



Innesti ossei vascularizzati nelle pseudoartrosi di scafoide: quali, quando e come fissarli

Vascularized bone graft in scaphoid non union: which ones, when and how to fix them

Pierluigi Tos¹, Kalina Fadel¹, Alice Clemente¹, Valentina Cecconato¹, Alessandro Crosio², Simona Odella¹

¹ UOC Chirurgia della mano e Microchirurgia Ricostruttiva, ASST Gaetano Pini – CTO, Milano; ² UOC Ortopedia e Traumatologia II, Chirurgia della Mano – AOU Città della Salute e della Scienza, Ospedale CTO, Torino

Riassunto

L'impiego dell'osso vascularizzato nel trattamento chirurgico delle pseudoartrosi di scafoide è una tecnica consolidata ed indicata in casi complessi dove l'apporto vascolare sembrerebbe poter essere determinante per la guarigione. Oltre alle indicazioni (compromissione della vitalità ossea, fallimento di interventi precedenti e cronicità e sclerosi ossea) vengono discusse e descritte in dettaglio le principali tecniche di innesto vascularizzato, sia peduncolate locali (come 1,2-ICSRA di Zaidenberg e il lembo volare di Mathoulin/Kuhlmann) sia libere microvascolari (come il lembo da condilo femorale mediale) nella forma ossea ed osteocondrale per la sostituzione del polo prossimale. Sono discussi inoltre i metodi di fissazione ed i risultati prevedibili rispetto alle serie presenti in letteratura. I tassi di consolidazione complessivi per i VBG si attestano tra l'80% e il 95%, con tempi medi di unione di 10-12 settimane. La chiave del successo chirurgico risiede nella selezione accurata della tecnica e nella garanzia di una fissazione compressiva stabile, essenziale per l'integrazione dell'innesto. In sintesi, la scelta del VBG è una strategia di **biological augmentation** riservata a deficit biologici marcati, ma la sua efficacia dipende interamente dalla contemporanea ottimizzazione meccanica.

Parole chiave: pseudoartrosi, scafoide, osso vascularizzato

Summary

The use of vascularized bone in the surgical treatment of scaphoid non-union is a well-established technique, indicated in complex cases where vascular supply appears to be a decisive factor for healing. In addition to the indications (compromised bone viability, failure of previous procedures, chronicity and bone sclerosis), the main techniques of vascularized grafts are discussed and described in detail, both local pedicled grafts (such as the 1,2-ICSRA of Zaidenberg and the volar flap of Mathoulin/Kuhlmann) and free microvascular grafts (such as the medial femoral condyle flap), in both their osseous and osteochondral forms for proximal pole replacement. The fixation methods and the predictable outcomes based on published series are also discussed. Overall union rates for VBG range between 80% and 95%, with average union times of 10–12 weeks. The key to surgical success lies in the careful selection of technique and in ensuring stable compressive fixation, which is essential for graft integration. In summary, choosing a VBG is a strategy of biological augmentation reserved for marked biological deficits, but its effectiveness depends entirely on simultaneous mechanical optimization.

Key words: non union, scaphoid, vascularized bone graft

Corrispondenza:

Pierluigi Tos

E-mail: Pierluigi.tos@asst-pini-cto.it

Conflitto di interessi

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

Come citare questo articolo: Tos P, Fadel K, Clemente A, et al. Innesti ossei vascularizzati nelle pseudoartrosi di scafoide: quali, quando e come fissarli. Rivista Italiana di Chirurgia della Mano 2025;62:1-15. <https://doi.org/10.53239/2784-9651-2025-13>

© Copyright by Pacini Editore Srl



OPEN ACCESS

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

Introduzione

Le fratture dello scafoide rappresentano la lesione più frequente tra le fratture carpali, costituendo circa il 60 % di tutte le fratture del carpo^{1,2}. Tra queste, una percentuale compresa tra il 5 % e il 12% evolve in ritardo di consolidazione o pseudartrosi, soprattutto nei casi diagnosticati tardivamente o trattati in modo inadeguato^{1,3,4}.

