessione ed estensione della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto intermedio. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y).

INTERMEDIO - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: FLESSIONE (+) ESTENSIONE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	165.95 ±0.29	162.31 ±0.44	169.02 ±0.70	170.30 ±0.45	152.54 ±0.70	170.65 ±0.58	168.38 ±0.87	176.76 ±0.85	172.07 ±0.89	171.60 ±1.06
Sinistra (°)	151.81 ±0.82	149.45 ±3.24	152.17 ±1.26	144.04 ±0.77	141.57 ±0.65	161.96 ±2.54	161.69 ±0.56	167.57 ±0.41	169.96 ±1.06	177.33 ±0.86

Tabella 15 – Cambiamento degli angoli di flessione ed estensione della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto intermedio. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard.

5.1.3 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: ANGOLI ARTICOLAZIONE SPALLE – PRINCIPIANTE

Il grafico 7 e la tabella 16 riportano i dati inerenti i movimenti di abduzione ed adduzione (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Entrambe le spalle sono in abduzione (unica eccezione la spalla sinistra a 30 cm): la spalla destra è, per tutte le altezze, maggiormente abdotta rispetto alla sinistra. All'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani, le spalle aumentano, in modo irregolare, il movimento di abduzione; non sono presenti, inoltre, casi di simmetria tra le spalle.

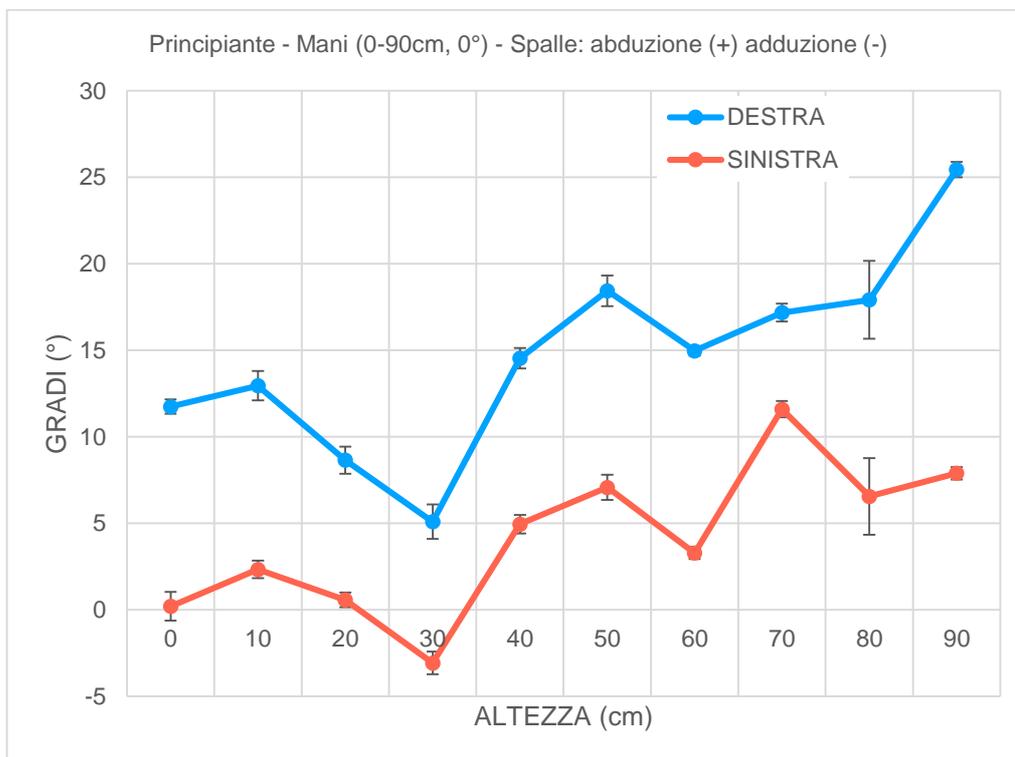


Grafico 7 – Cambiamento degli angoli di abduzione e adduzione della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y).

PRINCIPIANTE - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: ABDUZIONE (+) ADDUZIONE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	11.74 ±0.41	12.95 ±0.85	8.65 ±0.79	5.09 ±0.99	14.54 ±0.59	18.44 ±0.89	14.97 ±0.28	17.18 ±0.52	17.91 ±2.25	25.45 ±0.44
Sinistra (°)	0.20 ±0.82	2.33 ±0.51	0.57 ±0.42	-3.08 ±0.66	4.95 ±0.53	7.07 ±0.72	3.28 ±0.35	11.59 ±0.47	6.55 ±2.22	7.89 ±0.36

Tabella 16 – Cambiamento degli angoli di abduzione e adduzione della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard.

Il grafico 8 e la tabella 17 riportano i dati inerenti i movimenti di rotazione interna ed esterna (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Entrambe le spalle si trovano in intrarotazione: la spalla destra è più ruotata rispetto alla sinistra per tutto l'intervallo di altezze. Non sono presenti casi in cui le spalle hanno inclinazione simile: al contrario dall'altezza di 70 cm in poi, la spalla sinistra, dopo una notevole diminuzione della rotazione interna, assume valori molto differenti da quelli della spalla destra.

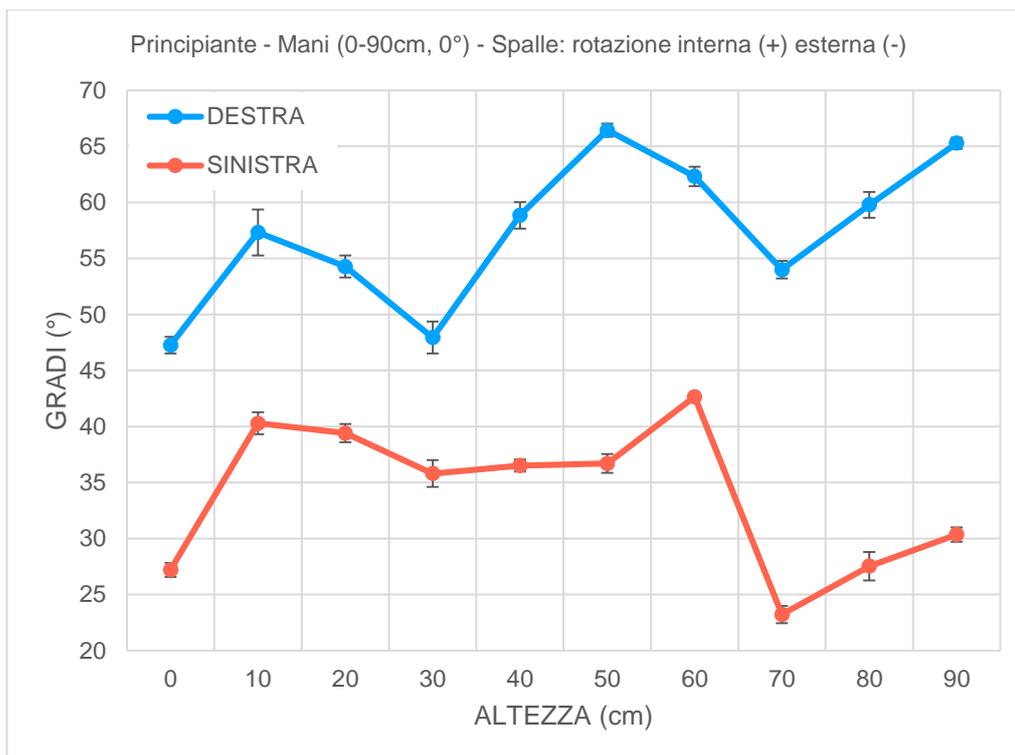


Grafico 8 – Cambiamento degli angoli di rotazione interna ed esterna della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y).

PRINCIPIANTE - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: ROTAZIONE INTERNA (+) ESTERNA (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
J Destra (°)	47.26 ±0.75	57.32 ±2.06	54.27 ±0.99	47.94 ±1.43	58.84 ±1.19	66.44 ±0.58	62.32 ±0.87	54.00 ±0.79	59.78 ±1.15	65.28 ±0.50
J Sinistra (°)	27.21 ±0.62	40.29 ±0.98	39.41 ±0.81	35.80 ±1.20	36.51 ±0.54	36.70 ±0.84	42.65 ±0.26	23.22 ±0.77	27.54 ±1.27	30.36 ±0.64

Tabella 17 – Cambiamento degli angoli di rotazione interna ed esterna della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard.

Il grafico 9 e la tabella 18 riportano i dati inerenti i movimenti di flessione ed estensione (definiti dai relativi angoli articolari) della spalla sinistra e destra dal soggetto principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Entrambe le spalle rimangono in flessione: le spalle assumono valori simili nell'altezza 10 cm e nell'intervallo 60-90 cm. Nell'intervallo 20-50 cm, invece, la spalla destra è più flessa della sinistra.

