



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI MEDICINA E CHIRURGIA

Corso di Laurea in Medicina e Chirurgia

**ALLUNGAMENTO DEGLI ARTI
INFERIORI:
analisi retrospettiva clinico-radiologica**

Relatore: Chiar.mo
**PROF. GIGANTE
ANTONIO POMPILIO**

Tesi di Laurea di:
GALASSI FEDERICA

Correlatore: Chiar.mo
DR. COPPA VALENTINO

A.A. 2022/2023

INDICE:

1. DEFORMITÀ DEGLI ARTI INFERIORI	3
1.1 CAUSE DI DEFORMITÀ	5
1.2. DEFORMITÀ NEI TRE PIANI DELLO SPAZIO.....	5
2. ETROMETRIE DEGLI ARTI INFERIORI	8
2.1. ETROMETRIE DELL' APPARATO LOCOMOTORE: CAUSE E CLASSIFICAZIONI	8
2.2. EFFETTI DELL' ETROMETRIA DEGLI ARTI INFERIORI.....	10
2.3. STIMA DELL' ETROMETRIA ALLA MATURITA' SCHELETRICA.....	11
2.4. STRATEGIE TERAPEUTICHE DELLE ETROMETRIE	15
2.4.1. APPROCCIO CONSERVATIVO	16
2.4.2. APPROCCIO CHIRURGICO.....	16
3. OSTEOGENESI IN DISTRAZIONE	19
3.1. BIOLOGIA DELL' OSTEOGENESI IN DISTRAZIONE	21
3.2. DIFFERENTI TIPI DI IMPIANTI	26
3.2.1 FISSATORI ESTERNI MONOASSIALI.....	27
3.2.2 FISSATORI ESTERNI CIRCOLARI.....	28
3.2.3 CHiodo	30
3.3. INDICAZIONI TERAPEUTICHE	32
3.4. ALLUNGAMENTO SEMPLICE E TECNICA DEL TRASPORTO OSSEO.....	32
3.4.1 TECNICA DEL TRASPORTO OSSEO.....	34
3.5. COMPLICANZE	35
4. STUDIO CLINICO	39
4.1. INTRODUZIONE.....	39
4.2. MATERIALI E METODI.....	39
4.2.1. TECNICA CHIRURGICA.....	40
4.2.2. PROGRAMMA POST-OPERATORIO E GESTIONE	45
4.2.3. PARAMETRI DI VALUTAZIONE	46
4.3 RISULTATI.....	48
4.4. DISCUSSIONE.....	51
5. CONCLUSIONI	53
6. BIBLIOGRAFIA	57

1. DEFORMITÀ DEGLI ARTI INFERIORI

Il termine deformità indica una deviazione dalla forma normale e comprende infiniti quadri clinici.

In alcuni casi il difetto è conclamato mentre in altri il limite tra il normale ed il patologico può essere poco evidente e l'inquadramento diagnostico diventa estremamente complesso.

Per ciascuna delle ossa del corpo vengono assegnate linee di riferimento. Gli angoli in cui queste linee si intersecano indicano la presenza o meno di una deformità. Queste linee di riferimento standard sono denominate assi anatomici, assi meccanici e linee di orientamento articolare, tracciate nel piano frontale e nel piano sagittale.

L'*asse anatomico* di un osso lungo è la linea medio-diafisaria. Il termine *asse longitudinale* è sinonimo di asse anatomico; è necessario tenere conto del fatto che il termine "asse" in questo caso è convenzionale, poiché le ossa lunghe non sono rettilinee. Tuttavia, la curvatura fisiologica di alcune di esse, in un contesto clinico, può essere approssimata a una linea retta; per altre invece l'asse anatomico è accettato come linea curva.

Nel femore, ad esempio, la linea è retta nel piano frontale e curva nel piano sagittale. L'asse meccanico dell'osso è una linea retta che collega i centri delle articolazioni prossimali e distali dell'arto. Nell'arto inferiore, l'asse meccanico è una linea retta che collega i centri delle articolazioni dell'anca e della caviglia. Nell'arto superiore, è una linea retta che collega i centri delle teste omerali e ulnari.[1]

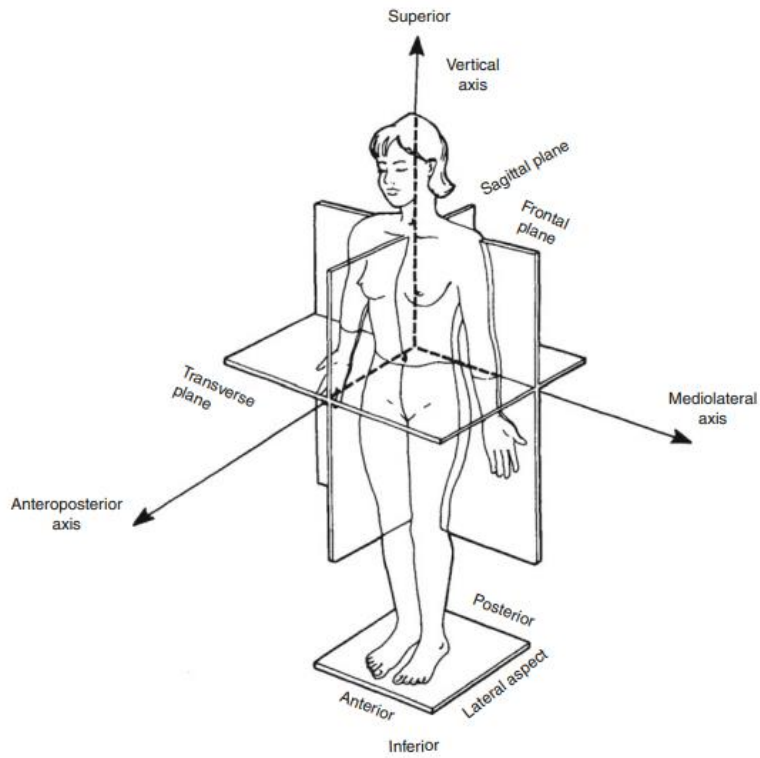


Fig. 1 piani e assi standard

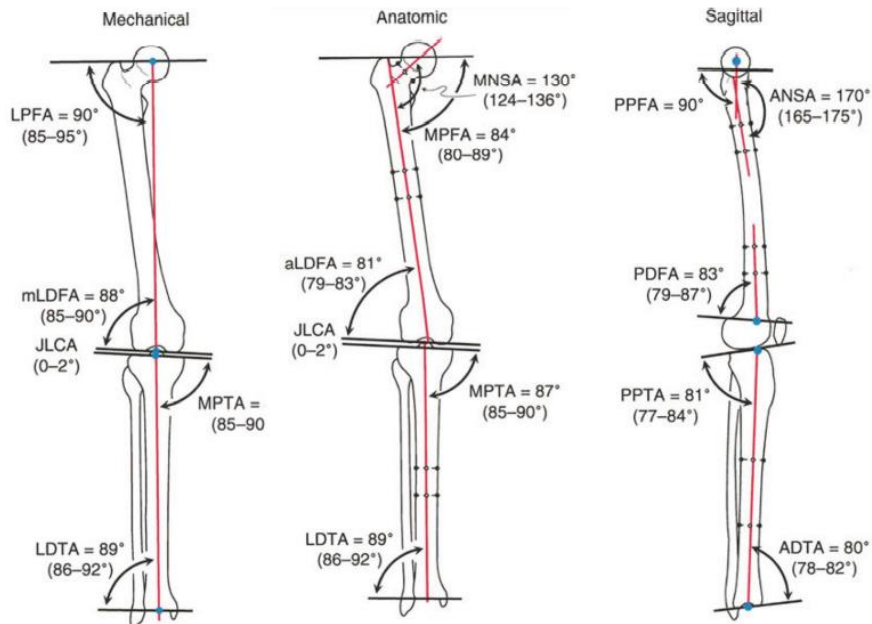


Fig.2 assi anatomici e meccanici standard degli arti inferiori in proiezione frontale e sagittale

1.1 CAUSE DI DEFORMITÀ

La deformità di un arto si può associare a una lesione o ad una specifica condizione ortopedica; può derivare da disturbi della crescita infantile, disturbi ossei metabolici, osteoartrite grave, traumi o fratture. Nella maggior parte dei casi, l'asse anatomico dell'osso è alterato per qualche motivo (malunione/nonunione, malattia metabolica dell'osso, ecc.) fino al punto in cui c'è una significativa *deviazione meccanica dell'asse (MAD)*, che porta ad alterare le pressioni di contatto dell'articolazione e la stabilità dei legamenti e che contribuisce ulteriormente alla degenerazione dell'articolazione e al peggioramento dell'allineamento meccanico nel tempo.

Dividiamo le deformità degli arti inferiori in base all'eziopatogenesi in forme congenite e secondarie [2], queste ultime possono essere causate da:

- **condizioni ortopediche:** come vizi di consolidazione, pseudoartrosi, artrosi avanzata con deformità, tumori ossei.
- **anomalie infantili:** come malattia di Blount (difetto di accrescimento della parte interna dell'estremità prossimale della tibia, che causa una progressiva deformità delle gambe in tre dimensioni [3]), displasia fibrocartilaginea focale, lesione della fisi tibiale prossimale, fenomeno di Cozen (deformità in valgo post-traumatica ad insorgenza tardiva associata a fratture metafisarie della tibia prossimale nei bambini [4]), displasia spondiloepifisaria (SED), displasia metafisaria (MED), antiversione del femore, eterometrie (LLD).
- **patologie sistemiche:** disturbi ossei metabolici (osteodistrofia renale, rachitismo da carenza di vitamina D o rachitismo ipofosfatemico), osteogenesi imperfetta, disturbi neuromuscolari (paralisi cerebrale), neurofibromatosi.

1.2. DEFORMITÀ NEI TRE PIANI DELLO SPAZIO

Paley nel 2002 [5] descrisse con accuratezza i parametri standard dei diversi assi, così da poter suddividere per ogni piano due tipi di deformità, angolari e di traslazione.

- Piano sagittale:
 - a. Angolari: varo/valgo
 - d. Di traslazione: laterale/mediale

- Piano frontale:
 - b. Angolari: procurvato/recurvato
 - e. Di traslazione: anteriore/posteriore
- Piano assiale:
 - c. Angolari: intra/extra rotazione
 - f. Di traslazione: ipo/ipermetria

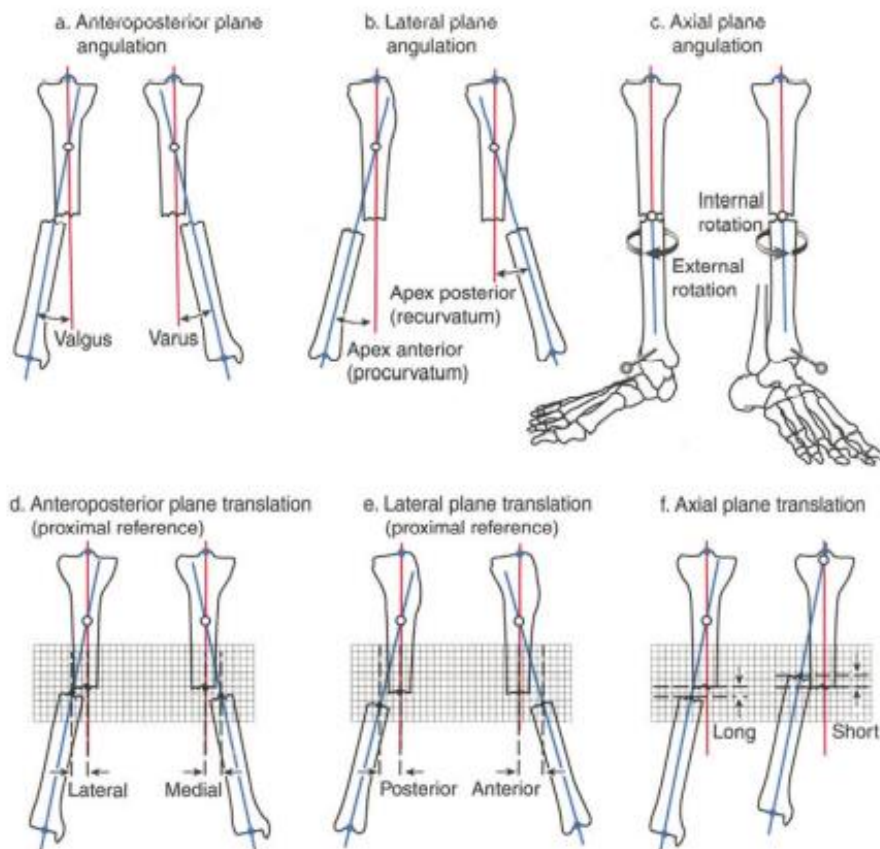


Fig. 3 deformità sui piani antero-posteriore, laterale e assiale dello spazio

Le linee di orientamento articolare vengono tracciate utilizzando speciali punti di riferimento anatomici e radiologici. Dall'intersezione dell'asse anatomico con una linea di orientamento dell'articolazione si ottengono gli angoli anatomici prossimale e distale per ogni osso. L'intersezione dell'asse meccanico con una linea di orientamento articolare forma l'angolo meccanico.

Linee e angoli diversi vengono confrontati con l'immagine standard, consentono di individuare le componenti della deformità.

Le componenti della deformità standard possono essere isolate o combinate in piani standard in diverse varianti. I piani standard e le componenti di deformità standard costituiscono la base per la classificazione pratica delle deformità delle ossa lunghe. In base a questa classificazione, una deformità può essere a uno, due o tre piani e a una, due, tre, quattro, cinque o sei componenti. In totale, esistono tre tipi di deformità. Questi sono suddivisi in:

- deformità semplici (un piano-una componente)
- deformità mediamente complesse (come un piano-due componenti o tre piani-tre componenti).
- deformità complesse (come due piani-quattro componenti o tre piani-sei componenti). [1]

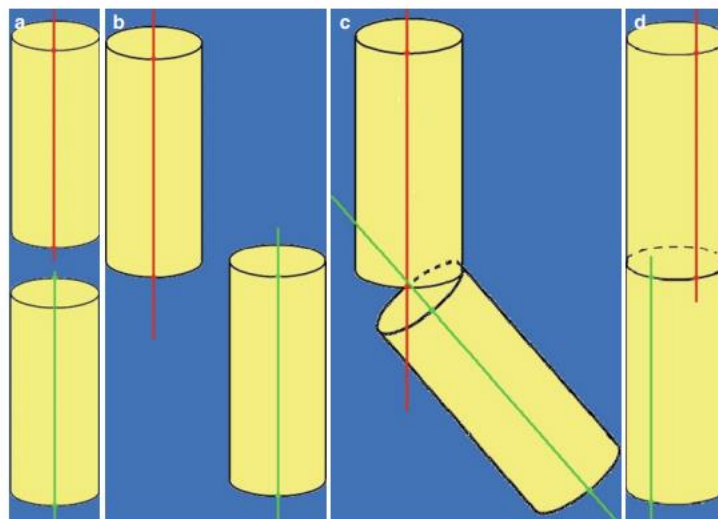


Fig. 4 componenti delle deformità: a) traslazione assiale: LLD b) traslazione periferica c) angolazione d) rotazione (torsione)

2. ETEROMETRIE DEGLI ARTI INFERIORI

Per eterometria, o dismetria si intende una differenza di lunghezza tra i due arti; questo problema è abbastanza comune in quanto le due metà del corpo non sono sempre perfettamente simmetriche. Knutson G. A.[6] ha riportato che solo il 10% della popolazione adulta esaminata nel suo studio presentava una perfetta simmetria di lunghezza degli arti inferiori, a fronte di una eterometria uguale o inferiore a 1 cm riscontrata nel 90% della popolazione esaminata.

2.1. ETEROMETRIE DELL'APPARATO LOCOMOTORE: CAUSE E CLASSIFICAZIONI

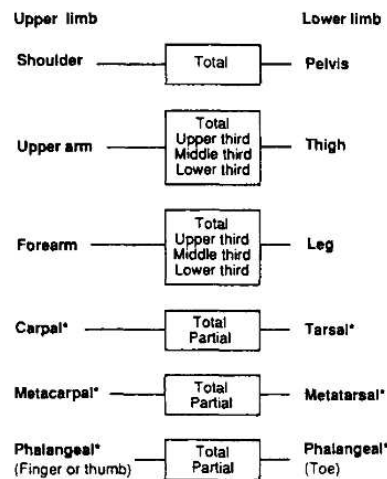
Di fronte ad un'eterometria non è sempre facile capire se questa sia reale, dovuta quindi ad una deformità scheletrica o se sia dovuta ad un atteggiamento, dato ad esempio da contratture muscolari o da rigidità articolari. Infatti, l'arto inferiore non è costituito da un unico segmento scheletrico, ma presenta tre articolazioni fondamentali (anca, ginocchio e caviglia) e il posizionamento reciproco dei vari segmenti scheletrici (sacro-iliaco, iliaco-femore, femore-tibia, tibia-astragalo e astragalo-calcagno), così come le tensioni posturali asimmetriche che la colonna può produrre sul bacino, è in grado di determinare una variazione funzionale della lunghezza dell'arto, non associata a una vera deformità scheletrica. In questa tesi si farà riferimento solo alle eterometrie vere.

In presenza di un'eterometria degli arti inferiori il primo passaggio diagnostico è quello di riuscire a distinguere se si tratta di *un'ipermetria*, cioè il lato patologico è quello più lungo, o *un'ipometria*, cioè il lato patologico è quello più corto. Questa differenza è possibile farla solo conoscendo la patologia di base.

