

## Colonna vertebrale nel piano frontale e rotatorio – Parte II Scoliosi: interpretazione biomeccanica e applicazione dei principi vettoriali

Dott. Mauro Lastrico – dott.ssa Laura Manni

### Nota editoriale

Questo articolo costituisce la **Parte II** del capitolo dedicato all'analisi biomeccanica della colonna vertebrale nel piano frontale e rotatorio.

La lettura di questo contenuto presuppone la conoscenza dei criteri metodologici e dei principi vettoriali sviluppati nella Parte I.

## 10 Scoliosi: applicazione dei principi fisici

### 10.1 Premesse eziologiche e biomeccaniche

L'eziologia della scoliosi idiopatica rimane sostanzialmente sconosciuta nonostante decenni di ricerca.

Sono state proposte diverse teorie - genetiche, neurologiche, biomeccaniche, metaboliche, ormonali, eccetera - ma nessuna spiega completamente il fenomeno.

Ciò che si osserva clinicamente è che la progressione delle curve è più rapida durante la crescita puberale e tende a stabilizzarsi, ma non necessariamente a fermarsi, dopo la maturità scheletrica.

L'analisi biomeccanica che segue non pretende di spiegare le cause della scoliosi, ma si limita a descrivere i meccanismi vettoriali attraverso cui le deviazioni vertebrali si manifestano e possono essere interpretate dal punto di vista muscolare.

L' "eccetera" sottolinea che l'elenco non è esaustivo e che si tratta di ipotesi ancora in studio.

### 10.2 Un criterio interpretativo: il rapporto rotazione/deviazione

Nell'analisi biomeccanica delle scoliosi, l'osservazione del rapporto tra rotazione e deviazione vertebrale può fornire indicazioni sulla risposta al trattamento.

Come visto nei paragrafi precedenti, fisiologicamente la rotazione dei corpi vertebrali è controlaterale alla deviazione laterale rispetto all'asse mediano.

In alcune scoliosi questa relazione si inverte: convessità e rotazione diventano omolaterali.

Questa osservazione clinica, derivata dalla pratica terapeutica, suggerisce una possibile chiave interpretativa:

**Ipotesi 1:** Quando la rotazione dei corpi vertebrali rimane opposta alla deviazione laterale (pattern fisiologico), potrebbero esistere margini di miglioramento con il trattamento sul sistema muscolare.

**Ipotesi 2:** Quando la rotazione dei corpi vertebrali è omolaterale alla deviazione laterale (pattern non fisiologico), la curva scoliotica potrebbe essere talmente strutturata da non rispondere al lavoro diretto ai muscoli.

Questo criterio rappresenta un'osservazione empirica che necessita di validazione scientifica e non sostituisce le classificazioni radiologiche standard (Lenke, King-Moe) utilizzate in ambito ortopedico. Potrebbe però fornire informazioni aggiuntive sulla possibilità di modificare le deformità scheletriche attraverso il lavoro sul sistema muscolare.

### 10.3 Applicazione del criterio alle diverse fasi

Il criterio interpretativo proposto suggerisce approcci differenziati basati sulla valutazione del rapporto rotazione/deviazione.

#### Fase di crescita attiva

Non conoscendo le cause della scoliosi idiopatica, l'intervento durante la crescita richiede necessariamente un approccio multidisciplinare.

Quando si osserva congruenza tra rotazione e convessità vertebrale (pattern fisiologico), sembra esistere, teoricamente, la possibilità di intervenire sulla componente muscolare.

Qualsiasi lavoro mirato alla diminuzione della forza resistente deve però essere valutato con l'équipe medica.

L'aumento della forza resistente osservato potrebbe rappresentare un meccanismo compensatorio che il sistema nervoso ha sviluppato per contenere la progressione delle curve.

Interferire con questo equilibrio senza adeguata valutazione potrebbe alterare una strategia difensiva spontanea del sistema.

#### Fase adulta stabilizzata

Dopo la maturità scheletrica si lavora sugli esiti della malattia, ormai conclusa nella sua fase attiva.