Le fratture che coinvolgono il polo prossimale mostrano un rischio più elevato di non-union, a causa della peculiare vascolarizzazione retrograda di questa porzione dello scafoide^{5,6}. La compromissione del flusso arterioso può determinare necrosi avascolare (AVN), una delle principali complicanze legate a questa anatomia⁵.

L'impatto funzionale della pseudartrosi dello scafoide è notevole: dolore cronico, riduzione della forza di presa e della mobilità del polso, deformità a "gobba d'asino" e, nei casi non trattati, evoluzione verso artrosi carpale progressiva o Scaphoid Non-Union Advanced Collapse (SNAC)^{6,7}. Il rischio di degenerazione articolare aumenta proporzionalmente al tempo intercorso tra il trauma e il trattamento chirurgico^{2,5}. Sul piano terapeutico, il trattamento chirurgico di riferimento per la maggior parte delle pseudartrosi semplici rimane l'innesto osseo non vascolarizzato (NVBG) associato a fissazione interna, come nella tecnica classica di Matti-Russe^{8,9}. Tuttavia, nei casi complessi — come nelle pseudoartrosi croniche, nelle necrosi avascolari del polo prossimale o nei fallimenti di precedenti interventi — la sola biologia fornita dall'NVBG può risultare insufficiente^{5,8}.

L'NVBG guarisce mediante un processo di "creeping substitution" e riassorbimento, caratterizzato da rivascolarizzazione lenta e sostituzione progressiva dell'osso necrotico. Questo processo è inefficace nei casi in cui la vascolarizzazione è già compromessa^{10,11}. In tali circostanze, gli innesti ossei vascolarizzati (VBG) si propongono come alternativa biologicamente più attiva, poiché forniscono cellule vive e un apporto sanguigno diretto, migliorando la guarigione primaria e i tempi di consolidazione^{5,6,11}.

Il fallimento di un precedente intervento con NVBG rappresenta un'indicazione consolidata al passaggio a un innesto vascolarizzato^{8,12}. In definitiva, il successo del trattamento della pseudartrosi dello scafoide dipende dal corretto equilibrio tra biologia e stabilità meccanica, principio che guida anche la selezione del tipo di innesto e del mezzo di sintesi^{13,14}.

Questo lavoro mira a fornire una sintesi critica e aggiornata (2025) sulle indicazioni, tecniche principali, risultati e complicanze degli innesti ossei vascolarizzati nella pseudartrosi dello scafoide, con l'obiettivo di delineare criteri pratici per la scelta tra NVBG e VBG, descrivere le principali tecniche locali e libere e analizzare il ruolo della stabilità meccanica nel successo chirurgico complessivo.

Razionale Biologico

Principi biologici della guarigione ossea

La guarigione ossea si fonda su tre meccanismi biologici fondamentali: osteoconduzione, osteoinduzione e osteogenesi¹⁵. Negli innesti non vascolarizzati (NVBG), come quelli impiegati nella tecnica di Matti-Russe, l'osso trapiantato agisce principalmente come scaffold osteoconduttivo, consentendo la crescita di nuovo tessuto osseo proveniente dal letto ricevente. Le cellule dell'innesto vanno incontro a necrosi e vengono lentamente sostituite da tessuto osseo neoformato attraverso "creeping substitution", caratterizzato da lenta rivascolarizzazione e rimodellamento progressivo^{5,8}. Tale processo, pur garantendo buoni risultati nei casi vitali, risulta inefficiente nell'osso ischemico, in cui la capacità rigenerativa dipende interamente dal flusso ematico locale^{5,8,11}. Di conseguenza, in presenza di necrosi avascolare (AVN) o di osso sclerotico non sanguinante, il potenziale biologico dell'NVBG è gravemente limitato^{10,16}.