Le cause più comuni di eterometria degli arti inferiori sono distinguibili in:

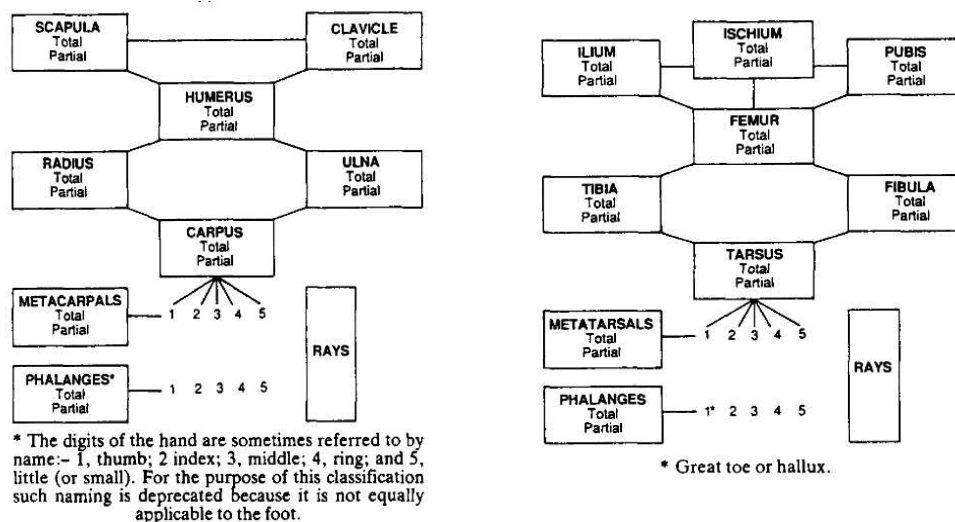
- *congenite*: ipoplasie congenita del femore (PFFD proximal femoral focal deficiency), emimelia tibiale o peroneale.
- *secondarie*: possono essere dovute a cause interne dell'individuo (es. sindromi di iperaccrescimento come la Klippel-Treanauny, displasia congenita dell'anca, piede torto congenito ecc.) o da eventi esterni che causano un danno della cartilagine di accrescimento (es. traumi, infezioni, neoplasie ecc) [7].

Per ciò che concerne le eterometrie congenite è stato introdotto un sistema di classificazione e nomenclatura comune. La classificazione ISPO (*International Society for Prosthetics and Orthotics*) del 1973, che stata poi riconosciuta dall'*International Organization for Standardization* (ISO 8548-1:1989) [8], divide i difetti di formazione scheletrica in trasversali e longitudinali, basandosi su un'analisi anatomica e radiologica.



Notes:
 (1) The skeletal elements marked * are used as adjectives in describing transverse deficiencies, e.g. transverse carpal total deficiency.
 (2) Total absence of the shoulder or hemipelvis (and all distal elements) is a transverse deficiency. If only a portion of the shoulder or hemipelvis is absent, the deficiency is of the longitudinal type.

Fig.5 classificazione difetti di formazione trasversali arto superiore e inferiore



* The digits of the hand are sometimes referred to by name:-- 1, thumb; 2, index; 3, middle; 4, ring; and 5, little (or small). For the purpose of this classification such naming is deprecated because it is not equally applicable to the foot.

* Great toe or hallux.

Fig.6 classificazione difetti di formazione longitudinali arto superiore e arto inferiore

2.2. EFFETTI DELL'ETEROMETRIA DEGLI ARTI INFERIORI

L'eterometria degli arti inferiori è quindi una complicanza comune che può presentarsi con quadri di diversa entità, da pochi centimetri fino ad oltre 20 cm e negli individui in accrescimento può aumentare.

Uno dei primi tentativi sistematici di quantificare le eterometrie degli arti inferiori e stabilire quali possano richiedere un trattamento e quali pazienti possano sviluppare sintomi associati, fu effettuato da Richard Gross [9], che nel 1983 pubblicò uno studio su trentacinque maratoneti maschi. Lo studio includeva 18 corridori con meno di 5 mm di dismetria tra i due arti, 10 da 5 a 9 mm e 7 con 1 cm o più. Di questi 18, 4 corridori con eterometria inferiore a 5 mm hanno utilizzato un rialzo, mentre solo 1 corridore dei 17 con una eterometria di 5 mm o più ha utilizzato il rialzo. Si è visto come piccole differenze di lunghezza tra i due arti (meno di 2,5 cm) non avessero un effetto deleterio sulla funzionalità degli arti nei maratoneti e come l'uso di un rialzo non fosse utile.

Ad oggi non vi sono stati molti altri avanzamenti dall'indagine di Gross che valutino l'effetto prodotto da eterometrie degli arti e che possano aiutare a stabilire quando debbano essere trattate.

Aiona et al.[10] esaminarono 43 pazienti con eterometria degli arti inferiori maggiore 2 cm, da problemi sia congeniti sia acquisiti. Su questi bambini è stata eseguita una *gait analysis*, ossia un'analisi dell'andatura che consente di identificare diversi meccanismi di compensazione come ad esempio l'obliquità pelvica, la flessione del ginocchio dell'arto più lungo, l'equino della caviglia degli arti corti e il crossover precoce della flessione plantare sul lato corto. È interessante notare che le dismetrie femorali utilizzavano strategie più distali per compensare la discrepanza della lunghezza degli arti.

Da ciò sembra si sia arrivati a concordare sul fatto che un'eterometria degli arti inferiori maggiore di 2 cm possa essere un problema. Ci sono inoltre prove che un'eterometria maggiore di 5 mm possa portare problemi all'anca, al ginocchio[11] [12] o alla colonna lombare [13][14]. Ci sono alcune prove che suggeriscono che i pazienti che hanno sintomi di lombalgia, associati a una discrepanza della lunghezza delle gambe di appena 5 mm, possano beneficiare di un rialzo o di una sorta di equalizzazione a breve termine[15].

In conclusione, è bene sottolineare che le eterometrie fanno riferimento solamente ad anomalie in un unico piano e che spesso il quadro è più complesso: la variazione di

lunghezza si associa frequentemente a deformità sugli altri piani dello spazio con presentazione in varo/valgo e intra/extrarotazione dell'arto.

2.3. STIMA DELL'ETEROMETRIA ALLA MATURITA' SCHELETRICA

In qualsiasi tentativo di previsione della crescita, è necessario inizialmente comprendere la normale crescita degli arti inferiori. A maturità ossea il femore e la tibia contribuiscono per il 54% e il 46% della lunghezza totale dell'arto. La crescita dell'arto inferiore con il principale guadagno di lunghezza avviene intorno all'articolazione del ginocchio. Il tasso di crescita totale e l'accrescimento delle estremità diminuiscono a partire dalla nascita fino all'adolescenza, quando inizia la crescita puberale. Gli arti inferiori guadagnano in media 3,2 cm all'anno dopo i 5 anni fino alla pubertà (2 cm all'anno dal femore e 1,5 cm all'anno dalla tibia). Dall'inizio della pubertà (stadio Tanner 2 ed età scheletrica di 13 anni nei ragazzi e 11 anni nelle ragazze), la crescita residua delle estremità inferiori è in media di 10 cm nei ragazzi e di 9 cm nelle ragazze prima che venga raggiunta la maturità scheletrica. Il tasso di crescita degli arti inferiori accelera da 3,2 a 5 cm all'anno al culmine della pubertà. [16]

Menelao definiva la fine della crescita all'età di 14 anni per le ragazze e 16 anni per i ragazzi. Dimeglio ha riscontrato in entrambi i sessi che la crescita si arresta 6 mesi prima in Risser 1 (calcificazione dell'osso al 25%) [17]. Queste formule si applicano solo se la pubertà si verifica nell'intervallo di età normale.

Per stimare l'altezza finale prevista di un neonato, un metodo di calcolo è utilizzando l'altezza media dei genitori. L'altezza del padre viene sommata a quella della madre, espresse in cm, viene diviso il risultato per 2, quindi vengono aggiunti 6,5 cm per i maschi e sottratti 6,5 cm per le femmine.

La maggior parte dei bambini ha un'altezza proiettiva per l'età adulta che non supera i 10 cm o le due deviazioni standard dell'altezza media dei genitori.

Tuttavia, né l'altezza prevista né quella proiettata costituiscono una prognosi di altezza.

L'età cronologica si basa sugli anni di età effettivi. L'età scheletrica (ossea) è un indicatore di maturità che si basa su un insieme di "norme" radiografiche che consentono di fare previsioni sulla crescita futura. [18]



	% total limb growth	% growth per bone	Average growth at physis > age 5	Growth at physis per year (Menelaus)	Growth at physis per year (Dimeglio)
Shoulder	15%	29%	3-4mm	3mm	
Elbow	37%	71%	10mm	9mm	11mm
Knee	28%	57%	6mm	6mm	9mm
Ankle	21%	43%	4-6mm	5mm	

Fig. 7 percentuali del contributo del femore e della tibia alla crescita ossea dell'arto inferiore e la crescita media annua di ogni articolazione

Sono stati descritti diversi metodi di previsione della crescita. Ad esempio, il *metodo aritmetico* anche chiamato *metodo o calcolo di White-Menelaus* [19], rapido per prevedere eterometrie degli arti, con il vantaggio di non richiedere l'accesso a radiografie specifiche o a un atlante di Greulich e Pyle (atlante che descrive gli stadi di ossificazione su una radiografia semplice dorso-palmare (d/p) della mano sinistra, compreso il polso) [20]. Tuttavia, si basa sull'età cronologica e presuppone che le femmine smettano di crescere all'età di 14 anni e i maschi a 16 anni, con una crescita annuale di 0,375 pollici dal femore distale e di 0,25 pollici dalla tibia prossimale.

Secondo questo metodo, una donna di 12 anni che ha completato lo sviluppo femorale, in seguito a un trauma ci si aspetta di avere una differenza di lunghezza tra gli arti di 1,8 cm alla maturità scheletrica, mentre per un maschio di 12 anni con la stessa lesione e lo stesso arresto della cartilagine di accrescimento, si prevede una dismetria finale di 3,6 cm. Se questi pazienti avessero una maturità scheletrica molto maggiore o molto minore rispetto all'età cronologica, questi calcoli potrebbero non essere accurati.

Green e Anderson hanno avuto diverse pubblicazioni che hanno contribuito alla comprensione della crescita scheletrica e alla previsione della crescita. Nel 1963, gli autori pubblicarono dei grafici che includevano cambiamenti nella statura, nella

lunghezza del femore e nella lunghezza della tibia, sulla base dei dati ottenuti da 100 bambini, 51 dei quali erano sani e 49 con una storia di poliomielite unilaterale, di età compresa tra gli 8 e i 18 anni [21].

Un anno dopo, Anderson et al. hanno creato delle tabelle di crescita basate sulle misurazioni di radiografie seriali di 134 bambini e bambine sani dall'età di un anno fino alla maturità scheletrica. [22] Le loro tabelle di crescita sono state ampiamente utilizzate per aiutare a prevedere eterometrie degli arti alla maturità e pianificare la tempistica dell'epifisiodesi. Tuttavia, le informazioni per questi grafici sono basate su dati raccolti da gruppi selezionati di pazienti, il che rende poco chiaro se siano realmente applicabili a una popolazione più ampia e diversificata.

Nel 1977, Moseley [23] ha pubblicato il *metodo della linea retta*. Questo metodo può essere utilizzato per prevedere sia la disuguaglianza della lunghezza degli arti alla maturità scheletrica sia il momento ottimale per l'epifisiodesi per i pazienti con diagnosi di eterometria degli arti all'inizio della crescita scheletrica. Può anche tenere conto di precedenti allungamenti e/o epifisiodesi iatrogene o patologiche. A differenza delle tabelle di Green e Anderson, questo metodo considera l'età scheletrica del paziente per stimare la crescita. Il metodo richiede l'accesso a un minimo di tre età ossee e tre radiografie e/o scanner degli arti inferiori per completare il metodo di predizione, nonché una speciale carta millimetrata e un atlante di Greulich e Pyle. Di conseguenza, si tratta di un metodo che necessita di maggior tempo, così da essere difficilmente utilizzabile nella pratica clinica.

Più recentemente, Paley et al. [24] hanno reso popolare il loro *Multiplier metodo*. Questi autori sostengono che gli arti inferiori seguono una costante di crescita biologica basata sull'età e sul sesso del paziente. Utilizzarono i dati di crescita di Green e Anderson per calcolare coefficienti specifici per età e sesso che possono essere applicati per calcolare la crescita residua fino alla maturità scheletrica. Poiché il metodo del moltiplicatore si basa su un rapporto di crescita nel tempo, elimina le differenze dovute al tempo e quelle dovute all'etnia e alla razza. I pazienti possono teoricamente ricevere una stima dell'eterometria degli arti alla prima visita clinica (il calcolo delle differenze per le dismetrie di sviluppo richiede conoscenza delle lunghezze degli arti del bambino in due momenti diversi). La creazione di più applicazioni per smartphone ha reso più facile per i medici calcolare rapidamente la dismetria degli arti alla maturità e determinare l'età in

cui dovrebbe essere eseguita un'epifisiodesi. Una critica a questo metodo è che si basa sull'età cronologica piuttosto che su quella età scheletrica, il che può portare a previsioni meno accurate negli adolescenti in peri-pubertà, in cui è stato dimostrato che l'età scheletrica è più accurata per una previsione.

Diversi autori hanno confrontato i metodi di previsione della crescita disponibili per determinare quale fornisca la maggiore accuratezza. Little et al. [25] hanno esaminato l'accuratezza del metodo aritmetico, dei grafici di Green e Anderson e del grafico a linea retta di Mosely esaminando i dati di 110 pazienti sottoposti ad epifisiodesi per eterometrie. Ognuno di questi metodi presentava un rischio di errore del 10%-20%, che si tradurrebbe in una differenza di lunghezza dell'arto superiore a 2 cm alla maturità con il metodo meno accurato, ovvero il grafico di Mosely, generato al computer.

Makarov et al. hanno confrontato l'accuratezza del metodo White-Menelaus, quello della crescita residua di Green e Anderson, quello della linea retta di Mosely e il metodo del multiplier di Paley, esaminando i dati di 77 pazienti trattati per eterometrie degli arti in un unico centro.

Tutti i pazienti hanno avuto almeno tre scansioni preoperatorie e radiografie dell'età ossea della mano sinistra associate. Ogni coppia di studi è stata distanziata di almeno sei mesi e i pazienti sono stati seguiti fino alla maturità scheletrica. I metodi di previsione sono stati confrontati sia con l'età cronologica che con l'età scheletrica per determinare quale metodo e quale età (cronologica o scheletrica) fornissero la previsione più accurata della lunghezza degli arti alla maturità. Gli autori hanno scoperto che l'età scheletrica piuttosto che età cronologica riduceva notevolmente l'errore di previsione della lunghezza dell'arto corto per ciascuno dei metodi citati e ha ridotto notevolmente l'errore di previsione per la differenza di lunghezza totale degli arti per il metodo di White-Menelaus e per quello del grafico della linea retta. [26] Ogni metodo è stato associato a un errore di previsione di circa 1 cm, con il metodo White Menelaus che risulta essere il metodo più accurato ($0,7 \pm 0,6$ cm) e il metodo del moltiplicatore il meno accurato ($1,16 \pm 0,9$ cm).

Il metodo White-Menelaus ha presentato valori di errore di predizione nettamente inferiori rispetto al metodo del moltiplicatore in questa coorte ($P < 0.0001$). [27]

Growth Prediction Methods			
Name	Requirements	Strengths	Limitations
Arithmetic	Age, sex, discrepancy data	Quick, simple	Assumed yearly growth, does not incorporate skeletal age
Green and Anderson	Age, sex, discrepancy data	Simple	Developed on homogenous group
Moseley	Age, sex, skeletal age, and discrepancy data from three visits	Good validation studies	Time consuming, requires multiple data points
Multiplier	Age, sex, discrepancy data	Quick, simple	Recent study suggests that this may be least accurate ¹⁷ (accuracy improves if skeletal rather than chronologic age is used for calculation)

Fig. 8 differenti metodi di previsione di crescita

2.4. STRATEGIE TERAPEUTICHE DELLE ETEROMETRIE

Il tipo di trattamento dipende principalmente dalla patologia di base, dall'entità dell'eterometria e la presenza di altre deformità associate. Anche la compliance al trattamento è un elemento importante nel processo decisionale. Quando possibile si tratta l'arto che presenta il problema: accorciando l'arto più lungo o allungando l'arto più corto.[28]

C'è una vasta gamma di opzioni di trattamento conservativo e chirurgico. I trattamenti che possono essere considerati includono rialzi, scarpe, ortesi, rallentamento della crescita indotto chirurgicamente mediante blocco delle cartilagini di accrescimento intorno all'articolazione del ginocchio, o allungamento delle gambe con osteotomia e successiva distrazione del callo osseo. I cambiamenti nella lunghezza delle gambe esercitano un marcato stress meccanico sui tessuti molli. Se la discrepanza di lunghezza degli arti prevista supera i 5 cm, il trattamento iniziale di allungamento può già essere preso in considerazione durante gli anni di crescita del paziente.

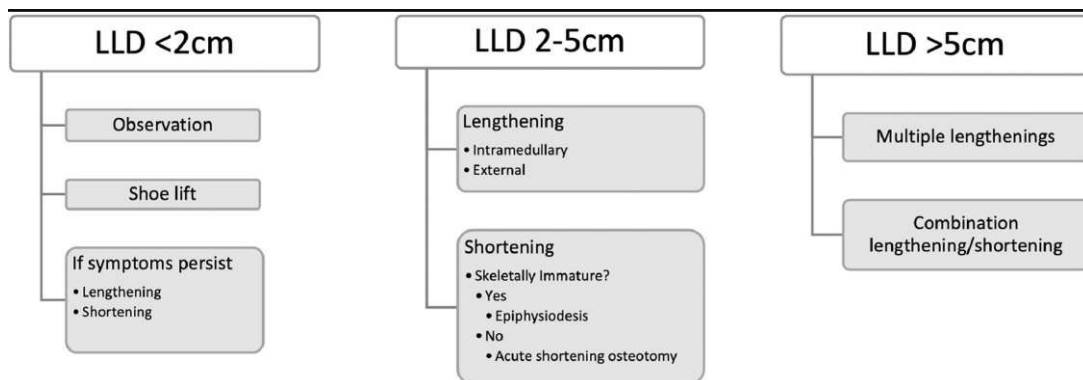


Fig. 9 indicazione terapeutiche LLD (Leg Length discrepancy) [29]

2.4.1. APPROCCIO CONSERVATIVO

- *Eterometria* < 2cm: nella maggior parte dei casi non è necessario alcun trattamento.
- *Eterometria* 2 – 4 cm: è una condizione che può essere gestita sia mediante rialzi od ortesi sia con un trattamento chirurgico.
- *Eterometria* > 6cm: la maggior parte di questi pazienti con eterometria non può essere trattata con supporto ortesico, poiché è molto difficile utilizzare il piede in questa situazione per motivi di spazio ed estetici.[30]

Stanitski et al. [31] esaminarono la valutazione e il trattamento delle dismetrie degli arti inferiori nel bambino in fase di crescita. Discussero sulle opzioni terapeutiche più comuni, che vanno dall'assenza di trattamento alle procedure chirurgiche di accorciamento o allungamento, concludendo che ci debba essere indicazione all'allungamento chirurgico se l'eterometria è superiore a 5-6 cm, mentre che l'epifisiodesi o l'accorciamento del femore possa essere utile per piccole discrepanze o differenze residue a seguito di un allungamento controlaterale.

