



Fissazione esterna esapodolica nella correzione delle deformità primitive e traumatiche degli arti inferiori. Analisi preliminare della precisione e limiti della procedura computer assistita

Hexapod external fixation for treatment of complex primary and post traumatic deformities of the lower limbs.

Preliminary analysis of precision and limits of the computer-assisted procedure

Pasquale Sessa¹ (foto), Marco Massobrio¹, Barbara Bertani², Redento Mora²

¹ Dipartimento di Scienze Anatomiche, Istologiche, Medico-Legali e dell'Apparato Locomotore "Sapienza" Università di Roma; ² Istituto di Cura "Città di Pavia", Università degli Studi di Pavia

Ricevuto: 13 settembre 2018
Accettato: 29 marzo 2020

Corrispondenza

Pasquale Sessa

Dipartimento di Scienze Anatomiche, Istologiche, Medico-Legali e dell'Apparato Locomotore-
"Sapienza" Università di Roma
E-mail: p.sessa@hotmail.it

Conflitto di interessi

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

Come citare questo articolo: Sessa P, Massobrio M, Bertani B, et al. Fissazione esterna esapodolica nella correzione delle deformità primitive e traumatiche degli arti inferiori. Analisi preliminare della precisione e limiti della procedura computer assistita. *Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia* 2020;46:124-132; <https://doi.org/10.32050/0390-0134-251>

© 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

Il fissatore esterno esapodolico computer assistito permette correzioni simultanee nei diversi piani dello spazio delle deformità complesse primitive e traumatiche. È stata valutata una serie consecutiva di 27 pazienti per definire efficacia, precisione e limiti del sistema. Risultati eccellenti/buoni sono stati ottenuti nell'86,6% dei pazienti. Nell'esperienza preliminare degli Autori, il fissatore esapodolico computer assistito si è rivelato strumento versatile, sicuro ed efficace per la correzione delle deformità complesse primitive e secondarie.

Parole chiave: deformità complesse, fissatore esapodolico, chirurgia computer assistita

Summary

The computer-assisted hexapod external fixator allows a simultaneous correction of primary and post traumatic complex deformities in the different space planes. A consecutive series of 27 patients was assessed in order to define efficiency, precision and limits of the hexapod systems in the correction of complex deformities. Good/excellent results were obtained in 86.6% of patients. In the Author's experience, the computer assisted hexapod external fixator revealed to be a versatile, safe and efficient tool for the correction of primary and post traumatic complex limb deformities.

Key words: hexapod external fixator, complex deformity, computer assisted surgery

Introduzione

Il fissatore esterno esapodolico computer assistito rappresenta l'evoluzione dei tradizionali dispositivi di fissazione esterna circolare. Le aste telescopiche graduate

allungabili applicate a supporti rigidi e un software dedicato per la pianificazione delle correzioni, superano alcuni limiti della fissazione esterna tradizionale: necessità di correzioni seriali e non simultanee, frequenti modifiche dei montaggi, controlli radiografici ravvicinati¹⁻³. L'utilizzo del fissatore esapodalico, nelle riduzioni delle fratture complesse^{4,5}, consente la rapida stabilizzazione dei segmenti ossei e la riduzione definitiva computer assistita in differita della frattura secondo i criteri del *damage control* ortopedico (i.e., D.C.O.)^{6,7}. Gli Autori riportano l'esperienza e i risultati dell'utilizzo dei fissatori esapodalici nella correzione delle deformità (primitive e secondarie) e in D.C.O. (per le fratture) di due diversi Centri Italiani (Roma, Pavia), discutendo precisione e limiti della correzione dei sistemi esapodalici computer assistiti.

Materiali e metodi

È stato eseguito uno studio retrospettivo non comparativo analizzando i dati clinici e radiografici di pazienti sottoposti a correzione di deformità primitive o secondarie degli arti inferiori e di pazienti sottoposti a trattamento D.C.O. di

fratture degli arti inferiori con fissatore esterno esapodalico presso la Clinica Ortopedica della "Sapienza" Università di Roma e l'Istituto di Cura "Città di Pavia" (Università degli Studi di Pavia) nel periodo compreso tra Gennaio 2017 e Aprile 2018. I criteri di inclusione sono stati: maturità scheletrica; completezza dei dati; follow-up di almeno 6 mesi; completamento della correzione; deformità complesse (almeno 2 piani dello spazio). Un totale di 27 pazienti trattati nel periodo in esame e rispondenti ai criteri di inclusione sono stati individuati. I dati clinici sono riportati in Tabella I. I sistemi esapodalici utilizzati nel presente studio sono: Taylor Spatial Frame (TSF®, Smith and Nephew), TL-HEX® (Orthofix), Ortho-SUV® (Synthes Plustek).