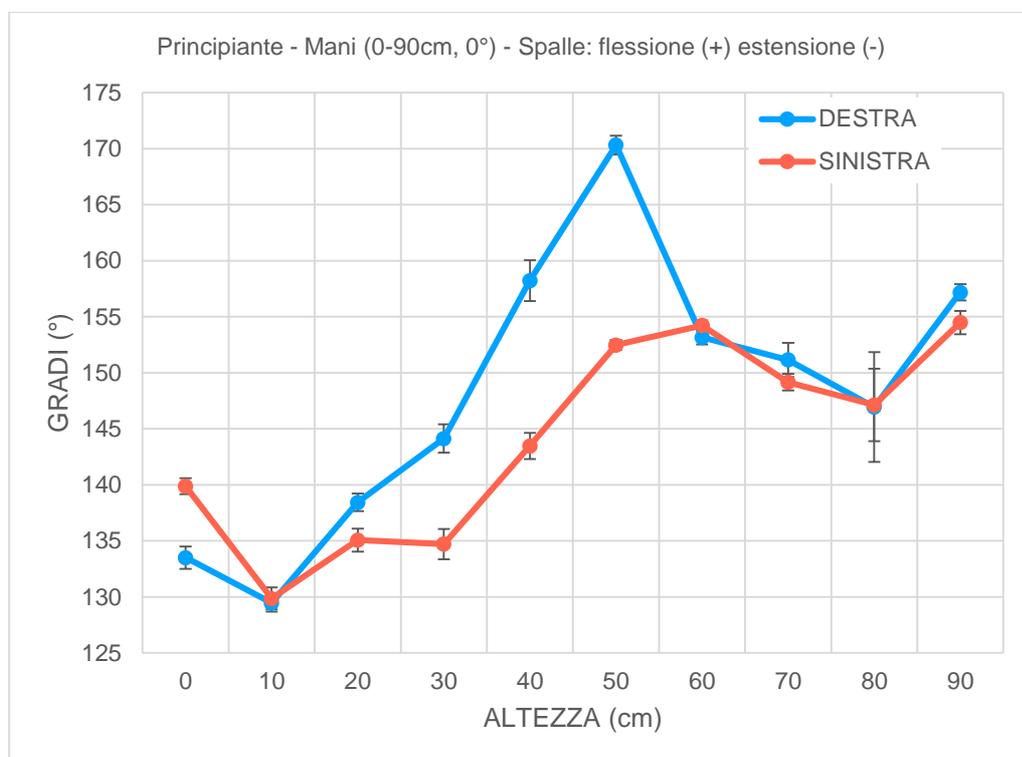


Grafico 9 – Cambiamento degli angoli di flessione ed estensione della spalla sinistra (curva rossa) e della spalla destra (curva blu) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi e le barre le deviazioni standard (asse y).

PRINCIPIANTE - MANI (0-90cm, 0°) - SPALLE: FLESSIONE (+) ESTENSIONE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Destra (°)	133.50 ±1.00	129.46 ±0.77	138.43 ±0.78	144.14 ±1.26	158.23 ±1.82	170.32 ±0.84	153.16 ±0.64	151.15 ±1.51	146.93 ±4.90	157.18 ±0.72
Sinistra (°)	139.88 ±0.71	129.86 ±0.98	135.07 ±1.03	134.71 ±1.35	143.47 ±1.17	152.48 ±0.44	154.23 ±0.43	149.16 ±0.74	147.12 ±3.23	154.48 ±1.03

Tabella 18 – Cambiamento degli angoli di flessione ed estensione della spalla sinistra e della spalla destra rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard.

5.1.4 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA E DELL'INCLINAZIONE DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: FORZE – SOGGETTO ESPERTO

Il grafico 10 e la tabella 19 riportano i dati inerenti le forze antero-posteriori esercitate dai piedi del soggetto esperto mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-30 cm e inclinazione variabile tra 0-45°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

Per ogni inclinazione, l'andamento delle forze espresse dai piedi, sempre posteriori, è massimo ad altezza 0 cm e diminuisce con l'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani. Solo per l'ultima altezza considerata si possono riconoscere distintamente le cinque curve, ma non è evidente una relazione che lega l'inclinazione delle mani con le forze posteriori esercitate dai piedi.

Il grafico 11 e la tabella 20 riportano i dati inerenti le forze antero-posteriori esercitate dalle mani del soggetto esperto mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-30 cm e inclinazione variabile tra 0-45°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

Ogni curva assume un andamento diverso e ben distinguibile a seconda della inclinazione che rappresenta. Le curve relative ai 0°, 15°, 25°, 35° assumono valori positivi, inoltre minore è l'inclinazione maggiore sono le percentuali di peso esercitate. La curva relativa ai 45°, invece, assume valori negativi. Tutte le curve tendono a zero all'aumentare dell'altezza.

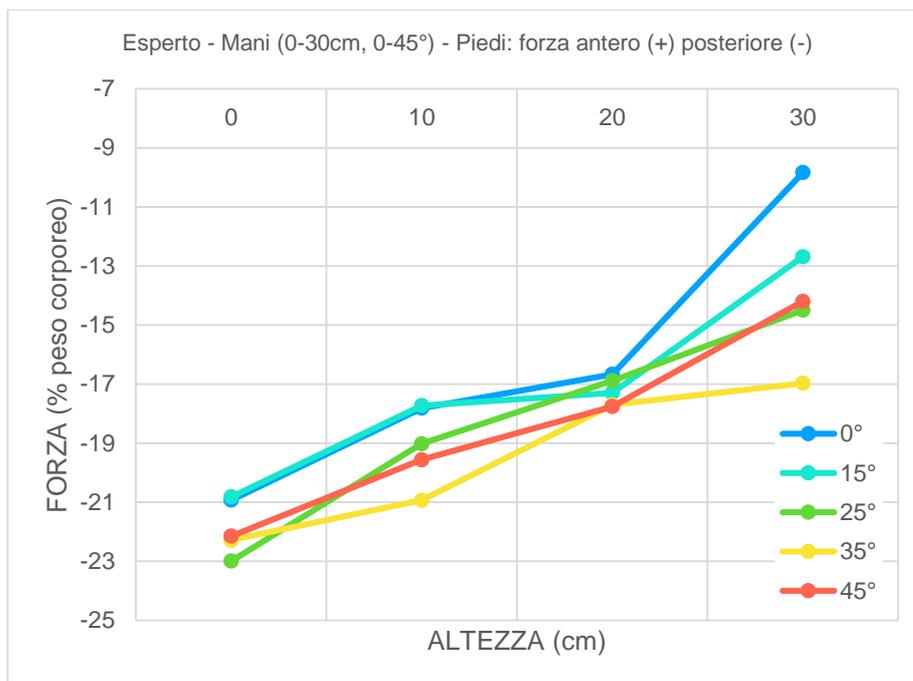


Grafico 10 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dai piedi rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0° (curva blu), 15° (azzurra), 25° (verde), 35° (gialla), 45° (rossa). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

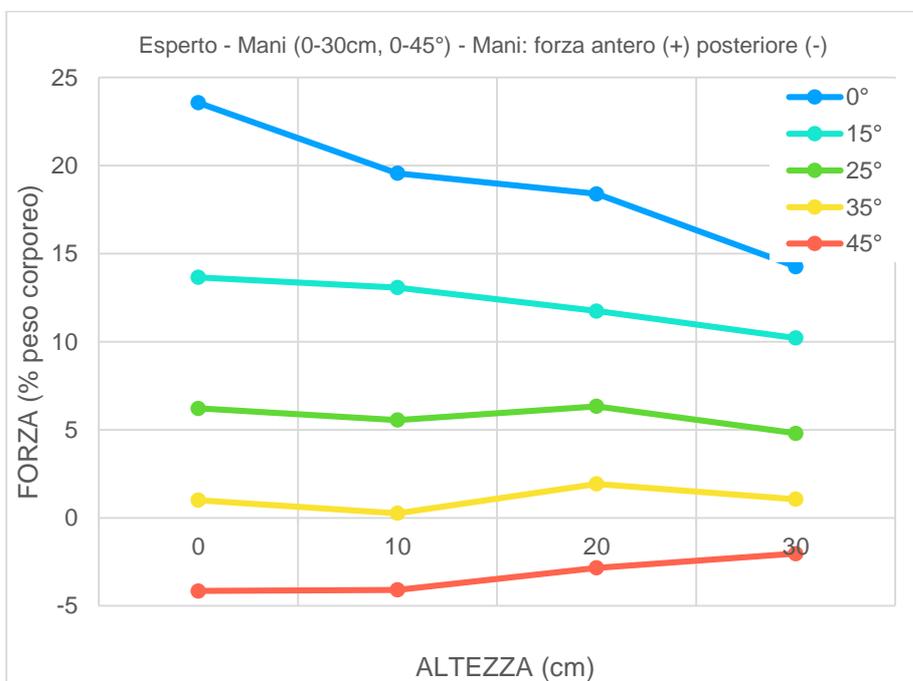


Grafico 11 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dalle mani rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0° (curva blu), 15° (azzurra), 25° (verde), 35° (gialla), 45° (rossa). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

ESPERTO - MANI (0-30cm, 0-45°) - PIEDI: FORZA ANTERO (+) POSTERIORE (-)				
Altezza (cm)	0	10	20	30
0° (%PC)	-20.9	-17.8	-16.7	-9.8
15° (%PC)	-20.8	-17.7	-17.3	-12.7
25° (%PC)	-23.0	-19.0	-16.9	-14.5
35° (%PC)	-22.3	-20.9	-17.7	-17.0
45° (%PC)	-22.1	-19.6	-17.8	-14.2

Tabella 19 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0°, 15°, 25°, 35°, 45°. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

ESPERTO - MANI (0-30cm, 0-45°) - MANI: FORZA ANTERO (+) POSTERIORE (-)				
Altezza (cm)	0	10	20	30
0° (%PC)	23.6	19.6	18.4	14.3
15° (%PC)	13.7	13.1	11.7	10.2
25° (%PC)	6.2	5.6	6.3	4.8
35° (%PC)	1.0	0.3	1.9	1.1
45° (%PC)	-4.2	-4.1	-2.8	-2.0

Tabella 20 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dalle mani rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0°, 15°, 25°, 35°, 45°. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

Il grafico 12 e la tabella 21 riportano i dati inerenti le forze verticali esercitate dai piedi del soggetto esperto mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-30 cm e inclinazione variabile tra 0-45°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

Per ogni inclinazione, l'andamento delle forze verticali espresse dai piedi, aumenta con l'altezza dell'appoggio delle mani. Ad inclinazioni maggiori corrispondono valori di percentuale di peso maggiori.