L'approccio rimane multidisciplinare ma le prospettive cambiano.

Quando il pattern rotazione/deviazione è fisiologico (rotazione opposta alla convessità), le possibilità di ottenere un miglioramento effettivo dei gradi di curva sono maggiori rispetto alla fase di crescita.

Il sistema non è più sottoposto alle forze evolutive ignote della patologia attiva e il lavoro sul riequilibrio vettoriale può esprimere il suo potenziale.

Il criterio diventa quindi operativo: nel pattern fisiologico si lavora per ridurre sia la sintomatologia che i gradi di curva attraverso la diminuzione della forza resistente.

Nel pattern non fisiologico (rotazione omolaterale alla convessità) l'obiettivo si limita al controllo sintomatologico, essendo la deformità ormai probabilmente strutturata.

In entrambi i casi si cerca di ottimizzare il rapporto tra forza resistente e forza lavoro per migliorare la funzionalità complessiva.

#### 10.4 Analisi Vettoriale nelle Scoliosi

L'analisi dei vettori dominanti sulle quattro curve muscolarmente indipendenti è identica a quanto esposto in precedenza.

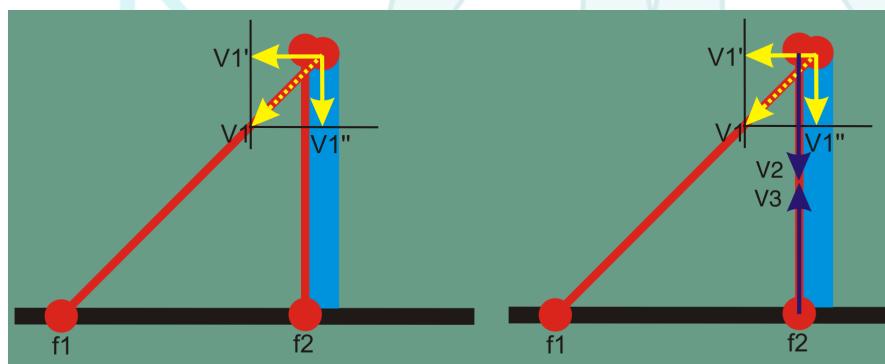
Nella scoliosi tutto risulta però più accentuato.

Sul piano sagittale le componenti verticali dei muscoli che agiscono nei due lati della colonna sono vettorialmente diverse ma si sommano, alterando l'andamento della sinusoida vertebrale.

Sul piano frontale le componenti orizzontali dei muscoli con inserzione diretta in colonna possono essere bilanciate da muscoli controlaterali che hanno vettori di eguale intensità ma verso contrario.

La trazione esercitata sulle vertebre toraciche dai romboidi, per esempio, può essere bilanciata dai romboidi controlaterali, che potenzialmente esprimono forza uguale e contraria.

A contrastare la deviazione laterale concorrono i paravertebrali che, attraverso i loro vettori longitudinali, irrigidiscono la colonna.



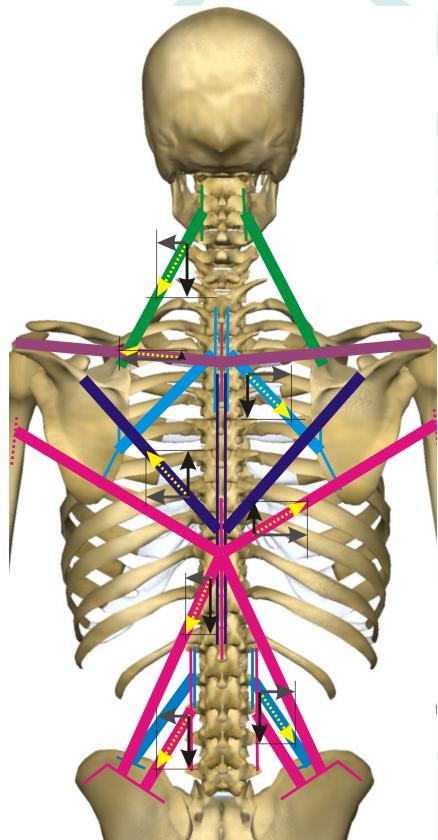
*Figura 7.21 - Due forze, una obliqua e una longitudinale applicate a un'asta esprimono componenti vettoriali diverse. La forza  $f_1$  ha una risultante vettoriale  $V_1$  composta da una componente orizzontale  $V_1'$  e una verticale  $V_1''$ . La componente orizzontale  $V_1'$  determina la deviazione laterale*