Misurazioni radiografiche

Esami RX pre-operatori in antero-posteriore (AP) e laterale (LL) sono stati eseguiti in tutti i pazienti per studiare deformità e caratteristiche delle fratture; nei pazienti trattati in elezione gli esami radiografici sono stati eseguiti sottocarico. Le misurazioni delle deviazioni dell'asse meccanico dell'arto inferiore sono state effettuate secondo i criteri proposti da Paley^{8,9} (Fig. 1). Il test di malallineamento

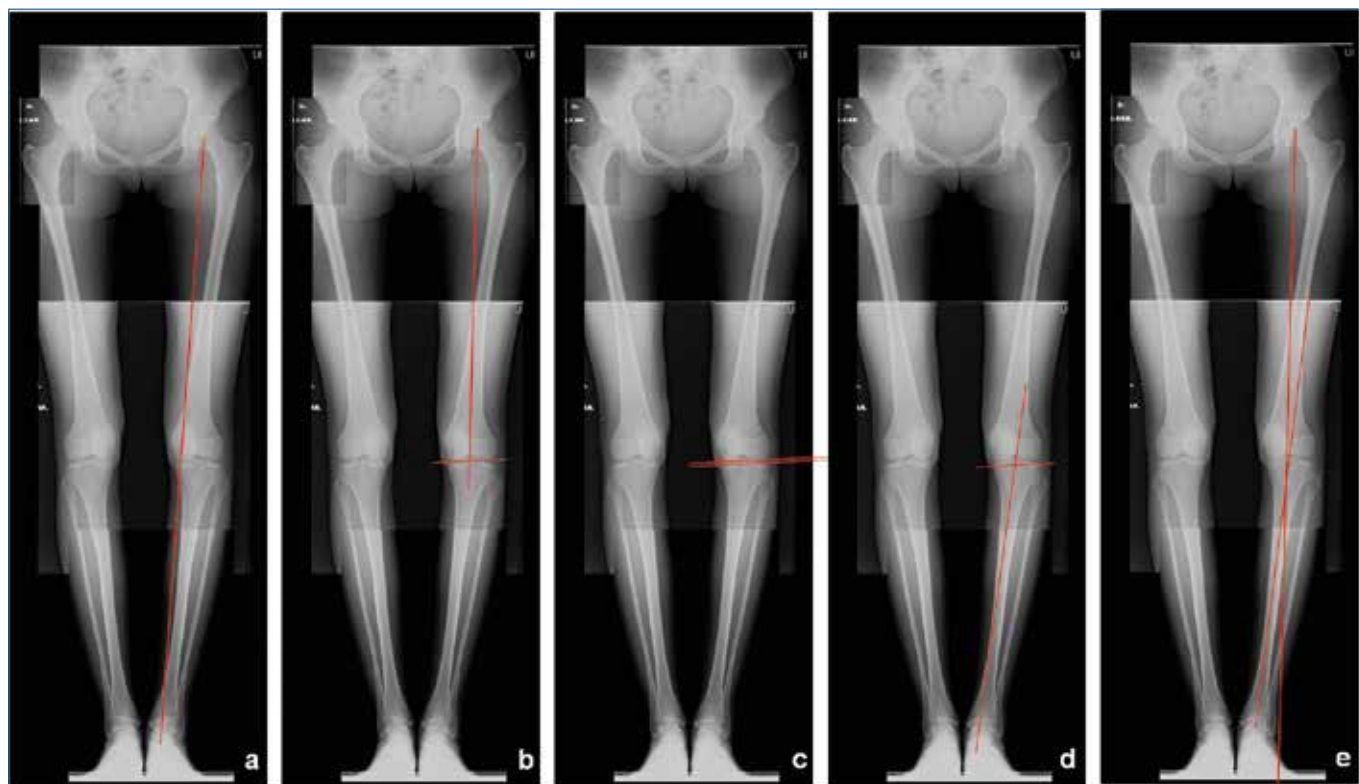


Figura 1. (a) Test di malallineamento meccanico: l'asse meccanico risulta deviato medialmente; (b) Determinazione dell'angolo femorale laterale LFA: 88,5°, normale; (c) Valutazione della congruenza articolare; (d) Valutazione dell'angolo tibiale mediale TMA: 82,3°, alterato; (e) determinazione del CORA.

Tabella I. Diagnosi, parametri delle deformità, tipo di fissatore esterno utilizzato.

Paziente	Diagnosi	F.E.
1, M	Piede talo secondario sinistro	TSF
2, M	Varismo tibio-tarsico secondario destro	TSF
3, F	Genu valgum post traumatico	TSF
4, M	Deformità combinata femore sinistro in esito a DCA	TSF
5, M	Tibia distale sinistra vara post traumatica	TSF
6, F	Frattura esposta III distale tibia sinistra (AO 43-A3)	TSF
7, F	Tibia vara recurvata destra post traumatica	TSF
8, M	Frattura esposta III distale femore sinistro (AO, 33-C2)	TL-HEX
9, M	Frattura schiacciamento III distale tibia destra (AO, 43C3)	TL-HEX
10, M	Ipometria femorale destra	TL-HEX
11, M	Frattura III medio tibia destra esposta (AO, 42-B2)	TL-HEX
12, M	Frattura III medio femore sinistro (AO, 32-C3)	TL-HEX
13, F	Genu varum post traumatico	Ortho SUV
14, M	Frattura tibia III distale sinistra esposta (AO, 43-C2)	Ortho SUV
15, F	Deformità femorale metaepifisario post traumatica	Ortho SUV
16, F	Tibia vara iuxtarticolare	Ortho SUV
17, M	Valgismo tibio-tarsico secondariodestro	Ortho SUV
18, M	Varismo secondario femore sovracondilare destro	Ortho SUV
19, F	Frattura metafisi prossimale tibia destra (AO, 41-C3)	Ortho SUV
20, M	Ipometria femorale destra primitiva	Ortho SUV
21, M	Tibia vara e procurvata post traumatica destra	Ortho SUV
22, F	Varismo tibio-tarsico secondariosinistro	Ortho SUV
23, M	Deformità rotatoria primitiva tibia destra	Ortho SUV
24, F	Deformità rotatoria femorale e tibiale destra	Ortho SUV
25, M	Varismo tibio-tarsico secondariodestro	Ortho SUV
26, F	Tibia vara e procurvata secondaria destra	Ortho SUV
27, M	Valgismo secondario femore sovracondilare destro	Ortho SUV