Il grafico 13 e la tabella 22 riportano i dati inerenti le forze verticali esercitate dalle mani del soggetto esperto mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-30 cm e inclinazione variabile tra 0-45°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

Per ogni inclinazione, l'andamento delle forze verticali espresse dalle mani, diminuisce con l'altezza dell'appoggio delle mani. Non è evidente una relazione che lega l'inclinazione delle mani con le forze verticali esercitate dalle mani.

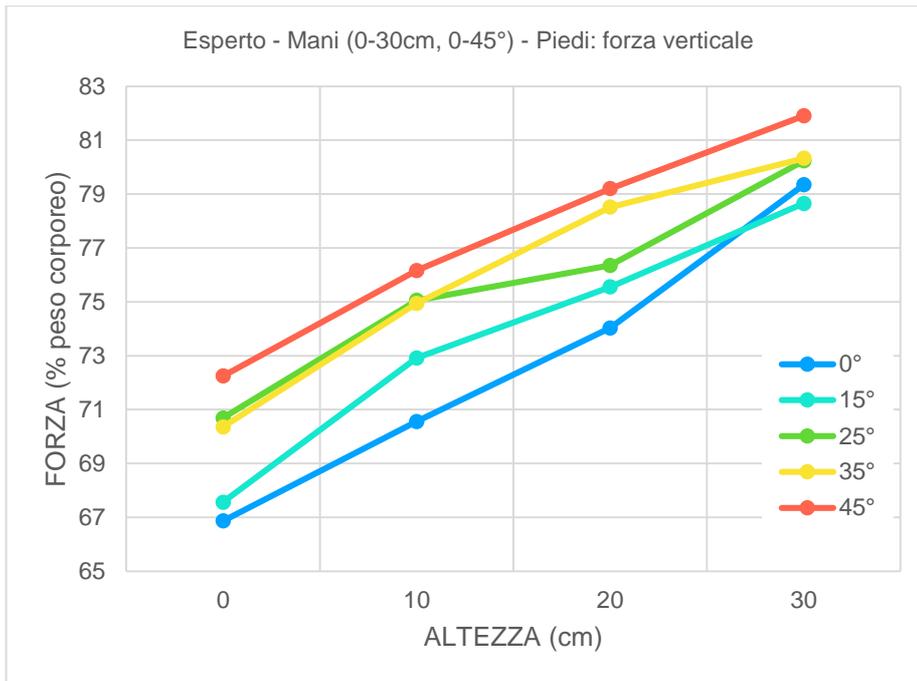


Grafico 12 – Confronto delle forze verticali esercitate dai piedi rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0° (curva blu), 15° (azzurra), 25° (verde), 35° (gialla), 45° (rossa). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

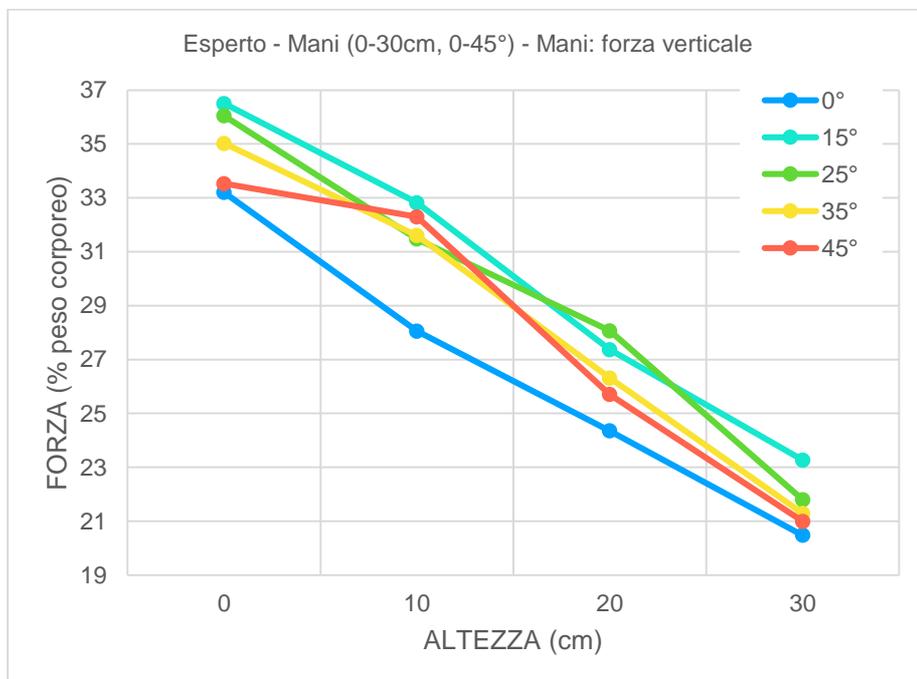


Grafico 13 – Confronto delle forze verticali esercitate dalle mani rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0° (curva blu), 15° (azzurra), 25° (verde), 35° (gialla), 45° (rossa). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

ESPERTO - MANI (0-30cm, 0-45°) - PIEDI: FORZA VERTICALE				
Altezza (cm)	0	10	20	30
0° (%PC)	66.9	70.6	74.0	79.3
15° (%PC)	67.6	72.9	75.6	78.6
25° (%PC)	70.7	75.1	76.3	80.2
35° (%PC)	70.4	74.9	78.5	80.3
45° (%PC)	72.2	76.2	79.2	81.9

Tabella 21 – Confronto delle forze verticali esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0°, 15°, 25°, 35°, 45°. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

ESPERTO - MANI (0-30cm, 0-45°) - MANI: FORZA VERTICALE				
Altezza (cm)	0	10	20	30
0° (%PC)	33.2	28.1	24.3	20.5
15° (%PC)	36.5	32.8	27.4	23.3
25° (%PC)	36.0	31.5	28.1	21.8
35° (%PC)	35.0	31.6	26.3	21.3
45° (%PC)	33.5	32.3	25.7	21.0

Tabella 22 – Confronto delle forze verticali esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto per le inclinazioni: 0°, 15°, 25°, 35°, 45°. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

5.2 CONFRONTI INTER-SOGGETTO

5.2.1 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: FORZE

Il grafico 14 e la tabella 23 riportano i dati inerenti le forze antero-posteriori esercitate dai piedi del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze espresse dai piedi, sempre posteriori, è massimo ad altezza 0 cm e tende a zero con l'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani per tutti e tre i soggetti. Le percentuali del peso corporeo del soggetto esperto e del soggetto intermedio hanno un andamento simile per tutte le altezze: a 0 cm le percentuali sono comprese tra i 20% e 25%. Il soggetto principiante, invece, parte con una percentuale minore, circa il 10%.

Il grafico 15 e la tabella 24 riportano, invece, i dati inerenti le forze antero-posteriori esercitate dalle mani del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30, 60, 90 cm. Tale variazione dal protocollo è stata fatta per non sottoporre il soggetto ad un carico di esercizi che sarebbe risultato eccessivo. Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze espresse dalle mani, sempre anteriori, è massimo ad altezza 0 cm e tende a zero con l'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani per tutti e tre i soggetti. Le percentuali del peso corporeo del soggetto esperto e del soggetto intermedio hanno un andamento simile per tutte le altezze: a 0 cm le percentuali sono comprese tra i 20% e 25%. Il soggetto principiante, invece, parte con una percentuale minore, circa il 15%.