dell'asta, mentre la componente verticale  $V1''$  stabilizza e irrigidisce l'asta. La forza  $f2$  ha vettori  $V2$  e  $V3$  unicamente verticali che stabilizzano e irrigidiscono l'asta. L'espressione della componente orizzontale  $V1'$  può essere neutralizzata attraverso il lavoro ad alta intensità dei vettori verticali  $V2$  e  $V3$  espressi dalla forza  $f2$  a cui si somma la componente verticale  $V1''$  espressa dalla forza  $f1$ .

## 10.5 La prevalenza delle componenti verticali

Tutti i muscoli obliqui, oltre alle componenti orizzontali, presentano componenti verticali.

Queste, sommate a quelle dei paravertebrali, modificano l'andamento sagittale della colonna e la irrigidiscono.



*Figura 7.22 –*

- elevatore della scapola: verde;
- fasci medi trapezio: viola;
- romboidi: azzurro;
- fasci inferiori trapezio: blu scuro;
- gran dorsale: magenta;
- quadrato dei lombi: blu.

*Componenti vettoriali orizzontali (frecce grigie) e verticali (frecce nere) espresse dai muscoli obliqui con inserzione in colonna vertebrale.*

*La sommatoria delle componenti verticali, che alterano la sinusoide vertebrale e irrigidiscono la colonna, è maggiore della sommatoria di quelle orizzontali che la deviano lateralmente.*

*Se alle componenti verticali dei muscoli obliqui si sommano i vettori verticali espressi dai paravertebrali, la differenza si accentua notevolmente (non rappresentata in figura).*

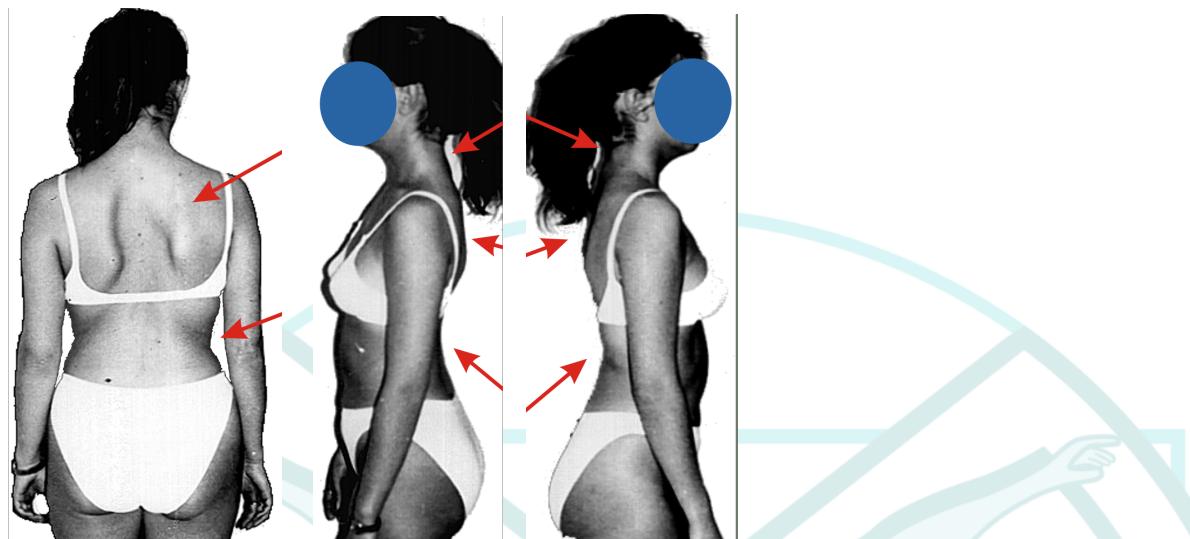
## 10.6 La scoliosi come espressione di saturazione sagittale

Nel capitolo sul modello neurofisiologico verrà esposto come il sistema distribuisce gli accorciamenti muscolari per evitare, il più a lungo possibile, che le strutture endo-articolari entrino in conflitto meccanico generando sintomi e impotenze motorie.

