



Il trattamento chirurgico delle deformità vertebrali neuromuscolari con accesso mininvasivo senza artrodesi: una tecnica innovativa

Surgical treatment of neuromuscular spine deformity with minimally invasive fusionless surgery: an innovative technique

Matteo Palmisani¹ (foto), Eugen Dema¹, Rosa Palmisani², Stefano Cervellati¹

¹ Centro scoliosi e Malattie della Colonna Vertebrale Hesperia Hospital, Modena; ² Scuola di Specializzazione in Ortopedia e Traumatologia Università Politecnica delle Marche, Ancona

Ricevuto: 24 aprile 2020
Accettato: 30 luglio 2020

Corrispondenza

Matteo Palmisani

Centro scoliosi e Malattie della Colonna Vertebrale
Hesperia Hospital, Modena
E-mail: dottmatteo.palmisani@gmail.com

Conflitto di interessi

Gli Autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interesse con l'argomento trattato nell'articolo.

Come citare questo articolo: Palmisani M, Dema E, Palmisani R, et al. Il trattamento chirurgico delle deformità vertebrali neuromuscolari con accesso mininvasivo senza artrodesi: una tecnica innovativa. *Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia* 2020;46:1-8; <https://doi.org/10.32050/0390-0134-233>

© Copyright by Pacini Editore Srl



OPEN ACCESS

L'articolo è OPEN ACCESS e divulgato sulla base della licenza CC-BY-NC-ND (Creative Commons Attribuzione – Non commerciale – Non opere derivate 4.0 Internazionale). L'articolo può essere usato indicando la menzione di paternità adeguata e la licenza; solo a scopi non commerciali; solo in originale. Per ulteriori informazioni: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it>

Riassunto

Introduzione. La deformità vertebrale nelle malattie neuromuscolari rappresenta una evenienza molto frequente. Lo scopo di questo lavoro è riportare i risultati del trattamento chirurgico delle deformità vertebrali neuromuscolari con una originale tecnica mininvasiva senza artrodesi.

Materiali e metodo. Riportiamo i dati relativi a 13 pazienti (6 maschi e 7 femmine) di età media 14 anni (11-22). Si trattava di 7 casi di tetraparesi spastica in esiti cerebropatia, 2 di atrofia muscolare spinale tipo 2, 3 casi di sindrome di Rett, mentre in 1 caso si trattava di una scoliosi infantile con grave ritardo psichico. In tutti i casi alla valutazione anestesiológica risultavano ASA 3.

Risultati. Ad una distanza media di 3 anni (2-4,6a) la scoliosi è stata corretta del 63%, il valore angolare medio di 107° (88-128°) nel preoperatorio è passato a 40° (12-50°) nel post operatorio. Una cifosi era presente in 8 casi ed è stata corretta del 64% passando da 96° (85-120°) a 25° (38-46°). L'inclinazione pelvica è stata corretta dell'82% da 32° (20-44°) a 6° (0-14°). I tempi chirurgici sono stati in media 3 ore e 40 min (3,15-5h). Le perdite ematiche intraoperatorie 150 ml (125-300) e post operatoria 50 ml (0-150), la permanenza media in terapia intensiva 1,5 gg (1-4) e la durata media del ricovero è stata 9 gg (7-15). Si registrano due complicazioni (15%), un disancoraggio del connettore ileosacrale ed una infezione del solo sito chirurgico prossimale.

Conclusioni. La tecnica della sintesi mininvasiva senza artrodesi appare promettente, consente di ottenere delle ottime correzioni delle deformità vertebrali e della inclinazione pelvica con una bassa percentuale di complicazioni. Attualmente questa tecnica viene riservata a pazienti che presentano delle condizioni generali che sconsigliano un intervento tradizionale di osteosintesi e artrodesi.

Parole chiave: scoliosi neuromuscolare, trattamento chirurgico, osteosintesi percutanea senza artrodesi

Summary

Backgrounds. Spinal deformity in neuromuscular patients represents a very frequent occurrence. The aim of this study is to evaluate the results of surgical treatment of neuromuscular spinal deformity with an original, minimally invasive fusionless technique.

Materials and methods. We perform 13 patients (6 male and 7 female) with an average age of 14 years (11-22). It was 7 cases of cerebral palsy, 2 spinal muscular atrophy 2, 3 cases of Rett syndrome, in 1 cases an early onset scoliosis with severe mental retardation.