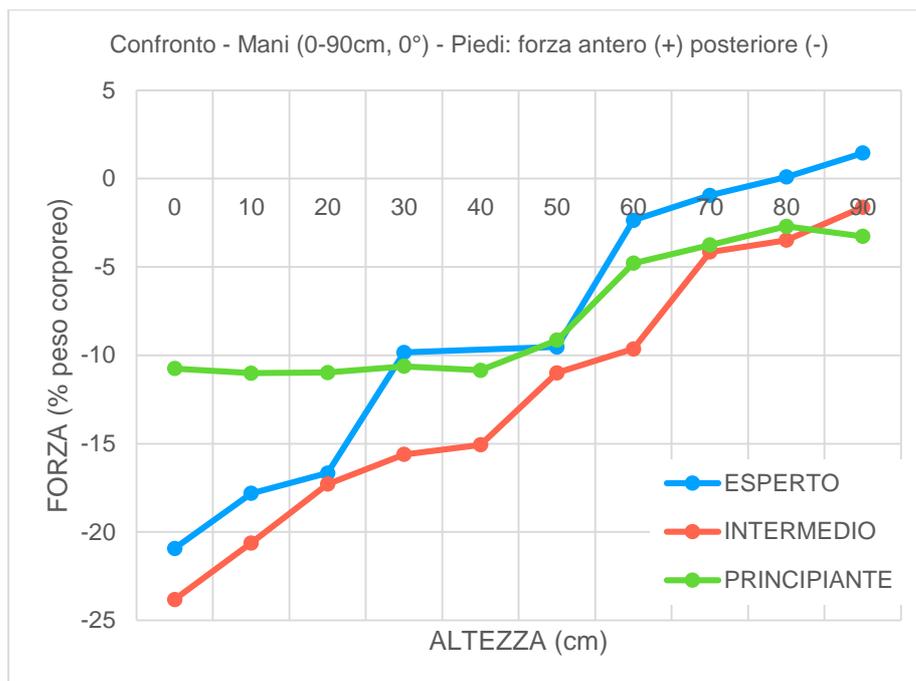


Grafico 14 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dai piedi rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

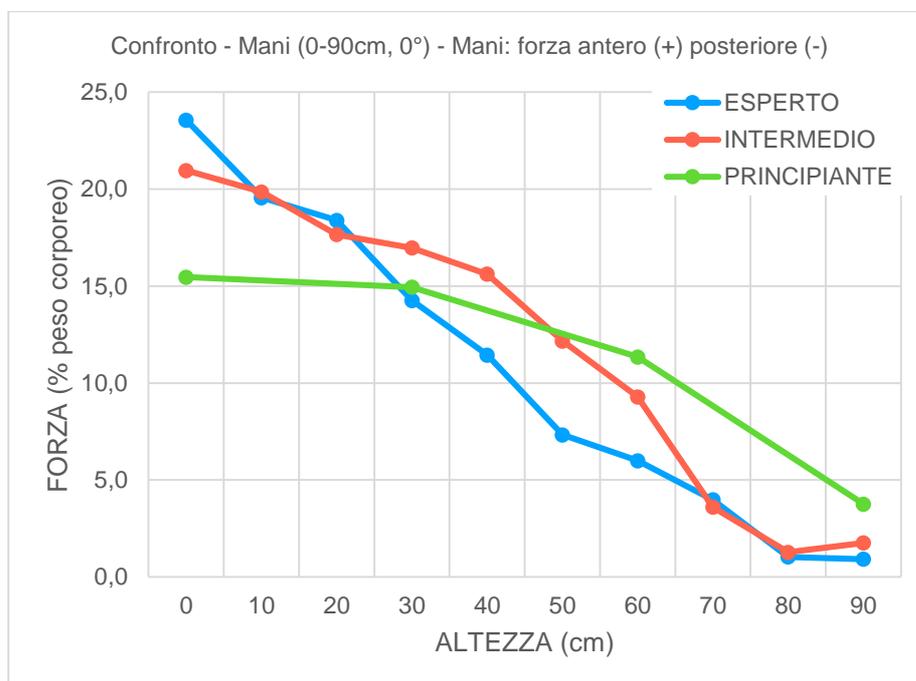


Grafico 15 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dalle mani rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30, 60, 90 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - MANI (0-90cm, 0°) - PIEDI: FORZA ANTERO (+) POSTERIORE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ESPERTO (%PC)	-20.9	-17.8	-16.7	-9.8	/	-9.5	-2.4	-0.9	0.1	1.4
INTERMEDIO (%PC)	-23.8	-20.6	-17.3	-15.6	-15.1	-11.0	-9.6	-4.2	-3.5	-1.6
PRINCIPIANTE (%PC)	-10.7	-11.0	-11.0	-10.6	-10.8	-9.1	-4.8	-3.8	-2.7	-3.3

Tabella 23 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - MANI (0-90cm, 0°) - MANI: FORZA ANTERO (+) POSTERIORE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ESPERTO (%PC)	23.6	19.6	18.4	14.3	11.5	7.3	6.0	4.0	1.0	0.9
INTERMEDIO (%PC)	21.0	19.9	17.7	17.0	15.6	12.2	9.3	3.6	1.3	1.8
PRINCIPIANTE (%PC)	15.5	/	/	14.9	/	/	11.3	/	/	3.8

Tabella 24 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dalle mani rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso. Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30, 60, 90 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

Il grafico 16 e la tabella 25 riportano i dati inerenti le forze verticali esercitate dai piedi del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze verticali espresse dai piedi, aumenta con l'altezza dell'appoggio delle mani per tutti e tre i soggetti. Le differenze più evidenti si osservano per le altezze minori, dove maggiore è l'esperienza del soggetto, maggiore è la percentuale di peso corporeo esercitato dai piedi.

Il grafico 17 e la tabella 26 riportano i dati inerenti le forze verticali esercitate dalle mani del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30, 60, 90 cm. Tale variazione dal protocollo è stata fatta per non sottoporre il soggetto ad un carico di esercizi che sarebbe risultato eccessivo. Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze verticali espresse dalle mani, diminuisce con l'altezza dell'appoggio delle mani per tutti e tre i soggetti. Mentre i soggetti esperto ed intermedio hanno un andamento simile (soprattutto per le altezze minori), quello principiante parte con una percentuale di peso corporeo maggiore (circa il 5% in più).

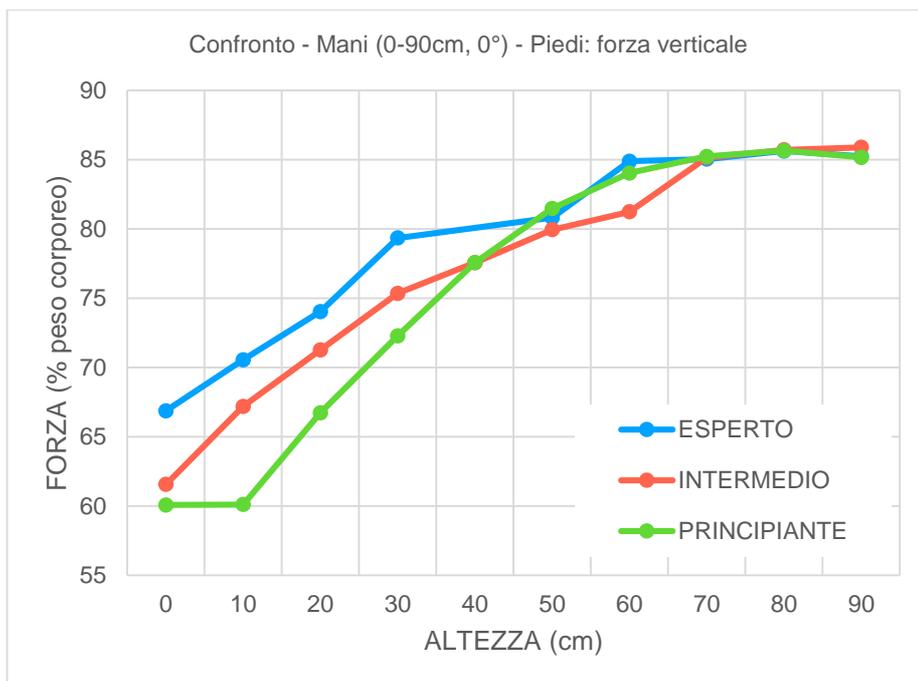


Grafico 16 – Confronto delle forze verticali esercitate dai piedi rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

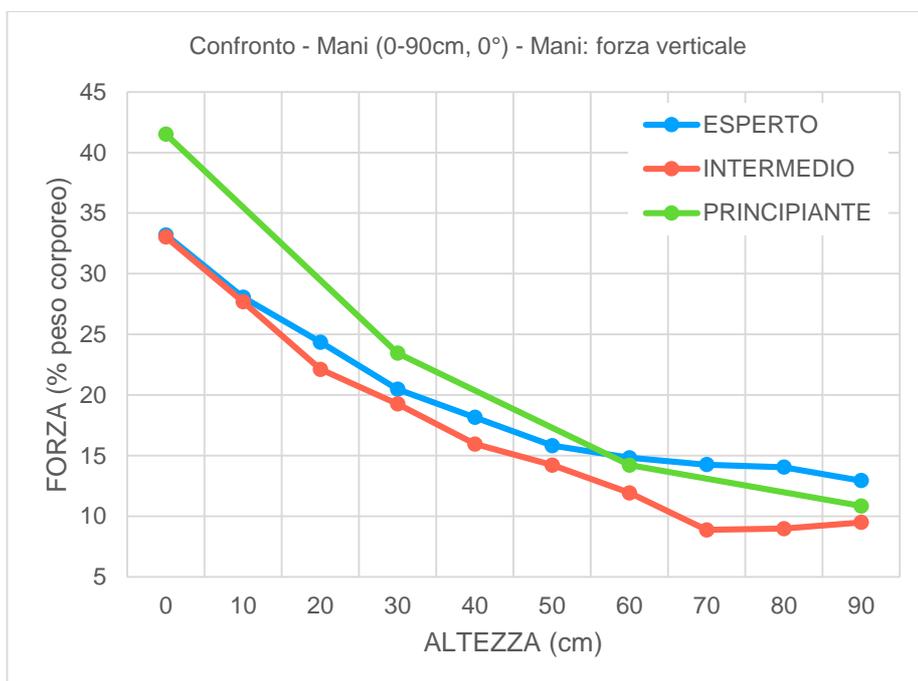


Grafico 17 – Confronto delle forze verticali esercitate dalle mani rispetto all’altezza dell’appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30, 60, 90 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - MANI (0-90cm, 0°) - PIEDI: FORZA VERTICALE										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ESPERTO (%PC)	66.9	70.6	74.0	79.3	/	80.8	84.9	85.0	85.6	85.2
INTERMEDIO (%PC)	61.6	67.2	71.3	75.3	77.6	79.9	81.2	85.2	85.7	85.9
PRINCIPIANTE (%PC)	60.1	60.1	66.7	72.3	77.6	81.5	84.0	85.2	85.6	85.2