neamento è stato effettuato nelle deformità complesse per definire se monostotica o combinata^{8,9}. La deformità rotatoria è stata valutata clinicamente e con TC quando necessario (Fig. 2).

La sede dell'apice della deformità o frattura (*center of rotation of angulation*, CORA) è stata distinta in diafisaria, metafisaria, iuxtarticolare; le traslazioni sui differenti piani sono state considerate come distanza tra i profili corticali dei segmenti ossei craniali e caudali al CORA della deformità (Fig. 3). Le misurazioni pre e post-trattamento sono state effettuate mediante RadiAnt™ 64 bit ver. 3.4.2 per Windows (Poznan, Poland)¹⁰. L'accuratezza delle misurazioni è pari a 0,1 mm /0,1°.

Tecnica chirurgica

Sono state seguite le regole "classiche" di montaggio, rispettando i "corridoi di sicurezza"¹¹, applicando il costrutto con maggiore stabilità e rigidità. L'utilizzo delle viti tronco-coniche (5 e 6 mm nel femore e tibia) è stato preferito a quello dei fili transossei (1,5-1,8 mm) quando possibile. I fili con "ogiva" sono stati usati nelle fratture articolari e nelle fratture con 3° frammento per la riduzione e compressione del frammento e tensionati con tenditore dinamometrico (50 a 100 kg). Il diametro dell'anello o semianello del fissatore è stato scelto per garantire l'articolarietà dei segmenti adiacenti il sito di correzione e un'agevole medicazione dei tramiti delle viti o fili, evitando i decubiti. Nelle defor-

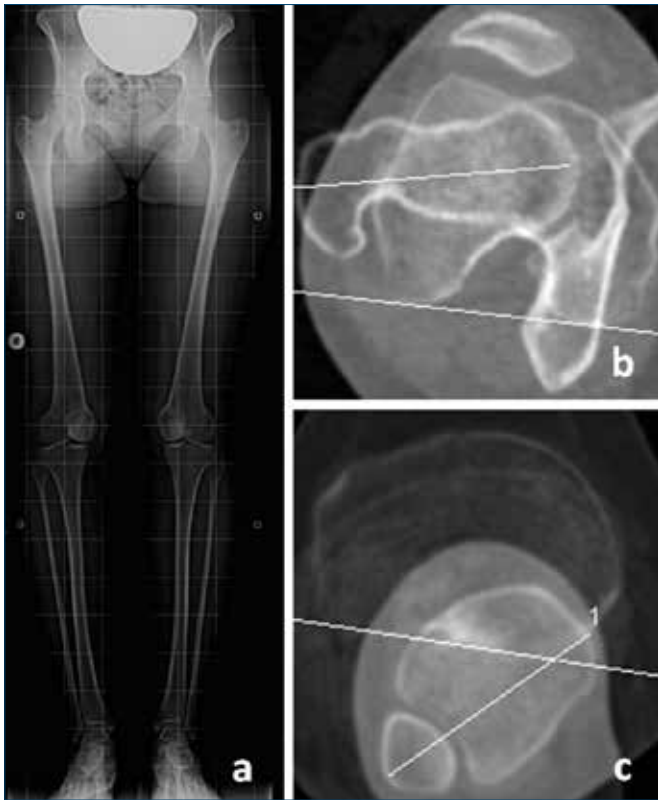


Figura 2. Programmazione preoperatoria di un caso di malallineamento rotatorio primitivo dell'arto inferiore: (a) RX arti inferiori; studio TC (b) femore e (c) tibia.

mità non traumatiche sono state effettuate "corticotomie" sottoperiostali secondo tecnica di Ilizarov classica dopo il montaggio dei supporti circolari del fissatore esterno.

Programmazione della correzione

I parametri di montaggio del fissatore esapodolico (diametro dei supporti circolari, lunghezza delle aste e distanze dei supporti dai segmenti ossei ove richiesto dal software), della deformità e la correzione prevista sono stati inseriti nei software e un programma di correzione graduale della deformità con un ritmo impostato di 1 mm e 1° al giorno è stato elaborato dal software.

Valutazione dei risultati - ASAMI score

L'ASAMI score (*Association for the Study and Application of the Methods of Ilizarov score*)¹² è stato utilizzato per valutare i risultati ottenuti dopo il trattamento.

