



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI GENOVA



## Università degli Studi di Genova

Scuola di Scienze Mediche e Farmaceutiche

Dipartimento di Neuroscienze, Riabilitazione, Oftalmologia, Genetica e Scienze Materno-Infantili

### Master in Riabilitazione dei Disordini Muscoloscheletrici

A.A. 2022/2023

Campus Universitario di Savona

# **Come si comportano realmente i movimenti accoppiati nel rachide toracico e in che modo la presenza della gabbia toracica li influenza? Revisione della letteratura**

Candidato:

Dott. FT, Tommaso Podda

Relatore:

Dott.ssa FT, OMPT, Serena Gattuso

# **INDICE**

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>MATERIALI E METODI.....</b>	<b>7</b>
Criteri inclusione .....	7
Fonti informazioni raccolte .....	7
Strategie di ricerca .....	8
Processo selezione articoli .....	8
Raccolta e sintesi dati.....	9
<b>RISULTATI .....</b>	<b>10</b>
Sommario trial inclusi .....	11
Review individuate .....	11
Tabelle risultati dei trial inclusi .....	12
<b>DISCUSSIONE .....</b>	<b>20</b>
Variabilità pattern dei movimenti accoppiati .....	20
Flesso-estensione: movimenti accoppiati.....	21
Rotazione assiale: movimenti accoppiati.....	21
Flessione laterale: movimenti accoppiati .....	23
Differenze emerse in vivo-in vitro.....	24
Ipotesi di cause della variabilità dei movimenti accoppiati.....	25
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>26</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>27</b>

## ABSTRACT

**Introduzione:** Il rachide toracico è la regione del rachide meno studiata. Non vi sono dati concordanti riguardo i movimenti accoppiati, e le precedenti revisioni esplicitavano la necessità di nuova letteratura, specialmente *in vivo*. Sappiamo che la gabbia toracica ha un effetto limitante sul ROM del rachide toracico, in questa revisione narrativa si è voluta indagare la natura dei movimenti accoppiati e l'effetto della gabbia toracica su di essi.

**Materiali e Metodi:** È stata condotta una ricerca sui database PubMed, PEDro e Cochrane in data 1° novembre 2022, rivolta alla biomeccanica del rachide toracico e della gabbia toracica, escludendo successivamente gli studi dove non venivano analizzati i movimenti accoppiati del rachide toracico.

**Risultati:** Sono stati inclusi 8 studi, 4 *in vivo* e 4 *in vitro*, in 2 degli studi *in vitro* sono stati testati i campioni a gabbia toracica intatta e poi progressivamente recisa. Non consistenti e non significativi i movimenti accoppiati sul piano sagittale. In rotazione assiale si osserva in quasi la totalità dei trial un accoppiamento di flessione laterale ipsilaterale. In flessione laterale gli studi *in vivo* indicano un pattern ipsilaterale di rotazione assiale, in quelli *in vitro* non vi è concordanza. La gabbia toracica risulta limitare l'ampiezza ma non alterare i pattern dei movimenti accoppiati.

**Conclusioni:** C'è unanimità sull'assenza di rilevanti e specifici movimenti accoppiati nella flesso-estensione primaria. Nella rotazione assiale prevale un pattern di flessione laterale ipsilaterale, e sono poco osservati e inconsistenti i movimenti associati sul piano sagittale. Nella flessione laterale gli studi *in vivo* concordano su una rotazione assiale ipsilaterale accoppiata, *in vitro* i dati sono contrastanti, in entrambe le condizioni sono scarsi e non sufficienti i dati sui movimenti associati sul piano sagittale. BMI, sesso, ed età non sembrano influenzare i pattern di accoppiamento. La rimozione della gabbia toracica nei setting *in vitro* ha aumentato l'ampiezza dei movimenti accoppiati (congiuntamente al ROM primario) senza alterare i pattern. Si registra nuovamente grande variabilità tra i diversi trial e all'interno dei trial stessi. Si ritiene necessario effettuare nuovi studi *in vivo* con diversi metodi di misura sullo stesso campione.

# INTRODUZIONE

Con questa revisione della letteratura si sono voluti indagare i movimenti accoppiati (*coupled motions*) delle vertebre toraciche, considerando l'influenza della gabbia toracica su di essi. La natura narrativa di questa revisione ha permesso di avere uno spettro ampio nell'inclusione degli articoli per individuare quanto materiale sia disponibile nelle banche dati, considerata la significativa eterogeneità nei setting di analisi, in termini di preparazione anatomica negli studi *in vitro*, nel campione utilizzato e nella modalità di misurazione.

Lo scopo è stato comprendere quale materiale fosse disponibile in letteratura, suddividerlo, ed interpretarne il più oggettivamente possibile i risultati.

I disordini della regione toracica sono risultati, in letteratura, meno prevalenti rispetto a quelli della regione lombare e cervicale,<sup>[1]</sup> nonostante ciò, possono potenzialmente causare un livello di disabilità pari a quello dei disordini lombari.<sup>[2]</sup> Risulta quindi di nostro interesse conoscere ed interpretare correttamente la normale cinematica toracica, essendo la valutazione della mobilità un aspetto fondamentale dell'inquadramento di questi disturbi muscolo-scheletrici.<sup>[3]</sup>

Nel 2007 è stata condotta una revisione sistematica (Sizer et al.), con 8 articoli inclusi, per indagare i movimenti accoppiati del rachide toracico. Veniva discusso come le evidenze fossero inconsistenti, per via dei risultati dalla grande variabilità. Si evidenziava quindi la necessità di specifiche verifiche, prima di poter utilizzare tali conclusioni all'interno del ragionamento clinico. In aggiunta, si evidenziava anche la necessità di produrre nuove sperimentazioni *in vivo*, rendendo disponibili i parametri cinematici del rachide, sia in posizione neutra ma anche flessa ed estesa, vista la grande variabilità riscontrata nei movimenti accoppiati in base alla postura adottata. Tuttavia, gli articoli inclusi non erano di recente data, essendo stati pubblicati tra il 1967 ed il 2002<sup>[4]</sup>

Nel 2022 è stata pubblicata una revisione sistematica (Liebsch et al.), sull'influenza della gabbia toracica sulle proprietà biomeccaniche del rachide toracico, 11 studi inclusi, dove si confermava il ruolo di stabilizzazione e aumento della *stiffness* della gabbia toracica, nei confronti della colonna toracica. Si è osservato innanzitutto che la resezione dei muscoli intercostali, causava un aumento del ROM toracico, specialmente nella rotazione assiale e flessione laterale (circa del 20%). Simile comportamento si è osservato con la frattura longitudinale dello sterno, con un aumento complessivo del ROM, specialmente nella rotazione assiale (circa il 50%). Con la frattura trasversale dello sterno si otteneva un aumento della flesso-estensione circa del 40%, e del 20% con il *release* sternale. La rimozione completa della gabbia toracica era stata indagata in 4 studi, di cui solo uno

nei confronti dell'intero rachide toracico, si è osservato in questo caso un aumento globale del ROM, maggiormente nella rotazione assiale, con un incremento di circa il 130%. [5]

Si riportano di seguito le caratteristiche osteologiche del rachide toracico che lo contraddistinguono rispetto alle altre regioni del rachide, e le caratteristiche osteologiche della gabbia toracica. Il rachide toracico si considera costituito da 12 vertebre (T1-T12), e suddiviso in: superiore (T1-T3), medio (T4-T9) e inferiore (T10-T12). La zona toracica media presenta caratteristiche morfologiche proprie della regione toracica, la regione superiore è di transizione verso quella cervicale, mentre la regione inferiore verso quella lombare. Funzionalmente si individuano delle aree transizionali, che si precisa sono soggette a notevole variabilità per i pareri degli autori: la cerniera cervico-toracica, comprendente la regione da C7 a T4 [6],[7],[8] e la cerniera toraco-lombare comprendente la regione da T10 a L2, dove vi è particolare variabilità anatomica tra i soggetti, e maggiore discordanza tra gli esperti in termini di numero e livello delle vertebre interessate. [9],[10],[11] Le dimensioni dei corpi vertebrali aumentano procedendo in senso caudale in tutti i loro parametri: altezza del corpo, larghezza del piatto vertebrale (End-Plate Width) e profondità del piatto vertebrale (End-Plate Depth), arrivando ad essere circa tre volte più grandi considerando T1 e T12. I corpi vertebrali presentano una forma leggermente a cuneo in direzione ventrale, con angoli di circa 2° sia per il piatto superiore che inferiore. I corpi vertebrali sono disposti nello spazio secondo un angolo complessivo di circa 45°, a costituire la curva cifotica (con un interessamento poco meno di 4° per ogni vertebra). [12] I peduncoli presentano una struttura tridimensionale molto complessa, prevalentemente a forma di "goccia" o di "rene", [13] con convessità in direzione laterale. I processi articolari sono didatticamente definiti inclinati di 60° gradi sul piano trasversale e 20° su quello frontale [14], tuttavia è ben noto il fenomeno del tropismo delle faccette articolari vertebrali, il quale causa una notevole variabilità morfologica. Nella cerniera cervico-toracica si è visto circa il 20% dei soggetti ha dimostrato dei valori diversi da quelli canonici di almeno il 10% dei gradi [15],[16] I processi spinosi si presentano con una lunghezza di circa 50 mm, andando a diminuire a livello di T11 con circa 46 mm di lunghezza. Essi sono lunghi e diretti infero-posteriormente, più inferiormente che distretti cervicale e lombare. I processi trasversi, lunghi e sottili, diretti posteriormente, presentano dimensioni costanti tra T4 e T10, nelle altre regioni vanno diminuendo in senso caudale, presentano ognuno due emi-faccette articolari per l'articolazione con la testa delle coste. L'articolazione costo-vertebrale avviene invece a livello del corpo vertebrale, tramite le faccette costali. T1, T11 e T2 dispongono di faccette intere, mentre le articolazioni per le coste da K2 a K10 si sviluppano tramite 2 emi-faccette posizionate su 2 vertebre adiacenti. [18]

La gabbia toracica è definita dal complesso di rachide toracico, le 12 paia di coste con relative cartilagini nelle estremità sternali, e l'osso sternale, composto da 3 porzioni: *manubrio*, *corpo* e *processo xifoideo*.