Tabella 25 – Confronto delle forze verticali esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - MANI (0-90cm, 0°) - MANI: FORZA VERTICALE										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ESPERTO (%PC)	33.2	28.1	24.3	20.5	18.2	15.8	14.8	14.3	14.0	12.9
INTERMEDIO (%PC)	33.0	27.7	22.1	19.3	15.9	14.2	11.9	8.9	9.0	9.5
PRINCIPIANTE (%PC)	41.5	/	/	23.4	/	/	14.2	/	/	10.8

Tabella 26 – Confronto delle forze verticali esercitate dalle mani rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30, 60, 90 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

5.2.2 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: ANGOLI ARTICOLAZIONE LOMBOSACRALE

Il grafico 18 e la tabella 27 riportano i dati inerenti i movimenti di antiversione e retroversione dell'articolazione lombosacrale (definiti dai relativi angoli articolari tra la quinta lombare e la prima sacrale: L5S1) svolti dal soggetto esperto, intermedio e principiante mentre le mani sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-90 cm e inclinazione costante a 0°.

L'inclinazione del bacino sul piano sagittale si mantiene, per tutte le altezze e i soggetti, in antiversione. I valori del soggetto esperto ed intermedio rimangono compresi tra lo 0 e i 10°; quelli del soggetto principiante assumono un andamento

simile ai precedenti fino ai 40 cm, dopodiché l'antiversione del bacino aumenta e raggiunge i 30°.

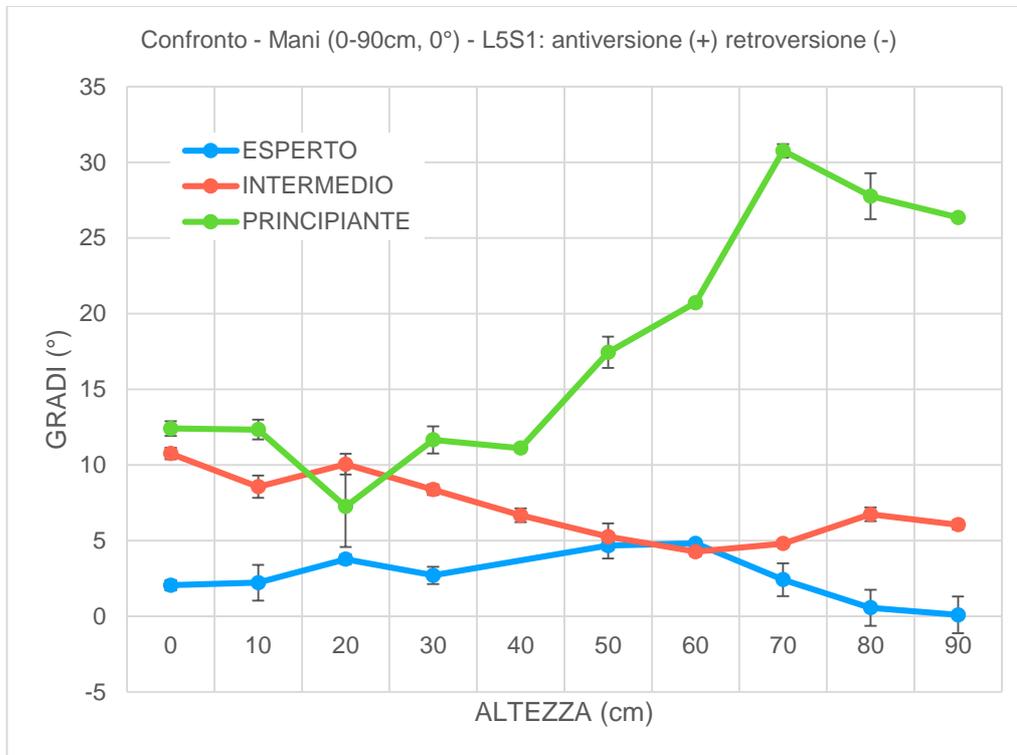


Grafico 18 – Confronto degli angoli di antiversione e retroversione della colonna vertebrale (in particolare tra la quinta lombare e prima sacrale) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. I punti rappresentano i valori medi, le barre rappresentano le deviazioni standard (asse y).

CONFRONTO - MANI (0-90cm, 0°) - L5S1: ANTIVERSIONE (+) RETROVERSIONE (-)										
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ESPERTO (°)	2.06 ±0.34	2.23 ±1.18	3.77 ±0.33	2.71 ±0.57	/	4.67 ±0.86	4.82 ±0.22	2.42 ±1.08	0.57 ±1.20	0.10 ±1.21
INTERMEDIO (°)	10.76 ±0.37	8.56 ±0.74	10.05 ±0.69	8.37 ±0.35	6.68 ±0.45	5.26 ±0.88	4.28 ±0.30	4.81 ±0.15	6.74 ±0.45	6.05 ±0.31
PRINCIPIANTE (°)	12.41 ±0.49	12.34 ±0.66	7.26 ±2.68	11.66 ±0.89	11.12 ±0.26	17.44 ±1.03	20.72 ±0.16	30.75 ±0.44	27.76 ±1.52	26.53 ±0.14

Tabella 27 – Confronto degli angoli di antiversione e retroversione della colonna vertebrale (in particolare tra la quinta lombare e prima sacrale) rispetto all'altezza dell'appoggio delle mani nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione le mani sono sulla struttura e i piedi poggiano a terra. Tali angoli sono espressi in media ± deviazione standard.

5.2.3 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DEI PIEDI SULLA STRUTTURA: FORZE

Il grafico 19 e la tabella 28 riportano i dati inerenti le forze antero-posteriori esercitate dai piedi del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre i piedi sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-50 cm e inclinazione costante a 0°.

Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0 e 30 cm. Tale variazione dal protocollo è stata fatta per non sottoporre il soggetto ad un carico di esercizi che sarebbe risultato eccessivo. Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze espresse dai piedi, sempre posteriori, è massimo ad altezza 0 cm e diminuisce con l'aumentare dell'altezza dell'appoggio dei piedi per tutti e tre i soggetti. Le percentuali del peso corporeo del soggetto esperto e del soggetto intermedio hanno un andamento simile per tutte le altezze: a 0 cm le percentuali sono di circa 23%. All'altezza 50 cm, la curva del soggetto esperto ed intermedio effettua un repentino calo di percentuale di peso corporeo. Il soggetto principiante, invece, parte con una percentuale minore, quasi il 10% in meno.

Il grafico 20 e la tabella 29 riportano, invece, i dati inerenti le forze antero-posteriori esercitate dalle mani del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre i piedi sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-50 cm e inclinazione costante a 0°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze espresse dalle mani, sempre anteriori, è massimo ad altezza 0 cm e diminuisce leggermente con l'aumentare dell'altezza dell'appoggio dei piedi per tutti e tre i soggetti. Le percentuali del peso corporeo del soggetto esperto e del soggetto intermedio hanno un andamento simile per tutte le altezze: a 0 cm le percentuali sono di circa 23%. Il soggetto principiante, invece, parte con una percentuale minore, quasi il 10% in meno.

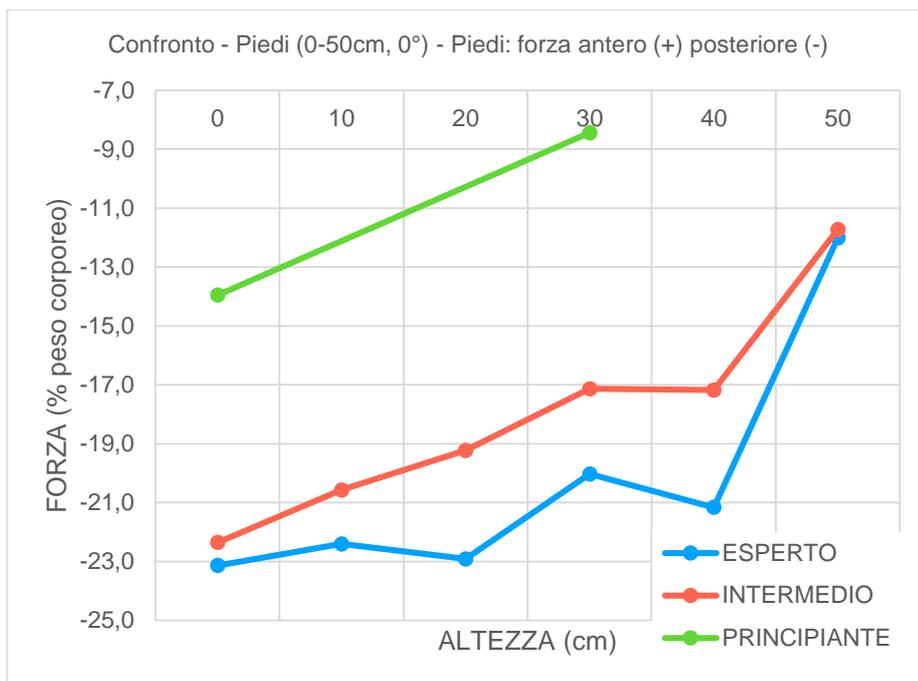


Grafico 19 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dai piedi rispetto all’altezza dell’appoggio dei piedi (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