Results. At latest control 3 years follow-up (2-4.6yr) the mean scoliosis Cobb angle of scoliosis improved from 107° (88-128°) to 40° (12-50°) which means 63% of correction. The mean

preoperative kyphosis was 96 ° (85-120°) and it was corrected to 25° (38-46°) (64%). The mean pelvic obliquity has been corrected from 32° (20-44°) to 6 ° (0-14°) which means 82% of correction. The average surgical time was 3,30 hours (3.15h-5h), the average intraoperative blood loss was 150 ml (125-300 ml) and post operative 50 ml (0-150 ml), a mean length stay in intensive care was 1.5 days (1-4) and mean discharge was after 9 days (7-15). We reported two complications (15%), one case of distal dislodgement of ileosacral connector and one infection of the proximal surgical site only.

Conclusions. The original fusionless minimally invasive technique is promising, providing a significant correction of spinal deformities and pelvic obliquity with a low rate of complications. Currently chose this technique in patients who have poor general conditions that do not recommend a conventional spinal surgical treatment.

Key words: neuromuscular scoliosis, surgical treatment, minimally invasive fusionless

Il trattamento delle scoliosi neuromuscolari rappresenta una aperta sfida anche per chirurghi vertebrali esperti sia per la gravità delle deformità che ci troviamo ad affrontare sia per le problematiche di carattere generale legate alle patologie di base che affliggono questi pazienti.

La deformità vertebrale nelle malattie neuromuscolari è una evenienza molto frequente, spesso insorge in età infantile giovanile^{1,2}, progredisce rapidamente durante la crescita in particolare durante lo sviluppo puberale e continua a peggiorare anche durante l'età adulta²⁻⁴. Numerosi sono i contributi in letteratura^{2,4-7} in cui si evidenzia la mancanza di efficacia del trattamento conservativo nel bloccare il peggioramento delle curve. L'aggravamento della deformità e dell'inclinazione del bacino, che può raggiungere anche valori angolari di particolare entità, determina non solo un decadimento delle condizioni generali e respiratorie ma anche un peggioramento della qualità di vita di questi pazienti. Un trattamento chirurgico è indicato quando la deformità vertebrale progredisce rapidamente nonostante il trattamento ortopedico, indipendentemente dall'età del paziente⁸⁻¹⁰. Gli obiettivi della chirurgia sono la correzione della deformità, il ripristino delle curve fisiologiche sagittali del rachide e un corretto asse del tronco che consenta una confortevole posizione seduta e di liberare l'impiego degli arti superiori spesso utilizzati per il mantenimento della postura, evitare il deterioramento della funzione respiratoria ed il miglioramento delle funzioni intestinali, in ultima analisi migliorare la qualità di vita di questi pazienti^{9,11,12}. Ancora oggi ci si trova, non infrequentemente, di fronte a quadri clinici e radiografici talmente gravi da impedire l'esecuzione di un intervento chirurgico già di per sé gravato da una elevata incidenza di complicazioni¹³. In questi pazienti infatti è richiesta, nella maggior parte dei casi, una chirurgia estesa dalla prime vertebre toraciche all'ileo dove è necessario un solido ancoraggio per consentire una rapida mobilizzazione del paziente fin dai primi giorni post operatori senza supporto esterno. La estesa e prolungata esposizione chirurgica aumenta il rischio di complicazioni intra e post operatorie. Tra le prime si annovera un vasto

sanguinamento con necessità di plurime trasfusioni, la frattura delle lamine e la perdita di tenuta delle viti peduncolari per la scarsa qualità dell'osso, la possibilità di un danno neurologico determinato dall'anemia, dall'ipotensione e dalla correzione della deformità. Tra le complicazioni post operatorie precoci si possono verificare: la difficoltà all'estubazione e problemi polmonari che a volte richiedono una tracheostomia e la nutrizione parenterale con conseguente il prolungamento del ricovero in terapia intensiva. Tra le complicazioni post operatorie tardive, che spesso richiedono la revisione dell'impianto, la più frequente e temuta è l'infezione del sito chirurgico ma anche il cedimento meccanico, in particolare al passaggio lombosacrale, con possibile perdita di correzione^{14,15}. Nel 2016 ci siamo recati presso l'Ospedale Neker di Parigi dove opera il dr. L. Miladi, Allievo di J. Dubousset, ed abbiamo potuto approfondire la tecnica di osteosintesi "Bipolare" senza artrodesi che sembrava una valida alternativa nei pazienti in cui, per le condizioni generali scadute, era impossibile o particolarmente rischioso eseguire un intervento classico di strumentazione ed artrodesi¹⁶.

Lo scopo di questo lavoro è valutare, ad una distanza media di 3 anni, i casi sottoposti a questa innovativa tecnica chirurgica.