La presenza della gabbia toracica si è dimostrata influenzare direttamente la *stiffness* del rachide toracico. [17],[18]

La prima costa (K1) si articola con il manubrio tramite un'articolazione di tipo sincondrotica, tramite la cartilagine costale, e sono spesso presenti relazioni con la seconda articolazione costo-sternale. K1 e K2 (lunga circa il doppio di K1) sono corte, piatte, e curva secondo un angolo più acuto, rispetto a quello delle altre coste. [19], [20] Nelle coste da K2 a K7, denominate anche “coste vere”, le articolazioni sono di tipo sinoviale artrodico doppio. Le coste da K8 a K10, o “coste false” (con variabilità anatomica) non presentano una cartilagine propria con esclusiva articolazione sullo sterno, ma sono vincolate in un'unica cartilagine che prende contatto con quella di K7. Le ultime 2 coste K11 e K12 sono dette “coste fluttuanti”, per via dell'assenza di contatti diretti o indiretti anteriormente con lo sterno. [19]

L'osso sternale è un osso piatto, misura 15-20 cm di lunghezza negli adulti, ed è costituito da 3 porzioni. [19] Il manubrio, la porzione più craniale, esso è morfologicamente piatto e largo, superiormente presenta l'incisura soprasternale, lateralmente si articola bilateralmente con la clavicola, la prima e la seconda costa, tramite le rispettive cartilagini costali. La componente centrale, detta *corpo sternale*, la più allungata ed appiattita, si articola bilateralmente con le coste da K2 a K7, tramite le individuali cartilagini costali. [20] Posteriormente presenta relazioni con il pericardio tramite il legamento sterno-pericardico. [21] Il *processo xifoideo* è la porzione più caudale e più piccola, struttura di natura cartilaginea (ialina prossimalmente ed elastica distalmente) di forma triangolare e lungo tra 2 e 5 cm, in età adulta va incontro a processo di ossificazione. Questa porzione dello sterno, pur avendo relazione anatomica con muscoli come il diaframma e gli addominali non è considerata di grande rilevanza per la meccanica del torace. [22] Nell'atto respiratorio lo sterno si eleva e l'estremità inferiore si muove in senso anteriore. [23]

Il rachide toracico e gabbia toracica, svolgono un ruolo di protezione nei confronti degli organi interni, viene quindi prediletta questa funzione, insieme ad una maggiore stabilità, a scapito della mobilità, che risulta minore rispetto agli altri distretti del rachide.

Il range of motion toracico è stato misurato in molte diverse condizioni, specialmente in termini di preparati anatomici negli studi su cadavere. In una revisione sistematica (Borkowski et al 2016) si è indagato il range of motion toracico tramite 33 studi differenti. È emersa un'elevata disparità nei

risultati in base alle condizioni dei preparati anatomici degli studi, tutti in vitro. Il *range of motion* globale (T1-T12) in 7 studi con gabbia toracica intatta mostravano valori tra 7.93° e 33.9° per la flesso-estensione, tra 10.4° e 47.4° nella flessione laterale, e tra 23.0° e 44.9° nella rotazione assiale. Negli studi effettuati con la rimozione della gabbia toracica, si sono ottenuti valori medi di 28° per la flesso-estensione, 36° per la flessione laterale, e 45° per la rotazione assiale. In prossimità delle cerniere cervico-toracica (segmento T1-T2) e toraco-lombare (segmento T11-T12) si sono misurati i maggiori livelli di mobilità in flesso-estensione e i minori livelli di rotazione assiale. [24] Persistono ad ogni modo risultati sempre molto diversi tra i diversi studi presenti in letteratura [25] e testi di riferimento sul rachide [26]. Nel 2018 una revisione sistematica di 45 studi in vivo, sulla morfologia e la mobilità del rachide toracico propone come valori di mobilità, ottenuti principalmente con metodi non radiologici, 40° per la rotazione assiale (il movimento più ampio), 26° per la flessione laterale, 21° in flessione, e 13° in estensione. [27] Sappiamo inoltre che il centro di rotazione delle vertebre è influenzato dalla presenza della gabbia toracica, esso si anteriorizza con la rimozione delle coste. [28] Occorre ricordare quindi che oltre alle strutture ossee, hanno un ruolo fondamentale le strutture anatomiche quali i legamenti, dischi intervertebrali, muscoli intrinseci del rachide e della gabbia toracica (specialmente i muscoli intercostali), fascia toraco-lombare [29] e probabilmente anche i visceri. Le strutture muscolari possono influenzare sia attivamente che passivamente la cinematica vertebrale e toracica. Per questo motivo, gli studi effettuati in vivo, come più volte sottolineato dagli autori, hanno la potenzialità di restituirci informazioni più fedeli sulla reale biomeccanica, anche se rendono potenzialmente più complicata la misurazione del movimento.

## MATERIALI E METODI

Considerata la scarsità di studi presenti sul rachide toracico in confronto agli altri distretti del rachide, è stata impostata una ricerca su diverse banche dati, più ampia possibile riguardo i termini di ricerca, senza limiti temporali per l'estrazione degli articoli e senza limiti riguardo la tipologia di studio, purché rispondano al quesito clinico posto.

È stata condotta una revisione narrativa della letteratura, stilando un apposito protocollo di ricerca, e seguendo le linee guida PRISMA-P checklist (2020), al fine di mantenere una procedura più chiara possibile per il reperimento dei dati, nonostante la natura narrativa della revisione. (Page et al. 2020)

### Criteri inclusione

Non sono stati posti limiti di inclusione in termini di tipologia di studio e data di pubblicazione.

Sono stati esclusi gli studi con le seguenti caratteristiche:

- Non accettati
- Non in lingua inglese
- Non effettuati sull'essere umano o su preparati anatomici tratti dall'essere umano
- Non relativi al distretto anatomico del torace (T1-T12 e gabbia toracica) o relativi alla sola gabbia toracica, senza considerazione del rachide
- Relativi a test di impatto e traumi prodotti in laboratorio
- Relativi a quadri traumatici, neoplastici, neurologici o chirurgici
- Relativi esclusivamente alla deambulazione, respirazione, o compiti funzionali specifici
- Non relativi ai movimenti accoppiati del rachide

### Fonti informazioni raccolte

Le banche dati consultate sono PubMed, Pedro, e Cochrane, ognuna delle quali tramite la funzione di "ricerca avanzata".

## Strategie di ricerca

La ricerca su PubMed è stata condotta per Titolo e Abstract degli articoli, con la seguente stringa:  
(((((((thorax[Title/Abstract]) OR ("thoracic vertebrae"[Title/Abstract])) OR ("thoracic wall"[Title/Abstract])) OR ("chest wall"[Title/Abstract])) OR ("chest"[Title/Abstract])) OR ("thoracic cage"[Title/Abstract])) OR (ribcage[Title/Abstract])) OR ("rib cage"[Title/Abstract])) OR ("dorsal spine"[Title/Abstract] ("dorsal spine")))) AND ((((((biomechanics[Title/Abstract]) OR (biomechanic[Title/Abstract])) OR (kinematics[Title/Abstract])) OR (kinematic[Title/Abstract])) OR ("biomechanic phenomena"[Title/Abstract])) OR ("coupled motion"[Title/Abstract])) OR ("coupled motions"[Title/Abstract] ("coupled motions"))).

La ricerca su Cochrane, è stata eseguita per Titolo ed Abstract degli articoli, tramite la stringa:  
**(thorax OR "thoracic cage" OR "dorsal spine" OR "thoracic spine" OR chest OR ribcage OR "rib cage" OR "thoracic vertebrae" OR "thoracic wall" OR "chest wall" OR MeSH descriptor: [Thorax] OR MeSH descriptor: [Thoracic vertebrae] OR MeSH descriptor: [Rib cage]) AND (biomechanics OR biomechanic OR kinematics OR kinematic OR "coupled motion" OR "coupled motions" OR "biomechanical phenomena" OR MeSH descriptor: [Biomechanics]) .**

La ricerca su PEDro è stata condotta nella modalità “ricerca avanzata” cercando ognuno dei seguenti termini: **“thoracic spine”, “dorsal spine”, “thorax”, “thoracic cage”, “thoracic wall”, “chest”, “chest wall”, “thoracic vertebrae”, “ribcage”, “rib cage” in combinazione con ognuno dei termini “biomechanics”, “kinematics”, “coupled motion”**, tramite l’operatore booleano **“AND”**.