Perché e quando utilizzare un innesto osseo vascolarizzato (VBG)

Gli innesti vascolarizzati (VBG) sono stati introdotti per superare questi limiti biologici e fornire un apporto cellulare vivo e una vascolarizzazione diretta al sito ricevente. A differenza dell'NVBG, il VBG mantiene un peduncolo arterioso funzionale o un'anastomosi microchirurgica che preserva la perfusione dell'innesto. Ciò consente la sopravvivenza degli osteociti e degli osteoblasti originari, accelerando la guarigione primaria e migliorando l'incorporazione^{11,17}. Dal punto di vista fisiopatologico, il VBG favorisce una rivascolarizzazione rapida del frammento necrotico, un rimodellamento osseo più efficace, e una migliore conservazione della massa corticale e trabecolare⁶. Numerosi studi hanno dimostrato che in presenza di AVN i tassi di consolidazione raggiungono fino all'88 % con VBG, rispetto al 47 % con NVBG^{18,19}. Altre meta-analisi supportano la superiorità del VBG in questi casi complessi, sebbene con percentuali leggermente inferiori, riscontrando un tasso medio di unione del 74% per il VBG rispetto al 62% per l'NVBG nei casi di necrosi avascolare del polo prossimale²⁰. Il successo nel trattamento della pseudoartrosi dello scafoide si basa su un principio integrativo: la combinazione della biologia e la stabilità meccanica è ciò che promuove guarigione. L'apporto biologico fornito dal VBG è indispensabile per favorire la rigenerazione nei casi avascolari, ma risulta inefficace se non accompagnato da una fissazione stabile che permetta la compressione interframmentaria e la neutralizzazione delle forze di taglio^{6,13}. Le moderne tecniche chirurgiche associano quindi l'innesto vascolarizzato a mezzi di sintesi a vite o a fili di K, in modo da ottimizzare simultaneamente il supporto biologico e la

rigidità meccanica.

Indicazioni selettive per VBG

Sebbene gli innesti vascolarizzati offrano vantaggi biologici superiori, il loro impiego deve essere riservato a condizioni specifiche, data la maggiore complessità tecnica e i costi operativi^{5,6}. Le indicazioni principali comprendono:

- Necrosi avascolare del polo prossimale, in cui la perfusione ossea è compromessa^{5, 21}
- Fallimento di un precedente NVBG o pseudoartrosi recidiva^{12, 22, 23}
- Pseudoartrosi croniche (> 12 mesi) o con osso sclerotico e deformità strutturali^{7, 24}
- Difetti ossei ampi o perdita di sostanza, che richiedono innesti strutturali voluminosi, come i free flaps da condilo femorale mediale^{12, 25}.

Nei casi semplici e vitali, al contrario, l'NVBG rimane la prima scelta terapeutica^{26, 27}.

Inquadramento Clinico, Diagnostico e Indicazioni Chirurgiche

Definizione e classificazione della pseudoartrosi dello scafoide

La pseudoartrosi dello scafoide (SN) è definita come l'assenza di consolidazione radiografica a distanza di almeno sei mesi dal trauma, associata a dolore persistente o limitazione funzionale²⁸. Dopo dodici mesi, la condizione viene considerata cronica, con progressiva sclerosi e perdita del potenziale biologico di guarigione²⁹.

Le classificazioni più utilizzate per orientare la strategia terapeutica sono:

- Herbert & Fisher (1984), che distingue le pseudoartrosi in base a stabilità e grado di fibrosi: **D1-D2** (fibrose stabili) vs **D3-D4** (instabili o con perdita di sostanza)³⁰;
- Slade & Dodds (2003), che propone sei gradi basati su RMN e TC, integrando vitalità ossea, deformità e sclerosi³¹.
- Shmidle et al descrivono con accuratezza l'importanza della TC per ciò che concerne lo stato dello scafoide³².

In generale, le forme vitali e stabili rispondono bene all'innesto non vascolarizzato (NVBG), mentre quelle avascolari o instabili richiedono un approccio vascolarizzato (VBG).

Diagnostica per immagini e pianificazione pre-operatoria

La diagnosi e la pianificazione chirurgica della SN si fondano su un approccio multimodale.

- Radiografie standard (PA, laterale, obliqua e semipronata) consentono di valutare la rima di pseudoartrosi, l'an-

golazione dorsale e l'eventuale deformità **hump-back**^{7, 24, 33}.