Materiali e metodo

Vengono descritti retrospettivamente 13 casi di deformità vertebrale in pazienti affetti da malattia neuromuscolare trattati consecutivamente dall'ottobre 2016 a marzo 2018. Tutti i pazienti sono stati sottoposti ad intervento chirurgico di correzione della deformità con tecnica "Bipolare" mininvasiva senza artrodesi. Si trattava di 6 maschi e 7 femmine con età media di 14 anni¹¹⁻²². La diagnosi era rappresentata da 7 casi di tetraparesi spastica in esiti cerebropatia, 2 di atrofia muscolare spinale tipo 2, 3 casi di sindrome di Rett, 1 di scoliosi infantile con grave ritardo psichico. Le curve erano tutte toracolombari ad ampio raggio con curva toracica minore di compenso, si trattava

in 7 casi di una curva toracolombare sinistra e in 6 casi toracolombare destra. In tutti i casi era presente una obliquità pelvica, sul piano sagittale in 8 casi si associava una ipercifosi mentre in 2 casi una iperlordosi. Tutti i pazienti tranne 1 erano costretti in carrozzina.

In tutti i casi era presente una gravissima insufficienza respiratoria di grado restrittivo, in 2 casi era necessaria una nutrizione enterale. Alla valutazione anestesiológica globale erano stati classificati ASA 3.

Valutazione preoperatoria

Tutti i pazienti sono stati ricoverati per studio ad una distanza media di 2 mesi prima dell'intervento. Sono stati eseguiti oltre agli esami di laboratorio, elettrocardiogramma, ecocardiogramma e prove di funzionalità respiratoria. Lo studio radiografico del rachide comprendeva: radiografie panoramiche in toto in 2 proiezioni in carico (posizione seduta) e supina. Lo studio comprendeva inoltre una risonanza magnetica nucleare del rachide in toto che è stata eseguita in tutti i casi in sedazione. In casi particolari (2 casi) di grave alterazione neurologica sono stati eseguiti i potenziali motori e sensitivi per l'acquisizione di un tracciato da confrontare durante il monitoraggio intraoperatorio^{16,17}. I pazienti sono stati sottoposti a visita anestesiológica ed i casi discussi collegialmente con i colleghi anestesisti rianimatori. Infine i parenti dei pazienti venivano resi edotti delle decisioni prese sulla operabilità, delle modalità dell'intervento con i relativi benefici e le possibili complicazioni.

Tecnica chirurgica

Tutti i pazienti sono stati sottoposti ad anestesia generale totalmente endovenosa (TIVA-TCI) senza blocco neuro-

muscolare, monitoraggio dei potenziali evocati motori e sensitivi e somministrata la profilassi antibiotica preoperatoria. Il rachide è stato posto in trazione attraverso il posizionamento di una pinza cranica di Mayfield ed una contro trazione esercitata agli arti inferiori con bendaggio a cerotto (Fig. 1). La trazione agli arti è stata asimmetrica per consentire una correzione preoperatoria dell'obliquità pelvica. Attraverso una breve incisione cutanea al passaggio lombosacrale e con due accessi para vertebrali, incisa la fascia divaricati i muscoli lunghissimo e multifido si raggiunge il rachide¹⁸. Non vengono aperte le articolazioni o lesionate le strutture capsulo legamentose. Si posiziona un connettore poliassiale, ancorato al sacro attraverso una vite ileosacrale (Fig. 2) che viene introdotta con un sistema cannulato (Fig. 3). Con una incisione cutanea centrata sulle prime vertebre toraciche, raramente dalle ultime cervicali, una volta eseguita la scheletrizzazione,



Figura 2. Sistema di fissaggio ileosacrale.

Figura 1. Il paziente in trazione sul letto operatorio.



Figura 3. Sistema di guida per il posizionamento della vite ileosacrale.

mantenendo integre le articolazioni e le strutture legamentose, si eseguono due coppie di pinze con uncini laminari e peduncolari intervallate da una vertebra libera. Si fanno passare per via sottocutanea le barre, 5,5 mm di diametro in cromo cobalto, modellate secondo le curve fisiologiche sagittali ed ancorate agli uncini prossimali che in seguito vengono connesse, con doppio connettore barra-barra, a quelle ancorate ai connettori ileosacrali. Si eseguono le manovre correttive per consentire la correzione della deformità vertebrale e l'obliquità pelvica. Le barre vengono poi solidarizzate attraverso l'impiego di 2 o 3 dispositivi di connessione trasversale (Fig. 4). Nei pazienti in crescita si può utilizzare un sistema originale in auto elongazione "Nemost" che permette lo slittamento progressivo delle barre attraverso un sistema a cremagliera che sfrutta la mobilità del paziente o le trazioni progressive esercitate sul tronco durante gli spostamenti (Fig. 5). In 9 casi abbiamo utilizzato la sintesi bipolare con impianto classico in 4 casi è stato associato il sistema di auto elongazione.