## Processo di selezione degli articoli

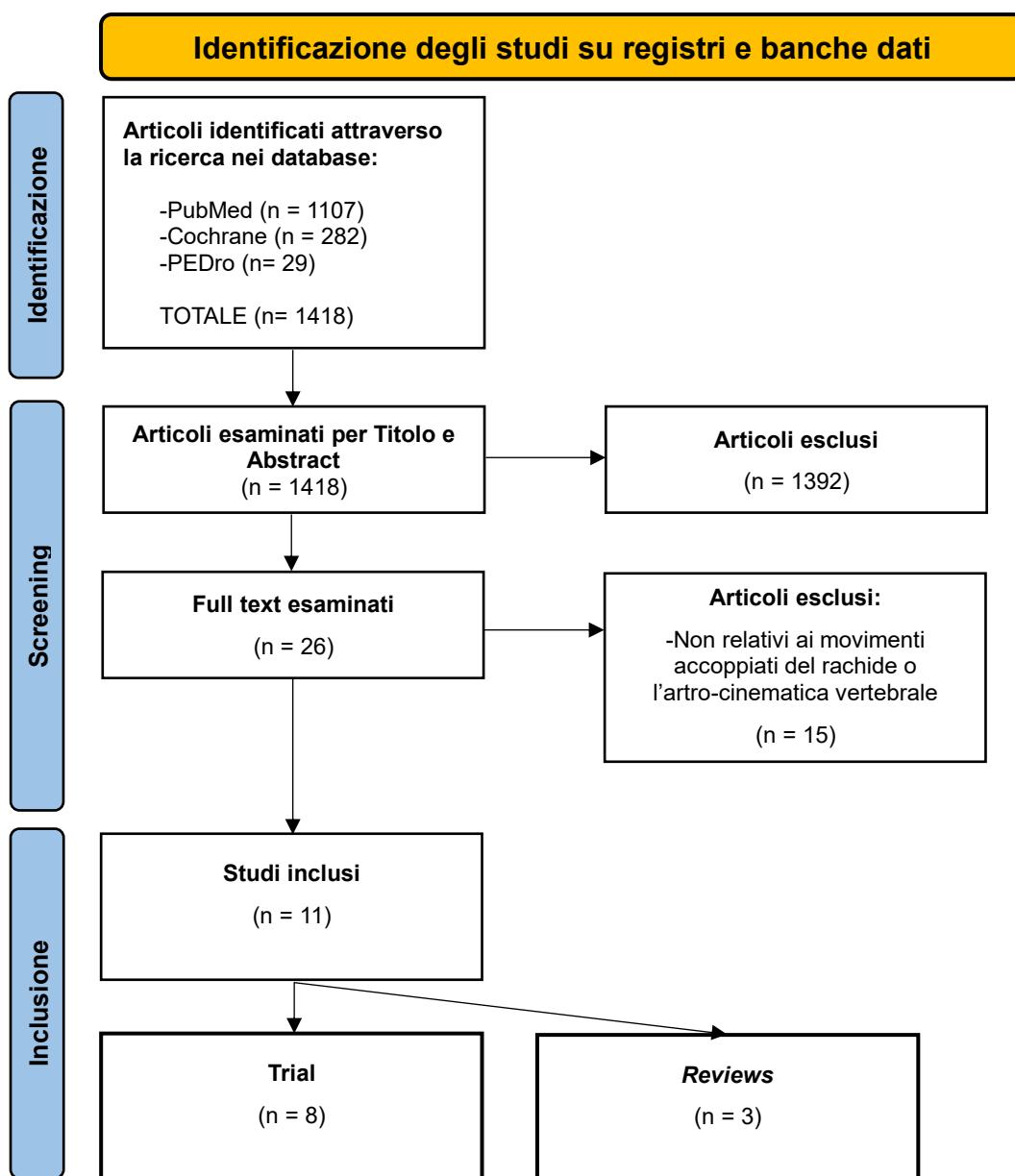
È stato utilizzato il software *Rayyan* come strumento per analizzare Titolo ed Abstract per poi includere/escludere gli articoli ottenuti con le stringhe di ricerca. In seguito all’esclusione degli articoli non pertinenti, secondo Titolo ed Abstract, sono stati analizzati i Full Text degli articoli non esclusi, per determinare definitivamente gli articoli pertinenti alla revisione. Al termine del processo di inclusione, sono stati divisi i trial e revisioni.

## Raccolta e sintesi dei dati

Da ogni articolo incluso sono stati estrapolati: tipologia di studio, campione utilizzato (specificando se *in vivo/in vitro*, età media e sesso dei soggetti quando possibile), il setting sperimentale (modalità di misurazione e posizione del soggetto/campione anatomico), i movimenti analizzati, e i risultati statisticamente significativi, le conclusioni emerse dai risultati.

# RISULTATI

La ricerca su PubMed, effettuata in data 01/11/22, ha generato 1,107 risultati (pubblicati dal 1955 al 2022). La ricerca su Cochrane, effettuata in data 01/11/22, ha prodotto come risultato 282 trials (pubblicati tra il 1985 ed il 2022). La ricerca su PEDro, effettuata in data 01/11/22, ha generato un totale di 29 risultati. Il totale dei 1418 articoli è stato analizzato tramite il software *Rayyan* per visionare i Titoli e Abstract. L'analisi degli articoli secondo Titolo ed Abstract ha portato all'esclusione di 1392 articoli, di conseguenza 26 articoli da valutare secondo il *Full Text*. Di questi ne sono risultati pertinenti 11, di cui 3 *review*, le quali non sono state considerate nell'analisi degli studi. Di seguito il processo di inclusione e la tabella riportante i dati degli 8 studi inclusi, 4 *in vivo* e 4 *in vitro*, ed infine i dati raccolti da essi.



Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;372: n71. doi: 10.1136/bmj.n71

## SOMMARIO TRIAL INCLUSI

<b>Studio</b>	<b>Campione</b>	<b>Preparazione campione</b>	<b>Movimenti testati</b>	<b>Metodologia di misura</b>
<b>Edmondston et al. (2007) [30]</b>	<i>In vivo</i>	X	Rotazione assiale	Marker cutanei + telecamere
<b>Fujimori et al. (2012) [31]</b>		X	Rotazione assiale	CT funzionale
<b>Fujimori et al. (2013) [32]</b>		X	Flessione laterale	CT funzionale
<b>Narimani et al. (2018) [33]</b>		X	Flessione, estensione, flessione laterale, rotazione assiale	Sensori inerziali
<b>Brasiliense et al. (2011) [34]</b>	<i>In vitro</i>	4 campioni: T2-T5 3 campioni: T3-T6 1 campione: T4-T7 + Coste con relativa porzione di sterno + Muscoli intercostali	Flesso-estensione, flessione laterale, rotazione assiale	Marker + stereofotogrammetria 3D
<b>Erin et al. (2015) [35]</b>		T1-T12 + Gabbia toracica	Flesso-estensione, flesso-estensione flessione laterale, rotazione assiale	Marker + telecamere
<b>Liebsch et al. (2017) [36]</b>		C7-L1 + Gabbia toracica + Muscoli intercostali e 5 altre condizioni tramite revisioni graduali	Flesso-estensione, flessione laterale, rotazione assiale	Marker + telecamere
<b>Liebsch et al. (2018) [37]</b>		C7-L1 + Gabbia toracica + Muscoli intercostali	Flesso-estensione, flessione laterale, rotazione assiale: con e senza carico assiale	Marker + telecamere

## REVIEW INDIVIDUATE

<b>Harrison et Al. (1998) [38]</b>	<i>Three-dimensional spinal coupling mechanics: part I-a review of the literature</i>
<b>Lee (2015) [39]</b>	<i>Biomechanics of the thorax - research evidence and clinical expertise.</i>
<b>Liebsch et al. (2022) [40]</b>	<i>How Does the Rib Cage Affect the Biomechanical Properties of the Thoracic Spine a Systematic Literature Review</i>

**Edmondston et al. (2007) [30]**

*Influence of posture on the range of axial rotation and coupled lateral flexion of the thoracic spine*

Tipo di studio	Campione	Setting sperimentale	Movimenti analizzati	Risultati significativi	Conclusioni
Studio osservazionale	<b>In vivo</b> <b>52 soggetti</b> (25M/27F) Età media 23.2 anni (range 18-43) Soggetti sani secondo anamnesi ed esame fisico	<b>Modalità misurazione:</b> Sistema di analisi (PEAK Performance Technologies Inc.) con 4 telecamere optical motion, analisi 3D, poste a terra a 2 m dal soggetto e 3 telecamere a 2 m sopra il soggetto. Marker cutanei posizionati su T2, T6, T10 per ricostruzione 3D del rachide.  <b>Posizione dei soggetti:</b> Seduti su uno sgabello, busto diritto, anche e ginocchia flesse a 90° con piedi appoggiati a terra. Pelvi e cosce stabilizzate da una cintura. Braccia abdotte a 90° con mani appoggiate sulla spalla omolaterale.	Rotazione assiale in posizione: -Neutra -In estensione -In flessione	<b>ROM sex comparison:</b> - Neutro: p<0.05 rotazione sinistra (M>F), p<0.01 rotazione destra (M>F) - Estensione: p<0.05 rotazione sinistra (M>F), p<0.01 rotazione destra (M>F) - Flessione: p<0.05 rotazione sinistra/rotazione destra (M>F)  <b>ROM mean value:</b> - Estensione: p<0.01 vs neutro in inclinazione accoppiata a rotazione dx (estensione>neutro)  <b>Pattern:</b> - Pattern omolaterale: neutro 15%F, 0%M; estensione 0%F, 0%M, flessione 63%F, 15%M - Pattern controlaterale: neutro 59%F, 76%M; estensione 89%F, 80%M; flessione 15%F, 20%M - Pattern variabile: neutro 26%F, 24%M; estensione 11%F, 20%M; 22%F, 20%M	Range of motion assoluto in rotazione assiale simile in posizione neutra ed estesa, ma minore in flessione.  Inclinazione laterale accoppiata (indipendentemente dalla direzione) alla rotazione assiale risultava di 8,9% in posizione neutra, 14,3% estesa e 23,2% flessa, rispetto ai gradi di movimento della rotazione assiale stessa.  L'inclinazione accoppiata media in posizione neutra è risultata di circa 4°.  Range of motion assoluto maggiore nei machi, ma non differenze significative inter-sesso nei movimenti accoppiati.  Pattern controlaterale osservato in estensione in 85% dei soggetti, in posizione neutra nel 67%.  Pattern omolaterale osservato in flessione nel 60% dei soggetti.  Pattern variabile (diverso in base al senso di rotazione) osservato nel 25% dei casi circa, in tutte le posture (neutro, flesso, esteso).