Per quanto riguarda un approccio conservativo, tramite solette, si è visto come un fattore limitante fosse il volume delle scarpe. Con le solette con zeppa sul tallone, è possibile correggere la discrepanza della lunghezza delle gambe fino a 2 cm. Con le scarpe, la correzione fino a 5 cm di differenza può essere ottenuta sollevando la suola.

I rialzi di ≥ 5 cm invece, sono associati a una crescente instabilità, in tal caso l'uso di un'ortesi diventa indispensabile. Il trattamento ortesico, tuttavia, porta sempre a equino relativo e perdita di funzione dell'articolazione della caviglia.

2.4.2. APPROCCIO CHIRURGICO

L'approccio chirurgico per pazienti con dismetria degli arti di almeno 2 cm si basa sull'accorciamento dell'arto più lungo o sull'allungamento di quello più corto, fino all'amputazione e adozione protesica.

- **controllo della crescita tramite epifisiodesi:** modifica l'accrescimento della cartilagine di accrescimento rallentandone o bloccandone la crescita. [18]

Può essere:

- *simmetrica* se la crescita viene rallentata in modo simmetrico, sia nella parte interna che in quella esterna, con rallentamento globale della

crescita del segmento. Questa si differenzia quindi da un'epifisiodesi asimmetrica applicata a deformità in varo o valgo, quando l'accrescimento deve essere rallentato solo su un versante, mentre la restante parte di cartilagine deve continuare a crescere normalmente.

- *permanente*, effettuato da ablazione della cartilagine di accrescimento con un blocco irreversibile. Può essere effettuata mediante tecnica percutanea (con un piccolo accesso) o mediante tecnica Phemister (con un accesso un po' più ampio viene visualizzata direttamente la cartilagine di crescita, si ruota un tassello di osso in modo da creare un arresto di crescita) [32]. Viene effettuato in prossimità della maturità scheletrica, così da recuperare la differenza di lunghezza senza eccedere.
- *temporanea*, effettuata da cambre, viti o sistemi con viti e placche per colmare la placca epifisaria. Sarà possibile una volta raggiunto l'obiettivo desiderato, rimuovere i mezzi di sintesi in modo da far ripartire la crescita della cartilagine. Una procedura che è quindi teoricamente reversibile.

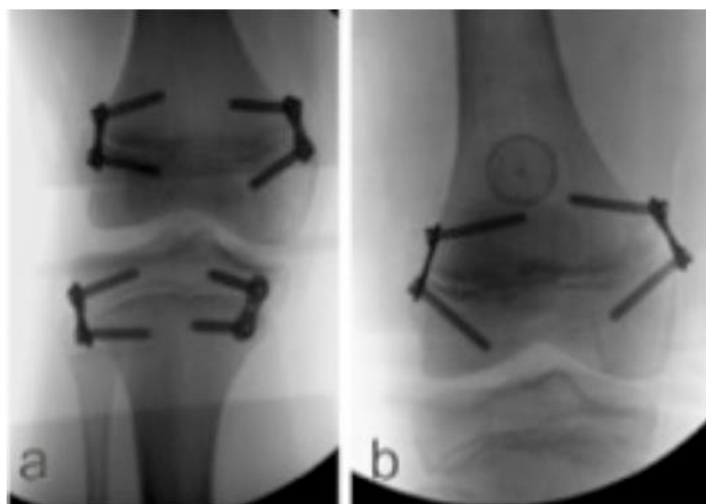


Fig. 10 epifisiodesi a) di femore distale e tibia prossimale b) solo del femore distale con placche a otto (eight plate) posizionate a cavallo della cartilagine di accrescimento e fissate all'osso da due viti

Presupposto fondamentale di tutte le procedure di epifisiodesi è che la crescita residua della cartilagine di accrescimento sia sufficiente, cioè che non solo venga effettuata una procedura di arresto su una parte di cartilagine, ma che la restante parte di cartilagine o la cartilagine di crescita dell'altro arto siano ancora attive.

L'epifisiodesi è una metodica adatta per una discrepanza moderata tra 2 e 5 cm.

A seconda delle necessità, può essere eseguita contemporaneamente su femore e tibia o solamente su uno dei due segmenti. Come qualsiasi procedura chirurgica di accorciamento questa ridurrà anche l'altezza assoluta; in chi ha un accorciamento significativo maggiore di 5 cm può creare problemi di proporzione tra gambe e tronco. Oltre a una previsione incerta, un altro rischio fondamentale è la deviazione secondaria dell'asse a causa di un blocco sbilanciato della cartilagine di accrescimento.[30]

- **accorciamento acuto del lato lungo** Consiste in un'osteotomia con asportazione del cilindro la cui altezza corrisponde all'eterometria. Viene esercitata una compressione forzata che si associa sempre a stress significativo, con al termine tessuto molle troppo lungo. Ciò porta al cedimento muscolare con perdita di forza, fino alla zoppia. Con un allenamento intensivo si può compensare la perdita di forza, anche se in tempi a volte lunghi che possono richiedere anni. [30]
- **allungamento del lato ipometrico:** se LLD atteso è più di 5 cm. Allungamento è spesso combinato con una procedura di accorciamento (epifisiodesi, osteotomia) sul lato lungo. Se effettuato in acuto si associa sempre ad uno stress significativo dei tessuti molli, a un rischio di lesioni da stiramento delle strutture vascolonervose [33] e a necessità di un secondo intervento chirurgico, per il riempimento con innesti dei difetti ossei creati. [34] Per questo motivo la tecnica principale utilizzata è quella dell'osteogenesi in distrazione che permette un graduale allungamento dell'arto più corto.
- **amputazione e adattamento protesico:** se l'arto non è ricostruibile, con LLD atteso maggiore di 20 cm.

3. OSTEOGENESI IN DISTRAZIONE

L'osteogenesi in distrazione è un metodo di allungamento degli arti che consente la correzione anche di difetti ossei estesi. Nonostante già in precedenza diverse innovazioni abbiano portato a questa tecnica, il merito della sua applicazione in clinica è attribuibile a A. G. Ilizarov, che con la “*legge dello stress da tensione*” volle studiare e sperimentare i principi biologici alla base della rigenerazione ossea e dei tessuti molli, sotto lenta e graduale distrazione, in seguito a un’osteotomia di ossa lunghe.[35][36]

In realtà la fissazione esterna viene utilizzata in medicina da migliaia di anni. Le prime notizie risalgono ad Ippocrate il quale, intorno al 377 a.C., sviluppò un fissatore esterno rudimentale formato da stecche di legno per la stabilizzazione delle fratture. [37]

Sebbene esistano documentazioni di diversi episodi aneddotici, non si sa bene come o da chi sia stato eseguito il primo allungamento di arti inferiori.

Il titolo di “*Father of Modern-Day Leg Lengthening*” è attribuibile ad Alessandro Codivilla [38], il primo ad aver impiegato una trazione ossea per l’allungamento degli arti. Egli era convinto della necessità di un allungamento forzato, sotto narcotici, utilizzando una forza improvvisa ed intensa e applicando poi un apparecchio di gesso mentre l’arto veniva mantenuto in estensione. L’applicazione della forza poteva essere ripetuta tutte le volte che si riteneva necessario.

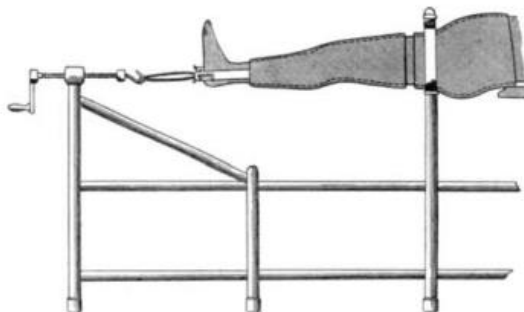


Fig. 11 metodo di distrazione ideato da Codivilla

Nel 1921 un’ulteriore innovazione fu proposta da Vittorio Putti [39], protetto di Codivilla, con il suo “*osteon*”. Quest’ultimo era costituito da un tubo interno e da dei tubi esterni scorrevoli, ognuno con un chiodo, collegato al tubo interno da un manicotto/morsetto. All’interno del tubo si trovava una pesante molla compressa da una vite. La distrazione graduale e continua veniva effettuata allentando la vite. Le calibrature sul lato del tubo

consentivano di monitorare il grado di forza e l'entità della distrazione. Attraverso questo fissatore esterno Putti tentò di superare la resistenza dei tessuti molli all'allungamento, problematica già evidenziata da Codivilla. [40] L'allungamento in acuto, tuttavia, si è rilevato non utilizzabile nella pratica clinica poiché legato a numerose complicanze come la mancata guarigione ossea, danni vascolari e nervosi e forti dolori per il paziente.

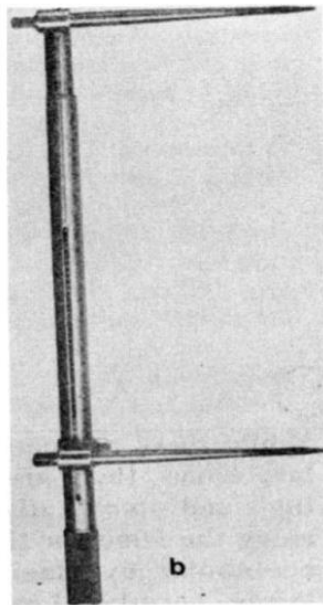


Fig. 12 Osteon di Putti

Nel 1939 Abbott e Saunders [41] descrissero il proprio metodo di allungamento utilizzando un fissatore esterno semicircolare a letto. Le complicanze associate evidenziate corrispondono a quelle che si possono presentare tutt'oggi.

Henz Wagner [42] successivamente introdusse un proprio fissatore esterno formato da un tubo telescopico a sezione quadrata, collegato a viti di Schanz (da due a tre) inserite in parallelo, fissate con un morsetto che poteva ruotare sia parallelamente, sia perpendicolarmente al fissatore. Egli combinò l'uso del fissatore con un approccio chirurgico aggressivo, associato a resezione importante dei tessuti molli, con un'incisione circonferenziale del periostio nel sito dell'osteotomia e una distrazione intraoperatoria acuta. [43]

Notando un alto tasso di complicanze e di interventi di revisioni associati alla tecnica di Wagner, durante gli anni '70, De Bastiani [44] [45] sviluppò il "*fissatore esterno dinamico assiale*". Questo fissatore era composto da quattro pin, disposti in gruppi di due, ai due estremi della frattura/osteotomia, che erano collegati l'uno all'altro da un'asta tubolare

telescopica di grande diametro. Il vantaggio di questi fissatori, oltre ad essere meglio tollerati dal paziente, era rappresentato dal fatto che consentivano micromovimenti e un carico assiale durante la deambulazione, migliorando così la guarigione.

Tuttavia, è a A. G. Ilizarov che è attribuito il merito dell'applicazione clinica dell'osteogenesi in distrazione. Inizialmente il suo metodo non ebbe molto risalto in URSS, fino a quando venne utilizzato per il trattamento della pseudoartrosi infetta di gamba di Valeri Brumel, saltatore in alto sovietico medaglia d'oro alle olimpiadi del 1964 [46]. Fu così che con il tempo Ilizarov ricevette molta notorietà all'interno dell'Unione Sovietica, trattando personaggi illustri come, ad esempio, il famoso compositore Shotakovich. Il suo metodo arrivò al mondo occidentale grazie all'italiano Carlo Mauri, famoso fotoreporter, alpinista ed esploratore italiano di Lecco, il quale nel febbraio 1961 riportò una frattura esposta di tibia con esito in pseudoartrosi infetta. Nel marzo del 1980 Mauri andò a Kurgan e fu operato dal professor Ilizarov il 4 aprile 1980 con la correzione della deformità e dell'ipometria. Tornato in Italia Carlo Mauri condivise la sua esperienza con il Dr. Angelo Villa il quale, nel novembre del 1980, organizzò la visita di Mauri con i chirurghi ortopedici dell'Ospedale di Lecco ed il Prof. Bianchi-Maiocchi di Milano, presidente di AO Italia all'epoca. Quest'ultimo insieme al professor Roberto Cattaneo invitarono il professor Ilizarov come oratore, ospite alla ventiduesima Conferenza AO Italia che si tenne a Bellagio dal 12 al 14 giugno 1981; questa fu la prima visita di Ilizarov in occidente.

Un'ulteriore innovazione ci fu quando nel 1994 J. Charles e Harold S. Taylor modificarono l'apparato di Ilizarov collegando sei aste telescopiche (chiamate *struts*), libere di ruotare nei loro punti di connessione, a due anelli, uno prossimale e uno distale. Questo fissatore esterno è costituito da un unico montaggio con due anelli e sei struts che possono correggere tutti gli aspetti di una deformità sui sei piani simultaneamente senza dover modificare il montaggio ogni volta, come invece era necessario con il classico apparato di Ilizarov. Attraverso specifici software, è possibile gestire le modifiche durante il corso della correzione in base ai parametri della deformità. [5]

3.1. BIOLOGIADELL'OSTEOGENESI IN DISTRAZIONE

Ilizarov ha affermato che la forma e le dimensioni dell'osso sono influenzate dalla quantità di carico applicato sull'osso e dall'apporto di sangue. Se accompagnato da un

corrispondente aumento dell'afflusso di sangue, un aumento del carico sull'osso porterebbe ad un aumento delle dimensioni ossee. Recenti indagini molecolari indicano che la cascata di fattori di crescita probabilmente svolge un ruolo importante nella distrazione. Danis [47] ha ipotizzato che l'osteogenesi in distrazione delle ossa lunghe si basi su due fattori locali:

- *lo stretching meccanico*, che moltiplica la popolazione fibroblastica di cellule mesenchimali indifferenziate;
- *l'ipossia*, dovuta all'allungamento dei vasi e alla compattazione cellulare, che induce il metabolismo delle proteine dello stress osteogenico. [1]

L'osteogenesi in distrazione può essere divisa in tre fasi:

1. *Fase di latenza*: è la fase di reclutamento di cellule infiammatorie e delle cellule staminali mesenchimali (*MSCs*), che a seguito della corticotomia si organizzano formando l'ematoma. Dura dai 5-10 giorni in media, varia in base alle caratteristiche dell'individuo come l'età o altri fattori sistemici. [48]
2. *Fase di distrazione*: inizia al termine del periodo di latenza con una progressiva distrazione dei monconi ossei effettuata a determinati velocità e ritmo. Si inizia a circa 1.0 mm/giorno con un ritmo di circa 0.25 mm ogni 6 ore, fino alla lunghezza o alla correzione desiderata. Se ci fosse una riduzione della velocità (sotto 0.5 mm/giorno) si creerebbe una consolidazione prematura, così come un aumento maggiore di 2 mm/giorno potrebbe portare a un afflusso ematico non sufficiente, con inadeguato scambio di nutrienti e quindi inadeguata rigenerazione e formazione di nuovo osso.[2]
3. *Fase di consolidamento*: in questa ultima fase la distrazione viene interrotta per permettere all'osso neoformato di consolidare. Richiede generalmente un mese per ogni centimetro allungato fino a che l'osso non è sufficientemente maturo e resistente da poter rimuovere il fissatore esterno.

La formazione delle corticali ossee è il miglior indicatore radiologico della forza di unione ossea [9] e la consolidazione viene generalmente definita come la presenza di almeno tre di quattro corticali.

Gli eventi molecolari e istologici alla base dell'OD condividono molte caratteristiche con la normale guarigione del gap di frattura, in particolare nel periodo di latenza, ma con velocità di formazione di nuovo osso doppia.

Nell'OD si verificano infatti tre tipi differenti di modalità di ossificazione. Nella fase iniziale della distrazione la formazione ossea può essere di tipo *endocondrale*, cioè che parte da un abbozzo cartilagineo, come nella guarigione delle fratture. Tuttavia, il meccanismo predominante di ossificazione è quello di tipo *intramembranoso*, mentre nelle fasi successive è stato proposto un meccanismo di formazione ossea *trascondroide* [50], definito come formazione di tessuto intermedio tra osso e cartilagine, formato da cellule simili a condrociti e con transizione da tessuto fibroso a osso, che si verifica gradualmente senza invasione capillare.

Fattori importanti che intercorrono nell'adeguata ossificazione sono sicuramente la stabilità della fissazione, velocità e ritmo di distrazione e la vascolarizzazione dei tessuti circostanti. Nonostante il meccanismo alla base dell'osteogenesi in distrazione sia ancora dibattuto, si è visto che è possibile individuare specifiche zone.

Durante il periodo di distrazione si osservano alla radiografia tre zone distinte: una zona radiotrasparente centrale (*interzona*), una zona di maggiore densità ossea (*zona di sclerosi*) e una zona a bassa densità (*zona di rimodellamento*) [51].