Risultati

Tutti i pazienti sono stati sottoposti a controllo radiografico alla dimissione, a 12 mesi dall'intervento ed al controllo finale ad una distanza media di 3 anni (2-4,6a). La scoliosi presentava un valore angolare preoperatorio medio di 107° (88-128°) che è stata corretta del 63%, passando ad un valore angolare medio 40° (32-66°) nel post operatorio. Una ipercifosi era presente in 8 casi ed è stata corretta del 64% passando da una media preoperatoria di 96° (85-120°) a 25° (38-46°). In 2 casi era presente una iperlordosi totale del rachide che presentava un valore angolare di 90°

e 108° che è stata rispettivamente corretta a 60° e 75°. L'inclinazione pelvica, presente in tutti i casi, presentava un valore angolare medio di 32° (20-44°) è stata corretta del 82% passando in media a 6° (0-14°) nel post operatorio. I tempi chirurgici sono stati in media 3 ore e 40 min. (3,15-5). Le perdite ematiche intraoperatorie sono state in media 150 ml (125-300) e post operatorie di 50 ml (0-150). La permanenza media in terapia intensiva è stata di 1,5 gg (1-4) e la durata media del ricovero è stato 9 gg (7-15). Non abbiamo avuto perdita di correzione nei controlli a distanza. Si registrano due complicazioni (15%). In un caso, tra i primi operati, si è verificato lo sganciamento della toulip del connettore sacrale, evenienza legata probabilmente al non adeguato serraggio del bullone che solidarizza la vite ileosacrale e connettore, senza evidenza di perdita di correzione ma che ha richiesto la sostituzione del connettore, mentre nel secondo caso si è trattato di una infezione del solo sito chirurgico prossimale guarita dopo pulizia chirurgica senza interessamento del sito lombosacrale. La valutazione dei risultati clinici post operatori è stata fatta interpellando direttamente i pazienti collaboranti, i parenti ed i fisioterapisti che avevano in cura i pazienti quando non collaboranti. Tutti si sono dichiarati molto soddisfatti del risultato clinico radiografico e funzionale attraverso una più confortevole posizione seduta. La revisione chirurgica, eseguita nei due casi di complicazioni, non ha inciso sul risultato finale e sul quadro funzionale e clinico dei pazienti.

Discussione

Le deformità vertebrali in pazienti affetti da patologie neuromuscolari differiscono rispetto alle scoliosi idiopatiche per la precocità di insorgenza e per il rapido aggravamento legato principalmente alla debolezza dei muscoli secondario alla patologia neurologica di base. Il trattamento ortopedico e riabilitativo che opportunamente viene instaurato nelle prime fasi dell'insorgenza della deformità è inefficace a bloccarne l'evoluzione, ma nelle prime fasi della cura ha lo scopo di mantenere una confortevole posizione seduta e, quando possibile, di raggiungere l'età che consenta di eseguire un unico intervento chirurgico. Ma quando si evidenzia un peggioramento, nonostante il trattamento ortopedico, non bisogna esitare a porre l'indicazione al trattamento chirurgico anche in età infantile¹⁹⁻²². In questi pazienti, dove non è possibile eseguire un intervento di artrodesi vertebrale, si eseguono artrodesi apicali e strumentazioni sotto fasciali da allungare progressivamente durante la crescita come per le scoliosi idiopatiche infantili ad insorgenza precoce (*early onset scoliosis*). A differenza della tecnica di Marchetti e Faldini²³ si esegue una strumentazione sotto fasciale senza artrodesi e per evitare interventi di messa in tensione della strumentazione, la tecnica mette a disposizione un sistema