- Tomografia computerizzata (TC) è l'esame di riferimento per la morfologia del gap, la sclerosi corticale e l'allineamento scafoideo; fornisce informazioni essenziali la condizione dell'osso³² per il planning meccanico²⁹.
- Risonanza magnetica (RMN) valuta la vitalità del polo prossimale e individua la necrosi avascolare (AVN), ma la sua sensibilità può essere sovrastimata nelle forme croniche^{5, 20, 25}.
- Durante l'intervento, la valutazione diretta del sanguinamento osseo ("**bleeding bone test**") rimane il criterio più affidabile per distinguere le pseudoartrosi vitali da quelle ischemiche⁵. In caso di assenza di sanguinamento o di osso friabile, è consigliabile predisporre un piano alternativo come l'uso di un innesto vascolarizzato pedunculato o un innesto libero da condilo femorale mediale^{8, 34}.

Criteri di scelta terapeutica

La scelta del tipo di innesto e della tecnica di fissazione deve considerare quattro fattori fondamentali:

1. Vitalità ossea (RMN (non dirimente) e test intraoperatorio):
 - Osso vitale → NVBG.
 - Osso avascolare → VBG²⁹.
2. Stabilità meccanica e deformità:
 - Pseudoartrosi stabili e allineate → NVBG¹⁸.
 - Instabili o con deformità **hump-back** → VBG strutturale^{24, 35}.
3. Durata della pseudoartrosi:
 - < 6-12 mesi → NVBG o mini-VBG locale.
 - 12 mesi → VBG pedunculato o libero⁵.
4. Trattamenti precedenti:
 - Fallimento di NVBG → VBG di revisione^{22, 23}.

Inoltre, la presenza di gap ossei ampi o di frammenti necrotici rende preferibile un innesto vascolarizzato libero, come il lembo da condilo femorale mediale (MFC), che è di dimensioni maggiori rispetto a quello che si può prelevare localmente^{5, 12, 25}.

Obiettivi chirurgici

Gli obiettivi fondamentali della ricostruzione scafoidea consistono nel rimuovere completamente il tessuto fibroso e sclerotico fino a ottenere superfici ossee vitali e sanguinanti, ripristinare l'allineamento anatomico correggendo, quando presente, la deformità hump-back, e ristabilire la continuità cortico-spongiosa mediante l'interposizione di un innesto adeguato.

La fissazione deve garantire una stabilità meccanica sufficiente — mediante vite compressiva o fili di Kirschner — per favorire la guarigione primaria, mentre ogni manovra deve mirare a preservare o ripristinare la perfusione del polo

prossimale.

Il principio cardine rimane l'equilibrio dinamico tra biologia e meccanica: un innesto perfuso ma instabile fallirà tanto quanto una sintesi rigida su osso necrotico. Il rispetto di questi criteri determina il successo funzionale e radiografico a lungo termine ^{12, 13}.

Classificazione e tipologia degli innesti vascolarizzati

Gli innesti ossei vascolarizzati rappresentano oggi una risorsa fondamentale nel trattamento della pseudoartrosi dello scafoide, soprattutto nei casi caratterizzati da necrosi avascolare, fallimenti chirurgici precedenti o perdita di sostanza ossea.

Essi si suddividono in innesti locali (peduncolati) e innesti liberi (microvascolari). I primi consentono un trasferimento diretto senza microanastomosi, con morbidità donatrice minima; i secondi, provenienti da distretti scheletrici distanti come il condilo femorale mediale, richiedono microchirurgia ma offrono un volume e una versatilità superiori.

La scelta tra le diverse tecniche dipende dalla sede e vitalità della pseudoartrosi, dall'ampiezza del difetto osseo, dalla necessità di correzione strutturale e dall'esperienza chirurgica disponibile ^{5, 6, 18, 29}.

Innesti locali (peduncolati) dal radio distale

4.1.1. Dorsale 1,2-ICSRA (Zaidenberg)

Il lembo dorsale 1,2-ICSRA, descritto da Zaidenberg et al. (1991), rappresenta la soluzione più consolidata per le pseudoartrosi del polo prossimale, in particolare in presenza di necrosi avascolare parziale o di fallimenti dopo innesto non vascolarizzato. Si tratta di un innesto cortico-spongioso peduncolato sull'arteria intercompartimentale sovraretinacolare 1,2, con un arco di rotazione sufficiente a raggiungere sia il polo prossimale sia la metà distale dorsale dello scafoide ^{36,37} (Fig. 1).