Analisi statistica

La media, la deviazione standard (SD), l'intervallo di confidenza al 95% (95% CI) e il range della differenza (Delta)

tra i valori attesi di correzione e i valori realmente ottenuti dopo la correzione sono state calcolate sia per le correzioni angolari (°) che per le lineari (mm). Il *Wilcoxon rank sum test* è stato usato per valutare la differenza tra i valori pre-correzione e post correzione e tra i valori di correzione attesi e quelli riscontrati sia per le correzioni angolari che lineari. Il livello di significatività applicato è 0,05. SPSS 19 per Windows (SPSS, IBM, Chicago, Illinois) è stato utilizzato.

Risultati

L'età media era 37 anni (range, 21-69 anni). Il tempo medio di mantenimento del fissatore esterno esapodolico (i.e., *Time In external Fixator - T.I.F.*), era 133 giorni (range, 65-252 giorni). Il test di Wilcoxon per dati appaiati ha evidenziato una differenza statisticamente significativa ($p = 0,01$) tra i valori di deformità pre-operatori e i valori post operatori sia per le correzioni lineari che per quelle angolari (Fig. 4), evidenziando l'efficacia della correzione



Figura 3. Esempio di determinazione del CORA a sede diafisaria di tibia in un caso di varo-procurvato tibiale post traumatico. (a) AP; (b) laterale.

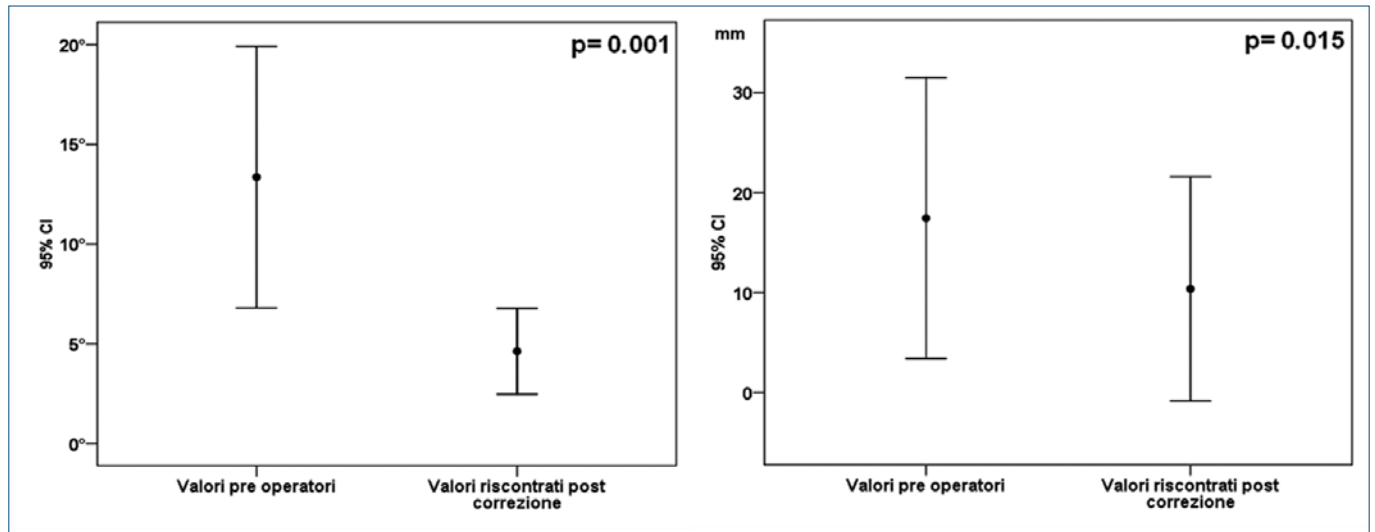


Figura 4. Sinistra. Error bar con i valori delle medie delle misurazioni angolari pre operatorie e post operatorie. Destra. Error bar con i valori delle medie delle misurazioni lineari pre operatorie e post operatorie.

della deformità in trattamento (Fig. 5). L'analisi della precisione della correzione, ha mostrato una differenza statisticamente significativa per i valori di correzione angolare ($^{\circ}$) ($p = 0,010$) ma non per i valori di correzione lineare (mm) ($p = 0,12$) (Fig. 6). Il Delta per la correzione angolare aveva in media un valore di $2,07^{\circ}$ con un 95% CI compreso tra $0,88^{\circ}$ e $3,26^{\circ}$. La deviazione standard (SD) era 2,05, il range tra -1° e 5° . Il Delta medio per la correzione lineare era $-4,1$ mm, il 95% CI $-11,8$ e $3,4$ mm e la SD 9,9. Il range era compreso tra -30 e 2 mm. Il follow-up medio è stato di 18 mesi (SD 2,7; range 8-36 mesi). Il tempo medio di correzione è stato di 17,8 giorni (SD 17,9; range 10-48 giorni). La velocità media di correzione è stata di 1mm/die per le correzioni lineari e di $1,7^{\circ}$ /die (SD 7,81, range 1° - 5°)

per le correzioni angolari. L'ASAMI (Associazione per lo Studio e Applicazione dei Metodi di Ilizarov)¹² ha riportato risultati eccellenti nell'80% dei casi ($n = 22$ pazienti), buoni nel 6,6% dei casi ($n = 2$ paziente) e accettabili nel 13,3% dei casi ($n = 3$ pazienti). Non sono stati riscontrati valori pessimi di correzione (Fig. 7). La percentuale totale delle complicanze è stata del 40%. L'infezione superficiale dei tramiti è stata la più frequente complicanza (32,6%). La parziale perdita della correzione post operatoria ottenuta si è verificata in due pazienti (7,4%). In 1 paziente è stato necessario procedere a una conversione con sintesi interna (chiodo femorale retrogrado) al termine della correzione programmata (3° mese post trattamento) a causa di problematiche socioeconomiche del paziente (Fig. 8).