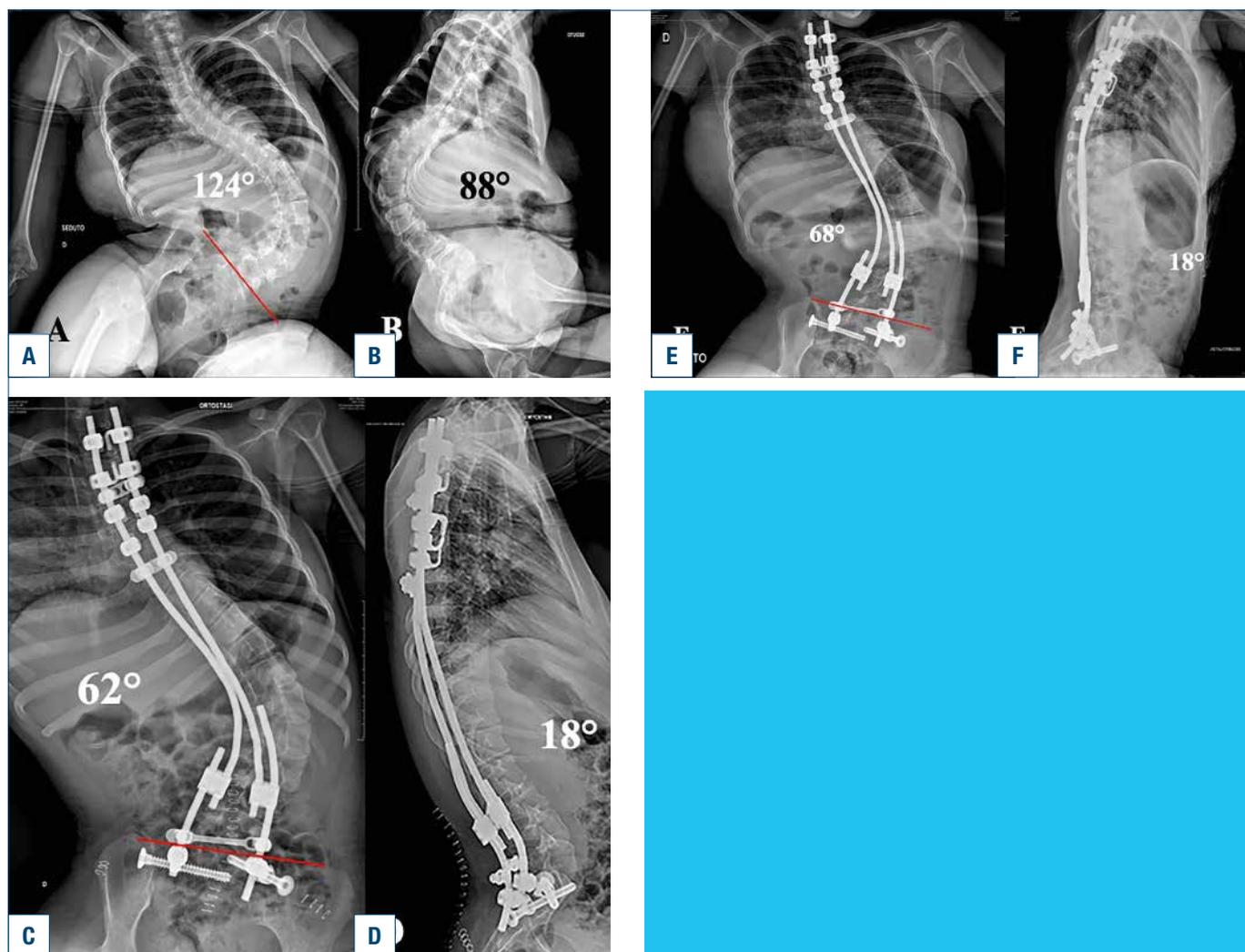


Figura 4. (A-B) Paziente di anni 13, affetta da S. di Rett con grave cifoscoliosi. (C-D) Controllo post operatorio. (E-F) Controllo a 3 anni. (G) Quadro clinico pre operatorio. (H) Quadro clinico a distanza di 3 anni.

originale di auto elongazione delle barre (NEMOST). Si tratta di un meccanismo a cremagliera che sfrutta la mobilità del rachide nei pazienti deambulanti e la trazione esercitata sul tronco del paziente durante gli spostamenti in carrozzina nei non deambulanti. Questo sistema è stato impiegato in 4 pazienti con ottimi risultati (Fig. 5). Prolungare il trattamento ortopedico, nonostante il peggioramento della curva, determina il progressivo deterioramento della funzionalità respiratoria²⁴, la sempre maggiore difficoltà a mantenere la stazione seduta confortevole e conseguente peggioramento delle condizioni di vita di questi pazienti. Non è infrequente a tutt'oggi assistere a deformità vertebrali che raggiungono valori angolari proibitive da affrontare chirurgicamente che, associate alle condizioni generali e respiratorie particolarmente deteriorate, possono addirittura impedire l'esecu-