L'incisione dorsale longitudinale, centrata tra il primo e il secondo compartimento estensorio, permette di identificare e seguire il peduncolo vascolare per alcuni centimetri prossimalmente. Dopo l'isolamento, viene prelevato un tassello cortico-spongioso di dimensioni approssimative pari a 10 × 6 × 3 mm, mantenendo intatta la perfusione. La preparazione del sito ricevente richiede una toilette accurata del focolaio, con rimozione completa del tessuto fibroso e della sclerosi fino a ottenere osso vitale e sanguinante (Fig. 2).

Il lembo viene quindi modellato per colmare il gap o fungere da ponte dorsale, posizionato in modo da ripristinare la continuità cortico-spongiosa. La fissazione avviene con vite in compressione quando la dimensione del frammento lo consente, oppure con fili di Kirschner nel caso di poli prossimali piccoli ^{17, 33}.

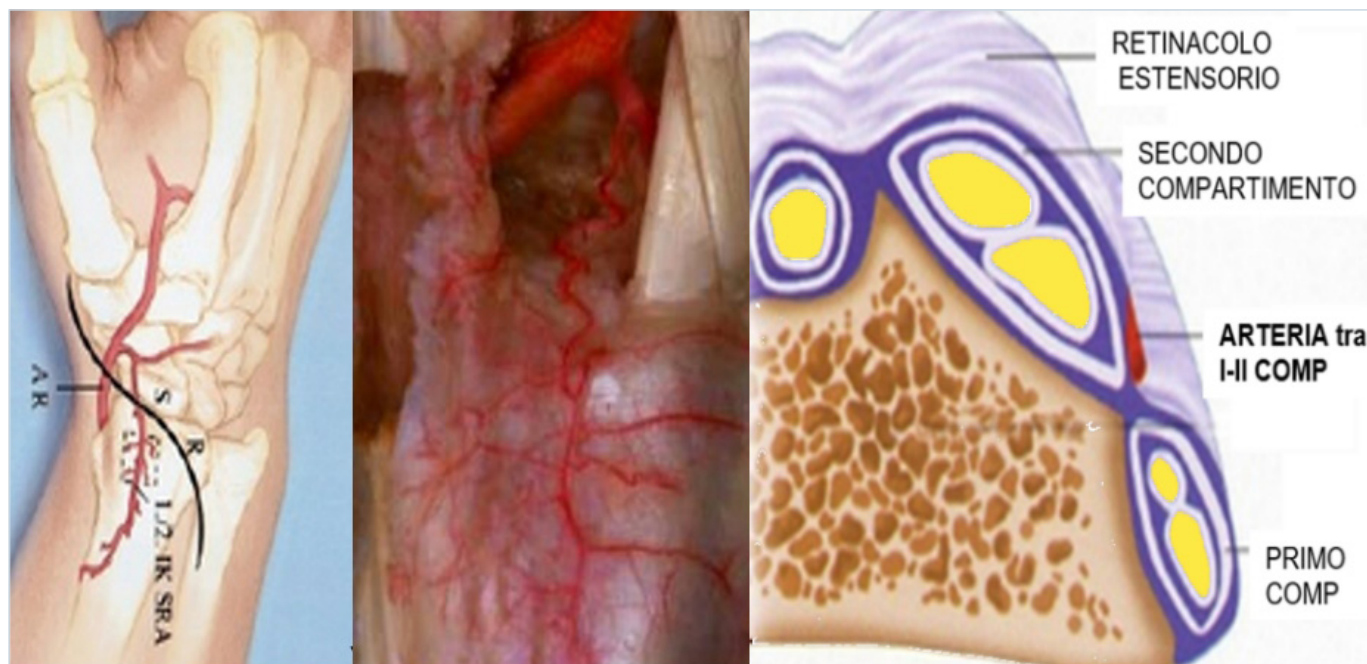


Figura 1. 1,2 ICSRA origina dall'arteria Radiale ed è costante; Intercompartimentale I-II sovraretinacolare, tra il primo e il secondo compartimento estensorio.