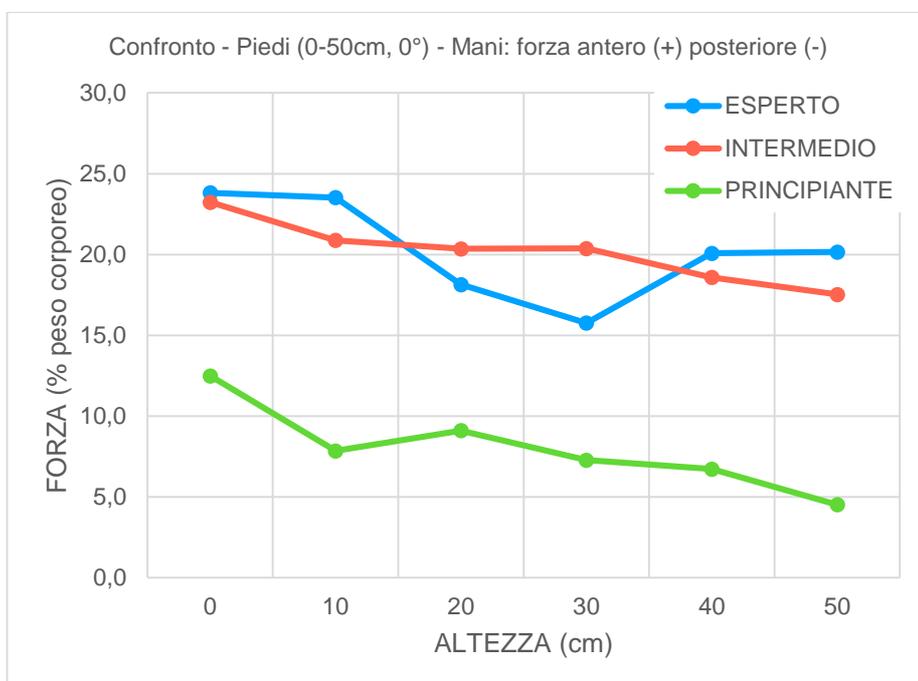


Grafico 20 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dalle mani rispetto all’altezza dell’appoggio dei piedi (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - PIEDI (0-90cm, 0°) - PIEDI: FORZA ANTERO (+) POSTERIORE (-)						
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50
ESPERTO (%PC)	-23.1	-22.4	-22.9	-20.0	-21.2	-12.0
INTERMEDIO (%PC)	-22.4	-20.6	-19.2	-17.1	-17.2	-11.7
PRINCIPIANTE (%PC)	-14.0	/	/	-8.4	/	/

Tabella 28 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio dei piedi nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - PIEDI (0-90cm, 0°) - MANI: FORZA ANTERO (+) POSTERIORE (-)						
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50
ESPERTO (%PC)	23.8	23.5	18.1	15.8	20.1	20.2
INTERMEDIO (%PC)	23.2	20.9	20.4	20.4	18.6	17.5
PRINCIPIANTE (%PC)	12.5	7.9	9.1	7.3	6.7	4.5

Tabella 29 – Confronto delle forze antero-posteriori esercitate dalle mani rispetto all'altezza dell'appoggio dei piedi nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

Il grafico 21 e la tabella 30 riportano i dati inerenti le forze verticali esercitate dai piedi del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre i piedi sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-50 cm e inclinazione costante a 0°.

Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0 e 30 cm. Tale variazione dal protocollo è stata fatta per non sottoporre il soggetto ad un carico di esercizi che sarebbe risultato eccessivo. Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze verticali espresse dai piedi, diminuisce con l'altezza dell'appoggio dei piedi per tutti e tre i soggetti. Le percentuali del peso corporeo del soggetto esperto e del soggetto intermedio hanno un andamento estremamente simile per tutte le altezze. La curva del soggetto principiante, invece, assume valori di percentuale di peso minori rispetto ai precedenti.

Il grafico 22 e la tabella 31 riportano i dati inerenti le forze verticali esercitate dai piedi del soggetto esperto, intermedio e principiante mentre i piedi sono sulla struttura con altezza variabile tra 0-50 cm e inclinazione costante a 0°.

Si è deciso di non rappresentare le deviazioni standard perché sono estremamente piccole rispetto alle misure.

L'andamento delle forze verticali espresse dalle mani, aumenta con l'altezza dell'appoggio dei piedi per tutti e tre i soggetti. Mentre i soggetti esperto ed intermedio hanno un andamento simile, quello principiante parte con una percentuale di peso corporeo maggiore (circa l'8% in più).

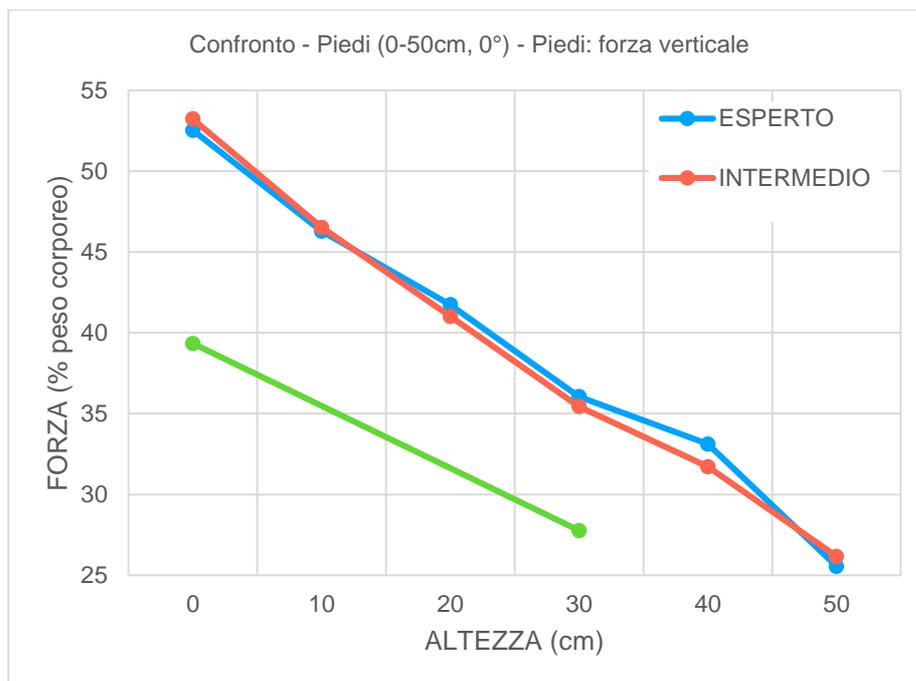


Grafico 21 – Confronto delle forze verticali esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio dei piedi (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

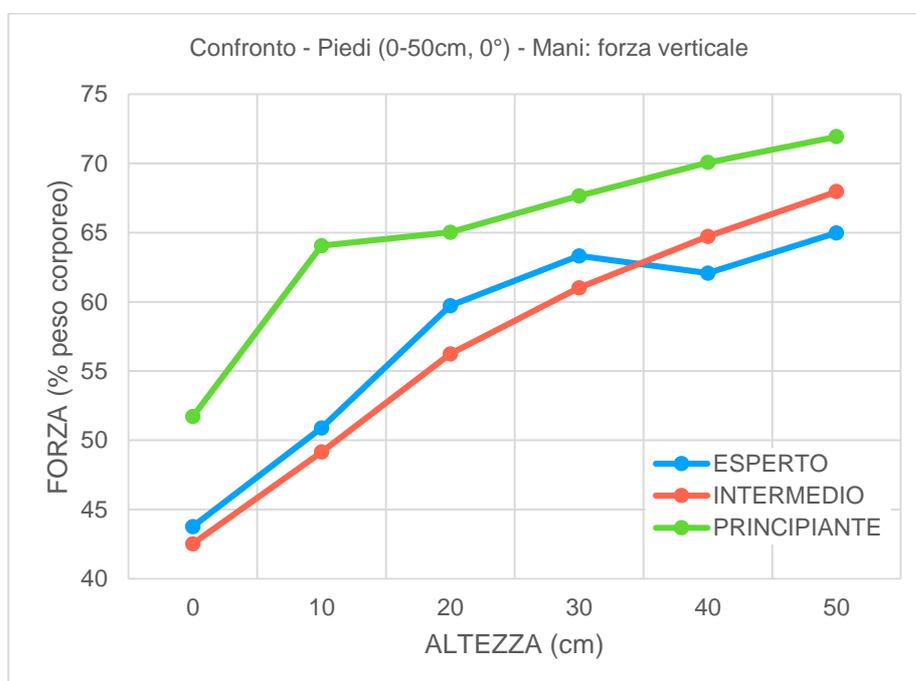


Grafico 22 – Confronto delle forze verticali esercitate dalle mani rispetto all'altezza dell'appoggio dei piedi (asse x) nel soggetto esperto (curva blu), intermedio (curva rossa) e principiante (curva verde). In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. I punti rappresentano le medie delle forze espresse in percentuale del peso corporeo (asse y). Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - PIEDI (0-90cm, 0°) - PIEDI: FORZA VERTICALE						
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50
ESPERTO (%PC)	52.5	46.3	41.7	36.0	33.1	25.6
INTERMEDIO (%PC)	53.2	46.5	41.0	35.4	31.7	26.2
PRINCIPIANTE (%PC)	39.3	/	/	27.8	/	/