zione dell'intervento per un rischio peri operatorio troppo elevato. Infatti è ormai ampiamente dimostrato in letteratura come le condizioni cliniche scadute siano alla base dell'alta incidenza di complicazioni e del risultato insoddisfacente postoperatorio²⁵⁻²⁸. In questi casi l'impiego di una sintesi vertebrale mininvasiva può svolgere un ruolo fondamentale. Per chi è fermamente convinto che una solida artrodesi vertebrale sia l'unico baluardo per consentire un risultato duraturo nel tempo, è un salto culturale senza precedenti. Ma la comprensione dei principi su cui si fonda la "Tecnica Bipolare" ci ha spinto ad applicarla anche perché era l'unica opportunità chirurgica per i questi pazienti. Questi principi sono principalmente di ordine biomeccanico e biologico. Il principio biomeccanico si realizza attraverso la configurazione geometrica dell'impianto a "Torre Eiffel" e sulla solidità

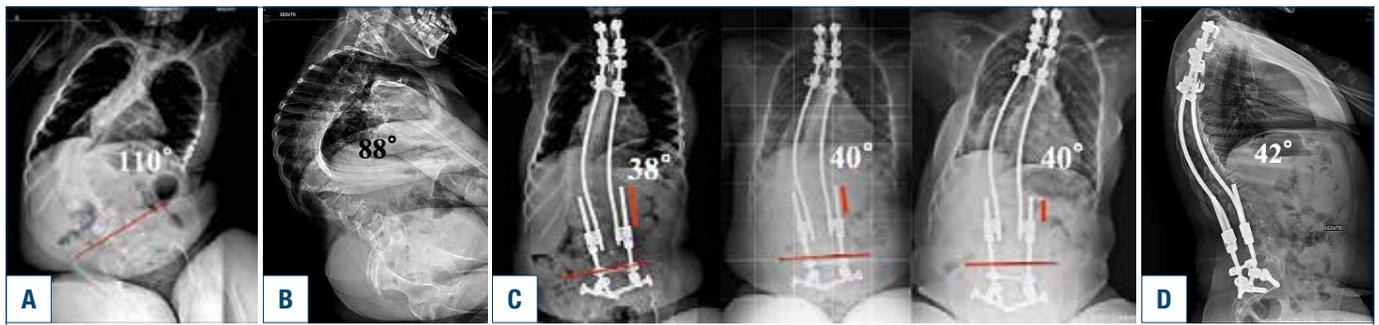


Figura 5. (A-B) Paz. di anni 11. Grave cifoscoliosi in atrofia muscolare spinale di tipo 2. (C) Operata di osteosintesi mininvasiva senza artrodesi con sistema di auto allungamento della strumentazione. La radiografia in proiezione anteroposteriore postoperatoria (sin) confrontata con quella ad un anno (centro) e a 3 anni (destra). (D) la radiografia in proiezione laterale a distanza di 3 anni. (E) Quadro clinico preoperatorio. (F) Quadro clinico post operatorio. (G) Quadro clinico a 3 anni.

del costruito che poggia su due forti punti di presa ai poli. Ne consegue che la sospensione della colonna vertebrale integra nelle sue strutture capsulo legamentose e l'elasticità dell'impianto permettono di assorbire gli stress riducendo notevolmente il rischio di rottura delle barre. L'autore della tecnica riporta 1 solo caso di cedimento meccanico della strumentazione nei primi 100 casi trattati con un controllo a distanza minima di 5 anni¹⁶. La sospensione del rachide, l'accesso mininvasivo e la tensione elastica del rachide sottoposto a trazione determinano, come effetto biologico, una fibrosi ed anchilosi articolari con conseguente progressivo irrigidimento della colonna e riduzione degli stress sui mezzi di sintesi. Le possibilità correttive della scoliosi e delle deformità sagittali di questa tecnica sono sovrapponibili alle altre²⁹⁻³³, ma è nella correzione della obliquità pelvica che si possono raggiungere percentuali di correzione superiori all'80%, maggiore rispetto a quanto riportato in letteratura. L'impiego di una trazione preoperatoria, associata alla stabilità del montaggio bipolare probabilmente sono alla base dei risultati clinici radiografici. La tecnica Bipolare consente, a nostro avviso, di avere tempi chirurgici più bassi, di ridurre il ricorso ad emotrasfusioni, una mobilitazione rapida dei pazienti con un ridotto ricorso ad analgesici, di minimizzare il numero di complicazioni che nella nostra casistica, considerando il caso di cedimento meccanico frutto della curva

di apprendimento, è limitato ad un solo caso di infezione del solo sito chirurgico prossimale. Tutto va rapportato, ovviamente, alla gravità della deformità e alla tipologia di pazienti che sono stati trattati con questa tecnica, il cui trattamento chirurgico in modo tradizionale era sconsigliato.