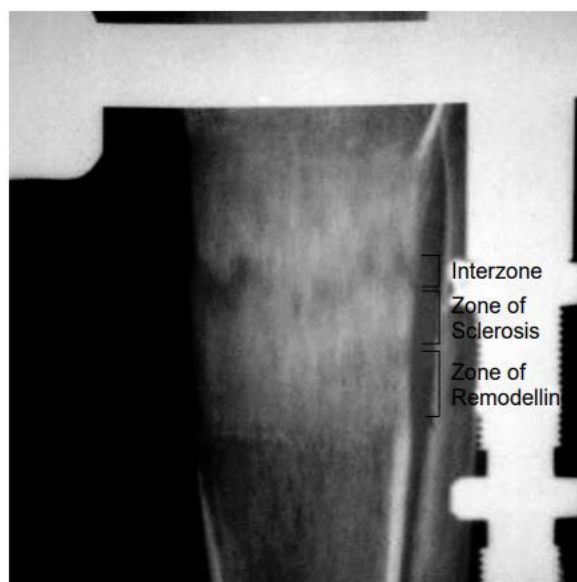


Fig.13 Interzona, zona di sclerosi e zona di rimodellamento distinguibili durante il periodo di distrazione

La zona centrale, chiamata interzona fibrosa (FIZ), composta da collagene di tipo I e zone adiacenti di crescita vascolare, dove gli osteoblasti proliferano e si differenziano depositando l'osteoidi lungo i fasci di collagene. Le cellule nell'interzona mostrano alti livelli di fosfatasi alcalina, acido piruvico, acido lattico ed enzimi per l'ossidazione. I seni vascolari neoformati (150-250 micron di diametro) sembrano essere i siti da cui è iniziata la formazione ossea all'interno del gap di distrazione. All'aumentare del gap di distrazione, le colonne longitudinali di osso cristallizzano longitudinalmente lungo i fasci di collagene orientati, aumentano in lunghezza e diametro, mentre la FIZ rimane lunga circa 4 mm.

Istologicamente, le colonne ossee, chiamate *zona di formazione di microcolonne* (MCF) da Aronson et al.[52] assomigliano a stalagmiti e stalattiti proiettate dalla superficie corticotomica verso il centro. Questi coni raggiungono diametri massimi di 150-200 micron in corrispondenza delle superfici della corticotomia. Quando la distrazione viene interrotta, inizia la consolidazione. Le colonne ossee si rimodellano rapidamente macro e microscopicamente. L'aumento della formazione e del rimodellamento osseo sembra derivare soprattutto dall'aumento del reclutamento e dall'attivazione delle cellule che formano e riassorbono l'osso. La più alta densità di cellule proliferanti si osserva nella zona tra FIZ e MCF; Aronson et al. [52] chiamarono questa *zona di transizione matrice primaria o fronte di mineralizzazione* (PMF).

Pertanto, dagli studi effettuati su cani adulti da Aronson et al., il tempo di latenza in OD appare non differente dalla formazione ossea che avviene in seguito a frattura. L'ematoma e gli infiltrati delle cellule infiammatorie riempiono la lacuna nel sito della corticotomia. Dopo l'inizio della distrazione, le cellule mesenchimali iniziano ad organizzare un ponte di collagene e sinusoidi vascolari immaturi. Col procedere della distrazione, il ponte fibrovascolare sembra organizzarsi parallelamente alla direzione della distrazione stessa. La rete di collagene diventa più densa e meno vascolare, quasi simile al tendine, mentre i canali vascolari rimangono ai bordi prossimali e distali, sulle superfici dei segmenti corticotomici.

Durante la prima settimana di distrazione, la FIZ, zona centrale di tessuto fibroso ipovascolare colma l'intero gap di 6-7 mm. I fibroblasti formano un fuso intercalandosi tra i fasci di collagene senza che siano presente né osteoidi né osteoblasti. Durante la

seconda settimana di distrazione, appaiono cluster di cellule simili a osteoblasti vicino a sinusoidi vascolari su entrambi i lati della FIZ.

Alla fine della seconda settimana, l'osteoido inizia a mineralizzarsi. Queste spicole ossee precoci potrebbero essere descritte come PMF (*primary matrix o mineralitation front*).

A partire dalla terza settimana, questo processo continua con FIZ al centro di spessore medio da 4 a 8 mm. Con l'aumento del divario di distrazione si allungano nuove spicole ossee di diametro di circa 7-10 micron, fino a un massimo di 150 micron, che si connettono longitudinalmente con fibre di collagene. Ciascuna microcolonna di nuovo osso viene circondata da grandi sinusoidi a parete sottile, le colonne sono prive di canali di Haversiani, senza cartilagine o osteoclasti. Queste regioni su entrambi i lati della FIZ possono essere descritte come zone di MCF.

Al termine della distrazione, la FIZ si è ossificata e si crea una zona di MCF, così da colmare completamente il divario. Alcune isole di cartilagine si formano centralmente in aree distanti più di 300 micron dai vasi locali.

Questa formazione di cartilagine è raramente osservata se la distrazione è eseguita al ritmo adeguato e la fissazione dell'osso rimane stabile. L'interposizione di cartilagine è riscontrata in siti con ritardo del ponte osseo, di solito quando la biologia locale è stata traumatizzata dall'instabilità della fissazione.

In questo modello sperimentale, il fissatore è stato rimosso sei settimane dopo il periodo di distrazione di quattro settimane. Durante questo periodo di consolidamento di sei settimane, i cani hanno solitamente ripreso a sopportare il peso.

Durante le sei settimane successive alla rimozione del fissatore, l'area osteogenica si è rimodellata in corteccia e canale midollare e le colonne ossee hanno assunto le caratteristiche di colorazione dell'osso lamellare maturo. Il tessuto fibrovascolare che riempiva gli spazi intorno alle colonne ossee è stato sostituito da elementi midollari di aspetto normale, con presente un normale rimodellamento osteoclastico.[2]

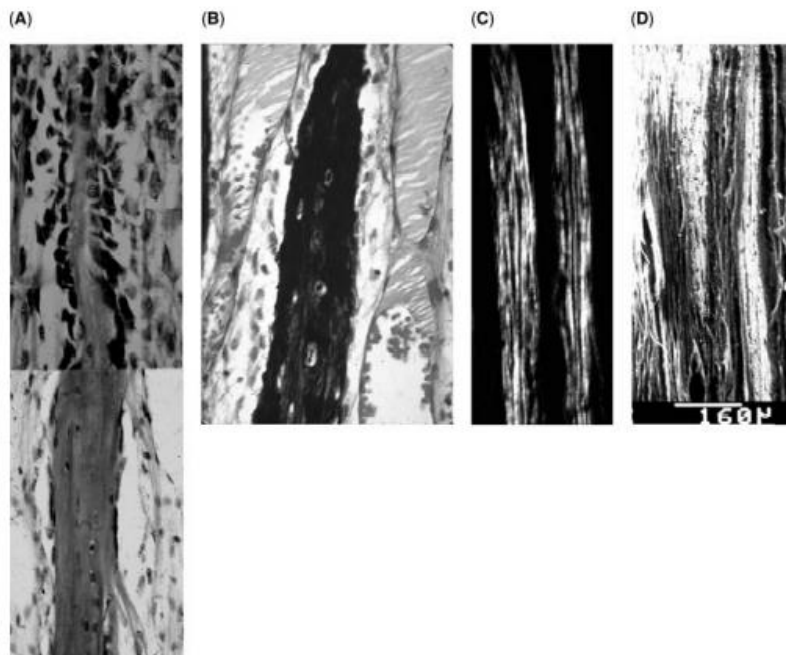


Fig. 14 Preparati istologici che mostrano come il collagene si incorpori in ogni trabecola ossea durante la transizione da FIZ a PMF (A) formazione delle microcolonne. (B) ogni microcolonna è circondata da sinusoidi vascolari. (C) immagine al microscopio che mostra l'incorporazione uniforme di collagene nelle microcolonne, parallelamente alla forza di distrazione (D) immagine al microscopio elettronico di colonne di mineralizzazione di nuovo osseo circondate da collagene e vasi.

3.2. DIFFERENTI TIPI DI IMPIANTI

Un impianto di fissazione esterna è composto da:

- Segmento scheletrico stabilizzato
- Apparato esterno stabilizzante (fissatore)
- Elementi di presa o di raccordo fra monconi ossei e struttura esoscheletrica (fili, half-pin)

Nell'allungamento degli arti vengono applicati impianti dove la componente stabilizzante è data da un chiodo oppure da un fissatore esterno monoassiale o circolare. Esistono molti tipi diversi di fissatori esterni, da sistemi più semplici fino ai più complessi come gli esapodalici. Sono divisibili secondo tipologia in FE:

- Lineari (monolaterali o bilaterali)
- Tridimensionali (settoriale, semicircolare, circolare, ibrido)

3.2.1 FISSATORI ESTERNI MONOASSIALI

I *fiissatori esterni monoassiali (FEM o FEA)* o unilaterali sono formati da un elemento di congiunzione, formato da una o più barre collegate tra loro, solidarizzato all'osso tramite viti di diametro solitamente maggiore di 3 mm. Vengono solitamente utilizzati sistemi detti "a *slitta*", sistemi di sintesi elastica che permettono quindi micromovimenti dei monconi dell'osteotomia durante il carico.

Tutti i FEM meccanicamente si comportano come un *sistema a mensola*, in modo tale che gli elementi di presa sono sollecitati dall'esterno del moncone osseo e bloccati a livello dell'elemento di stabilizzazione grazie a un morsetto che funge da fulcro. Questo porta a una distribuzione asimmetrica delle forze e quindi una deviazione angolare dei monconi ossei in risposta al carico. Tutto ciò comporta che, applicando ad esempio lateralmente a livello femorale un FEM, ci sarà una deviazione in varo, mentre se applicato medialmente alla tibia questa sarà in valgo.

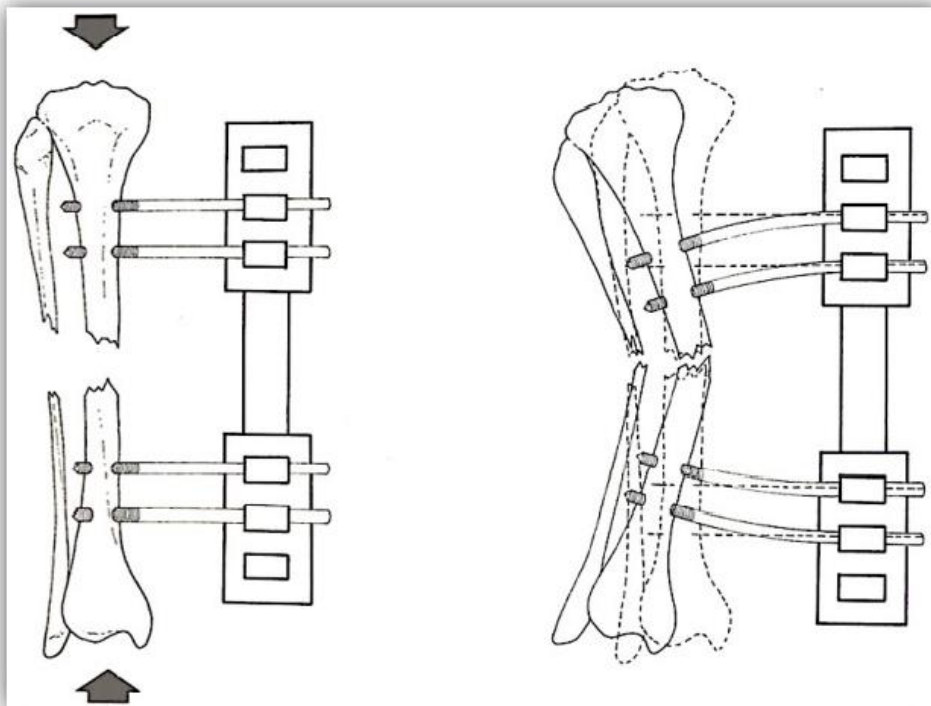


Fig. 15 Deviazione in valgo in seguito ad applicazione di FEM medialmente a livello tibiale

La stabilità del FEM, cioè la capacità di mantenere nel tempo un disegno geometrico definito, è data: dal diametro delle fiches, dalla distribuzione, distanza e quantità delle

fiches, dal collegamento degli elementi di presa alle barre di collegamento e dalla distanza delle barre di collegamento all'osso.

La rigidità del montaggio, quindi la conservazione inalterabile della situazione spaziale di partenza, è direttamente proporzionale al numero degli elementi di presa.

Per posizionare gli half-pin si cerca di massimizzare la distanza tra gli elementi di presa su ciascun moncone, con una vite il più vicino possibile alla soluzione di continuità dell'osso ed una più distante possibile. Aggiungendo un ulteriore elemento di presa fuori dal piano degli altri si può incrementare la stabilità.

Nella pratica si inseriscono 3-4 viti o fili per stabilizzare, solitamente 2-3 viti per ogni morsetto inserito.

Anche la distanza delle barre di collegamento all'osso influisce sulla stabilità e dovrebbe essere il più possibile vicina allo scheletro. La stabilità della barra, come quella della vite è direttamente proporzionale alla terza potenza del suo raggio e la stabilità aumenta se presenti più barre posizionate su piani diversi dello spazio.[53]

3.2.2 FISSATORI ESTERNI CIRCOLARI

Il *fissatore esterno circolare (FEC)* è costituito da barre di collegamento che circondano completamente l'arto. È formato da anelli, che possono essere completi o parziali (aperti), composti da archi e da snodi. Gli anelli completi conferiscono certamente più stabilità all'impianto; tuttavia, potrebbero impedire il movimento e l'escursione articolare in determinate posizioni, come a livello prossimale di tibia e femore, portando così ad optare per anelli parziali. Anche nel caso di ferite post traumatiche potrebbero essere più utili anelli aperti.

La stabilità è influenzata anche da altre proprietà dell'anello come il diametro: quelli più grandi sono meno stabili e diminuendo il diametro di 2cm c'è effettivamente un aumento della stabilità del 70%. [54]

L'osso dovrebbe essere centrato rispetto l'anello (anche se questo non influisce sulla stabilità) e quest'ultimo idealmente andrebbe posizionato a 2 cm dalla cute, lasciando solamente spazio sufficiente in caso di edema.

Essenziale per la stabilità è il *ring block*, cioè la porzione di montaggio collegata ad un segmento osseo (determinato da ogni interruzione della continuità).

La stabilità del ring block è maggiore più alto è il numero di anelli, di connessioni tra gli anelli e di punti di presa sull'osso.

Nella pratica si utilizzano due anelli per ogni segmento scheletrico, che vengono fissati con due elementi di presa ciascuno e uniti da almeno quattro aste di connessione. I ring block possono essere formati anche da un solo anello con 3-4 punti di fissaggio all'osso.

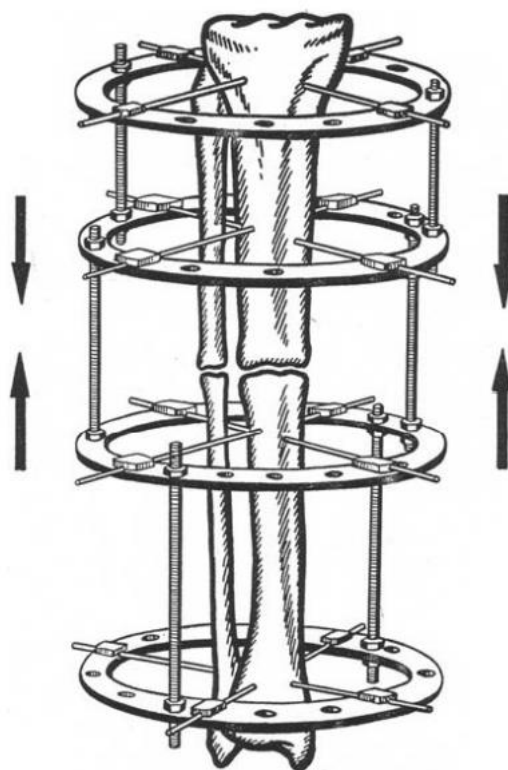


Fig.16 Fissatore formato da due ring block ognuno formato da due anelli con due punti di fissazione tramite fili.

Sebbene l'immagine mostri solo due aste di connessione, per un'adeguata stabilità ne sono necessarie quattro.

Per quanto riguarda la scelta degli elementi di presa, tra fili e half-pin in passato si utilizzavano o gli uni o gli altri ma attualmente è sempre maggiore l'utilizzo di montaggi ibridi con entrambi. Tuttavia, a volte nei bambini si usano principalmente fili, evitando half-pins ad esempio in pseudoartrosi di tibia, poiché non capaci del rimodellamento necessario intorno ai fori degli half-pins più grandi. I fili sono effettivamente più utili in metafisi, possono essere rimossi facilmente e aiutano a stabilizzare e orientare

correttamente, mentre gli half-pin sono più utili in diafisi, in particolare in femore e omero, senza attraversare compartimenti muscolari.[2]



Fig. 17 Esempio di fissatore esterno circolare che utilizza come mezzo di presa sia fili che viti[55]

Uno degli apparecchi più innovativi è il fissatore esterno esapodalico per il riposizionamento tridimensionale basato su supporti esterni circolari e semicircolari fissati ai segmenti ossei mediante fili e viti, interconnessi tramite sei aste telescopiche micrometriche (*struts*) controllati da un software. La posizione può essere regolata in acuto o gradualmente con incrementi micrometrici, con regolazioni estremamente precise. [56]

3.2.3 CHIODO

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati dispositivi interni di allungamento osseo, come Albizzia/Guichet (Medinov-AMP, Roanne, Francia)[57], Fitbone (Wittenstein, Igersheim, Germania) [58] e Intramedullar Skeletal Kinetic Distractor (ISKD) (Orthofix, Inc, Lewisville, TX, USA)[59], per ovviare alla necessità di fissatori esterni. Si tratta di

chiodi telescopici che vengono inseriti nel canale intramidollare delle ossa lunghe dopo l'osteotomia. Tramite chiodi distali e prossimali fissati ai rispettivi segmenti ossei, la distrazione del chiodo determina l'allungamento dell'osso. Sono stati impiegati diversi meccanismi di funzionamento.

Tuttavia, i precedenti progetti per dispositivi di allungamento interno mancavano di un meccanismo affidabile per il monitoraggio e il controllo della distrazione. Diversi autori hanno riportato una distrazione incoerente di questi dispositivi, che ha portato a nonunion, lesioni nervose, rotture del chiodo, contratture articolari e altre gravi complicanze.