Tabella 30 – Confronto delle forze verticali esercitate dai piedi rispetto all'altezza dell'appoggio dei piedi nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Il soggetto principiante ha effettuato la prova solo per le altezze 0, 30 cm in quanto il carico di esercizi sarebbe altrimenti risultato eccessivo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CONFRONTO - PIEDI (0-90cm, 0°) - MANI: FORZA VERTICALE						
Altezza (cm)	0	10	20	30	40	50
ESPERTO (%PC)	43.8	50.9	59.7	63.3	62.1	65.0
INTERMEDIO (%PC)	42.5	49.2	56.2	61.0	64.7	68.0
PRINCIPIANTE (%PC)	51.7	64.2	65.0	67.6	70.1	71.9

Tabella 31 – Confronto delle forze verticali esercitate dalle mani rispetto all'altezza dell'appoggio dei piedi nel soggetto esperto, intermedio e principiante. In questa configurazione i piedi sono sulla struttura e le mani poggiano a terra. Le medie delle forze sono espresse in percentuale del peso corporeo. Non sono rappresentate le dev. std. perché risultano estremamente piccole rispetto alle misure.

CAPITOLO 6 – DISCUSSIONE

Lo scopo del presente studio è quello di osservare come tre soggetti con esperienza diversa (esperto, intermedio e principiante) eseguono una specifica posizione yoga, denominata Adho Mukha Svanasana, (dal sanscrito: “posizione del cane a testa in giù”) e le sue varianti. Le varianti consistono nel cambiamento dell’altezza ed dell’inclinazione della superficie in cui poggiano le mani e i piedi.

6.1 CONFRONTI INTRA-SOGGETTO

6.1.1 VARIAZIONE DELL’ALTEZZA DELL’APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: ANGOLI ARTICOLAZIONE SPALLE

Dall’analisi degli angoli articolari delle spalle, si osserva come il soggetto esperto (**Grafici 1, 2 e 3**), quando l’altezza della struttura è minima (0 cm) e la posizione risulta quindi più impegnativa, tenda ad avere la spalla sinistra maggiormente abdotta, intra-ruotata e flessa rispetto alla destra. Queste differenze, con l’aumentare dell’altezza e quindi con il diminuire della difficoltà di esecuzione dell’esercizio, tendono a ridursi fino ad arrivare, per l’altezza di 90 cm, ad una quasi totale simmetria tra i due arti lungo tutti e tre gli assi anatomici. Si nota inoltre come, all’aumentare dell’altezza, gli angoli articolari in tutti e tre i movimenti (flessione, intra-rotazione, abduzione) della spalla destra aumentino in maniera quasi costante, mentre gli angoli della spalla sinistra tendano a variare maggiormente tra le varie altezze, pur rimanendo all’interno di un intervallo di movimento ridotti. Il soggetto esperto mostra quindi una parziale asimmetria tra le due spalle nella posizione più impegnativa. Di conseguenza il soggetto durante l’esecuzione della posizione più difficile compensa con una dismetria degli arti superiori: questo porta a sollecitare

maggiormente un'articolazione rispetta all'altra. Tale andamento non si verifica invece per gli altri due soggetti.

In particolare, il soggetto intermedio (**Grafici 4, 5 e 6**) mostra degli angoli articolari di abduzione/adduzione e intra/extra rotazione simmetrici tra i due arti nella variante a 0 cm di altezza. Per quanto riguarda il movimento di flessione-estensione, si osserva una flessione maggiore dell'arto destro (in particolare a circa 30 cm) mantenendo un andamento simmetrico tra le varianti; gli angoli articolari di spalla destra e sinistra, inoltre, si discostano tra di loro in maniera non correlabile all'aumentare dell'altezza del supporto. Per le ultime posizioni gli angoli di abduzione/adduzione e flessione/estensione tornano su valori molto simili tra loro, a differenza degli angoli di intra/extra rotazione. Si può notare che per questo soggetto gli angoli articolari dalla posizione iniziale a quella finale sono diversi: per il soggetto esperto, al contrario, gli angoli rimanevano pressoché costanti. Da quanto detto finora si conclude che il soggetto intermedio è molto simmetrico nella posizione più impegnativa, ma non riesce a trovare la stessa simmetria per le restanti varianti, salvo per quella finale, la meno impegnativa. Questo potrebbe essere dovuto al livello di esperienza: essa è sufficiente per conoscere ed attuare con precisione il movimento, ma non sufficiente per mantenere una stabilità costante tra le varianti, come si era visto per il soggetto esperto. La tendenza ad avere una flessione maggiore durante l'ultima posizione rispetto a quelle iniziali denota come la mobilità del soggetto sia influenzata dalla difficoltà dell'esercizio, diventando massima, proprio quando questo non è particolarmente impegnativo.

Infine, per quanto riguarda il soggetto principiante (**Grafici 7, 8 e 9**), si può osservare come gli angoli di abduzione/adduzione ed intra/extra della spalla destra siano maggiori, per tutte le varianti, di quelli della spalla sinistra. In particolare, la spalla sinistra risulta minimamente abdotta, a confronto di un'abduzione importante per la spalla destra. Per la flessione/estensione, vi è invece simmetria tra gli arti per tutte le varianti tranne per le due centrali. Si può concludere che l'aumentare dell'altezza non influenzi particolarmente la simmetria tra gli arti, come si è invece visto per il soggetto esperto ed intermedio, ma rimane un'asimmetria costante sul piano frontale e trasverso. Questa asimmetria è quindi anche assecondata dalla ridotta difficoltà delle varianti. Data la minor escursione nella flessione, il soggetto compensa aumentato le rotazioni e l'abduzione/adduzione delle spalle a secondo della spalla interessata. Questo può essere dovuto ad uno scompenso tra la parte sinistra e destra

del corpo abbastanza marcato per il soggetto, e alla poca conoscenza delle strategie motorie da attuare per compensarla, tipiche dello yoga. Vista anche la poca differenza degli angoli tra 0 cm e 90 cm di altezza della prova, si può ipotizzare anche una muscolatura fortemente contratta ed una ridotta mobilità articolare per il soggetto principiante.

6.1.2 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA E DELL'INCLINAZIONE DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: FORZE – SOGGETTO ESPERTO

Il **Grafico 11**, relativo alle componenti antero-posteriori delle mani, mostra che all'aumentare del valore dell'inclinazione delle mani, i valori delle forze diminuiscono. Quando l'inclinazione è nulla c'è una maggior instabilità e un conseguente aumento del controllo necessario per mantenere la posizione: ciò significa maggior forza muscolare e, quindi, fatica. Inoltre, aumentando l'altezza dell'appoggio delle mani, si può osservare come siano necessarie inclinazioni sempre più accentuate per mantenere la posizione di estensione dell'articolazione radio-carpica a 90°. Ad altezze elevate, l'influenza dell'inclinazione per la componente antero-posteriore è minima, in quanto tutto il peso è maggiormente a carico dei piedi.

Dal **Grafico 12**, si può notare come maggiore è l'inclinazione, maggiore è la forza verticale sui piedi, in quanto il peso sulle mani viene diminuito.

Le precedenti osservazioni non si notano in merito alle componenti antero-posteriori dei piedi (**Grafico 10**) e quelle verticali delle mani (**Grafico 13**), in quanto non dimostrano una particolare dipendenza dall'inclinazione.

L'essere umano stando in una posizione di ortostatismo è più abituato a gestire la componente verticale sui piedi rispetto alle mani e meno la componente antero-posteriore. Questo fattore è importante in quanto durante l'esecuzione dell'esercizio si andrà a posizionare il soggetto con le diverse varianti in modo da diminuire la componente antero-posteriore e quindi a sollecitare meno le articolazioni.

6.2 CONFRONTI INTER-SOGGETTO

6.2.1 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: FORZE

L'andamento generale tra le tre curve (una per soggetto), nei **Grafici 14-15-16-17**, che riportano le forze, è simile. Il motivo che sta dietro tali comportamenti generali è il seguente: essendo le posizioni uguali per tutti i soggetti, è lecito aspettarsi risposte simili da parte del corpo e quindi andamenti delle forze confrontabili. Nella posizione originale, la parte inferiore del corpo e quella superiore sono inclinate: la forza risultante dovuta alla distribuzione del peso ed esercitata dalle mani e dai piedi, avrà una componente parallela al suolo (antero-posteriore) e una perpendicolare (verticale). Man mano che gli arti, grazie alle varianti, si portano perpendicolari alla superficie su cui poggiano, la forza che esercitano avrà sempre più componente verticale e sempre meno componente antero-posteriore.

Le differenze tra le forze esercitate dai tre soggetti mentre eseguono la stessa posizione, potrebbero essere dovute all'esperienza, alla tipologia di preparazione fisica e alle abilità motorie sviluppate. Un soggetto con una discreta percezione del corpo e una buona tecnica durante l'esecuzione del movimento riesce a distribuire in maniera efficace e consapevole il proprio peso su braccia e gambe. La mobilità delle articolazioni, l'elasticità muscolare ed un buon tono muscolare sono necessarie per eseguire i movimenti richiesti da una determinata posizione e per mantenerla costante nel tempo.