**Fujimori et al. (2012) [31]**

*Kinematics of the Thoracic Spine in Trunk Rotation: In Vivo 3-Dimensional Analysis*

Tipo di studio	Campione	Setting sperimentale	Movimenti analizzati	Risultati significativi	Conclusioni
Studio osservazionale	In vivo  13 soggetti maschi sani, secondo assenza di deformità alla TC, e curve scoliotiche <5°, assenza di malattie polmonari  Età media 33.2 anni (range 30-36)  No atleti o ginnasti	<b>Modalità misurazione:</b>  Acquisizione dati con tomografia computerizzata funzionale a bassa dose di radiazioni  <b>Posizione dei soggetti:</b>  Supini sul tavolo della TC in posizione neutra del rachide con arti superiori dietro la testa. Bacino fissato al tavolo sulla spina iliaca antero-superiore tramite un'ampia cintura.  Cuscino morbido sotto la testa per mantenere la posizione neutra e un altro per supportare il tronco nella posizione in rotazione.	Rotazione assiale attiva massima (fuori da sensazione di discomfort) dalla posizione supina	<b>ROM mean values T1-L1:</b>  -Rotazione assiale: 24.9° ( $\pm 4.9^\circ$ ) -Flessione laterale accoppiata: 7.6 ( $\pm 6.0^\circ$ ) -Flesso-estensione accoppiata: 1.8° ( $\pm 12.4^\circ$ )  Rotazione più ampia nei segmenti centrali T6-T11 ( $p<0.01$ )  <b>Flessione laterale accoppiata:</b>  -ROM mean value tra -0.1° e 2.0° tra 2 singole vertebre -Casistica di flessione laterale verso lo stesso lato della rotazione assiale: 92% in T1-T2, 96% in T2-T3, 92% in T3-T4, 88% in T4-T5, 88% in T5-T6, 85% in T6-T7, 85% in T7-T8, 54% in T8-T9, 54% in T9-T10, 73% in T10-T11, 65% in T11-T12, e <b>38% in T12-L1</b> . Nessuna differenza significativa nel senso della rotazione accoppiata, tranne che in T12-L1 ( $p=0.3$ ).  <b>Flessione-estensione accoppiata:</b> Movimento accoppiato alla rotazione su questo piano, è risultato una leggera flessione con media intervertebrale 0.37° ( $\pm 1.13^\circ$ ).	ROM toracico in rotazione assiale maggiore nella zona centrale, lontano dalle cerniere cervico-toracica e toraco-lombare.  Pattern dei movimenti accoppiati osservato in rotazione assiale è di flessione laterale ipsilaterale (tranne che nel segmento T12-L1 dove lo è risultato solo nel 38% dei casi) e di lieve flessione anteriore.  Misurate anche le traslazioni su tutti i 3 piani, ma non sono risultate significative statisticamente. Valori di poche unità decimali e spesso uguali a 0°.

Fujimori et al. (2013)<sup>[32]</sup>

*Kinematics of the Thoracic Spine in Lateral bending: In Vivo 3-Dimensional Analysis*

Tipo di studio	Campione	Setting sperimentale	Movimenti analizzati	Risultati significativi	Conclusioni
Studio osservazionale	In vivo <b>15 soggetti</b> maschi sani, secondo assenza di deformità alla TC, e curve scoliotiche <5°, assenza di malattie polmonari  Età media 32.8 anni (±1.6 anni)  No atleti o ginnasti	<b>Modalità misurazione:</b> Acquisizione dati con tomografia computerizzata funzionale a bassa dose di radiazioni, elaborazione con Virtual Place software  <b>Posizione dei soggetti:</b> Supini sul tavolo della TC in posizione neutra del rachide con arti superiori dietro la testa.	Flessione laterale attiva massima (fuori da sensazione di discomfort) dalla posizione supina	<b>ROM mean values T1-L1:</b> -Flessione laterale: 15.6° (±6.3°) -Rotazione assiale accoppiata: 6.2° (±4.8°) -Flesso-estensione accoppiata: 0.9° (±2.9°)  <b>Flessione laterale segmentale:</b> Range di valori tra 0.9° e 2.3°, con valori inter-segmentali significativamente minori nella porzione T4-T7 rispetto alla porzione T1-T4 (p=0.28), T7-T10 (p=0.28) e T10-L1 (p<0.001). Valori maggiori in T10-L1 rispetto a T1-T4 (p<0.001) e T7-T10 (p=0.002).  <b>Rotazione assiale accoppiata:</b> Valore inter-segmentale medio 0.2° (±0.6°) Casistica del pattern ipsilaterale rispetto alla flessione laterale 67% in T1-T2, <b>47% in T2-T3,</b> <b>40% in T3-T4</b> , 67% in T4-T5, 67% in T5-T6, 80% in T6-T7, 80% in T7-T8, 80% in T8-T9, 77% in T9-T10, 90% in T10-T11, 90% in T11-T12, e 73% in T12-L1.  <b>Flesso-estensione accoppiata:</b> -Flessione nei segmenti da T1-T10: 0.3° (±1.2°) -0.0° (±0.4°) a livello T9-T10 -Estensione nei segmenti T10-L1: -0.3° (±0.7°)  <b>Traslazione:</b> Significativa solo quella laterale, con range 0.2-0.6 mm, nella direzione di flessione laterale.	ROM flessione laterale minore nella parte medio-superiore e maggiore nella regione T10-L1.  Pattern di rotazione assiale accoppiata prevalentemente ipsilaterale, ma con certa variabilità. I livelli T2-T3 e T3-T4 hanno prodotto invece più frequentemente pattern controlaterale.  Nella flesso-estensione accoppiata si sono verificati valori massimi in corrispondenza delle cerniere: 0.7° (flessione) in T1-T2 e -0.8° (estensione) in T12-L1.  La traslazione intervertebrale è avvenuta prevalentemente in direzione laterale, nella direzione della flessione laterale.

**Narimani et al. (2018) [33]**

*Three-dimensional primary and coupled range of motions and movement coordination of the pelvis, lumbar and thoracic spine in standing*

<b>Tipo di studio</b>	<b>Campione</b>	<b>Setting sperimentale</b>	<b>Movimenti analizzati</b>	<b>Risultati significativi</b>	<b>Conclusioni</b>
<b>Studio osservazionale</b>	<b>In vivo</b> <b>22 soggetti giovani maschi sani, senza recenti problematiche a schiena, anche e ginocchia</b> Età media 24.8 ±1.0 anni (range 24-28)	<b>Modalità misurazione:</b> Sensori inerziali posizionati sulla cute a livello di T1, T5, T12, S1. <b>Posizione dei soggetti:</b> In piedi, rachide in posizione neutra, piedi distanti tra di loro come la larghezza delle spalle, ginocchia estese.	Flessione, estensione, flessioni laterali, rotazioni assiali, in posizione eretta	<p>ROM toracico maggiore nei movimenti di flessione laterale (<math>p&lt;0.001</math>) e rotazione assiale (<math>p&lt;0.05</math>) rispetto alla flesso-estensione.</p> <p>Il ROM globale si è dimostrato superiore nel tratto T5-T12 rispetto al tratto T1-T5.</p> <p>Individuati durante la flesso-estensione piccoli movimenti accoppiati con pattern variabili tra i soggetti.</p> <p>Nella flessione laterale si è osservata una rotazione assiale ipsilaterale nel 75% dei casi nella flessione laterale sinistra e nell'85% dei casi nella flessione laterale destra. La lombare e la pelvi invece hanno effettuato una rotazione controlaterale (55% a sinistra e 65% a destra). (<math>p&lt;0.05</math>)</p> <p>Non con significatività statistica alta, ma nella rotazione assiale si sono osservati valori medi di flessione laterale ipsilaterale alla rotazione.</p>	<p>Movimenti accoppiati di minima rilevanza e con pattern inconsistenti nei movimenti di flesso-estensione.</p> <p>Nella maggior parte dei soggetti si è osservato nella flessione laterale, un pattern di rotazione ipsilaterale accoppiata.</p> <p>Nella rotazione assiale si è apprezzata (con minore significatività) una flessione laterale accoppiata, in direzione ipsilaterale.</p>

**Brasiliense et al. (2011) [34]**

*Biomechanical Contribution of the Rib Cage to Thoracic Stability*

Tipo di studio	Campione	Setting sperimentale	Movimenti analizzati	Risultati significativi	Conclusioni
Studio osservazionale	<p><b>In vitro</b></p> <p><b>8 campioni di rachide toracico superiore con gabbia toracica intatta:</b>            -4 campioni T2-T5            -3 campioni T3-T6            -1 campione T4-T7</p> <p>Rimossi dai campioni pelle, grasso, muscoli superficiali e organi. Intatti i processi articolari, articolazioni costovertebrali, muscoli intercostali e legamenti.</p> <p>5 maschi,            3 femmine.            Età media 62 anni (range 36-92)</p>	<p><b>Modalità misurazione:</b>            Sistema servo-idraulico standard (MTS Minneapolis).            Acquisizione immagini con Optotrak 3020. Analisi movimento con software ideato appositamente.</p> <p><b>6 stadi di test:</b>            1) Intatto            2) Split sterno longitudinale            3) Sternotomy            4) Resezione coste 50%            5) Resezione coste 75%            6) Teste costali disarticolate</p>	<p>Flesso-estensione, flessione laterale, rotazione assiale</p> <p>Applicazione di 7.5 Nm di momento flettente.</p> <p>Effettuati 60 secondi di carico pre-test.</p>	<p>Aumento progressivo del ROM con l'avanzare degli stadi di resezione. Valori significativi statisticamente (<math>p&lt;0.5</math>):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Flessione: dallo stadio 2 in poi: +74%, +141%, +154%, +181%</li> <li>-Estensione: dallo stadio 2 in poi: +260%, +631%, +694%, +702%.</li> <li>-Flessione laterale: dallo stadio 4 in poi: +96% e +182%</li> <li>-Rotazione assiale: Dallo stadio 2 in poi: +</li> </ul> <p>Nei campioni con gabbia toracica intatta, la rotazione assiale accoppiata alla flessione laterale è risultata di <math>0.2^\circ \pm 0.2^\circ</math> controlateralmente alla flessione laterale primaria. Negli stadi di resezione successivi il pattern non è risultato alterarsi (<math>p=0.99</math>)</p> <p>La variabilità è aumentata tra i diversi campioni dallo stadio 4 in poi (resezione 50% delle coste).</p> <p>Non è stato possibile valutare la flessione laterale accoppiata alla rotazione assiale primaria in seguito alla ridotta ampiezza del ROM nella rotazione con i campioni intatti (<math>0.5^\circ \pm 0.3^\circ</math>). Ciò ha portato a grandi rapporti di accoppiamento (<i>coupling ratios</i>) ed estrema variabilità tra i campioni.</p>	<p>Lo split sternale longitudinale non ha in nessun caso aumentato in modo significativo il ROM toracico.</p> <p>Con la rimozione completa dello sterno si è ottenuto un aumento significativo nella flessione, estensione e rotazione assiale, ed in tutti gli stadi successivi si è ottenuto un progressivo aumento del ROM.</p> <p>La flessione laterale è aumentata significativamente solo dopo la resezione al 75% delle coste.</p> <p>È stato possibile misurare solo i movimenti accoppiati di rotazione assiale durante la flessione laterale, i quali avvenivano in direzione controlaterale, con un'ampiezza media di <math>0.2^\circ</math> per ogni grado di movimento di flessione laterale.</p> <p>La progressiva resezione delle strutture anatomiche non ha alterato il pattern di movimento. Ad ogni modo si sono leggermente modificati i rapporti di accoppiamento.</p>