Figura 5. Stesso caso della Figura 1. Correzione di deformità combinata iuxtarticolare della metafasi tibiale prossimale sinistra. (a) RX post operatorie; (b) RX a correzione ultimata; (c) RX di controllo a 12 mesi.

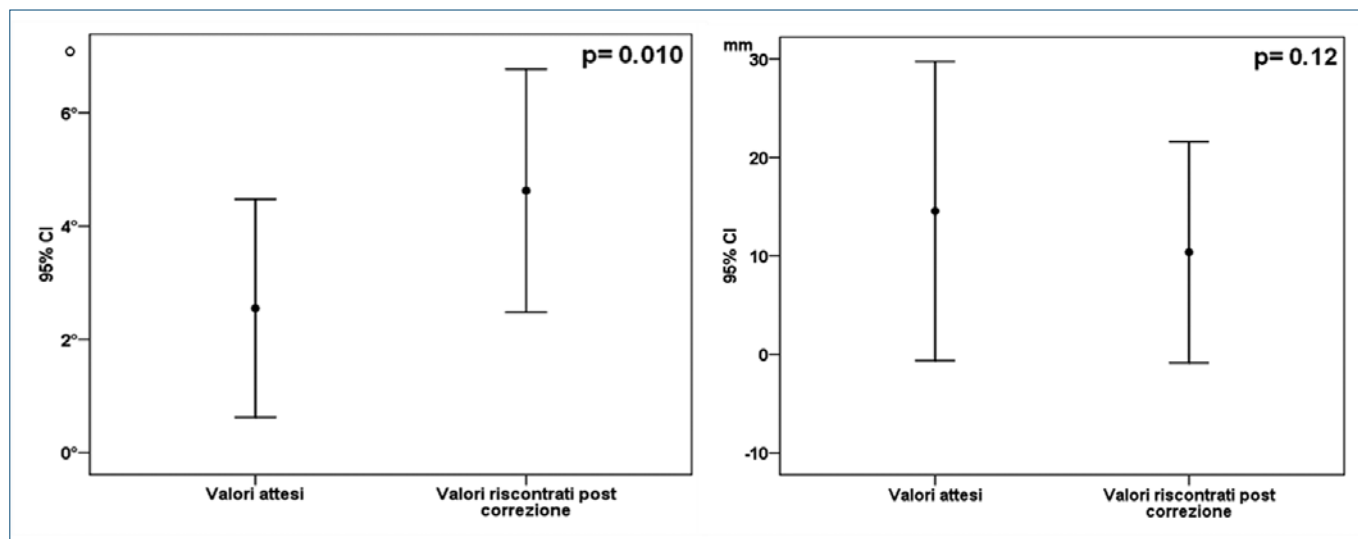


Figura 6. Sinistra. Error bar delle medie dei valori delle correzioni angolari programmate ed ottenute. Destra. Error bar delle medie dei valori delle correzioni lineari programmate ed ottenute.

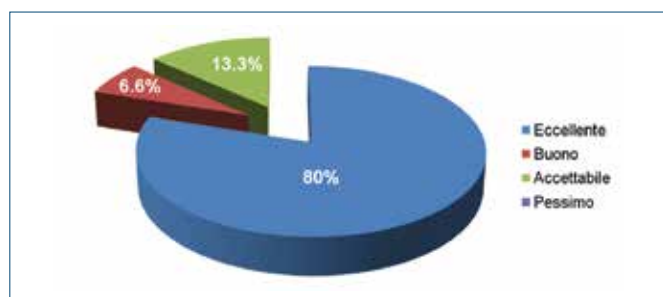


Figura 7. ASAMI score dei risultati ottenuti al termine del programma di correzione.

Discussione

Le deformità complesse degli arti inferiori sia primitive che secondarie influenzano negativamente le attività della vita quotidiana e causano una precoce degenerazione articolare^{14,15}. La fissazione esterna esapodolica è un sistema versatile ed efficace per il loro trattamento^{1,4-5,15-18}. L'uso di un software consente di programmare gli aggiustamenti della lunghezza delle aste telescopiche che uniscono i supporti rigidi (anelli, semianelli) del corpo del fissatore: è così possibile ottenere correzioni simultanee nei diversi piani dello spazio