In quest'ottica la comparsa di deviazioni laterali del rachide può essere interpretata come espressione della saturazione delle possibilità di alterarne ulteriormente l'andamento sagittale senza determinare conflitti meccanici.

Il sistema, non potendo più compensare sul piano sagittale, inizia a utilizzare il piano frontale.

Clinicamente, nella maggioranza dei casi di scoliosi il rachide si presenta rigido e con significative alterazioni sagittali.



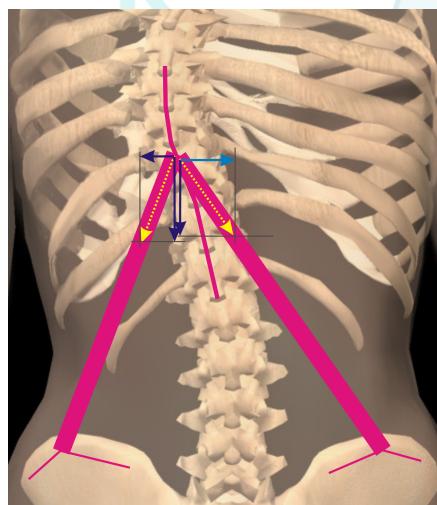
*Figure 7.23, 7.24 e 7.25 - Paziente di 24 anni. Scoliosi a doppia curva: convessità lombare sinistra D12-L4, 10 gradi; convessità dorsale destra D5-D12, 20 gradi. Le frecce rosse evidenziano: rettificazione del tratto cervicale come conseguenza della diminuzione della fisiologica cifosi dorsale; sporgenza e adduzione delle scapole con rettificazione del tratto dorsale; accentuazione lordosi lombare e antiversione del bacino. Le alterazioni dell'andamento sinusoidale della colonna vertebrale sul piano sagittale risultano complessivamente maggiori di quelle del piano frontale.*

## 10.7 Meccanismi di auto-perpetuazione della scoliosi

Una volta che un muscolo obliquo prevale sul controlaterale deviando lateralmente la colonna, cambiano le direzioni delle componenti vettoriali.

Quando le componenti vettoriali longitudinali del muscolo antagonista hanno la loro proiezione oltre la linea mediana, queste si sommano alle componenti orizzontali e verticali del muscolo agonista.

Invece di opporsi, contribuiscono alla stabilizzazione e all'incremento della scoliosi.



*Figura 7.26 - Scoliosi sinistro convessa indotta dalle fibre del gran dorsale di sinistra estese da cresta iliaca a vertebre toraciche D7-D12. Una volta che la colonna è deviata, le componenti vettoriali verticali del gran dorsale di destra, trovandosi oltre la linea mediana, si sommano a quelle del gran dorsale di sinistra contribuendo alla deviazione scoliotica. La scoliosi viene così sostenuta dalle componenti verticali e orizzontali del gran dorsale di sinistra e dalle componenti vettoriali verticali del gran dorsale di destra (frecce blu). Le componenti orizzontali del gran dorsale di destra (freccia azzurra) risultano vettorialmente sottodominanti e non potranno bilanciare la deviazione scoliotica.*

Anche le linee di forza dei paravertebrali, a scoliosi instaurata, cambiano direzione.

Seguendo la colonna deviata perdono la loro verticalità e, sommandosi alle forze oblique dominanti, contribuiscono alla fissazione della deviazione vertebrale.