**Erin et al. (2015) [35]**

*Mechanical analysis of the human cadaveric thoracic spine with intact rib cage*

Tipo di studio	Campione	Setting sperimentale	Movimenti analizzati	Risultati significativi	Conclusioni
Studio osservazionale	<b>In vitro</b> <b>7 campioni di rachide toracico (T1-T12) con gabbia toracica intatta.</b>  Rimosse le coste fluttuanti, e i tessuti molli, compresi muscoli intercostali.  RX per escludere fratture ed anomalie del rachide  Età media 71 ( $\pm 7$ ) anni (range 59-82)	<b>Modalità misurazione:</b> Campioni montati su spine testing machine (Applied Test Systems, Butler, USA). Posizionate pin con 3 marker, inserite su viti fissate dentro le vertebre posteriormente. T12 fissata, T1 non vincolata e libera di muoversi.  Elaborazione dati con il software Matlab.	Flessione, estensione, flesso-estensione, flessione laterale, rotazione assiale  Applicati momenti puri di 5Nm alla velocità di 1°/s	Nella flesso-estensione non si sono misurati significativi movimenti accoppiati ( $p=0.19$ )  Per la flessione laterale si è registrata una significativa rotazione assiale 12.4% ( $\pm 8.6$ ) e di flesso-estensione del 24.0% ( $\pm 15.3$ ) rispetto ai gradi del ROM totale T1-T12, ovvero in media 23.3% ( $\pm 8.4$ ). Non vengono specificate le direzioni dei movimenti accoppiati. ( $p<0.005$ )  Per la rotazione assiale T1-T12 (valore medio $26.3^\circ \pm 12.2$ ) di sono registrati dei movimenti significativi in flessione laterale del 12.1% ( $\pm 10.5$ ) rispetto al ROM in rotazione. Non viene specificata la direzione di movimento ( $p<0.05$ ). Non significativi movimenti accoppiati in flesso-estensione ( $p=0.19$ )  Traslazioni significative in tutte le direzioni, eccetto in senso supero-inferiore nella flesso-estensione ( $p=0.08$ ).  Traslazione antero-posteriore in mm: 12.6 ( $\pm 11.1$ ) fl-est, 3.9 ( $\pm 2.6$ ) fl lat, 6.7 ( $\pm 5.1$ ) rot. Traslazione laterale (mm): 2.9 ( $\pm 1.9$ ) fl-est, 30.4 ( $\pm 23.5$ ) fl lat, 8.6 ( $\pm 9.1$ ) rot. Traslazione supero inferiore: 3.4 ( $\pm 4.3$ ) fl-est, 4.2 ( $\pm 3.6$ ) fl lat, 1.6 ( $\pm 1.4$ ) rot.	Durante il movimento di flesso-estensione non si sono osservati i movimenti accoppiati, né traslazioni supero-inferiori significative.  Nella flessione laterale si sono osservati movimenti accoppiati in lieve estensione e di rotazione assiale (non specificata la direzione) e traslazioni significative, specialmente in direzione laterale.  Nella rotazione assiale si sono registrati movimenti accoppiati in flessione laterale (non specificata la direzione), e traslazioni significative, specialmente in senso antero-posteriore (maggiormente che in flessione laterale) e lateralmente (molto inferiormente rispetto alla flessione laterale).

**Liebsch et al. (2017) [36]**

*The rib cage stabilizes the human thoracic spine: An in vitro study using stepwise reduction of rib cage structures*

<b>Tipo di studio</b>	<b>Campione</b>	<b>Setting sperimentale</b>	<b>Movimenti analizzati</b>	<b>Risultati significativi</b>	<b>Conclusioni</b>
<b>Studio osservazionale</b>	<b>In vitro</b>  <b>6 campioni di rachide toracico (T1-L1) con gabbia toracica intatta.</b>  1 maschio e 5 donne, età media 56 anni (range 50-65)  Conservate strutture ossee, cartilaginee, legamentose ed i muscoli intercostali.	<b>Modalità misurazione:</b> Acquisizione dati con sistema ottico Vicon MX13 (Vicon Motion Systems Ltd), con 6 telecamere.  Posizionati 3 marker su ogni spinosa delle vertebre da T1 a T12  C7 e L1 incorporate in polimetilmacrilato.  Elaborazione dati con il software Nexus 1.8.5 (Vicon Motion Systems Ltd)	Flesso-estensione, flessione laterale, rotazione assiale  <b>6 condizioni di test:</b> 1) Gabbia intatta 2) Senza intercostali 3) Sternotomia mediana 4) Resezione coste, conservando le teste 5) Rimozione teste coste K6, K7, K8 6) Rimozione di tutte le teste costali	I risultati statisticamente significativi dei movimenti accoppiati ( $p<0.05$ ):  -Rotazione assiale controlaterale, accoppiata alla flessione laterale primaria. La rotazione accoppiata (tratto T1-T12) presentava valori medi di $4.6^\circ (\pm 2.3^\circ)$ bilateralmente a gabbia intatta. Con gabbia toracica rimossa aumentavano entrambi a $11.8^\circ (\pm 3.2^\circ)$ .  -Lieve flessione laterale ipsilaterale, accoppiata alla rotazione assiale primaria. La flessione laterale accoppiata (tratto T1-T12) presentava valori di $1.1^\circ (\pm 1.2^\circ)$ nella rotazione sinistra, e di $1.1^\circ (\pm 1.3^\circ)$ nella rotazione destra con gabbia toracica intatta. A gabbia toracica rimossa questi valori incrementavano rispettivamente a $2.2^\circ (\pm 2.4^\circ)$ e a $2.2^\circ (\pm 2.4^\circ)$ .  I valori del ROM di riferimento (T1-T12), a gabbia toracica intatta (stadio 1) e a rimozione completa della gabbia toracica (stadio 6) sono:  -Flessione laterale, stadio 1: $14.9^\circ (\pm 3.9^\circ)$ -Flessione laterale, stadio 6: $23.6^\circ (\pm 6.4^\circ)$ -Rotazione assiale, stadio 1: $20.4^\circ (\pm 7.4^\circ)$ -Rotazione assiale, stadio 6: $46.9^\circ (\pm 16.1^\circ)$	La progressiva resezione delle strutture della gabbia toracica ha portato ad un progressivo e significativo aumento del ROM toracico.  Per quanto riguarda l'aumento del ROM, l'effetto più forte ( $1-\beta>0.8$ ) si è registrato con la resezione anteriore delle coste e progressivamente negli stadi successivi per la rotazione assiale, mentre dalla rimozione di K6, K7, K8 in poi per la flessione laterale.  I movimenti accoppiati principalmente osservati sono stati quelli di rotazione accoppiata controlateralmente alla flessione laterale primaria.  Osservabile in modo più lieve poi la leggera flessione laterale ipsilaterale, accoppiata alla rotazione assiale primaria.  La progressiva resezione anatomica delle strutture della gabbia toracica ha prodotto l'aumento dell'ampiezza dei movimenti accoppiati, approssimativamente in modo proporzionale all'aumento del ROM dei movimenti primari.