Per questo è stato approvato l'utilizzo del chiodo PRECICE (Ellipse Technologies, Inc, Irvine, CA, USA) che permette la graduale distrazione dell'osso con il vantaggio, rispetto al fissatore esterno, dato dall'assenza di ingombro, dal basso rischio di frattura del rigenerato osseo, dal basso rischio di deviazioni assiali nei lunghi allungamenti. Esso permette di poter allungare dai 5 agli 8 cm e non richiede manipolazioni angolari dell'arto, facendo uso di un sistema magnetico e di un controllo remoto. L'architettura interna di questo chiodo comprende un generico magnete collegato a una scatola di ingranaggi e a un gruppo di alberi a vite. L'allungamento del chiodo avviene in seguito all'interazione del magnete interno con i due magneti rotanti dell'unità di controllo esterna, che può essere programmata su misura per regolare la velocità di distrazione. [60]

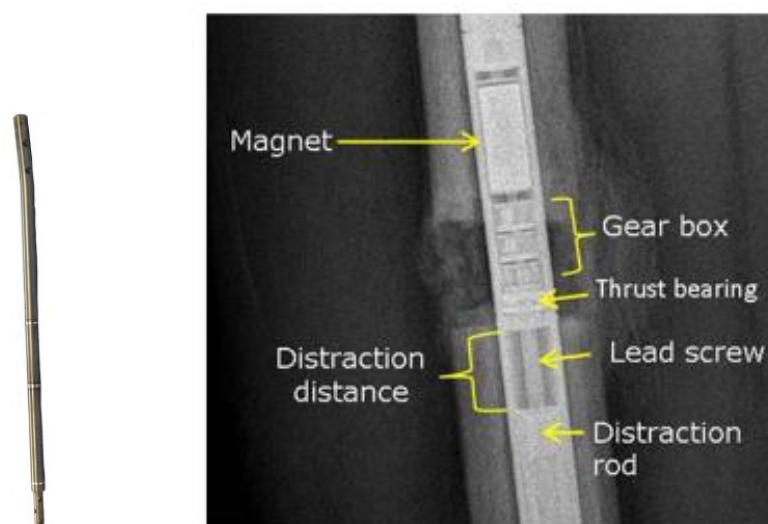


Fig. 18 chiodo PRECICE

3.3. INDICAZIONI TERAPEUTICHE

L'osteogenesi in distrazione è ampiamente utilizzata per trattare eterometrie, deformità, nonunion, osteomielite e perdita ossea. Si è visto che la maggior parte delle condizioni difficili può essere risolta con questo metodo.[61]

In particolare, si è dimostrata efficace per il trattamento delle nonunion accompagnate da perdita ossea e delle pseudoartrosi infette.

Il metodo Ilizarov offre infatti, una soluzione simultanea per diversi problemi legati alla non unione, instabilità, infezione, deformità, perdita ossea, contrattura articolare, eterometrie e difetti cutanei. Inoltre, l'osteogenesi in distrazione è sicura, utile ed efficiente per il trattamento della perdita ossea anche dopo l'asportazione di un tumore. Conservazione e ricostruzione dell'articolazione attraverso l'osteogenesi in distrazione è l'intervento chirurgico più conservativo per il salvataggio degli arti attualmente disponibile. Inoltre, l'osteogenesi in distrazione fornisce una rigenerazione naturale dell'arto.

Il principale vantaggio è quello di poter ottenere la rigenerazione di osso con la stessa forza e larghezza dell'osso nativo. Anche i nervi periferici, i vasi, i muscoli, i tendini, i legamenti e la pelle si allungano gradualmente in proporzione all'allungamento dell'osso. [35]

3.4. ALLUNGAMENTO SEMPLICE E TECNICA DEL TRASPORTO OSSEO

La fase principale del processo di allungamento degli arti è il periodo di distrazione. In effetti, la distrazione rigenera le forme durante l'allungamento dell'arto. Il successivo periodo di riabilitazione dipende in larga misura dal modo in cui è stata eseguita la distrazione e se le condizioni supportano la formazione di nuovo osso. I fattori determinanti della distrazione sono la velocità e il ritmo. Il regime di distrazione comunemente accettato è di 1mm al giorno, intervallato da 4-6 fasi giornaliere.

Tuttavia, esistono dispositivi manuali che consentono un allungamento più rapido così come fissatori esterni automatici che possono potenzialmente aumentare il ritmo di distrazione di dieci volte. La distrazione in una sola fase (ad esempio una distrazione di 1 mm al giorno in una sola fase) determina una diminuzione dell'attività osteogenetica. La presenza di emorragie vecchie e nuove suggerisce che il regime di distrazione è stato traumatico.

Il costante danneggiamento della struttura rigenerata durante il periodo di distrazione impedisce il ripristino della microcircolazione e la differenziazione delle cellule osteoblastiche.

L'ipossia porta alla proliferazione dei fibroblasti e a un'intensa fibrillogenesi, che a sua volta prolungherà la durata della fissazione esterna dell'arto a 90-150 giorni.

L'approccio classico all'allungamento dell'arto, in cui la velocità di distrazione è di 1,0 mm/giorno in quattro fasi da 0,25 mm, determina una rigenerazione più attiva.

Alla fine del periodo di allungamento, il diametro rigenerato è uguale o superiore al diametro dei bordi del frammento osseo. I compartimenti ossei del rigenerato sono costituiti da osso spugnoso di origine endoperiostale e periostale. La zona di crescita del rigenerato, che è 7-8 mm, è attraversata da ombre trabecolari e i suoi elementi cellulari prevalenti sono i fibroblasti e i preosteoblasti a bassa differenziazione.

Il periodo di distrazione classico è di 30-70 giorni. Quando una tibia viene allungata di 1,0 mm con il regime di distrazione automatico ad alta frequenza, con distrazione uniforme dei frammenti ossei in 60 fasi (0,017 mm alla volta), la rigenerazione riparativa è più intensa.

Al 28° giorno di distrazione, la rigenerazione supera il diametro dei frammenti ossei. La diastasi è quasi completamente riempita con tessuto osseo spugnoso. Il tessuto connettivo intermedio ha un'altezza di 5 mm ed è costituito da sottili e sporadici fili di collagene, osteoblasti, cellule poco differenziate e fibroblasti. [1] È attraversato da un sistema trabecolare che forma i ponti ossei. In alcune aree, gli apici delle trabecole ossee, che si formano bilateralmente dall'intercalare, si sovrappongono l'uno all'altro, somigliando a una giunzione a cerniera. Durante il periodo di fissazione, il rigenerato di solito perde la sua struttura zonale entro il quindicesimo giorno. Dopo un mese, essendo formata la diastasi, ha la struttura di un osso spugnoso. La durata della fissazione dopo distrazione automatica ad alta frequenza è di 15-30 giorni in condizioni sperimentali, mentre la durata dell'osteogenesi è di soli 48-68 giorni. L'osteogenesi attiva e la rapida riorganizzazione del tessuto rigenerato in osso organizzato nella distrazione ad alta frequenza sono promosse dalle microtensioni ritmiche, che stimolano la genesi dei capillari e quindi forniscono un elevato livello di ossigenazione. Questo, a sua volta, provoca la differenziazione dello scheletro in tessuto osseo. [1]

3.4.1 TECNICA DEL TRASPORTO OSSEO

Il trattamento standard di allungamento osseo (BL) applica direttamente una distrazione graduale ai frammenti ossei risultanti da una singola osteotomia fino al raggiungimento dell'allungamento clinicamente richiesto.

Il trasporto osseo (BT) è un altro approccio ricostruttivo basato sull'OD per gestire specifiche malattie ortopediche, come mancate consolidazioni o difetti ossei, in particolare infezioni [62]. Questa tecnica, anche detta tecnica dell'*ascensore*, si basa sul trasporto progressivo di un segmento osseo, normalmente osteotomizzato dall'osso originario, verso il frammento osseo infetto/malato, che generalmente viene asportato in sede chirurgica.[63]

In questo processo vengono generati due focolai ossei principali su entrambi i lati del segmento trasportabile. La principale differenza tra BT e BL è la conservazione della lunghezza originaria dell'arto, evitando potenziali problemi derivati dall'allungamento dei tessuti molli circostanti. Uno dei maggiori limiti di questi processi di rigenerazione ossea è il tempo necessario per la fase di consolidamento, che si prolunga fino a quando il tessuto rigenerato è ossificato e stabilizzato abbastanza da smontare la fissazione corrispondente. Per prevenire una rimozione prematura, il monitoraggio deve essere quotidiano.[64]

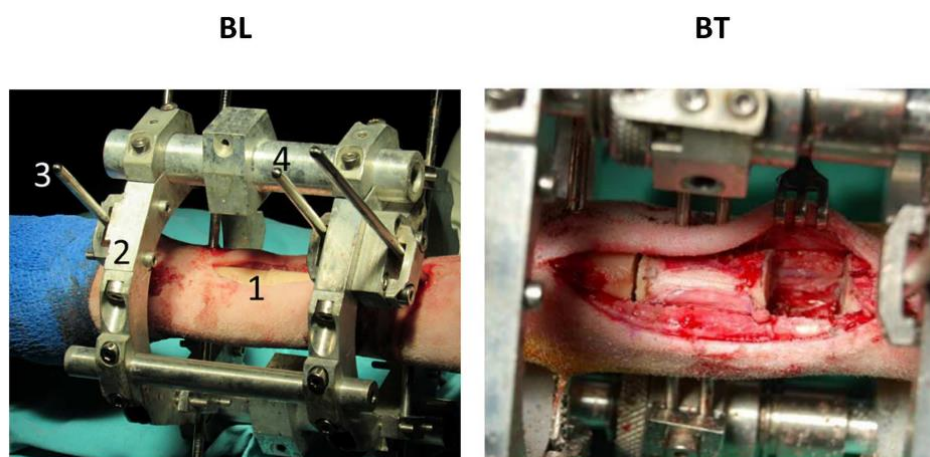


Fig.19 metatarso destro di una pecora dopo osteotomia sottoposto ad allungamento osseo classico (BL) a sinistra e a trasporto osseo (BT) a destra.

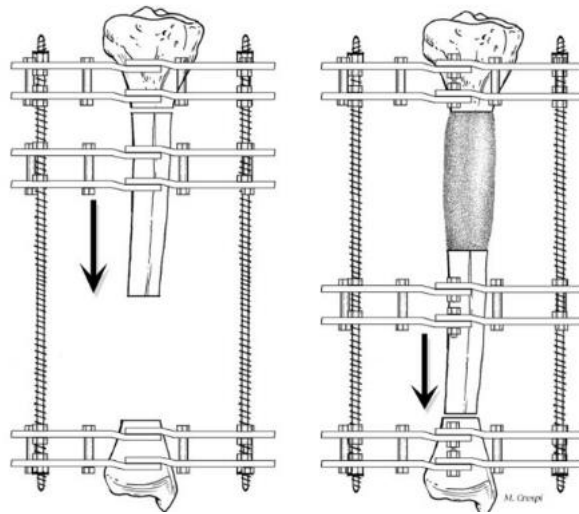


Fig.20 Tecnica del trasporto osseo (BT)

3.5 COMPLICANZE

Oltre che dividere le complicanze in locali o sistemiche e in intraoperatori, precoci o tardive, bisogna aggiungere un gruppo di complicanze relative al periodo di distrazione e un altro per il periodo di fissazione.

Come proposto da Paley, [65] differenziamo tra complicanze vere, problemi ed ostacoli in quanto un *problema* è definito come una potenziale difficoltà che emerge durante la distrazione o la fissazione e che si risolve con la fine del trattamento in maniera non operativa. Un *ostacolo* dell'allungamento è invece una potenziale difficoltà che emerge durante il periodo di distrazione o fissazione e che si risolve completamente con la fine del trattamento con mezzi operativi. Qualsiasi *complicanza* è una difficoltà locale o sistemica, intraoperatoria o perioperatoria, durante la distrazione o la fissazione, che rimane irrisolta alla fine del periodo di trattamento. Le complicanze vere sono divisibili in quelle che non interferiscono con l'outcome del trattamento e quelle che invece lo condizionano. Le *minori* sono problemi che non lasciano un residuo significativo, che possono infastidire però il paziente o ritardare il trattamento o la riabilitazione; mentre le complicanze *maggiori* sono il problema più serio incontro al quale si può andare nel corso del trattamento, le più significative sono permanenti e interferiscono con l'obiettivo del trattamento.

- **Contratture muscolari:** sono solitamente il risultato della tensione sul muscolo durante la distrazione, compaiono quando la lunghezza del muscolo rispetto a quella dell'osso risulta minore. Per evitare le contratture bisogna mettere il muscolo in tensione per più ore possibili: si è visto che stretching non previene la comparsa di contratture se non vengono eseguiti esercizi per almeno sei ore al giorno. Per mantenere la tensione muscolare inoltre, sono state sviluppate ortesi per l'estensione del ginocchio da indossare di notte quando si ha più tendenza a flettere il ginocchio e ortesi per la dorsiflessione della caviglia, da indossare sia di giorno che di notte per mantenere l'articolazione a 90°. Chiamiamo quindi problema la contrattura che va risolta in maniera non operativa, ostacolo che si risolve prima della fine del trattamento in maniera operativa e se rimane alla fine del trattamento è una complicanza.
- **Lussazione articolare:** si potrebbe andare incontro nel corso dell'allungamento a sublussazioni e dislocazioni di un'articolazione adiacente. Il fattore predisponente principale è una preesistente instabilità articolare, di solito data da cause congenite; per questo è essenziale evitare lo sviluppo di una contrattura muscolare che si manifesta con una trazione muscolare sbilanciata sull'articolazione. Possono essere trattate con fisioterapia che funziona per i casi intermedi, oppure tramite trazione. Se non ha residui permanenti è considerata un problema, è un ostacolo se per la risoluzione richiede un trattamento operativo come l'estensione dei tessuti intorno al ginocchio; qualsiasi sublussazione che rimane irrisolta dopo aver rimosso il fissatore di Ilizarov è una complicanza, maggiore se necessita di trattamento operativo.
- **Deviazioni dell'asse:** durante l'allungamento c'è la tendenza a una graduale deviazione; ciò può essere a causa di una differenza di forza muscolare tra i due lati dell'osso. Osteotomie al femore prossimale tendono ad evolvere in varo e procurvato, quelle al femore distale in valgo e procurvato, se l'osteotomia è sulla tibia prossimale tende al varo procurvato. Un'altra causa di queste deviazioni assiale è l'instabilità. Il miglior trattamento è la prevenzione: i perni dovrebbero avere un'inclinazione di 5°-10° verso la direzione opposta della deviazione aspettata. Anche le deviazioni possono rappresentare un problema, un ostacolo o

una complicanza che è minore se l'angolo di deviazione è minore di 5° e maggiore se più ampio.

- **Lesioni neurologiche:** la lesione del nervo dovrebbe essere associata alla tecnica chirurgica o alla distrazione. La prevenzione si basa su un'attenta analisi dell'anatomia per posizionare i perni in regioni sicure, lontano dai nervi. Quando si posiziona un filo transfisso nell'osso bisogna minimizzare la lesione ai tessuti molli intorno all'osso. I primi sintomi sono iperestesie e dolore, che può essere riflesso (ad esempio alla regione dorsale della caviglia), seguiti da ipoestesie e poi riduzione della forza muscolare fino alla paralisi. Il trattamento si basa principalmente sull'aumento della fisioterapia. Attualmente una lesione dei nervi intraoperatoria viene considerata una complicanza, così come se rimane una disfunzione residua alla fine del trattamento, mentre disfunzioni nervose che si recuperano durante il trattamento sono solamente un problema o un ostacolo.
- **Lesioni vascolari:** possono essere associate alla chirurgia o alla distrazione. Il danno a un'arteria o a una vena se visualizzato durante l'intervento chirurgico il filo dovrebbe essere rimosso e il sanguinamento tamponato. Inoltre, il danno vascolare può essere dato anche dall'osteotomia creata e come in ogni procedura ortopedica il rischio di trombosi venosa profonda è sempre possibile. Sulle arterie invece una manifestazione della distrazione è l'ipertensione che, a differenza delle altre lesioni vascolari, vere complicanze, rappresenta un problema.
- **Rifratture:** avvengono dopo la rimozione del fissatore e sono sempre una vera complicanze. Possono essere minori se si perde meno di 1 cm di lunghezza o meno di 5° di angolazione, se di più sono considerate maggiori.
- **Rigidità articolare:** è una complicanza tardiva, dovuta a persistenti contratture muscolari o data da rigidità articolare per l'aumento di pressione sulla superficie articolare durante l'allungamento.
- **Problemi del sito dei perni:** sono problemi cutanei e dei tessuti molli. Possono essere trattati con antibiotici o antisettici e partendo da un'infezione dei tessuti molli (grado 1) possono evolvere in infezione di questi (grado 2), fino a un'infezione dell'osso (grado 3).
- **Consolidazione prematura:** è il problema più comunemente diagnosticato come un fallimento dell'osteotomia. La formazione di un ponte osseo improvvisa è

dolorosa. Se viene trattata non operativamente è considerata come problema altrimenti un ostacolo e complicanza solo se comporta un'interruzione prematura dell'allungamento.

- **Ritardi di consolidazioni:** potrebbero essere causati da fattori tecnici come corticotomia traumatica, instabilità, diastasi iniziale e distrazione troppo rapida o fattori dipendenti dal paziente come infezioni, malnutrizioni e fattori metabolici. Da problema diventa ostacolo se necessita di aggiungere altri perni e una complicanza quando si ha bisogno di un innesto osseo.
- **Dolore:** il dolore postoperatorio è abbastanza intenso nei primi giorni, il dolore dato dalla contrazione dei muscoli transfissi dai perni si risolve in una o due settimane e certamente aumenta con l'aumentare dell'osteotomie. Durante la distrazione è frequente un dolore sordo cronico a volte solamente durante la fisioterapia, di notte o mentre si cammina. Si tratta con paracetamolo e codeina, da evitare invece l'ossicodone per rischio di dipendenza.
- **Altri:** comuni sintomi sono perdita di appetito e di peso che si risolvono con la fine del periodo di distrazione, mentre la depressione durante l'allungamento di solito si risolve spontaneamente una settimana dopo la fine della distrazione.

4. STUDIO CLINICO

4.1. INTRODUZIONE

Per eterometria o dismetria degli arti si fa riferimento ad una differenza di lunghezza dei due arti.