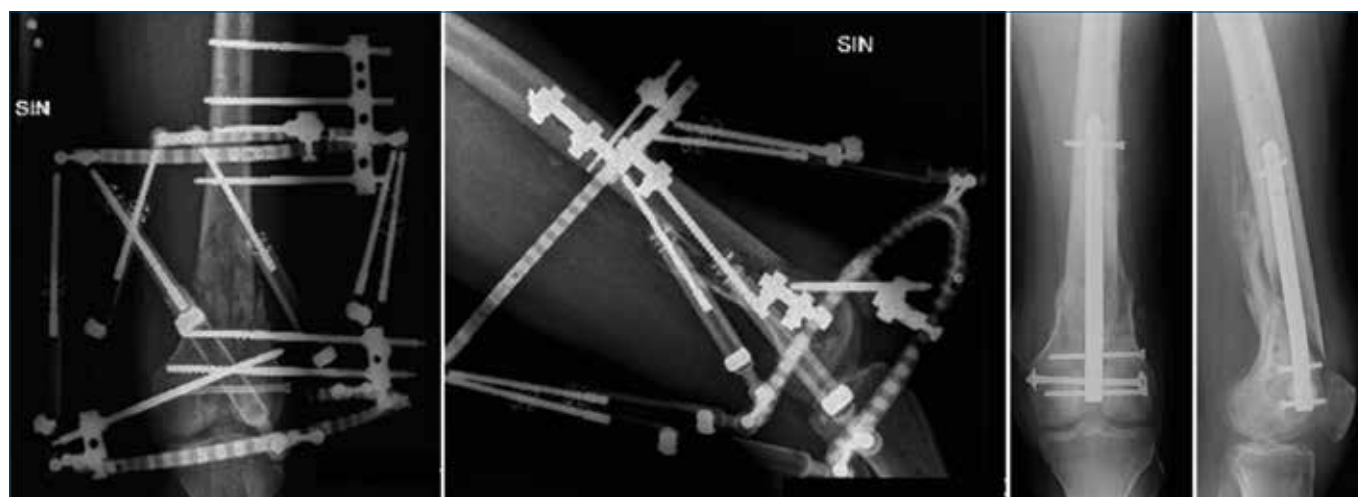


Figura 8. Conversione a sintesi interna a 3 mesi (Paziente 8, M) dopo completamento della correzione della deformità traumatica.

con 6 gradi di libertà, superando i limiti della fissazione esterna tradizionale¹⁹⁻²¹.

Scopo del presente studio è stato quello di valutare l'efficacia e la precisione della correzione di deformità complesse in diversi segmenti (femore, tibia, piede) con l'utilizzo di sistemi di fissazione esterna esapodolica computer assistita. In particolare, è stata analizzata la sovrapposibilità tra il programma di correzione generato dal software e la correzione effettivamente ottenuta nel post operatorio. Abbiamo ipotizzato che diverse variabili potessero influenzare il raggiungimento di una correzione completa: limiti intrinseci del sistema hardware, errori di input dei parametri di montaggio, errore nel montaggio del fissatore esterno (non perpendicolare al segmento osseo di riferimento) o variabili non controllabili connesse al paziente.

L'analisi dei risultati riportati mostra che i sistemi esapodolici sono efficaci nella correzione delle deformità primitive e traumatiche, con una differenza statisticamente significativa tra deformità pre operatoria e risultato post operatorio sia per le correzioni lineari che per quelle angolari ($p = 0,01$). Tale dato è in linea con la letteratura^{5,16-18,22,23}. L'analisi della precisione, mostra una differenza statisticamente significativa tra valori programmati di correzione e valori realmente ottenuti per le sole correzioni angolari ($p = 0,010$) ma non per quelle lineari ($p = 0,12$). Ciò sembrerebbe suggerire una minore precisione del sistema nelle correzioni angolari. Una possibile spiegazione potrebbe essere che un'osteotomia/corticotomia eseguita non a livello del "CORA" della deformità ma prossimalmente o distalmente ed esso, necessita di una concomitante distrazione dei frammenti ossei per consentire la correzione angolare: in questa fase una reazione vincolare può opporsi alla correzione rendendo meno preciso il fissatore esapodolico. La capacità del fissatore esapodolico di opporsi alle forze vincolari è funzione sia della sede di impianto del fissatore (entità delle masse muscolari, modulo e direzione dei vettori di forza) che della tipologia di costruito. Tale ipotesi è supportata dalla letteratura^{16-18,24}. Schmoroshko et al.²⁴ hanno evidenziato che differenti tipologie di montaggio del fissatore esterno hanno una capacità differente di apportare correzioni in senso angolare, traslatorio o rotatorio e di mantenere la rigidità del sistema. Henderson et al.²⁵ hanno riportato una minore capacità di resistenza del fissatore esapodolico al carico assiale rispetto al fissatore esterno di Ilizarov (645 N/mm vs 1296 N/mm) ma una maggiore rigidità in torsione (16 N/mm vs 5 N/mm) e in flessione (78 N/mm vs 42 N/mm) con una deformazione elastica del sistema (0,72 mm in carico assiale, 0,5° in flessione e 2° in torsione, alle forze applicate). All'interfaccia osso/vite e osso/filo, l'esapodolico appariva meno rigido rispetto all'Ilizarov con una maggiore elasticità nel carico assiale e un intrinseco grado di lassità a livello

della giunzione degli *struts* agli anelli a circa 10 N di carico assiale e 5 Nm di flessione o torsione. Mavcic et al.²⁶ sottolineano che è essenziale una micromovimentazione del sistema, in quanto un sistema eccessivamente rigido causa un ambiente biomeccanicamente sfavorevole all'osteogenesi^{27,28}. Resta complicato combinare le proprietà di un sistema non eccessivamente rigido a quelle di un sistema sufficientemente rigido da resistere a sollecitazioni soprattutto assiali.