**Liebsch et al. (2018) [37]**

*The effect of follower loaded on the intersegmental coupled motion characteristics of the human thoracic spine: An in vitro study using entire rib cage specimens*

<b>Tipo di studio</b>	<b>Campione</b>	<b>Setting sperimentale</b>	<b>Movimenti analizzati</b>	<b>Risultati significativi</b>	<b>Conclusioni</b>
<b>Studio osservazionale</b>	<b>In vitro</b> <b>8 campioni di torace età, media 54 ±6 (range 40-60)</b> No traumi, malattie spinali o morte dovuta a cause legate a colonna e gabbia toracica C7-T1 con gabbia toracica intatta, con presenza dei legamenti e muscoli intercostali	<b>Modalità misurazione:</b> Acquisizione dati con sistema ottico Vicon MX13, con 12 telecamere. Posizionati 3 marker su ogni processo spinoso Elaborazione dati con il software Matlab. C7 e T1 integrate per metà della loro altezza in polimetilmetacrilato, e successivamente equipaggiati di flange. Viti su misura inserite lateralmente nei centri di rotazione vertebrali (stimati con RX) per fare da guida ai cavi utilizzati per il carico assiale.	Flesso-estensione, flessione laterale, rotazione assiale con 5Nm di momento flettente puro, in direzione del movimento testato. Movimenti testati senza e successivamente con 400N di carico assiale	Applicazione di carico assiale, ha portato ad una riduzione del ROM in estensione (-46%), flessione laterale destra e sinistra (-72% e -72%), rotazione assiale destra e sinistra (-26% e -26%). La riduzione è avvenuta specialmente nei segmenti da T1 a T5 ( $p<0.01$ ) Riduzione non significativa solo in flessione (-36%) Non significativi movimenti accoppiati durante le flesso-estensione. Movimenti accoppiati apprezzabili registrati in flessione laterale con una piccola estensione ed una più evidente rotazione assiale in direzione ipsilaterale. Il carico assiale ha modificato l'ampiezza dei movimenti accoppiati: riduzione dell'estensione accoppiata del 67% nella flessione sinistra e significativamente dell'80% nella flessione destra ( $p<0.01$ ) e un aumento dell'ampiezza della rotazione assiale accoppiata del 18% nella flessione destra e del 16% nella flessione sinistra, specialmente nei segmenti da T6 a T12. Nella rotazione assiale si è osservato un pattern di flessione laterale controlaterale, lievemente ridotto con l'applicazione del carico assiale, specialmente da T3 a T12.	Il carico assiale ha ridotto il ROM globale in tutte le direzioni, e modificato in diversi modi l'ampiezza dei movimenti accoppiati, ma non il loro pattern. Movimenti accoppiati non significativi in flesso-estensione. Movimenti accoppiati flessione laterale: rotazione assiale ipsilaterale e leggera estensione. Movimenti accoppiati in rotazione assiale: flessione laterale controlaterale. Per quanto riguarda l'influenza del carico assiale sui movimenti accoppiati, solo nel caso della flessione laterale, ha causato l'incremento della rotazione assiale associata, specialmente da T6 a T12.

# DISCUSSIONE

## Variabilità pattern dei movimenti accoppiati

Si conferma la grande variabilità dei risultati ottenuti nei diversi trial. Nell'ultimo decennio sono stati proposti nuovi studi *in vivo*, soddisfacendo in parte le richieste degli studi effettuati precedentemente. Sarebbe interessante osservare in futuri studi la biomeccanica toracica di un dato campione di soggetti, misurata tramite diversi strumenti di misura, all'interno dello stesso trial. In questo modo otterremmo ulteriori informazioni sui motivi della variabilità dei pattern dei movimenti accoppiati misurati fino ad ora, in altre parole capire se essa sia dovuta al campione utilizzato o alla modalità di misurazione. Qualora apprezzassimo risultati simili riguardo ai pattern di movimento con le 2 metodologie di misurazione potremmo ipotizzare che le differenze di pattern osservati nella letteratura possano essere dovuti a differenze nei campioni, viceversa agli strumenti di misura.



*Figura 1: Fujimori et al 2012: Acquisizione della rotazione assiale tramite CT funzionale*



*Figura 2: Fujimori et al. 2013: Acquisizione della flessione laterale tramite CT funzionale*

## Flesso-estensione: movimenti accoppiati

La flesso-estensione è stata analizzata in uno studio *in vivo* (**Narimani et al. 2018**) tramite sensori inerziali, e in quattro studi *in vitro* (**Brasiliense et al. 2011; Erin et al. 2015; Liebsch et al. 2017; Liebsch et al. 2018**). Essa è risultata essere priva di significativi movimenti accoppiati, sia in termini di ROM in gradi, che in termini di pattern di accoppiamento. Pertanto, i movimenti accoppiati registrati su questo piano sono sempre risultati minimi ed inconsistenti, e su questo vi è accordo in tutti i trial considerati.

È risultata invece maggiormente osservabile, *in vitro* da **Erin et al. 2015**, il movimento di traslazione in senso antero-posteriore tra vertebre adiacenti, per un valore complessivo 12.6 mm ( $\pm 11.1$ ) tra T1 e T12.

## Rotazione assiale: movimenti accoppiati

La rotazione assiale è stata misurata *in vivo* da **Edmoston et al. 2017; Fujimori et al. 2012; Narimani et al. 2018** e *in vitro* da **Brasiliense et al. 2011; Erin et al. 2015; Liebsch et al. 2017; Liebsch et al. 2018**. Per quanto riguarda i trial *in vivo* Edmoston et al., individua tramite marker e telecamere, un pattern di accoppiamento di flessione laterale controlaterale alla rotazione assiale primaria, per ciò che riguarda la posizione di partenza a rachide neutro o esteso (percentuale della casistica del pattern esteso>neutro). Per quanto riguarda la posizione di partenza a rachide flesso invece si era individuato un pattern di flessione laterale ipsilaterale alla rotazione primaria. In ogni condizione di misura effettuata si individuava sempre una percentuale di minoranza dove il movimento accoppiato avveniva in direzione opposta, ed ulteriormente si individuava anche una percentuale pressoché costante del 25% di pattern variabili, dove si intendeva un comportamento di pattern di accoppiamento differente tra rotazione primaria destra e rotazione primaria sinistra. Nell'analisi tramite tomografia computerizzata nello studio di **Fujimori et al. 2012**, si sono registrati pattern di flessione laterale accoppiata in direzione ipsilaterale, accompagnata da una leggera flessione. Anche nello studio di **Narimani et al. 2018**, effettuato con l'ausilio di sensori inerziali si è individuato un pattern di flessione laterale ipsilaterale.

Per quanto concerne gli studi *in vitro*, **Brasiliense et al. 2011** dichiara che non è stata possibile l'interpretazione dei dati, specialmente nel setting a gabbia toracica intatta, a detta dell'autore per via di piccoli gradi di movimento registrati ed elevati *coupling ratios* (movimento accoppiato diviso il movimento primario). **Erin et al. 2015** indica il movimento accoppiato di flessione laterale ma non

specifica una direzione preferenziale. **Liebsch et al. 2017** riporta un pattern di flessione laterale in direzione ipsilaterale, **Liebsch et al. 2018** riporta di nuovo un pattern di accoppiamento di flessione laterale ipsilaterale, risultata diminuire con il ROM primario all'applicazione del carico assiale.

Le traslazioni intersegmentali sono state analizzate *in vivo* nello studio di **Fujimori et al. 2012**, ma considerate minime e spesso uguali a 0°, mentre *in vitro* secondo **Erin et al. 2015** si sono verificate traslazioni in senso antero-posteriore maggiormente che nella flessione laterale primaria (valori totali T1-T12: 6.7 mm ( $\pm 5.1$ ) vs 3.9 mm ( $\pm 2.6$ )). Ad ogni modo la traslazione più apprezzabile registrata è stata quella in senso laterale di 8.6 mm ( $\pm 9.1$ ).

Per quanto riguarda l'influenza della gabbia toracica, in **Liebsch et al. 2017** la graduale resezione anatomica delle strutture della gabbia toracica ha portato ad un progressivo aumento del ROM e dell'ampiezza dei movimenti accoppiati ma non ad un'alterazione del loro pattern.

<u>MOVIMENTI ACCOPIATI REGISTRATI IN ROTAZIONE ASSIALE PRIMARIA</u>				
TRIAL	CAMPIONE	METODO MISURA	FLESSIONE LATERALE	PIANO SAGITTNALE
Edmondston et al. (2007)	<i>In vivo</i>	Marker + telecamere	-Controlaterale (posizione N ed EST) -Ipsilaterale (posizione FL)	X
Fujimori et al. (2012)		CT funzionale	Ipsilaterale	Flessione
Fujimori et al. (2013)		X	X	X
Narimani et al. (2018)		Sensori inerziali	Ipsilaterale	X
Brasiliense et al. (2011)	<i>In vitro</i>	Marker + telecamere	X	X
Erin et al. (2015)			Lato non specificato	X
Liebsch et al. (2017)			Ipsilaterale	X
Liebsch et al. (2018)			Ipsilaterale	X

## Flessione laterale: movimenti accoppiati

La flessione laterale è il movimento, per quanto riguarda gli studi inclusi, che ha presentato maggiore significatività statistica nei movimenti accoppiati, principalmente nella rotazione assiale, e in misura minore in movimenti sul piano sagittale.

I movimenti accoppiati della flessione laterale sono stati valutati *in vivo* in **Fujimori et al. 2013** e **Narimani et al. 2018** ed *in vitro* da **Brasiliense et al. 2011; Erin et al. 2015; Liebsch et al. 2017; Liebsch et al. 2018**. **Fujimori et al. 2013** individua tramite CT funzionale una rotazione ipsilaterale nella maggioranza dei casi (con eccezione dei segmenti T2-T3 e T3-T4, che hanno mostrato accoppiamento controlaterale). Individua con meno ampiezza, sul piano sagittale lieve movimento di flessione nei segmenti da T1 a T10 e di lieve estensione nei segmenti da T10 a T12. Anche **Narimani et al. 2018** registra movimento accoppiato di rotazione assiale ipsilaterale, tramite sensori inerziali.

Per quanto concerne gli studi *in vitro*, **Brasiliense et al. 2011** rileva una rotazione assiale accoppiata in direzione controlaterale. **Erin et al. 2015** individua movimenti di rotazione assiale per il 12.4% il ROM della flessione laterale primaria, e del 24.0% sul piano sagittale, tuttavia non specifica le direzioni di movimento su entrambi i piani. **Liebsch et al 2017**, registra un movimento di rotazione assiale controlaterale. Nello studio di **Liebsch et al. 2018**, viene registrata invece una rotazione assiale controlaterale, associata a lieve estensione. Sotto carico assiale si è osservata la riduzione del ROM primario e della estensione associata del 67% nella flessione sinistra e dell'80% nella flessione destra, e allo stesso tempo ad un aumento della rotazione assiale accoppiata del 18% nella flessione sinistra e del 16% nella flessione destra.

**Erin et al. 2015** indica le traslazioni più ampie in senso laterale (controlateralmente) con un valore globale T1-T12 uguale a 30.4 mm ( $\pm 23.5$ ).