Le cause dell'eterometria possono essere congenite o acquisite e l'entità della differenza di lunghezza varia a seconda della condizione di base. Solitamente eterometrie dell'arto inferiore di lieve entità sono ben tollerate e quando sono inferiori a 2 cm non è indicato alcun trattamento.

L'approccio terapeutico può essere conservativo (come la sola osservazione o l'utilizzo di rialzi) o chirurgico. L'approccio chirurgico può interessare il lato più lungo, mediante tecniche di accorciamento in acuto (come le osteotomie in accorciamento) e accorciamento progressivo (come le tecniche di crescita guidata), oppure il lato più corto con tecniche di allungamento che prevedono la distrazione di un'osteotomia mediante un fissatore esterno o un chiodo endomidollare allungabile.

La tipologia di trattamento varia in base all'età del paziente, biologica e scheletrica, all'entità dell'eterometria, alla sede, alla presenza di sindromi, alla compliance e al supporto familiare. Il trattamento con fissatore esterno richiede non solo tempistiche lunghe di rigenerazione ossea ma anche un attento follow up postoperatorio, clinico radiologico e una supervisione familiare attenta, in pazienti generalmente pediatrici.[66]

Lo scopo di questo studio è analizzare i risultati ottenuti e valutare, attraverso indici specifici, l'osteogenesi mediante distrazione nella correzione di eterometrie degli arti inferiori di entità differenti. Sono stati utilizzati diversi tipi di fissatori: fissatori esterni monoassiali, fissatori esterni circolari ed esapodali.

4.2. MATERIALI E METODI

Sono stati inclusi nello studio tutti i pazienti che hanno subito un intervento di allungamento degli arti inferiori da marzo 2021 a settembre 2022 presso la Clinica Ortopedica Ospedali Riuniti di Ancona e in particolare presso l'Ortopedia Pediatrica al centro Salesi di Ancona.

In totale sono stati valutati 5 pazienti che hanno subito un intervento di allungamento mediante osteogenesi in distrazione. È stato inoltre inserito nell'analisi 1 paziente sottoposto ad allungamento ulnare sempre tramite OD.

Sono state trattate con FE tre emimelie congenite, un'eterometria da esiti di DCA (*Displasia Congenita dell'anca*) con necrosi avascolare della testa femorale, un'ipoplasia femorale congenita, in deformità complessa.

Inoltre, il paziente sottoposto ad allungamento dell'arto superiore, incluso nello studio, è stato ugualmente trattato mediante osteogenesi in distrazione con applicazione di FEA.

Come frequente, spesso queste eterometrie rientrano in quadri sindromici complessi.

4.2.1. TECNICA CHIRURGICA

Prendendo in esame gli interventi chirurgici di questo studio eseguiti sugli arti inferiori, le tecniche chirurgiche utilizzate si basano sull'applicazione di fissatori esterni monoassiali in 2 pazienti e circolari in 3 pazienti. Di questi ultimi, in un caso è stato utilizzato un fissatore esterno esapodalico.

Le fasi dell'intervento chirurgico di applicazione di un fissatore esterno monoassiale per allungamento sono:

1. **Controllo lunghezza FEA:** il primo step è quello di controllare la lunghezza del FEA per assicurarsi che questa sia adeguata alla lunghezza dell'osso, per procedere poi all'inserimento delle viti. Il corpo del fissatore va applicato sulla faccia antero-mediale o anteriore dell'osso.
2. **Osteotomia di perone:** per l'allungamento di tibia è consigliabile fissare distalmente il perone con una vite transindesmotica per prevenire la scomposizione del malleolo peroneale durante il trattamento, si esegue poi un'osteotomia distale di perone asportando 1 cm di osso.
3. **Impianto della vite più prossimale e della vite più distale:** in seguito, si procede all'impianto delle viti partendo dalla vite più prossimale del morsetto prossimale e a seguire quella più distale del morsetto distale, per mantenere più stabile possibile il sistema. Le viti hanno diametro di 5-6 mm, solo nei casi di pazienti molto piccoli si possono utilizzare viti fino a 4 mm.

Nel femore la prima vite si impianta nell'area intertrocanterica del femore prossimale, o al di sotto della cartilagine di accrescimento quando la fisi è ancora aperta; nella tibia circa 2 cm al disotto dell'articolazione, attraverso la prima (o seconda) sede più prossimale del morsetto, in direzione perpendicolare all'asse tibiale. Prima di inserire la seconda vite, assicurarsi del corretto posizionamento del corpo del fissatore e della posizione delle viti rimanenti per una presa ottimale nell'osso. Si parte sempre dalla vite più prossimale nel morsetto prossimale proprio per permettere l'inserimento di tutte le altre viti alla stessa profondità.

4. **Impianto delle altre viti:** si procede con l'impianto delle altre viti, valutando la giusta distanza in base ai morsetti. Ogni morsetto è utilizzato come template per l'inserimento delle guide per viti ossee, garantendone il corretto posizionamento. Solitamente, in totale si inseriscono tre viti prossimalmente e tre distalmente.

Le viti ossee in acciaio a doppio diametro sono autoperforanti e autofilettanti e sono state progettate per una presa ottimale a fronte di un danno minimo della sostanza ossea. Le viti hanno un profilo a doppio diametro, in modo tale che la porzione con diametro minore si inserisca con più facilità nel sistema, permettendo alla porzione di maggior diametro poi di farsi strada meglio all'interno dell'osso. Il profilo a doppio diametro delle viti e la rigidità intrinseca del fissatore sono gli elementi che garantiscono la stabilità del sistema.

Le viti vanno inserite sempre utilizzando le cannule protetti tessuti. Vengono poi rimosse le cannule protetti tessuti e serrati sulle viti ossee i coperchi dei morsetti con una chiave a T.

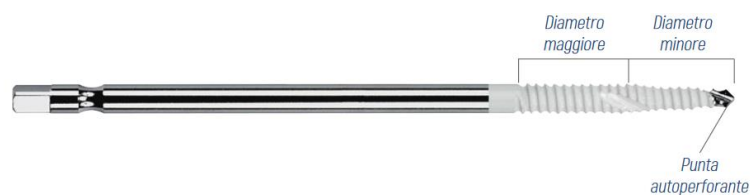


Fig. 21 vite autoperforante e autofilettata a doppio diametro

5. **Fissaggio del FEA:** Si blocca quindi il FEA per evitare deviazioni durante l'osteotomia. La maggior parte dei morsetti è caratterizzata da una base basculante ($\pm 11^\circ$) che permette di inserire le viti ossee inclinandole, in modo da migliorare la presa sui segmenti ossei che presentano una curvatura. Serrando le due viti dei

blocchetti superiori dei morsetti si blocca simultaneamente sia la posizione delle viti ossee nel morsetto, che il loro orientamento ottenuto mediante la porzione basculante.

6. **Osteotomia:**

- a. Si incide la cute: con incisione laterale se femorale, se tibiale si esegue un'incisione antero-mediale longitudinale sotto l'inserzione del tendine rotuleo. Si effettua l'osteotomia a 1,5 cm dalla vite più distale del morsetto prossimale.
- b. Si arriva al sottocute e alla fascia.
- c. Si arriva al piano osseo.
- d. Si incide il periostio e si divarica: deve essere inciso longitudinalmente e sollevato delicatamente dalla corticale. Il periostio è un tessuto altamente osteogenico, si cerca perciò di inficiare il meno possibile con la sua funzione.
- e. Si indebolisce l'osso con la fresa di trapano, in genere si effettuano 3-6 buchi per agire su piani diversi, così da effettuare in modo più agevole l'osteotomia.
- f. Si completa poi con l'osteotomia.

7. **Allungamento del fissatore e chiusura:** Si allunga il fissatore per essere sicuri che l'osteotomia sia completa. Si riporta il fissatore allo stato di riposo. Si sutura e si chiude fascia, sottocute e cute.

Con il morsetto distale attivato, il paziente potrà iniziare la fase di allungamento ruotando la chiave a T in senso antiorario (sul terminale prossimale) o in senso orario (sul terminale distale). Solitamente l'allungamento si effettua con un ottavo di giro per 3 volte al giorno.

Le fasi dell'intervento chirurgico di applicazione di un fissatore esterno circolare per allungamento sono:

1. **Premontaggio:** alcuni chirurghi scelgono di eseguire il premontaggio (cioè l'assemblaggio preventivo del costrutto) prima dell'intervento chirurgico così da ridurre i tempi operatori.
2. **Osteotomia di perone:** viene eseguita a livello del terzo distale al fine di ridurre il rischio di danno del nervo sciatico popliteo esterno. Successivamente si

solidarizza il perone alla tibia con una vite sovramalleolare, si inserisce una vite transindesmotica così da rendere solidale il perone con la tibia. Ciò previene la scomposizione del malleolo peroneale e la lussazione della sindesmosi tibio-peroneale durante l'allungamento.

3. **Fissaggio dell'anello di riferimento:**

- a. Viene scelto il *Reference Ring* (l'anello di riferimento): è sempre quello più vicino al ginocchio, quindi il più prossimale nell'allungamento tibiale, il più distale se l'allungamento è femorale.
- b. Si inserisce un filo guida parallelo all'articolazione del ginocchio.
- c. Si fissa l'anello di riferimento.

4. **Fissaggio degli altri anelli:** si fissa l'altro anello, il più distale se l'allungamento è della gamba, il più prossimale se è femorale. Vengono inseriti di solito 3-4 elementi di presa; maggiore il numero di viti, maggiore è la stabilità e la rigidità del costruito.

Ogni vite viene inserita dopo un bullone fissavite che funge da guida per la vite stessa, viene poi fatto passare un filo di Kirschner attraverso il bullone di fissaggio nella stessa direzione dell'inserimento della vite, poi con forbici o clamp si crea un percorso attraverso i tessuti molli fino all'osso. Viene quindi inserita la vite attraverso il bullone, fatta penetrare fino alla prima corticale e attraverso una chiave a T inserita attraverso la seconda corticale.

5. **Osteotomia:** viene eseguita, a livello metafisario, il più prossimale possibile, in modo da permettere una più efficace osteogenesi. La metodica classica è analoga a quella utilizzata per l'impianto del FEA:

- a. Si incide la cute.
- b. Si arriva al sottocute e alla fascia.
- c. Si arriva al piano osseo.
- d. Si incide il periostio e si divarica.
- e. Si indebolisce l'osso con la fresa di trapano (3-6 buchi).
- f. Si completa poi con l'osteotomo.

6. **Allungamento fissatore e chiusura:** si allunga il fissatore per essere sicuri che l'osteotomia sia completa. Si riporta il fissatore allo stato di riposo. Si chiude fascia, sottocute, cute.

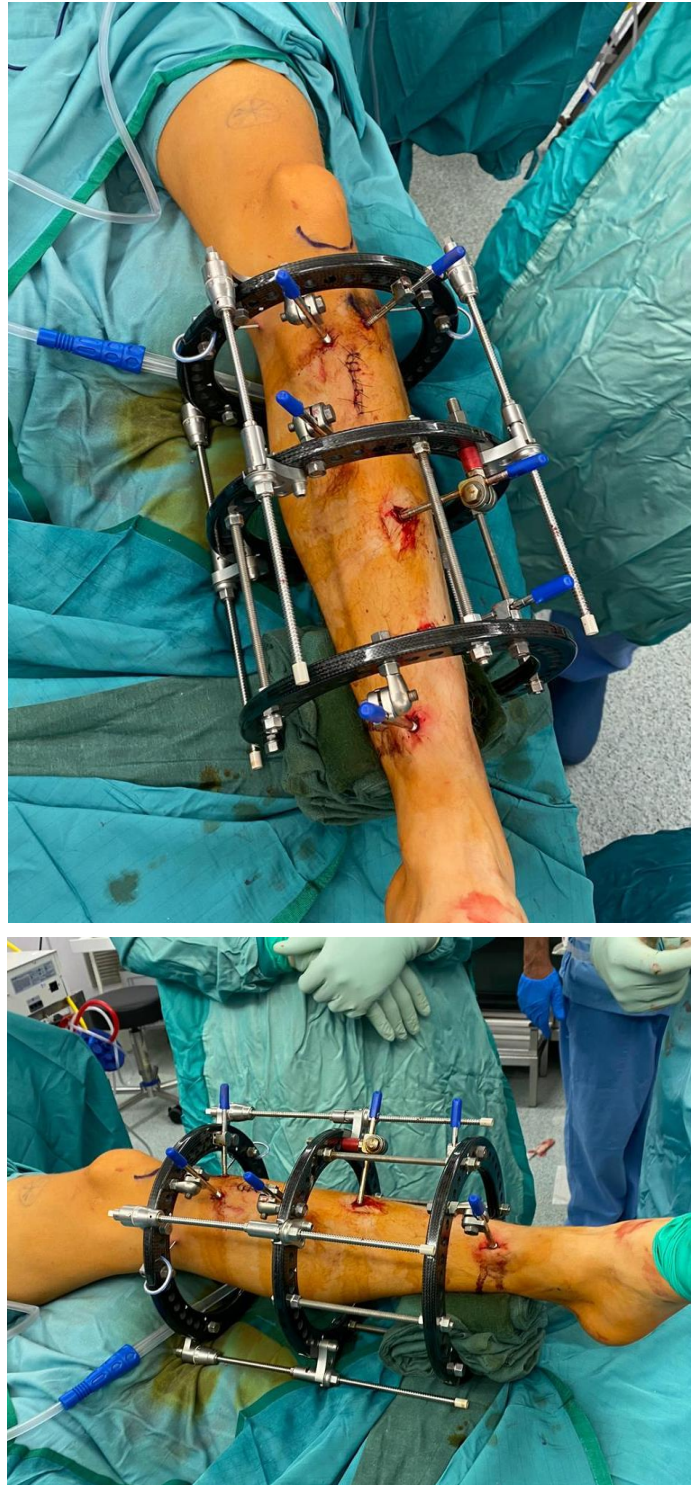


Fig. 22 immagine intraoperatoria postintervento di allungamento arto inferiore tramite osteotomia e fissazione FEC gamba sinistra

4.2.2. PROGRAMMA POST-OPERATORIO E GESTIONE

Il programma si divide per giorni con le relative correzioni da effettuare quotidianamente agli orari prefissati, con esami clinici e radiologici programmati. L'allungamento è stato iniziato dopo 5 giorni in tutti i pazienti (fase di latenza). Tutti i pazienti ha seguito un allungamento di 0.75 mm al giorno suddiviso in 3 allungamenti giornalieri.

Durante l'allungamento è stato posto il divieto di carico; al termine della fase di allungamento è stato quindi concesso un recupero graduale del carico. Come di norma, sono state effettuate medicazioni con terapia antibiotica e antalgica quando necessario.

Tutti i casi esaminati, sottoposti ad allungamento di un arto inferiore, presentavano prima del trattamento un'eterometria dai 3 agli 8 cm.

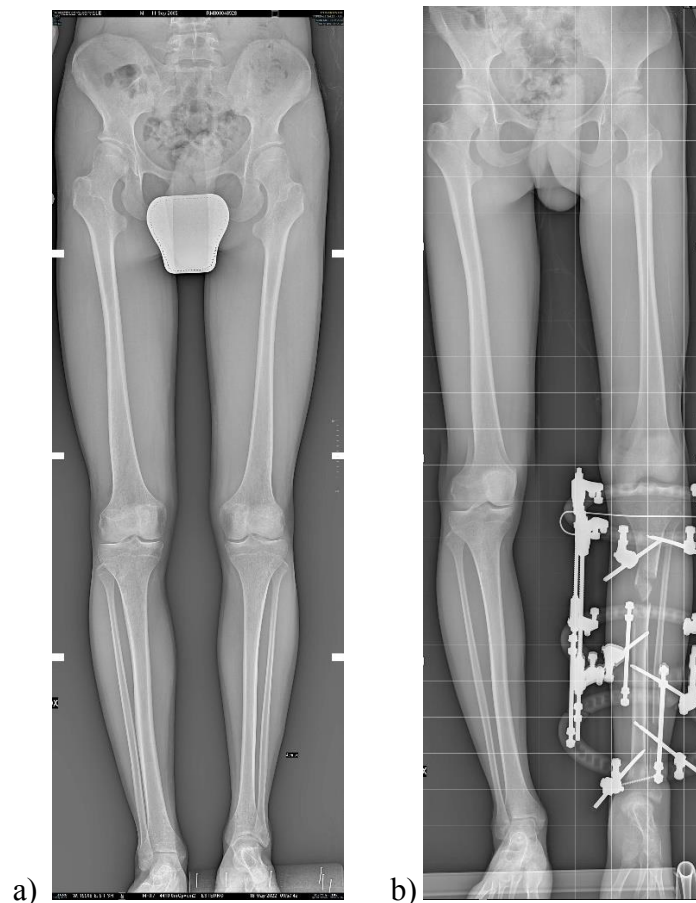


Fig 23 immagini radiologiche paziente sottoposto ad allungamento per OD di gamba sinistra tramite FEC a) RX arti inferiori preoperatoria con rialzo di 4cm a sinistra b) RX arti inferiori postoperatorio dopo montaggio FEC

4.2.3. PARAMETRI DI VALUTAZIONE

I risultati sono stati valutati mediante *ASAMI score* (*Association for the Study and Application of the Method of Ilizarov*). Secondo questo score i risultati vengono divisi in ottimi, buoni, discreti e scarsi dalla valutazione di quattro parametri: consolidazione, infezione, deformità ed eterometria residua.

I risultati funzionali sono stati valutati mediante *ASAMI function score* basato su cinque criteri: deambulazione (con o senza zoppia), rigidità del ginocchio o della caviglia, dolore, presenza di distrofia simpatica riflessa (*RSD*) e la capacità di eseguire le *ADL* (*activities of daily living*). Secondo quest'ultimo i risultati vengono definiti ottimi se il paziente riesce ad eseguire qualsiasi attività di vita quotidiana, con minima rigidità (ginocchio flesso di 15° e perdita di 15° di dorsiflessione della caviglia), nessuna *RSD* né dolore. Buoni, discreti e scarsi invece se progressivamente c'è una riduzione della motilità e della qualità di vita.