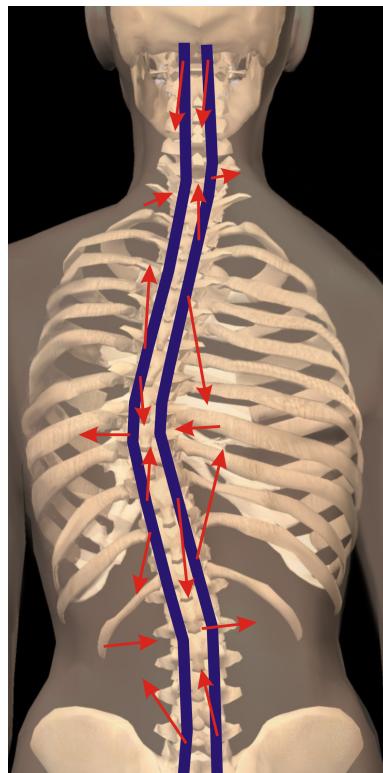


Figura 7.27 –

Paravertebrali: blu.

Scoliosi indotta da muscoli ad inserzione vertebrale aventi linee di forza oblique.

Le linee di forza dei paravertebrali, seguendo la colonna, perdono la loro direzione verticale.

Le risultanti vettoriali dei paravertebrali, sommandosi a quelle dei muscoli obliqui, stabilizzano le curve scoliotiche.

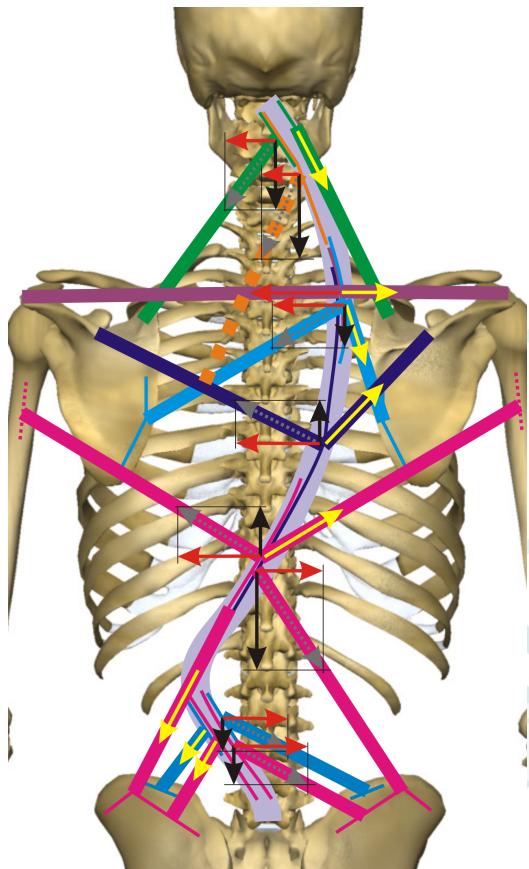
## 10.8 Il Comportamento dei muscoli dal lato della concavità vertebrale

I muscoli nel lato concavo sono in allungamento rispetto alla posizione iniziale.

Il loro allungamento, però, è solo apparente perché non supera il massimo allungamento potenziale del muscolo.

Questi muscoli, inoltre, aumentano la loro tensione nel tentativo di bilanciare la lateralizzazione delle vertebre e nel tempo questo eccesso di tensione determina l'accorciamento della porzione connettivale della fibra muscolare.

I muscoli del lato concavo risultano quindi in allungamento relativo rispetto alla posizione di partenza, ma complessivamente in accorciamento.



*Figura 7.28 - Simulazione andamento colonna vertebrale: viola chiaro; scaleni: arancione; elevatore della scapola: verde; fasci medi trapezio: viola; romboidi: azzurro; fasci inferiori trapezio: blu scuro; gran dorsale: magenta; quadrato dei lombi: blu. Esempio di scoliosi a doppia curva. I muscoli dal lato della convessità trazionano lateralmente le vertebre (frecce gialle). I muscoli dal lato concavo aumentano la loro intensità nel tentativo di bilanciare lo spostamento vertebrale. La scomposizione vettoriale sulle linee di forza dei muscoli della concavità evidenzia come questi abbiano una componente orizzontale (frecce rosse) che si oppone alla curva scoliotica e una componente verticale (frecce nere) che ne determina l'accentuazione. Terapeuticamente sarà quindi necessario diminuire l'eccesso di intensità sia dei muscoli del lato della convessità che di quelli della concavità.*

## 10.9 Implicazioni terapeutiche

L'identificazione dei vettori obliqui dominanti nel determinare il quadro è sempre necessaria ma il trattamento non può rivolgersi solo a questi, dal momento che l'eccesso di tensione riguarda anche i muscoli controlaterali e i paravertebrali.