L'influenza della gabbia toracica viene studiata in **Brasiliense et al. 2018**, dove la sua rimozione risulta in un aumento del ROM dei movimenti accoppiati, in modo pressoché proporzionale al ROM primario, ma senza l'alterazione dei pattern di accoppiamento. La progressiva resezione delle strutture anatomiche della gabbia toracica, descritta nello studio ha portato ad ogni modo a piccole variazioni del *coupling ratio*. Anche **Liebsch et al. 2018** osserva un aumento dell'ampiezza dei movimenti accoppiati proporzionale all'aumento del ROM primario, con la resezione delle strutture della gabbia toracica.

<u>MOVIMENTI ACCOPPIATI REGISTRATI IN ROTAZIONE FLESSIONE LATERALE</u>				
TRIAL	CAMPIONE	METODO MISURA	ROTAZIONE ASSIALE	PIANO SAGITTAL
Edmondston et al. (2007)	<i>In vivo</i>	X	X	X
Fujimori et al. (2012)		CT funzionale	<u>Ipsilaterale</u> (T2-T4: Controlat.)	-T1-T10: Flessione -T10-T12: Estensione
Fujimori et al. (2013)		X	X	X
Narimani et al. (2018)		Sensori inerziali	<u>Ipsilaterale</u>	X
Brasiliense et al. (2011)	<i>In vitro</i>	Marker + telecamere	<u>Controlaterale</u>	X
Erin et al. (2015)			Non specificata la direzione: 12.4% del ROM primario	<u>Non specificata la direzione: 20.4% del ROM primario</u>
Liebsch et al. (2017)			<u>Controlaterale</u>	X
Liebsch et al. (2018)			<u>Ipsilaterale</u>	<u>Estensione</u>

### Differenze emerse *in vivo-in vitro*

Si è osservata maggiore coerenza tra gli studi *in vivo*, nel caso della rotazione assiale primaria, si osserva solo lo studio di **Edmondston et al. 2018** tramite marker e telecamere, indicare l'accoppiamento controlaterale (dalla posizione neutra o estesa), contrapponendosi a **Fujimori et al. 2012** (CT funzionale) ed **Narimani et al. 2018** (sensori inerziali). Nel caso della flessione laterale primaria c'è accordo tra **Fujimori et al. 2013** (CT funzionale) e **Narimani et al. 2018** (sensori inerziali). Potremmo ipotizzare che lo strumento maggiormente fedele ai movimenti vertebrali reali *in vivo* possa essere la tomografia funzionale, andando a misurare direttamente i movimenti della vertebra, mentre nel caso dei marker o dei sensori inerziali vi è una misurazione indiretta sulla cute ed i tessuti soprastanti. L'unica criticità della CT funzionale potrebbe essere il fatto che è effettuata in posizione supina, e ciò potrebbe alterare la fisiologica biomeccanica tramite l'attivazione di muscoli diversi e la presenza di diversi punti di appoggio del corpo sul lettino del macchinario.

Per quanto riguarda gli studi *in vitro* si osserva minore coerenza tra di essi e nei confronti degli studi *in vivo*. In questo caso il metodo di misurazione rimane sempre il medesimo, tramite marker e telecamere, ma la preparazione dei campioni non è mai standardizzata, pur presentando simili procedimenti (specialmente in studi dei medesimi autori). Inoltre, non sappiamo con certezza che la rimozione dei visceri e tutti i tessuti non muscoloscheletrici non influenzi la cinematica vertebrale, ma ancora più determinante potrebbe essere l'attivazione muscolare sui segmenti vertebrali a poter modificare la cinematica ed i movimenti accoppiati.

Nello specifico, nel caso della rotazione assiale **Brasiliense et al. 2011** e **Liebsch et al. 2017** individuano un pattern controlaterale, mentre **Liebsch et al. 2018**, ipsilaterale, in linea con gli studi *in vivo*. Nel caso della flessione laterale invece sia **Liebsch et al. 2017** che **Liebsch et al. 2018** confermano un pattern ipsilaterale, come negli studi *in vivo*.

### **Ipotesi di cause della variabilità dei movimenti accoppiati**

Come già descritto la diversità delle modalità di misura potrebbe influenzare significativamente i risultati, come anche la stessa misurazione *in vivo* o *in vitro*, per i motivi già descritti. Negli studi effettuati non sembra essere influente il campione considerato (età, etnia, sesso, BMI) tuttavia la scarsa numerosità degli studi effettuati non ci permette di escludere con certezza che questa sia una variabile determinante.

Un aspetto da considerare è la grande variabilità osservata inter-trial: in ognuno degli 8 studi inclusi in ogni misurazione (per quanto riguarda reciprocamente i movimenti di flessione laterale e rotazione assiale) dove si notano sempre percentuali di minoranza che non rispettano i pattern individuati più frequentemente, in particolare in **Edmondston et al. 2007**, il 25% dei soggetti, indipendentemente dal sesso e dalla posizione di partenza della misurazione (neutra, flessa, estesa) presentava un pattern variabile, ovvero una differenza di pattern tra movimento di rotazione assiale destra e rotazione assiale sinistra, nello stesso livello vertebrale.

La variabilità anatomico, come il tropismo delle faccette articolari (deviazione di >10° dall'orientamento standard) [41], [42] e scoliosi (anche se solitamente esclusa per angoli di Cobb >5° nei trial) possono generare senza dubbio varietà dei pattern dei movimenti accoppiati.

# CONCLUSIONI

I dati ottenuti dai trial inclusi confermano una rilevante variabilità nei risultati tra i diversi studi ma anche all'interno dei campioni degli studi stessi. C'è accordo sulla non significativa presenza di movimenti accoppiati durante la flesso-estensione. Nella rotazione assiale prevalgono i dati a sostegno di un pattern di flessione laterale ipsilaterale. Per il movimento di flessione laterale si osserva un pattern di rotazione assiale ipsilaterale negli studi *in vivo*, mentre in quelli *in vitro* i dati non sono concordanti. Nella flessione laterale e nella rotazione assiale primaria sono presenti scarsi dati, e non concordanti, per quanto concerne i movimenti accoppiati sul piano sagittale. Variabili quale sesso, età, BMI non sembrano influenzare i pattern dei movimenti accoppiati. Negli studi *in vitro* la rimozione delle strutture della gabbia toracica ha dimostrato un aumento dell'ampiezza dei movimenti accoppiati, a pari passo con l'aumento del ROM globale, ma senza alterazione dei pattern di accoppiamento cinematico.

Ulteriori informazioni potrebbero essere ottenute da nuovi trial effettuati *in vivo* tramite differenti modalità di misurazione, per verificarne la congruenza, e sicuramente per aumentare il *pool* di studi al quale poter attingere circa la biomeccanica toracica, meno studiata rispetto a quella cervicale e lombare. Ciò sarebbe utile per fornire indicazioni sempre più precise in ambito ortopedico, dove risulta necessario ripristinare la fisiologica biomeccanica toracica, e anche se con minor peso, in ambito riabilitativo, si avrebbero indicazioni più precise su come rispettare i piani di trattamento ed impostare percorsi riabilitativi che rispettino più possibile la biomeccanica fisiologica, se possibile nel caso specifico dell'individuo interessato, ma considerando sempre la biomeccanica integrata nel modello bio-psico-sociale, e nel contesto di una elevata prevalenza di problematiche muscolo-scheletriche al rachide, aspecifiche, dove si necessita un approccio globale alla persona.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Alshami AM. Prevalence of spinal disorders and their relationships with age and gender. *Saudi Med J.* 2015 Jun;36(6):725-30. doi: 10.15537/smj.2015.6.11095. PMID: 25987116; PMCID: PMC4454908.
- [2] Occhipinti E, Colombini D, Grieco A. Study of distribution and characteristics of spinal disorders using a validated questionnaire in a group of male subjects not exposed to occupational spinal risk factors. *Spine (Phila Pa 1976).* 1993 Jul;18(9):1150-9. doi: 10.1097/00007632-199307000-00006. PMID: 8362320.
- [3] Heneghan NR, Rushton A. Understanding why the thoracic region is the 'Cinderella' region of the spine. *Man Ther.* 2016 Feb;21:274-6. doi: 10.1016/j.math.2015.06.010. Epub 2015 Jul 9. PMID: 26189592.
- [4] Sizer PS Jr, Brismée JM, Cook C. Coupling behavior of the thoracic spine: a systematic review of the literature. *J Manipulative Physiol Ther.* 2007 Jun;30(5):390-9. doi: 10.1016/j.jmpt.2007.04.009. PMID: 17574958.
- [5] Liebsch C, Wilke HJ. How Does the Rib Cage Affect the Biomechanical Properties of the Thoracic Spine? A Systematic Literature Review. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022 Jun 15;10:904539. doi: 10.3389/fbioe.2022.904539. PMID: 35782518; PMCID: PMC9240654.
- [6] Micsusi M, Bellitti A, Polli FM. Surgical approaches to the cervico-thoracic junction. *J Neurosurg Sci.* 2005 Jun;49(2):49-57. PMID: 16247344.
- [7] Donnarumma P, Nigro L, Tarantino R, De Giacomo T, Delfini R. The Manubriotomy is a safe option for the anterior approach to the cervico-thoracic junction. *J Spine Surg.* 2017 Sep;3(3):426-428. doi: 10.21037/jss.2017.06.23. PMID: 29057353; PMCID: PMC5637197.
- [8] Stanescu S, Ebraheim NA, Yeasting R, Bailey AS, Jackson WT. Morphometric evaluation of the cervico-thoracic junction. Practical considerations for posterior fixation of the spine. *Spine (Phila Pa 1976).* 1994 Sep 15;19(18):2082-8. doi: 10.1097/00007632-199409150-00014. PMID: 7825050.
- [9] Singer KP, Breidahl PD. Accessory ossification centres at the thoracolumbar junction. *Surg Radiol Anat.* 1990;12(1):53-8. doi: 10.1007/BF02094126. PMID: 2345897.