Conclusioni

Pur nella esiguità del numero dei casi trattati si può esprimere un giudizio positivo dell'esperienza fin qui fatta, ciononostante questa tecnica per ora viene riservata solo a casi in cui un trattamento chirurgico classico, strumentazione peduncolare e/o sotto laminare estesa all'ileo ed artrodesi, non può essere eseguito o fortemente sconsigliato. Un maggior numero di pazienti e un controllo a distanza più lungo saranno necessari per valutare la possibilità di estenderla a tutti i casi di deformità vertebrali neuromuscolari.

Bibliografia

- Hagglund G, Pettersson K, Czuba T, et al. Incidence of scoliosis in cerebral palsy. *Acta Orthop* 2018;89:443-7. <https://doi.org/10.1080/17453674.2018.1450091>
- Mary P, Servais L, Vialle R. Neuromuscular disease: diagnosis and management. *Orthop Traumatol Surg*

- Res 2018;104:S89-S95. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2017.04.019>
- 3 Maid M, Muldowny D, Holt R. Natural history of scoliosis in the institutionalized adult cerebral palsy population. *Spine* 1997;22:1461-6. <https://doi.org/10.1097/00007632-199707010-00007>
 - 4 Granata C, Marini ML, Capelli T, et al. Natural history of scoliosis in spinal muscular atrophy and results of orthopaedic treatment. In: Merlino-Granata-Dubowitz, eds. *Current concepts in childhood spinal muscular atrophy*. New York: Springer-Verlag Wien 1989.
 - 5 Miller A, Temple T, Miller F. Impact of orthoses on the rate of scoliosis progression in children with cerebral palsy. *J Pediatric Orthop* 1996;16:332-5. <https://doi.org/10.1097/00004694-199605000-00007>
 - 6 Olafsson Y, Saraste H, Al-Dabbagh Z. Brace treatment in neuromuscular spine deformity. *J Pediatric Orthop* 1999;19:376-9.
 - 7 Shapiro F, Zurakowski D, Bui T, et al. Progression of spinal deformity in wheelchair-dependent patients with Duchenne muscular dystrophy who are not treated with steroids: coronal plane (scoliosis) and sagittal plane (kyphosis, lordosis) deformity. *Bone Joint J*. 2014;96-B:100-5. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.96B1.32117>
 - 8 Adams AJ, Refakis CA, Flynn JM, et al. Surgeon and caregiver agreement on the goals and indications for scoliosis surgery in children with cerebral palsy. *Spine Deform* 2019;7:304-11.
 - 9 Cervellati S, Palmisani M, Bonfiglioli S, et al. Surgical treatment of scoliosis in spinal muscular atrophy. In Merlino-Granata-Dubowitz, Eds. *Current concepts in childhood spinal muscular atrophy*. New York: Springer-Verlag Wien 1989.
 - 10 Brooks JT, Sponseller PD. What's new in the management of neuromuscular scoliosis. *J Pediatr Orthop* 2016;36:627-33. <https://doi.org/10.1097/BPO.0000000000000497>
 - 11 Bohtz C, Meyer-Heim A, Min K. Changes in health-related quality of life after spinal fusion and scoliosis correction in patients with cerebral palsy. *J Pediatr Orthop* 2011;31:668-73. <https://doi.org/10.1097/BPO.0b013e318221093c>
 - 12 Suk KS, Lee BH, Lee HM, et al. Functional outcomes in Duchenne muscular dystrophy scoliosis: comparison of the differences between surgical and nonsurgical treatment. *J Bone Joint Surg Am* 2014;96:409-15. <https://doi.org/10.2106/JBJS.M.00777>
 - 13 Rumalla K, Yarbrough CK, Pugey AJ. Spinal fusion for pediatric neuromuscular scoliosis: national trends, complications and in hospital outcomes. *J Neurosurg Spine* 2016;25:500-8. <https://doi.org/10.3171/2016.2.SPINE151377>
 - 14 Toll BJ, Samdani AF, Janjua MB, et al. Perioperative complications and risk factor in neuromuscular surgery. *J Neurosurg Pediatr* 2018;22:207-13. <https://doi.org/10.3171/2018.2.PEDS17724>
 - 15 Turturro F, Montanaro A, Calderaro C, et al. Rate of complications due to neuromuscular scoliosis spine surgery in a 30-years consecutive series. *Eur Spine J* 2017;26(suppl 4):539-45. <https://doi.org/10.1007/s00586-017-5034-6>