Nell'analisi dell'osteogenesi ottenuta mediante distrazione sono stati valutati tre indici: *Distraction Index (DI)*, che si ottiene dividendo la durata dell'allungamento con l'allungamento ottenuto; il *Maturation Index (MI)*, calcolato dividendo la durata del mantenimento del fissatore esterno dal completamento della distrazione alla rimozione del fissatore, con l'allungamento ottenuto; *External Fixation Index (EFI)*, calcolato dividendo l'intera durata del mantenimento del fissatore esterno con l'allungamento ottenuto.

Questi indici risultano più accurati rispetto all'*healing index*, cioè il rapporto tra tempo di mantenimento del fissatore esterno e la lunghezza ottenuta, che non riflette adeguatamente i processi che avvengono durante l'intera correzione con il fissatore esterno. [67]

Sono stati poi esaminati gli eventi avversi dividendoli, come indicato da Paley, in problemi, ostacoli e complicanze. [65]

I problemi sono quelli che si manifestano nel post-operatorio e che non richiedono un intervento chirurgico per essere corretti (es. infezioni superficiali dei trami delle fiches), gli ostacoli sono quelli che necessitano di un intervento chirurgico, ma che sono risolvibili (es. realease per retrazione). Le complicanze invece sono quelle che permangono dopo l'intervento chirurgico correttivo.



DI (Distraction Index) = D / L (giorni / cm)
MI (Maturation Index) = M / L (giorni / cm)
EFI (External Fixation Index) = E / L (giorni / cm)

L = allungamento totale

Fig. 24 indici di analisi OD

ASAMI bone score	
Ottimo	- Completa consolidazione + { Nessuna infezione Deformità < 7° Dismetria < 2,5 cm
Buono	Completa consolidazione + 2 tra - Nessuna infezione - Deformità < 7° - Dismetria < 2,5 cm
Discreto	Completa consolidazione + 1 parametro tra: - Nessuna infezione - Deformità < 7° - Dismetria < 2,5 cm
Scarso	Mancata consolidazione 0 Frattura rigenerato o nessuno dei 3 parametri: - Nessuna infezione - Deformità < 7° - Dismetria < 2,5 cm

Fig. 25 ASAMI bone score

4.3 RISULTATI

Tutti i pazienti hanno completato il programma di allungamento ed hanno rimosso il fissatore esterno di correzione. È stato valutato *l'ASAMI bone score* e in base a questo sono stati ottenuti 2 risultati ottimi e 3 buoni. Esaminando *l'ASAMI fuction score* invece sono stati rilevati 3 risultati buoni e 1 ottimo e 1 scarso. Tutti i pazienti tranne uno sono stati sottoposti ad allungamento mediante osteogenesi in distrazione attraverso un'osteotomia. Il paziente che non è stato sottoposto ad osteotomia è stato allungato attraverso una frattura avvenuta in seguito ad un trauma accidentale.

Per quanto riguarda i pazienti sottoposti allungamento degli arti inferiori, l'allungamento medio di 3,5 cm, mentre il periodo medio di distrazione è di 42,2 giorni; il periodo medio di maturazione è di 141,4 giorni; il periodo medio di mantenimento del fissatore esterno invece è di 190,6 giorni.

Tra le complicanze è stata riscontrata in due casi rigidità con ROM limitato ai massimi gradi e in un caso lieve valgismo del lato più corto. Nel paziente 4, nel quale è stato applicato il fissatore esterno esapodalico, oltre a dolore e esauribilità durante la deambulazione, è stata riportato rigidità del ginocchio con estensione limitata a 10°, flessione a 20° ed una instabilità dell'anca, corrispondente ad *un'ASAMI fuction score* di scarso.

Come problemi, si sono visti in 4 casi arrossamenti o secrezioni da infezioni superficiali dei tramiti delle fiches, risolti con terapia antibiotica orale.

Infine, è stato considerato un paziente sottoposto a OD ulnare sinistra per malattia da esostosi multiple con deformità gomito e avambraccio sinistro.

In quest'ultimo è stato applicato un FEA in seguito ad asportazione di un'esostosi ulnare con osteotomia. Il periodo di allungamento è stato di 42 giorni e quello di maturazione di 44 giorni per un allungamento totale di 1,9 cm. *L'ASAMI bone score* valutato risulta buono, mentre *l'ASAMI fuction score* ottimo, con un decorso postoperatorio senza particolari problemi, senza dolorabilità importanti, recupero della pronosupinazione e flesso-estensione completa, senza deficit vasculo-nervoso periferici, con lieve varismo stabile del gomito residuo.

pz	Età	Diagnosi	Entità eterometria	Complicanze, problemi ed ostacoli
1	17	eterometria in minus a sinistra >2cm da emimelia longitudinale esterna, in paziente con sindattilia lassa 2-3 e 4-5 raggio e agenesia delle falangi degli stessi raggi	3,8 cm	<ul style="list-style-type: none"> • piccola escara superficiale a livello della ferita in corrispondenza del perone distale • lieve rigidità alla dorsiflessione della caviglia di circa 95° con tendenza alla supinazione • rigidità estensione ginocchio 10-15° • lieve secrezione fices distali
2	12	eterometria da esiti di DCA evolutiva bilaterale con necrosi avascolare della testa femorale, trattata con osteotomia di riduzione testa del femore secondo Paley mediante accesso secondo Ganz e apparecchio gessato pelvi malleolo	4 cm	<ul style="list-style-type: none"> • materiale fibrinoso intorno alla vita postero-proximale • termini delle viti distali arrossate • dolorabilità anca • instabilità dell'anca tendelemburg a sinistra • rigidità di ginocchio con estensione limitata a 10° e flessione a 20°
3	13	ipometria arto inferiore in emimelia longitudinale esterna di primo grado	3 cm	<ul style="list-style-type: none"> • lieve valgismo tibia sinistra da femore più corto e piedi valghi pronati maggiori a sinistra
4	20	eterometria in emimelia longitudinale esterna	3,2 cm	<ul style="list-style-type: none"> • dolorabilità ingravescente • lieve secrezione vite prossimale • ROM algolimitato al massimo dei gradi

5	13	Ipoplasia femorale congenita con deformità complessa, già sottoposta a interventi chirurgici	8 cm	<ul style="list-style-type: none"> lieve arrossamento e fibrina a livello dei morsetti prossimale e distale
6	9	malattia esostosi multiple con deformità gomito e avambraccio sinistro (minus ulnare, instabilità capitello radiale, esostosi ulna distale)	1,9 cm	<ul style="list-style-type: none"> gomito varo ma stabile

Tab.1 riportati 5 pazienti sottoposti ad osteogenesi in distrazione con applicazione di FE tibiale o femorale per eterometria dell'arto inferiore. In aggiunta il paziente 6 sottoposto a OD ulnare.

4.4. DISCUSSIONE

Dai casi esaminati, calcolando gli indici per l'analisi dell'osteogenesi mediante distrazione, i dati sono in linea con ciò che viene riportato in letteratura.

Esiste una correlazione tra allungamento e periodo di distrazione. Sono stati valutati i valori del *Distraction Index* e il rapporto tra allungamento e DI. In linea con ciò che è riportato in letteratura [56], sebbene il campione esaminato sia poco numeroso, si è visto un rapporto tra allungamento e DI costante, con un rapporto medio di 0,3.

Tenendo sempre conto della variabilità data dall'utilizzo di differenti tipi di fissatore esterno, vi è una correlazione diretta tra il periodo di maturazione e allungamento ottenuto e un rapporto inversamente proporzionale tra allungamento e *Maturation Index*.

Dei 5 pazienti in 2 casi l'allungamento è stato in sede femorale, mentre negli altri in sede tibiale. In letteratura ci sono dati contrastanti a riguardo, per cui alcuni autori riportano una più precoce maturazione a livello femorale mentre altri a livello tibiale. [67] [68]

La nostra casistica, avendo un campione ridotto, non ci permette di valutare un'eventuale differenza statisticamente significativa presente, ma bisogna considerare che questi indici sono anche influenzati dall'età, dalla sede e dalla patologia del paziente stesso.

pz	Distraction time (DT)/ Index (DI) (giorni- giorni/cm)	Maturation Time (MT)/ Index (MI) (giorni-giorni/cm)	External Fix. Time (EFT)/ Index (EFI) (giorni- giorni/cm)	Risultati	Score ASAMI B/F
1	DT= 46 giorni DI=13,5 giorni/cm	MT= 240 giorni MI=70,59 giorni/cm	EFT=299 giorni EFI=87,43 giorni/cm	Dismetria residua di 3,8 mm	B= ottimo F= buono
2	DT= 40 giorni DI= 10 giorni/cm	MT= 116 giorni MI=40,25 giorni/cm	EFT=161 giorni EFI=40,25 giorni/cm	Eumetria clinica	B= ottimo F= scarso
3	DT= 39 giorni DI= 13 giorni/cm	MT= 95 giorni MI=31,67 giorni/cm	EFT=139 giorni EFI=46,33 giorni/cm	Eumetria clinica	B= buono F= buono
4	DT= 27 giorni DI=8,4 giorni/cm	MT= 98 giorni MI=30,63 giorni/cm	EFT=133 giorni EFI=41,56 giorni/cm	Eumetria clinica	B=buono F= buono
5	DT= 57 giorni DT=14,25 giorni/cm	MT= 158 giorni MI= 39,5 giorni/cm	EFT=221 giorni EFI=55,25 giorni/cm	Dismetria residua 4cm	B= buono F= ottimo
6	DT=42 giorni DI=22,1 giorni/cm	MT =77giorni MI=40,53 giorni/cm	EFT=123 giorni EFI=64,74 giorni/cm	Asportazione esostosi ulna distale ed eumetria clinica	B= buono F= ottimo

Tab. 2 Distraction time (DT) e Index (DI), Maturation Time (MT) e Index (MI), External Fixation Time (EFT) e Index(EFI), ASAMI bone score e ASAMI fuccion score dei cinque pazienti sottoposti a OD di arto inferiore e in ultimo del paziente (pz 6) sottoposto a OD ulnare

5. CONCLUSIONI

In conclusione, attraverso questa tesi si è voluto esaminare e confermare il ruolo essenziale dei fissatori esterni e dell'osteogenesi in distrazione per il trattamento di eterometrie anche di entità importanti.

I pazienti che hanno subito trattamento con fissatore esterno possono essere confrontati con 4 pazienti che hanno subito un trattamento con epifisiodesi simmetrica nel nostro centro, per eterometrie congenite. Di questi, due casi rientrano nel quadro sindromico della sindrome Klippel Trenaunay: malformazione congenita dei vasi sanguigni caratterizzata dalla presenza simultanea di vene varicose, accrescimento asimmetrico degli arti, malformazioni artero-venose. [69]

Si può concludere che l'eterometrie trattate sono di entità minore per i pazienti con epifisiodesi, con un'eterometria media di 2,6 cm, che tuttavia non sempre ha raggiunto l'eumetria clinica dopo il trattamento.

La ridotta invasività dell'intervento di epifisiodesi permette la dimissione in prima o seconda giornata di postoperatorio, più precocemente rispetto ad interventi con applicazione di fissatore esterno dove è previsto un ricovero di 7-8 giorni.

Quindi, sebbene tramite epifisiodesi si intervenga per la correzione di eterometrie di più lieve entità, solitamente di 2-5 cm, i tempi di ospedalizzazione, così come dolore e infezioni postoperatorio riscontrate sono minori.

Riguardo alle complicanze presentate dai pazienti con epifisiodesi in 2 di questi si riscontra un'eterometria stabile di 1-2 cm trattabile con rialzi. Solo in un caso si è riscontrata una limitazione alla flessione ai massimi gradi, con necessità di fisiochinesiterapia e potenziamento della muscolatura. Per quanto riguarda gli indici *ASAMI bone score* i risultati sono ottimi, nonostante le eterometrie residue riscontrate, che essendo minori di 2,5cm, rientrano nei cut off dello score. Anche a livello funzionale, l'*ASAMI fuction score* ha risultati ottimi, con limitazione di flessione ai massimi gradi solo in un caso.

I tempi di ripresa dall'intervento risultano estremamente ridotti, con possibilità di carico completo libero già a 10 giorni dall'intervento.

Tuttavia, un intervento di epifisiodesi si effettua per entità massime di 5 cm: ciò non lo rende facilmente comparabile con l'applicazione di fissatori esterni, che seppur più invasivi garantiscono eumetria per entità maggiori di deformità.

Un ulteriore confronto può essere effettuato tra gli allungamenti progressivi effettuati tramite FE e un accorciamento in acuto effettuato tramite osteotomia in sottrazione di 4cm di femore sinistro, con chiodo endomidollare e viti di sintesi, due distali e una prossimale. Anche in questo caso il quadro rientrava nel quadro sindromico più complesso della sindrome di Aarskos (malattia rara X linked, con displasia facio-digito-genitale, diagnosticata in base alla bassa statura o al ritardo mentale)[70].

L'eterometria trattata era infatti di 5 cm in minus a destra, con valgismo asimmetrico in paziente già sottoposto a diversi interventi chirurgici quali: osteotomia di femore nel 2010, osteotomia di Chiari di femore destro con ricostruzione acetabolare da pregressa LCA (*lussazione congenita di anca*) nel 2012 ed epifisiodesi temporanea con cambre metalliche del femore distale e della tibia prossimale nel 2015, che tuttavia non hanno risolto la dismetria presente. Inoltre, il paziente aveva un'età in cui le cartilagini di accrescimento sono chiuse: questo ha portato ad optare per un trattamento in acuto rispetto a un trattamento con osteogenesi in distrazione.

In quest'ultimo paziente è stato valutato un *ASAMI bone score* ottimo mentre un *ASAMI fuction score* discreto per trofismo ridotto dell'arto e necessità di terapia analgesica, di rinforzo della muscolatura paravertebrale, addominale e glutea e di un rialzo di 18-20 mm a destra.

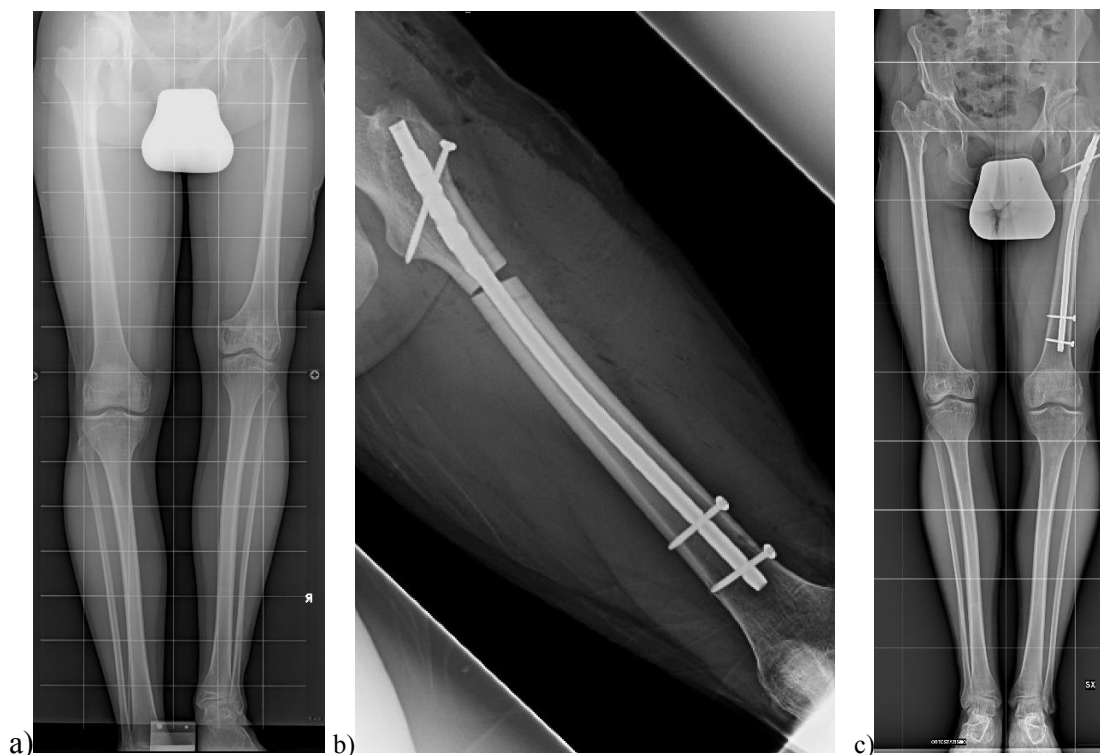


Fig 26 Immagini radiologiche di paziente sottoposto ad accorciamento in acuto tramite osteotomia in sottrazione di femore sinistro: a) RX arti inferiori immagine preoperatoria: eterometria di 4cm in minus a sinistra b) immagine di scopia intraoperatoria di controllo dopo inserimento chiodo endomidollare femore sinistro e viti di sintesi (due distali una prossimale) c) RX arti inferiori di controllo postoperatorio

Il trattamento delle eterometrie e in generale delle deformità degli arti inferiori riguarda principalmente l'età pediatrica e comporta necessariamente un attento e meticoloso studio prima di impostare un corretto iter terapeutico.

Per questo motivo si richiede per ogni paziente un minuzioso esame obiettivo, studio delle radiografie, correttamente eseguite con proiezioni ortogonali ed eventuali esami diagnostici di secondo livello, che sono parte integrante di un piano diagnostico-terapeutico correttamente impostato.

Il planning preoperatorio e lo studio del paziente sono fondamentali per decidere la tipologia di trattamento e se quindi poter optare per un allungamento in distrazione con fissatore esterno o per altri devices. A questo punto, come si è visto nella parte sperimentale presentata, la scelta può ricadere su apparecchi di fissazione esterna

differenti, da quelli più semplici monolaterali monoassiali, ai più moderni e complessi esapodalici.

Infatti, il fissatore esterno come strumento per allungamento degli arti non è da ritenersi un'innovazione, ma ad essere di particolare interesse attualmente è il monitoraggio attraverso specifici software che permettano di effettuare planning preoperatori attenti e prevedere ipo e ipercorrezioni, così da correggere in base all'apice della deformità e alla sede dell'osteotomia, effettuando correzioni in itinere con estrema precisione.