Sarà dunque necessario intervenire terapeuticamente sia dei muscoli del lato della convessità che di quelli della concavità seppure con tempi ed intensità differenti.

### 7.10.10 Esempio clinico:



*Figure da 7.29 a 7.34 - Paziente di 24 anni.  
All'ingresso la paziente presentava una scoliosi lombare sinistro convessa D12-L4 di 10 gradi e dorsale destro convessa D5-D12 di 20 gradi (foto ingresso paziente con biancheria bianca e dimissione foto con biancheria scura). Il trattamento mirato al riequilibrio vettoriale delle forze muscolari agenti in diminuzione della Forza resistente a favore della Forza Lavoro ha prodotto una diminuzione di oltre il 60% delle curve scoliotiche. Evidenti i miglioramenti morfologici sia sul piano frontale che sagittale (sul piano sagittale l'apparente cifosi è data dalla proiezione posteriore della scapola, la colonna, in realtà, si presentava in totale ipocifosi)*

### 10.11 Classificazione sistematica delle azioni muscolari

Considerando i singoli muscoli vettorialmente dominanti, questi potranno avere effetto diretto sulla colonna per roto-traslazione grazie alle loro inserzioni, o provocare la deviazione vertebrale laterale come risultante meccanica della loro azione sui cingoli e/o sul cranio:

MUSCOLO	AZIONE DIRETTA	AZIONE INDIRETTA
Fascio superiore trapezio	Inclinazione capo ed elevazione spalla omolaterali	Convessità vertebrale cervico-toracica controlaterale
Sterno-cleido-mastoideo	Elevazione spalla e clavicola omolaterali, inclinazione capo omolaterale, rotazione capo controlaterale	Rotazione corpi vertebre cervicali controlaterale
Scaleni	Rotazione corpi vertebre C1-C7 controlaterale e convessità omolaterale	
Elevatore della scapola	Convessità vertebre C1-C4 omolaterale	
Romboidi	Convessità vertebre C6-D4 omolaterale e rotazione corpi vertebrali controlaterale	
Fasci medi trapezio	Convessità vertebre C7-D3 omolaterale e rotazione corpi vertebrali controlaterale	
Fasci inferiori trapezio	Convessità vertebre D2-D12 omolaterale e rotazione corpi vertebrali controlaterale	
Gran dorsale porzione D7-D12	Convessità vertebre D7-D12 omolaterale e rotazione corpi vertebrali controlaterale	
Gran dorsale porzione omero-crestà iliaca	Elevazione emibacino ed abbassamento spalla omolaterali	Concavità vertebre toraco-lombari omolaterale
Gran dorsale porzione L1-L5	Convessità vertebre L1-L5 omolaterale e rotazione corpi vertebrali controlaterale	
Quadrato dei lombi	Convessità vertebre L1-L4 omolaterale e rotazione corpi vertebrali controlaterale	
Diaframma	Rotazione vertebre L1-L4 controlaterale e convessità omolaterale	
Psoas	Rotazione vertebre D12-L5 controlaterale e convessità omolaterale	