La posizione originale è la più complessa tra le varianti prese in esame, ovvero quelle con le mani in appoggio sulla struttura. All'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani, infatti, diminuisce il carico sulle spalle e sulle braccia (si osserva, infatti, che sia la componente antero-posteriore sia quella verticale delle mani diminuiscono); inoltre diminuisce anche il carico sulle gambe, infatti la componente antero-posteriore dei piedi tende a zero, mentre quella verticale aumenta. I muscoli degli arti inferiori sono abituati a lavorare in compressione rispetto alla muscolatura degli arti superiori che lavoro in elevazione. Alla posizione originale, infatti, corrisponde una reazione vincolare antero-posteriore che richiede un maggior lavoro

muscolare e quindi fatica. La reazione vincolare della componente verticale, al contrario, è gestita dalla muscolatura posturale e comporta un dispendio energetico inferiore. In particolare, più i segmenti corporei sono allineati tra loro, minori sono i momenti delle forze applicati su di essi.

Nella posizione finale delle varianti, con le mani in appoggio a 90 cm di altezza ed i piedi a terra, gli arti inferiori sono perpendicolari alla superficie d'appoggio, mentre il tronco e gli arti superiori sono paralleli: le componenti antero-posteriori di mani e piedi, quindi, sono approssimativamente nulle, mentre quelle verticali sono quasi totalmente a carico dei piedi, lasciando l'articolazione delle spalle in scarico. Per questi motivi questa variante è la meno stressante.

Dai **Grafici 14-15** dei tre soggetti in base all'altezza dell'appoggio delle mani, si può osservare come le curve abbiano lo stesso andamento ma una differenza nella percentuale di peso corporeo. Le componenti posteriori dei piedi e anteriori delle mani esercitate dal soggetto principiante, durante l'esecuzione della posizione originale (altezza 0 cm), assumono valori di intensità minori rispetto a quelli dei praticanti più esperti; in particolare, nell'intervallo di altezze 0-40 cm, la componente posteriore è invariata, quindi risulta indipendente rispetto all'aumento dell'altezza. Dai 30 cm il soggetto esperto e intermedio hanno una rapida diminuzione della componente anteriore (mani) e posteriore (piedi), e assumono quindi valori di forze minori di quello principiante. Il soggetto principiante, non conoscendo la corretta esecuzione della posizione, non sa bene come distribuire il peso, comportando un maggior lavoro muscolare, un maggior dispendio energetico e un maggior sovraccarico a livello articolare (soprattutto per gli arti superiori, la colonna e gli arti inferiori). Durante la posizione eseguita correttamente il peso è sopportato maggiormente dagli arti inferiori. Il soggetto principiante non riesce a sfruttare in maniera adeguata le diverse variazioni di posizione, anche quelle che risultano più semplici e, quindi, con meno impegno muscolare. La componente antero-posteriore dipende strettamente dall'esperienza, in quanto dipende da un buon controllo cosciente del gesto.

I **Grafici 16-17** illustrano le componenti verticali delle forze applicate dai piedi e dalle mani dei tre soggetti in base all'altezza dell'appoggio delle mani. Si nota che le curve hanno lo stesso andamento e che da circa 50 cm di altezza fino a 90 cm le curve sono sovrapponibili. Il soggetto principiante nelle altezze da 0 a 40 cm ha maggior componente verticale sulle mani e meno sui piedi, questo implica un sovraccarico a livello dell'articolazione degli arti superiori non abituati a lavorare con

carichi elevati. Nelle altezze da 50 cm a 90 cm non c'è differenza tra i tre soggetti in quanto in queste posizioni prevale la componente verticale che non viene influenzata dall'esperienza dei soggetti, in quanto abituati a stare in posizione eretta.

6.2.2 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DELLE MANI SULLA STRUTTURA: ANGOLI ARTICOLAZIONE LOMBOSACRALE

Per quanto riguarda gli angoli articolari della colonna vertebrale, in particolare della zona lombosacrale L5-S1 (**Grafico 18**), si osserva che con l'aumentare dell'altezza dell'appoggio delle mani il tratto lombosacrale accede ad un maggior intervallo di movimento e di conseguenza la catena cinetica posteriore ha un minor elongazione muscolare.

Il soggetto principiante, tra le altezze di 40 cm a 90 cm, per mantenere la posizione, compensa andando a effettuare un movimento di antiversione del bacino: questo comporta un aumento della lordosi lombare e un sovraccarico di questa zona. Il soggetto esperto e intermedio invece mantengono il bacino in una posizione neutra durante tutte le varianti.

6.2.3 VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DELL'APPOGGIO DEI PIEDI SULLA STRUTTURA: FORZE

Le posizioni che modificano l'altezza dell'appoggio dei piedi sulla struttura risultano più impegnative da ogni punto di vista. Dai **Grafici 19** e **20** che mostrano rispettivamente la componente antero-posteriore sui piedi e sulle mani, si osserva che il soggetto principiante ha un componente posteriore e anteriore molto inferiore al variare delle altezze rispetto agli altri due soggetti che risultano molto simili.

Le considerazioni fatte precedentemente per le varianti che modificano l'appoggio delle mani valgono anche per queste posizioni. Per le componenti verticali delle forze di piedi (**Grafici 21**) e mani (**Grafici 22**), l'andamento della componente dei tre soggetti è simile ma con l'intensità inversa (componente perpendicolare

minore nei piedi a diminuire e maggiore nella mani) rispetto a quello illustrato nei **Grafici 14-15-16-17** inerenti l'appoggio delle mani sulla struttura. Esattamente come prima, il principiante non riesce a distribuire in modo corretto il peso sugli arti inferiori e superiori.

CONCLUSIONE

La posizione “Adho Mukha Svanasana” ovvero la posizione del “Cane a testa in giù”, è una delle asana più comuni e diffuse nello yoga. Tale posizione, essendo fondamentale per imparare le altre asana, è importante eseguirla nel modo migliore per evitare affaticamenti muscolari, sovraccarichi alle articolazioni e possibili infortuni.

L’obiettivo della tesi è stato quello di valutare gli angoli articolari e le forze durante la posizione “Adho Mukha Svanasana” e le sue varianti effettuate da tre soggetti con esperienza diverse, tramite l’utilizzo di sensori inerziali e pedana dinamometrica.

Prima di tutto, anche se era scontato, abbiamo dimostrato che l’esperienza gioca un ruolo fondamentale nell’esecuzione di una posizione yoga, infatti i tre soggetti per poter assumere la stessa asana hanno attuato diverse compensazioni e correzioni. Grazie all’utilizzo delle varianti, inoltre, si è capito come le modifiche di altezza ed inclinazione degli appoggi degli arti influiscono sull’esecuzione della posizione.

L’essere umano stando in una posizione di ortostatismo è più abituato a gestire la componente verticale sui piedi rispetto alle mani e meno la componente antero-posteriore. Questo fattore è importante in quanto durante l’esecuzione dell’esercizio si andrà a posizionare il soggetto con le diverse varianti in modo da diminuire la componente antero-posteriore e quindi a sollecitare meno le articolazioni.

È stato possibile evidenziare quali varianti sono più adeguate alla pratica di soggetti con poca esperienza o con particolari problematiche fisiche. Infatti, si possono eseguire delle varianti ad hoc per soggetti che desiderano esercitare e studiare particolari parti del corpo o per soggetti che desiderano approfittare dei benefici della posizione senza stressare determinate aree sensibili del loro corpo.

Questo studio può rappresentare una base di partenza per eventuali progetti interessati a tematiche simili alle nostre. Esperienze future potrebbero avere una coorte di soggetti maggiore correlando l’età, il sesso, l’esperienza, l’indice di massa corporea, l’altezza, le problematiche fisiche, ecc. Inoltre, si potrebbero valutare altre posizioni yoga (e relative varianti, che magari coinvolgono l’utilizzo di strumenti yoga come

cinture, mattoni di legno, corde, ecc.), utilizzando più pedane di forza associate all'elettromiografia di superficie.

Le possibilità sono moltissime e tutte incredibilmente interessanti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fritjof CAPRA, *Il Tao della fisica*, Adelphi, 1989.
- [2] *Bhagavadgītā*, a cura di Anne-Marie ESNOUIL, Adelphi, 1991.
- [3] B.K.S IYENGAR, *Commento agli yoga sutra di Patanjali*, Edizioni Mediterranee, 2010.
- [4] B.K.S IYENGAR, *Teoria e pratica dello yoga*, Edizioni Mediterranee, 2003.
- [5] Giovanni LEGNANI, Giacomo PALMIERI, *Fondamenti di meccanica e biomeccanica del movimento*, Città studi edizioni, 2016.
- [6] Ray LONG, *The Key Muscles of Hatha Yoga*, Bandha Yoga Publications, 2009.
- [7] Ray LONG, *The Key Poses of Yoga*, Bandha Yoga Publications, 2009.
- [8] Michael W. WHITTLE, *An Introduction to Gait Analysis*, Butterworth-Heinemann, 2007.
- [9] *Xsens MVN User Manual*
- [10] Oliver J. WOODMAN, “An Introduction to inertial navigation”, *Technical Report*, 696, 2007