Tuttavia, i limiti ancora presenti sono attribuibili alla necessità di esperienza nella tecnica chirurgica della fissazione esterna e nell'esecuzione degli esami radiografici.

Concludendo, i risultati che sono stati valutati per allungamenti con tecnica di OD tramite fissatore esterno sono fortemente ottimistici e aprono ad applicazioni sempre più innovative, non solo per trattamenti di dismetrie. I tempi lunghi di trattamento e l'invasività dell'intervento chirurgico, comportano l'inevitabile necessità di sottoporre al trattamento pazienti e famiglie collaboranti, che riescano a mantenere una compliance al trattamento adeguata, per tutta la durata dell'allungamento e del consolidamento.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Solomin, A. c. di, *The Basic Principles of External Skeletal Fixation Using the Ilizarov and Other Devices*. Milano: Springer Milan, 2012. doi: 10.1007/978-88-470-2619-3.
- [2] «Limb Lengthening and Reconstructive Surgery [book].pdf».
- [3] M. Janoyer, «Blount disease», *Orthop. Traumatol. Surg. Res. OTSR*, vol. 105, fasc. 1S, pp. S111–S121, feb. 2019, doi: 10.1016/j.otsr.2018.01.009.
- [4] S. Dorman, A. Jariwala, e D. Campbell, «Cozen's phenomenon: a reminder», *Scott. Med. J.*, vol. 58, fasc. 3, pp. e10-13, ago. 2013, doi: 10.1177/0036933013496922.
- [5] D. Paley, *Principles of deformity correction*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [6] G. A. Knutson, «Anatomic and functional leg-length inequality: a review and recommendation for clinical decision-making. Part I, anatomic leg-length inequality: prevalence, magnitude, effects and clinical significance», *Chiropr. Osteopat.*, vol. 13, p. 11, lug. 2005, doi: 10.1186/1746-1340-13-11.
- [7] «Discrepanza nella lunghezza delle gambe (LLD) - Pediatria - Orthobullets». <https://www.orthobullets.com/pediatrics/4045/leg-length-discrepancy-lld> (consultato 28 febbraio 2023).
- [8] «SAGE PDF Full Text». Consultato: 28 febbraio 2023. [Online]. Disponibile su: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3109/03093649109164635>
- [9] «Leg length discrepancy in marathon runners.pdf».
- [10] M. Aiona, K. P. Do, K. Emara, R. Dorociak, e R. Pierce, «Gait Patterns in Children With Limb Length Discrepancy», *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 35, fasc. 3, p. 280, mag. 2015, doi: 10.1097/BPO.0000000000000262.
- [11] W. Harvey *et al.*, «ASSOCIATIONS OF LEG LENGTH INEQUALITY WITH PREVALENT, INCIDENT, AND PROGRESSIVE KNEE OSTEOARTHRITIS: A COHORT STUDY», *Ann. Intern. Med.*, vol. 152, fasc. 5, pp. 287–295, mar. 2010, doi: 10.1059/0003-4819-152-5-201003020-00006.
- [12] K. Tallroth, L. Ristolainen, e M. Manninen, «Is a long leg a risk for hip or knee osteoarthritis?», *Acta Orthop.*, vol. 88, fasc. 5, pp. 512–515, ott. 2017, doi: 10.1080/17453674.2017.1348066.

- [13] K. J. Murray e M. F. Azari, «Leg length discrepancy and osteoarthritis in the knee, hip and lumbar spine», *J. Can. Chiropr. Assoc.*, vol. 59, fasc. 3, pp. 226–237, set. 2015.
- [14] A. ten Brinke, H. E. van der Aa, J. van der Palen, e F. Oosterveld, «Is Leg Length Discrepancy Associated With the Side of Radiating Pain in Patients With a Lumbar Herniated Disc?», *Spine*, vol. 24, fasc. 7, p. 684, apr. 1999.
- [15] R. Defrin, S. B. Benyamin, R. D. Aldubi, e C. G. Pick, «Conservative Correction of Leg-Length Discrepancies of 10mm or Less for the Relief of Chronic Low Back Pain», *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 86, fasc. 11, pp. 2075–2080, nov. 2005, doi: 10.1016/j.apmr.2005.06.012.
- [16] P. M. Kelly e A. Diméglio, «Lower-limb growth: how predictable are predictions?», *J. Child. Orthop.*, vol. 2, fasc. 6, pp. 407–415, dic. 2008, doi: 10.1007/s11832-008-0119-8.
- [17] A. Dimeglio, «Growth in pediatric orthopaedics», *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 21, fasc. 4, pp. 549–555, 2001.
- [18] M. Willegger, M. Schreiner, A. Kolb, R. Windhager, e C. Chiari, «Epiphysiodesis for the treatment of tall stature and leg length discrepancy», *Wien. Med. Wochenschr. 1946*, vol. 171, fasc. 5, pp. 133–141, 2021, doi: 10.1007/s10354-021-00828-8.
- [19] M. B. Menelaus, «Correction of leg length discrepancy by epiphysial arrest», *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 48, fasc. 2, pp. 336–339, mag. 1966.
- [20] W. W. Greulich e S. I. Pyle, *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist*. Stanford University Press, 1959.
- [21] M. Anderson, W. T. Green, e M. B. Messner, «Growth and predictions of growth in the lower extremities», *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 45-A, pp. 1–14, gen. 1963.
- [22] M. Anderson, M. B. Messner, e W. T. Green, «DISTRIBUTION OF LENGTHS OF THE NORMAL FEMUR AND TIBIA IN CHILDREN FROM ONE TO EIGHTEEN YEARS OF AGE», *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 46, pp. 1197–1202, set. 1964.
- [23] C. F. Moseley, «A straight-line graph for leg-length discrepancies», *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 59, fasc. 2, pp. 174–179, mar. 1977.

- [24] D. Paley, A. Bhave, J. E. Herzenberg, e J. R. Bowen, «Multiplier method for predicting limb-length discrepancy», *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 82, fasc. 10, pp. 1432–1446, ott. 2000, doi: 10.2106/00004623-200010000-00010.
- [25] D. G. Little, L. Nigo, e M. D. Aiona, «Deficiencies of current methods for the timing of epiphysiodesis», *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 16, fasc. 2, pp. 173–179, 1996, doi: 10.1097/00004694-199603000-00007.
- [26] M. R. Makarov, T. J. Jackson, C. M. Smith, C.-H. Jo, e J. G. Birch, «Timing of Epiphysiodesis to Correct Leg-Length Discrepancy: A Comparison of Prediction Methods», *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 100, fasc. 14, pp. 1217–1222, lug. 2018, doi: 10.2106/JBJS.17.01380.
- [27] E. W. Hubbard, R. W. Liu, e C. A. Iobst, «Understanding Skeletal Growth and Predicting Limb-Length Inequality in Pediatric Patients»: *J. Am. Acad. Orthop. Surg.*, vol. 27, fasc. 9, pp. 312–319, mag. 2019, doi: 10.5435/JAAOS-D-18-00143.
- [28] J. A. Herring, *Tachdjian's Pediatric Orthopaedics E-Book: From the Texas Scottish Rite Hospital for Children*. Elsevier Health Sciences, 2013.
- [29] «Kuzma e Nichols - 2021 - Management of Mild Lower Extremity Deformity and L.pdf».
- [30] B. Vogt, G. Gosheger, T. Wirth, J. Horn, e R. Rödl, «Leg Length Discrepancy-Treatment Indications and Strategies», *Dtsch. Arzteblatt Int.*, vol. 117, fasc. 24, pp. 405–411, giu. 2020, doi: 10.3238/arztebl.2020.0405.
- [31] D. F. Stanitski, «Limb-Length Inequality: Assessment and Treatment Options», *JAAOS - J. Am. Acad. Orthop. Surg.*, vol. 7, fasc. 3, p. 143, giu. 1999.
- [32] A. G. Alzahrani, Y. M. Behairy, M. H. Alhossan, F. S. Arab, e A. A. Alammari, «Percutaneous versus open epiphysiodesis», *Saudi Med. J.*, vol. 24, fasc. 2, pp. 203–205, feb. 2003.
- [33] J. Cauchoix e G. Morel, «One stage femoral lengthening», *Clin. Orthop.*, fasc. 136, pp. 66–73, ott. 1978.
- [34] D. W. Murray, G. Kambouroglou, e J. Kenwright, «One-stage lengthening for femoral shortening with associated deformity», *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 75, fasc. 4, pp. 566–571, lug. 1993, doi: 10.1302/0301-620X.75B4.8331110.

- [35] G. A. Ilizarov, «The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues. Part I. The influence of stability of fixation and soft-tissue preservation», *Clin. Orthop.*, fasc. 238, pp. 249–281, gen. 1989.
- [36] G. A. Ilizarov, «The tension-stress effect on the genesis and growth of tissues: Part II. The influence of the rate and frequency of distraction», *Clin. Orthop.*, fasc. 239, pp. 263–285, feb. 1989.
- [37] G. W. Paul, «The history of external fixation», *Clin. Podiatr. Med. Surg.*, vol. 20, fasc. 1, pp. 1–8, v, gen. 2003, doi: 10.1016/s0891-8422(02)00050-2.
- [38] A. Codivilla, «The classic: On the means of lengthening, in the lower limbs, the muscles and tissues which are shortened through deformity. 1905», *Clin. Orthop.*, vol. 466, fasc. 12, pp. 2903–2909, dic. 2008, doi: 10.1007/s11999-008-0518-7.
- [39] V. Putti, «The operative lengthening of the femur. 1921», *Clin. Orthop.*, fasc. 250, pp. 4–7, gen. 1990.
- [40] «Birch - 2017 - A Brief History of Limb Lengthening.pdf».
- [41] L. C. Abbott e J. B. Saunders, «THE OPERATIVE LENGTHENING OF THE TIBIA AND FIBULA: A PRELIMINARY REPORT ON THE FURTHER DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES AND TECHNIC», *Ann. Surg.*, vol. 110, fasc. 6, pp. 961–991, dic. 1939, doi: 10.1097/00000658-193912000-00001.
- [42] H. Wagner, «Operative lengthening of the femur», *Clin. Orthop.*, fasc. 136, pp. 125–142, ott. 1978.
- [43] J. G. Birch, «A Brief History of Limb Lengthening», *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 37, fasc. Supplement 2, pp. S1–S8, set. 2017, doi: 10.1097/BPO.0000000000001021.
- [44] G. De Bastiani, R. Aldegheri, e L. Renzi Brivio, «The treatment of fractures with a dynamic axial fixator», *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 66, fasc. 4, pp. 538–545, ago. 1984, doi: 10.1302/0301-620X.66B4.6746689.
- [45] G. De Bastiani, R. Aldegheri, e L. Renzi Brivio, «Dynamic axial fixation. A rational alternative for the external fixation of fractures», *Int. Orthop.*, vol. 10, fasc. 2, pp. 95–99, 1986.
- [46] S. R. R. Ilizarov Svetlana, A c. di, *Limb Lengthening and Reconstruction Surgery*. Boca Raton: CRC Press, 2013. doi: 10.3109/9781420014013.
- [47] A. Danis, «[Mechanism of bone lengthening by the Ilizarov technique]», *Bull. Mem. Acad. R. Med. Belg.*, vol. 156, fasc. 1–2, pp. 107–112, 2001.

- [48] J. G. Birch e M. L. Samchukov, «Use of the Ilizarov method to correct lower limb deformities in children and adolescents», *J. Am. Acad. Orthop. Surg.*, vol. 12, fasc. 3, pp. 144–154, 2004, doi: 10.5435/00124635-200405000-00002.
- [49] M. M. Panjabi, S. D. Walter, M. Karuda, A. A. White, e J. P. Lawson, «Correlations of radiographic analysis of healing fractures with strength: a statistical analysis of experimental osteotomies», *J. Orthop. Res. Off. Publ. Orthop. Res. Soc.*, vol. 3, fasc. 2, pp. 212–218, 1985, doi: 10.1002/jor.1100030211.
- [50] Y. N *et al.*, «Three modes of ossification during distraction osteogenesis in the rat», *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 79, fasc. 5, set. 1997, doi: 10.1302/0301-620x.79b5.7423.
- [51] H. Kojimoto, N. Yasui, T. Goto, S. Matsuda, e Y. Shimomura, «Bone lengthening in rabbits by callus distraction. The role of periosteum and endosteum», *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 70, fasc. 4, pp. 543–549, ago. 1988, doi: 10.1302/0301-620X.70B4.3403595.
- [52] J. Aronson, B. Good, C. Stewart, B. Harrison, e J. Harp, «Preliminary studies of mineralization during distraction osteogenesis», *Clin. Orthop.*, fasc. 250, pp. 43–49, gen. 1990.
- [53] D. B. Carmack, K. L. Kaylor, e M. J. Yaszemski, «Structural stiffness and reducibility of external fixators placed in malalignment and malrotation», *J. Orthop. Trauma*, vol. 15, fasc. 4, pp. 247–253, mag. 2001, doi: 10.1097/00005131-200105000-00003.
- [54] B. Gasser, B. Boman, D. Wyder, e E. Schneider, «Stiffness characteristics of the circular Ilizarov device as opposed to conventional external fixators», *J. Biomech. Eng.*, vol. 112, fasc. 1, pp. 15–21, feb. 1990, doi: 10.1115/1.2891120.
- [55] S. R. Rozbruch, «Hybrid Techniques: The Best of Internal and External Fixation».
- [56] A. Informatica, «Trattamento delle deformità complesse degli arti con fissatore esterno esapodalico TL-HEX: analisi dell'osteogenesi per distrazione e risultati clinici», *Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia*. <https://old.giot.it/article/trattamento-delle-deformita-complesse-degli-arti-con-fissatore-esterno-esapodalico-tl-hex-analisi-dellosteogenesi-per-distrazione-e-risultati-clinici/> (consultato 18 aprile 2023).

- [57] J.-M. Guichet, B. Deromedis, L. T. Donnan, G. Peretti, P. Lascombes, e F. Bado, «Gradual femoral lengthening with the Albizzia intramedullary nail», *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 85, fasc. 5, pp. 838–848, mag. 2003, doi: 10.2106/00004623-200305000-00011.
- [58] H. Dinçyürek, M. Kocaoğlu, I. L. Eralp, F. E. Bilen, G. Dikmen, e I. Eren, «Functional results of lower extremity lengthening by motorized intramedullary nails», *Acta Orthop. Traumatol. Turc.*, vol. 46, fasc. 1, pp. 42–49, 2012, doi: 10.3944/aott.2012.2671.
- [59] J. D. Cole, D. Justin, T. Kasparis, D. DeVlugt, e C. Knobloch, «The intramedullary skeletal kinetic distractor (ISKD): first clinical results of a new intramedullary nail for lengthening of the femur and tibia», *Injury*, vol. 32 Suppl 4, pp. SD129-139, dic. 2001, doi: 10.1016/s0020-1383(01)00116-4.
- [60] K. Ym, F. At, e R. Sr, «Precision of the PRECICE internal bone lengthening nail», *Clin. Orthop.*, vol. 472, fasc. 12, dic. 2014, doi: 10.1007/s11999-014-3575-0.
- [61] H. Tsuchiya e K. Tomita, «Distraction osteogenesis for treatment of bone loss in the lower extremity», *J. Orthop. Sci. Off. J. Jpn. Orthop. Assoc.*, vol. 8, fasc. 1, pp. 116–124, 2003, doi: 10.1007/s007760300020.
- [62] S. Rigal, P. Merloz, D. Le Nen, H. Mathevon, A.-C. Masquelet, e French Society of Orthopaedic Surgery and Traumatology (SoFCOT), «Bone transport techniques in posttraumatic bone defects», *Orthop. Traumatol. Surg. Res. OTSR*, vol. 98, fasc. 1, pp. 103–108, feb. 2012, doi: 10.1016/j.otsr.2011.11.002.
- [63] J. Fürmetz *et al.*, «Bone Transport for Limb Reconstruction Following Severe Tibial Fractures», *Orthop. Rev.*, vol. 8, fasc. 1, p. 6384, mar. 2016, doi: 10.4081/or.2016.6384.
- [64] P. Blázquez-Carmona, J. Mora-Macías, J. Morgaz, J. A. Fernández-Sarmiento, J. Domínguez, e E. Reina-Romo, «Mechanobiology of Bone Consolidation During Distraction Osteogenesis: Bone Lengthening Vs. Bone Transport», *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 49, fasc. 4, pp. 1209–1221, apr. 2021, doi: 10.1007/s10439-020-02665-z.
- [65] D. Paley, «Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique», *Clin. Orthop.*, fasc. 250, pp. 81–104, gen. 1990.
- [66] S. Z. H. Naqui, W. Thiryayi, A. Foster, G. Tselentakis, M. Evans, e J. B. Day, «Correction of simple and complex pediatric deformities using the Taylor-Spatial

- Frame», *J. Pediatr. Orthop.*, vol. 28, fasc. 6, pp. 640–647, set. 2008, doi: 10.1097/BPO.0b013e3181831e99.
- [67] K. Sakurakichi, H. Tsuchiya, K. Uehara, T. Kabata, e K. Tomita, «The relationship between distraction length and treatment indices during distraction osteogenesis», *J. Orthop. Sci. Off. J. Jpn. Orthop. Assoc.*, vol. 7, fasc. 3, pp. 298–303, 2002, doi: 10.1007/s007760200051.
- [68] J. Fischgrund, D. Paley, e C. Suter, «Variables affecting time to bone healing during limb lengthening», *Clin. Orthop.*, fasc. 301, pp. 31–37, apr. 1994.
- [69] P. R. John, «Klippel-Trenaunay Syndrome», *Tech. Vasc. Interv. Radiol.*, vol. 22, fasc. 4, p. 100634, dic. 2019, doi: 10.1016/j.tvir.2019.100634.
- [70] A. Ahmed, A. Mufeed, A. K. Ramachamparambathu, e U. Hasoon, «Identifying Aarskog Syndrome», *J. Clin. Diagn. Res. JCDR*, vol. 10, fasc. 12, pp. ZD09-ZD11, dic. 2016, doi: 10.7860/JCDR/2016/22180.8982.