 - 16 Miladi L, Gaume M, Khouri N, et al. Minimally invasive surgery for neuromuscular scoliosis: results and complications in a series of one hundred patients. *Spine* 2018;43:E968-75. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000002588>
 - 17 Hammet TC, Boreham B, Quraishi NA, et al. Intraoperative spinal cord monitoring during the surgical correction of scoliosis due to cerebral palsy and other neuromuscular disorders. *Eur Spine J* 2013;22:S38-41. <https://doi.org/10.1007/s00586-012-2652-x>
 - 18 Wiltse LL, Spencer CW. New use and refinement of the paraspinous approach to the lumbar spine. *Spine* 1988;13:696-706.
 - 19 Sponseller PD, Yang JS, Thompson GH. Pelvic fixation of growing rods: comparison of constructs. *Spine* 2009;34:1706-10. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3181ab240e>
 - 20 McElroy MJ, Shaner AC, Crawford TO, et al. Growing rods for scoliosis in spinal muscular atrophy: structural effects, complications, and hospital stays. *Spine* 2011;36:1305-11. <https://doi.org/10.1097/BRS.0b013e3182194937>
 - 21 Abol O, Stuecker R. Bilateral rib to pelvis Eiffel tower VEP-TR construct for children with neuromuscular scoliosis: a preliminary report. *Spine J* 2014;14:1183-91. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2013.07.484>
 - 22 Dubousset J. Past, present and future in pediatric spinal surgery. *Ann Transl Med* 2020;8:36. <https://doi.org/10.21037/atm.2019.08.13>
 - 23 Marchetti PG, Faldini A. "End fusion" in the treatment of progressing or severe scoliosis in childhood or early adolescence. *Orthop Trans* 1978;2:271.
 - 24 Mayer OH. Scoliosis and the impact in neuromuscular disease. *Pediatr Respir Rev* 2015;16:35-42. <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2014.10.013>
 - 25 Cervellati S, Bettini N, Moscato M, et al. Surgical treatment of spinal deformities in Duchenne muscular dystrophy: a long term follow-up study. *Eur Spine J* 2004;13:441-8. <https://doi.org/10.1007/s00586-002-0515-6>
 - 26 Sharma S, Wu C, Andersen T, et al. Prevalence of complications in neuromuscular scoliosis surgery: a literature meta-analysis from the past 15 years. *Eur Spine J*. 2013;22:1230-49. <https://doi.org/10.1007/s00586-012-2542-2>
 - 27 Jain A, Sponseller PD, Shah SA, et al. Subclassification of GMFCS Level-5 cerebral palsy as a predictor of complications and health-related quality of life after spinal arthrodesis. *J Bone Joint Surg Am* 2016;98:1821-8. <https://doi.org/10.2106/JBJS.15.01359>
 - 28 Miller DJ, Flynn JM, Pasha S, et al. Improving health-related quality of life for patients with nonambulatory cerebral palsy: who stands to gain from scoliosis surgery? *J Pediatr Orthop* 2020;40:e186-92. <https://doi.org/10.1097/BPO.0000000000001424>
 - 29 Piazzolla A, Solarino G, De Giorgi S, et al. Cotrel-Dubousset instrumentation in neuromuscular scoliosis. *Eur Spine J* 2011;20(suppl 1):S75-S84. <https://doi.org/10.1007/s00586-011-1758-x>

- ³⁰ Ilharreborde B, Hoffmann E, Tavakoli S, et al. Intracanal rod fixation for pediatric long spinal fusion: results of a prospective study with a minimum 5-year follow-up. *J Pediatr Orthop* 2009;29:594-601. <https://doi.org/10.1097/BPO.0b013e3181b2b403>
- ³¹ Mattila M, Jalanko T, Puisto V, et al. Hybrid versus total pedicle screw instrumentation in patients undergoing surgery for neuro-muscular scoliosis: a comparative study with matched cohorts. *J Bone Joint Surg Br* 2012;94:1393-8. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.94B10.29383>
- ³² Beckmann k, Lange T, Gosheger G, et al. Surgical correction of scoliosis in patients with severe cerebral palsy. *Eur spine J* 2016;25:506-16. <https://doi.org/10.1007/s00586-015-4107-7>
- ³³ Funk S, Lovejoy S, Mencia G, et al. Rigid instrumentation for neuromuscular scoliosis improves deformity correction without increasing complications. *Spine* 2016;41:46-52. <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000001170>