Nella corretta pianificazione preoperatoria, dunque, si dovrebbe anche tener conto del modulo di resistenza dei tessuti molli alla distrazione/angolazione: ciò può influenzare la precisione della correzione. Differente è la sottoestima del grado di correzione necessario, che è invece un errore di pianificazione. A causa del numero limitato di casi, sulla base dei nostri dati non possiamo ipotizzare l'esistenza di una diversa precisione della correzione in vari distretti corporei. Errori nei parametri di montaggio o errori di montaggio del fissatore in sede intraoperatoria possono causare una malriduzione ma non influenzano la precisione del sistema²⁹. L'utilizzo della TC per l'acquisizione dei parametri di montaggio appare utile nei casi con grave deformità rotazionale.

L'ASAMI score ha mostrato risultati da eccellenti a buoni nell'86,6% dei casi, suggerendo l'efficacia del trattamento effettuato. La percentuale di complicanze legate all'infezione superficiale dei tramiti è stata del 32,6% e tale dato appare in linea con la letteratura. Feldman et al.² riportano un tasso di infezione dei tramiti dei fili/viti pari al 16,6%, Docquier et al.²² del 33,3%, Sala et al.¹⁵ del 36,8%, Nakase et al.³⁰ del 26,1%, Marangoz et al.³¹ del 27,1%.

In 1 caso (3,7%) si è verificata una perdita di rigidità del sistema esapodolico e della correzione della deformità trattata a seguito della rimozione di una vite condiloidea femorale per un'infezione del tramite non responsiva alla terapia antibiotica orale. Feldman et al.² e Nakase et al.³⁰ riportano nei loro studi 1 caso di fallimento della correzione per rimozione precoce del fissatore esapodolico, con recidiva della deformità. Non abbiamo osservato complicanze maggiori riportate in letteratura^{15-17,22,29} e il fissatore esterno esapodolico si è dimostrato uno strumento efficace e sicuro.

Conclusioni

Il fissatore esterno esapodolico computer assistito rappresenta un innovativo, versatile e sicuro strumento sia per la correzione delle deformità complesse degli arti (primitive e secondarie) sia per l'applicazione in ambito traumatologico acuto. La differenza riscontrata tra il programma di correzione generato dal software e la correzione finale post operatoria per i valori angolari, sebbene clinicamente non

rilevante, mette in evidenza un limite del sistema di cui il chirurgo deve avere consapevolezza. Va tuttavia sottolineato che una correzione residua a partire dall'ultimo valore di correzione raggiunto è possibile e consente di ottenere il valore di correzione angolare atteso con la massima precisione.