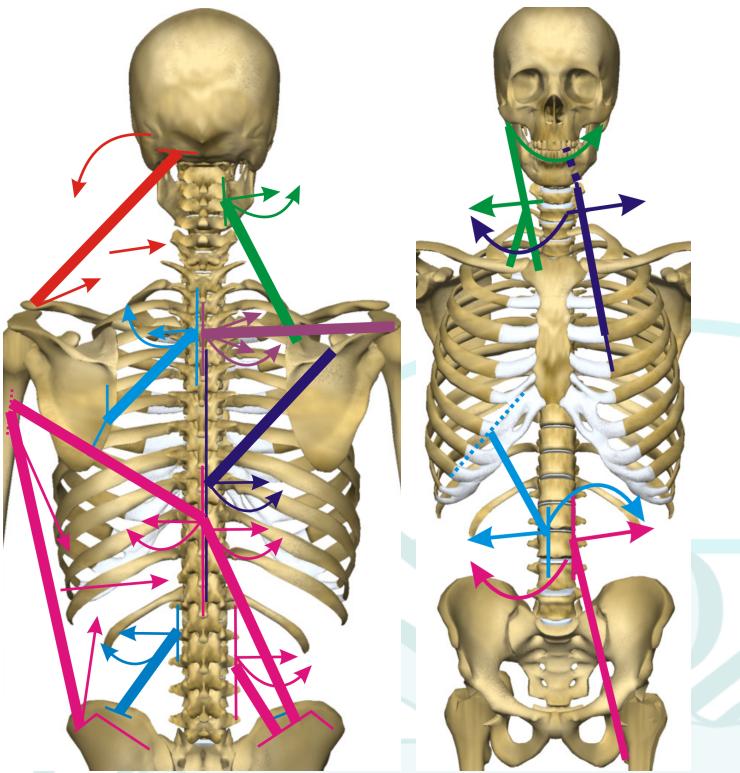


Figure 7.35 e 7.36 - Roto-traslazioni vertebrali indotte dai muscoli posteriori e anteriori.

**Veduta posteriore:**  
fasci superiori trapezio: rosso;  
elevatore della scapola: verde;  
fasci medi trapezio: viola;  
romboidi: azzurro chiaro;  
fasci inferiori trapezio: blu scuro;  
gran dorsale: magenta;  
quadrato dei lombi: azzurro.

**Veduta anteriore:**  
sternocleidomastoideo: verde;  
scaleni: blu;  
diaframma: azzurro;  
psoas: magenta.

## Concetti Chiave

**Il passaggio al piano tridimensionale richiede metodologie specifiche.** L'esame in posizione supina elimina le compensazioni attive permettendo di identificare gli accorciamenti strutturali reali. L'allineamento del paziente sulla linea mediana (malleoli-sinfisi-manubrio-occipite) è essenziale per una valutazione accurata.

**La distinzione tra convessità e concavità di una curva riflette meccanismi diversi.** La convessità deriva da trazione muscolare diretta sulle vertebre ed è vettorialmente dominante. La concavità è risultante meccanica di spostamenti di altri segmenti scheletrici.

**Il gran dorsale presenta due quadri principali.** Nel quadro A i fasci crestă iliaca-omero determinano concavità vertebrale omolaterale per avvicinamento meccanico di scapola e bacino. Nel quadro B i fasci con inserzione vertebrale producono convessità omolaterale per trazione diretta. Il quadro B è clinicamente più frequente.

**La colonna presenta quattro curve muscolarmente indipendenti.** Ogni tratto ha muscoli specifici responsabili delle deviazioni: cervicale (elevatore scapola/scaleni), cervico-toracico (romboidi/trapezio medio), toracico (gran dorsale), lombare (quadrato lombi/diaframma/psoas).

**Nelle scoliosi il rapporto rotazione/deviazione ha valore prognostico.** Quando la rotazione rimane opposta alla convessità (pattern fisiologico) esistono margini di miglioramento con il lavoro muscolare. Quando rotazione e convessità sono omolaterali la deformità è strutturata.

**I meccanismi di auto-perpetuazione stabilizzano la scoliosi.** Una volta instaurata la deviazione, le componenti vettoriali cambiano direzione. I muscoli controlaterali e i paravertebrali, invece di opporsi, contribuiscono al mantenimento della curva.

**I muscoli del lato concavo sono paradossalmente accorciati.** Pur essendo in allungamento relativo rispetto alla posizione iniziale, l'eccesso di tensione nel tentativo di bilanciare le forze opposte determina accorciamento delle componenti connettivali.