- [10] Masharawi Y, Rothschild B, Salame K, Dar G, Peleg S, Hershkovitz I. Facet tropism and interfacet shape in the thoracolumbar vertebrae: characterization and biomechanical interpretation. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005 Jun 1;30(11):E281-92. doi: 10.1097/01.brs.0000164098.00201.8d. PMID: 15928537.
- [11] Goudet P, Baulot E, Trouilloud P, Proy A, Cougard P, Autissier JM. La jonction thoraco-lombaire. Orientation des zygapophyses, tubercles mamillaires et rotation vertébrale [The thoraco-lumbar junction. Orientation of zygapophyses, mamillary process and vertebral rotation]. *Bull Assoc Anat (Nancy)*. 1995 Jun;79(245):13-20. French. PMID: 8534920.
- [12] Panjabi MM, Takata K, Goel V, Federico D, Oxland T, Duranceau J, Krag M. Thoracic human vertebrae. Quantitative three-dimensional anatomy. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1991 Aug;16(8):888-901. doi: 10.1097/00007632-199108000-00006. PMID: 1948374.
- [13] Panjabi MM, O'Holleran JD, Crisco JJ 3rd, Kothe R. Complexity of the thoracic spine pedicle anatomy. *Eur Spine J*. 1997;6(1):19-24. doi: 10.1007/BF01676570. PMID: 9093823; PMCID: PMC3454633.
- [14] Neumann, Donald A. *Kinesiology of the Musculoskeletal System : Foundations for Physical Rehabilitation*. St. Louis :Mosby, 2002.
- [15] Pal GP, Routal RV. Mechanism of change in the orientation of the articular process of the zygapophyseal joint at the thoracolumbar junction. *J Anat*. 1999 Aug;195 ( Pt 2)(Pt 2):199-209. doi: 10.1046/j.1469-7580.1999.19520199.x. PMID: 10529057; PMCID: PMC1467985.
- [16] Boyle JJ, Singer KP, Milne N. Morphological survey of the cervicothoracic junctional region. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1996 Mar 1;21(5):544-8. doi: 10.1097/00007632-199603010-00003. PMID: 8852307.
- [17] Chansirinukor W, Lee M, Latimer J. Contribution of ribcage movement to thoracolumbar posteroanterior stiffness. *J Manipulative Physiol Ther*. 2003 Mar-Apr;26(3):176-83. doi: 10.1016/S0161-4754(02)54131-2. PMID: 12704310.
- [18] Mannen EM, Anderson JT, Arnold PM, Friis EA. Mechanical Contribution of the Rib Cage in the Human Cadaveric Thoracic Spine. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2015 Jul 1;40(13):E760-6. doi: 10.1097/BRS.0000000000000879. PMID: 25768687.

- [19] Carrier G, Fréchette E, Ugalde P, Deslauriers J. Correlative anatomy for the sternum and ribs, costovertebral angle, chest wall muscles and intercostal spaces, thoracic outlet. *Thorac Surg Clin.* 2007 Nov;17(4):521-8. doi: 10.1016/j.thorsurg.2007.04.003. PMID: 18271166.
- [20] Schils JP, Resnick D, Haghghi P, Trudell D, Sartoris DJ. Sternocostal joints. Anatomic, radiographic and pathologic features in adult cadavers. *Invest Radiol.* 1989 Aug;24(8):596-603. PMID: 2777528.
- [21] Hacking C, Ma J, Hancox J, Pericardial ligaments. Reference article, Radiopaedia.org (Accessed on 16 Apr 2023) <https://doi.org/10.53347/rID-54168>
- [22] Anderson BW, Holme MR, Burns B. Anatomy Thorax, Xiphoid Process. 2022 Jul 19 In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023 Jan-. PMID: 30252338
- [23] Graeber GM, Nazim M. The anatomy of the ribs and the sternum and their relationship to chest wall structure and function. *Thorac Surg Clin.* 2007 Nov;17(4):473-89, vi. doi: 10.1016/j.thorsurg.2006.12.010. PMID: 18271162.
- [24] Borkowski SL, Tamrazian E, Bowen RE, Scaduto AA, Ebramzadeh E, Sangiorgio SN. Challenging the Conventional Standard for Thoracic Spine Range of Motion: A Systematic Review. *JBJS Rev.* 2016 Apr 5;4(4):e51-e511. doi: 10.2106/JBJS.RVW.O.00048. PMID: 27487429.
- [25] Wilke HJ, Herkommer A, Werner K, Liebsch C. In vitro analysis of the segmental flexibility of the thoracic spine. *PLoS One.* 2017 May 16;12(5):e0177823. doi: 10.1371/journal.pone.0177823. PMID: 28520819; PMCID: PMC5433776.
- [26] White AA, Panjabi MM: Kinematics of the spine White AA 3rd, Panjabi MM. The basic kinematics of the human spine. A review of past and current knowledge. *Spine (Phila Pa 1976).* 1978 Mar;3(1):12-20. doi: 10.1097/00007632-197803000-00003. PMID: 347598.
- [27] Pan F, Firouzabadi A, Reitmaier S, Zander T, Schmidt H. The shape and mobility of the thoracic spine in asymptomatic adults - A systematic review of in vivo studies. *J Biomech.* 2018 Sep 10;78:21-35. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.07.041. Epub 2018 Aug 4. PMID: 30100219.
- [28] Molnár S, Manó S, Kiss L, Csernátony Z. Ex vivo and in vitro determination of the axial rotational axis of the human thoracic spine. *Spine (Phila Pa 1976).* 2006 Dec 15;31(26):E984-91. doi: 10.1097/01.brs.0000250183.97746.51. PMID: 17172989.

- [29] Loukas M, Shoja MM, Thurston T, Jones VL, Linganna S, Tubbs RS. Anatomy and biomechanics of the vertebral aponeurosis part of the posterior layer of the thoracolumbar fascia. *Surg Radiol Anat.* 2008 Mar;30(2):125-9. doi: 10.1007/s00276-007-0291-4. Epub 2007 Dec 18. PMID: 18087664.
- [30] Edmondston SJ, Aggerholm M, Elfving S, Flores N, Ng C, Smith R, Netto K. Influence of posture on the range of axial rotation and coupled lateral flexion of the thoracic spine. *J Manipulative Physiol Ther.* 2007 Mar-Apr;30(3):193-9. doi: 10.1016/j.jmpt.2007.01.010. PMID: 17416273.
- [31] Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Ishii T, Kashii M, Murase T, Sugiura T, Matsuo Y, Sugamoto K, Yoshikawa H. Kinematics of the thoracic spine in trunk rotation: in vivo 3-dimensional analysis. *Spine (Phila Pa 1976).* 2012 Oct 1;37(21):E1318-28. doi: 10.1097/BRS.0b013e318267254b. PMID: 22772578.
- [32] Fujimori T, Iwasaki M, Nagamoto Y, Matsuo Y, Ishii T, Sugiura T, Kashii M, Murase T, Sugamoto K, Yoshikawa H. Kinematics of the thoracic spine in trunk lateral bending: in vivo three-dimensional analysis. *Spine J.* 2014 Sep 1;14(9):1991-9. doi: 10.1016/j.spinee.2013.11.054. Epub 2013 Dec 10. PMID: 24333460.
- [33] Narimani M, Arjmand N. Three-dimensional primary and coupled range of motions and movement coordination of the pelvis, lumbar and thoracic spine in standing posture using inertial tracking device. *J Biomech.* 2018 Mar 1;69:169-174. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.01.017. PMID: 29395226.
- [34] Brasiliense LB, Lazaro BC, Reyes PM, Dogan S, Theodore N, Crawford NR. Biomechanical contribution of the rib cage to thoracic stability. *Spine (Phila Pa 1976).* 2011 Dec 15;36(26):E1686-93. doi: 10.1097/BRS.0b013e318219ce84. PMID: 22138782.
- [35] Mannen EM, Anderson JT, Arnold PM, Friis EA. Mechanical Contribution of the Rib Cage in the Human Cadaveric Thoracic Spine. *Spine (Phila Pa 1976).* 2015 Jul 1;40(13):E760-6. doi: 10.1097/BRS.0000000000000879. PMID: 25768687.
- [36] Liebsch C, Graf N, Appelt K, Wilke HJ. The rib cage stabilizes the human thoracic spine: An in vitro study using stepwise reduction of rib cage structures. *PLoS One.* 2017 Jun 1;12(6):e0178733. doi: 10.1371/journal.pone.0178733. PMID: 28570671; PMCID: PMC5453693.
- [37] Liebsch C, Graf N, Wilke HJ. The effect of follower load on the intersegmental coupled motion characteristics of the human thoracic spine: An in vitro study using entire rib cage specimens. *J*

Biomech. 2018 Sep 10;78:36-44. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.06.025. Epub 2018 Jul 6. PMID: 30031651.

[38] Harrison DE, Harrison DD, Troyanovich SJ. Three-dimensional spinal coupling mechanics: Part I. A review of the literature. J Manipulative Physiol Ther. 1998 Feb;21(2):101-13. PMID: 9502066.

[39] Lee DG. Biomechanics of the thorax - research evidence and clinical expertise. J Man Manip Ther. 2015 Jul;23(3):128-38. doi: 10.1179/2042618615Y.0000000008. PMID: 26309383; PMCID: PMC4534848.

[40] Liebsch C, Wilke HJ. How Does the Rib Cage Affect the Biomechanical Properties of the Thoracic Spine? A Systematic Literature Review. Front Bioeng Biotechnol. 2022 Jun 15;10:904539. doi: 10.3389/fbioe.2022.904539. PMID: 35782518; PMCID: PMC9240654.

[41] Boyle JJW, Singer KP, Milne N (1996) Morphological survey of the cervicothoracic junctional region. Spine;21(5): 544-548

[42] Wysocki J, Bubrowski M, Reymond J, Kwiatkowski J (2003) Anatomical variants of the cervical vertebrae and the first thoracic vertebra in man. Folia Morphol;62(4):357-363