Bibliografia

- 1 Fadel M, Hosny G. The Taylor spatial frame for deformity correction in the lower limbs. *Int Orthop* 2005;29:125-9. <https://doi.org/10.1007/s00264-004-0611-9>
- 2 Feldman DS, Shin SS, Madan SS, et al. Correction of tibial malunion and non-union with six-axis analysis deformity correction using the Taylor Spatial Frame. *J Orthop Trauma* 2003;17:549-54. <https://doi.org/10.1097/00005131-200309000-00002>
- 3 Rozbruch RS, Helfet DL, Blyakher A. Distraction of hyper-trophic non-union of tibia with deformity using Ilizarov/Taylor Spatial Frame: report of two cases. *Arch Orthop Trauma Surg* 2002;122:295-8. <https://doi.org/10.1007/s00402-001-0370-7>
- 4 Seide K, Faschingbauer M, Wenzl ME, et al. A hexapod robot external fixator for computer assisted fracture reduction and deformity correction. *Int J Med Robot* 2004;1:64-9. <https://doi.org/10.1002/rcs.6>
- 5 Rogers MJ, McFadyen I, Livingstone JA, et al. Computer hexapod assisted orthopaedic surgery (CHAOS) in the correction of long bone fracture and deformity. *J Orthop Trauma* 2007;21:337-42. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e3180463103>
- 6 Lichte P, Kobbe P, Dombroski D, et al. Damage control orthopedics: current evidence. *Curr Opin Crit Care* 2012;18:647-50. <https://doi.org/10.1097/MCC.0b013e328359fd57>
- 7 D'Alleyrand JC, O'Toole RV. The evolution of damage control orthopedics: current evidence and practical applications of early appropriate care. *Orthop Clin North Am* 2013;44:499-507. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2013.06.004>
- 8 Paley D, Tetsworth K. Mechanical axis deviation of lower limbs. Preoperative planning of uniapical angular deformities of the tibia or femur. *Clin Orthop Relat Res* 1992;280:48-64.
- 9 Paley D. Normal lower limb alignment and joint orientation. In: Paley D. *Principles of deformity correction*. Berlin: Springer Publisher 2002, Cap. 1, pp. 1-18.
- 10 RadiAnt™ 64 bit ver. 3.4.2 per Windows (Poznan, Poland). www.radiantviewer.com
- 11 Solomin L. The basic principles of external skeletal fixation using the ilizarov and other devices. Milano: Springer Verlag Publisher, Italia 2012. <https://doi.org/10.1007/978-88-470-2619-3>
- 12 Association for the Study and Application of the Methods of Ilizarov score. www.asami-br.org
- 13 Bhave A, Paley D, Herzenberg JE. Improvement in gait parameters after lengthening for the treatment of limb-length discrepancy. *J Bone Joint Surg Am* 1999;81:529-34. <https://doi.org/10.2106/00004623-199904000-00010>
- 14 Tetsworth K, Paley D. Malalignment and degenerative arthropathy. *Orthop Clin North Am* 1994;25:367-77.
- 15 Sala F, Elbatrawy Y, Thabet AM, et al. Taylor spatial frame fixation in patients with multiple traumatic injuries: study of 57 long-bone fractures. *J Orthop Trauma* 2013;27:442-50. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e31827cda11>
- 16 Hughes A, Heidari N, Mitchell S, et al. Computer hexapod-assisted orthopaedic surgery provides a predictable and safe method of femoral deformity correction. *Bone Joint J* 2017;99-B(2):283-8.
- 17 Hughes A, Parry M, Heidari N, et al. Computer hexapod-assisted orthopaedic surgery for the correction of tibial deformities. *J Orthop Trauma* 2016;30:e256-61. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.99B2.BJJ-2016-0271.R1>
- 18 Eren I, Eralp L, Kocaoglu M. Comparative clinical study on deformity correction accuracy of different external fixators. *Int Orthop* 2013;37:2247-52. <https://doi.org/10.1007/s00264-013-2116-x>
- 19 Manner HM, Huebl M, Radler C, et al. Accuracy of complex lower-limb deformity correction with external fixation: a comparison of the Taylor Spatial Frame with the Ilizarov Ringfixator. *J Child Orthop* 2007;1:55-61. <https://doi.org/10.1007/s11832-006-0005-1>
- 20 Eidelman M, Bialik V, Katzman A. Correction of deformities in children using the Taylor spatial frame. *J Pediatr Orthop B* 2006;15:387-95. <https://doi.org/10.1097/01.bpb.0000228380.27239.8a>
- 21 Rozbruch SR, Segal K, Ilizarov S, et al. Does the Taylor spatial frame accurately correct tibial deformities? *CORR* 2009;468, 1352-61. <https://doi.org/10.1007/s11999-009-1161-7>
- 22 Docquier P, Rodriguez D, Mousny M. Three dimensional correction of complex leg deformities using a software assisted external fixator. *Acta Orthop Bel* 2008;74:816-22.
- 23 Dammerer D, Kirschbichler K, Donnan L, et al. Clinical value of the Taylor Spatial Frame: a comparison with the Ilizarov and Orthofix fixators. *J Child Orthop* 2011;5:343-9. <https://doi.org/10.1007/s11832-011-0361-3>
- 24 Schmoroshko PV, Vilensky VA, Hammouda A, et al. Determination of the maximal corrective ability and optimal placement of the Ortho-SUV frame for femoral deformity with respect to the soft tissue envelope, a biomechanical modelling study. *Adv Orthop* 2014;2014:268567. <https://doi.org/10.1155/2014/268567>
- 25 Henderson DJ, Rushbrook JL, Harwood PJ, et al. What are the biomechanical properties of the Taylor Spatial Frame™? *Clin Orthop Relat Res* 2017;475:1472-82. <https://doi.org/10.1007/s11999-016-5182-8>
- 26 Mavcic B, Antolic V. Optimal mechanical environment of the healing bone/fracture. *Int Orthop* 2012;36:689-5. <https://doi.org/10.1007/s00264-012-1487-8>
- 27 Epari DR, Duda GN, Thompson MS. Mechanobiology of bone healing and regeneration: in vivo models. *Proc Inst*

- Mech Eng H 2010;224:1543-53. <https://doi.org/10.1243/09544119JEIM808>
- ²⁸ Ulstrup AK. Biomechanical concepts of fracture healing in weight-bearing long bones. *Acta Orthop Belg* 2008;74:291-302.
- ²⁹ Kucukkaya M, Karakoyun O, Armagan R, et al. Calculating the mounting parameters for Taylor Spatial Frame correction using computed tomography. *J Orthop Trauma* 2011;25:449-52. <https://doi.org/10.1097/BOT.0b013e3181ee40c5>
- ³⁰ Nakase T, Kitano M, Kawai H, et al. Distraction osteogenesis for correction of three-dimensional deformities with shortening of lower limbs by Taylor Spatial Frame. *Arch Orthop Trauma Surg* 2009;129:1197-201. <https://doi.org/10.1007/s00402-008-0702-y>
- ³¹ Marangoz S, Feldman DS, Sala DA, et al. Femoral deformity correction in children and young adults using Taylor Spatial Frame. *Clin Orthop Relat Res* 2009;466:3018-24. <https://doi.org/10.1007/s11999-008-0490-2>