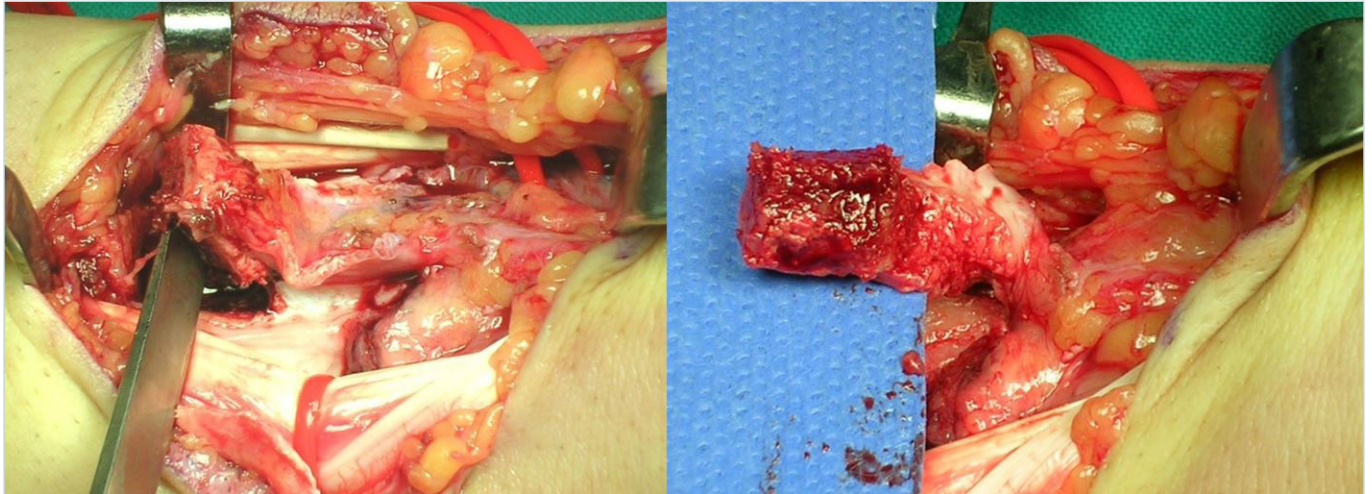


Figura 2. Particolare della tecnica chirurgica del prelievo del lembo inetercomartimentale I-II -lo strumentario di taglio piezoelettrico aiuta molto nel prelievo di piccoli lembi.

L'intervento non richiede microanastomosi, presenta morbidità minima del sito donatore e offre un eccellente equilibrio tra efficacia biologica e semplicità tecnica. I tassi di consolidazione riportati variano tra l'75 e il 90 %, anche nei casi con necrosi parziale del polo prossimale⁸, mentre le complicanze sono rare e generalmente lievi, comprendendo il fallimento complessivo del lembo (riportato a circa il 2% per gli innesti vascularizzati dell'arto superiore) o sintomi transitori quali rigidità e dolore o parestesie lievi al sito donatore^{13, 38}. Il successo di questa metodica deriva dalla combinazione di apporto vascolare diretto, stabilità meccanica adeguata e ridotta morbidità, che la rendono la prima opzione nei casi di pseudoartrosi prossimale vitali o parzialmente ischemiche, purché il difetto non sia eccessivamente voluminoso e il chirurgo disponga dell'esperienza necessaria per la dissezione del peduncolo.

4.1.2. Volare su arteria carpale/palmo-radiocarpale (Mathoulin/Kuhlmann)

Il lembo volare di Mathoulin e Kuhlmann è un innesto peduncolato basato sull'arteria carpale volare o palmo-radiocarpale, indicato per le pseudoartrosi localizzate al terzo medio o distale dello scafoide, in particolare in presenza di deformità hump-back o instabilità DISI^{35, 39, 40}. Questo approccio consente di associare correzione strutturale e apporto biologico, permettendo di ristabilire la lunghezza e l'allineamento del carpo^{5, 40} (Fig. 3). L'accesso chirurgico è volare, eseguito lungo il margine radiale del tendine del flessore radiale del carpo. Dopo aver isolato il peduncolo vascolare sull'arteria carpale volare o palmo-radiocarpale, si procede al prelievo di un blocco osseo di circa 12 × 8 × 4 mm, scolpito a forma di cuneo per consentire la correzione dell'angolazione e il ripristino della

curvatura anatomica dello scafoide. Il letto ricevente viene preparato con rimozione completa della fibrosi e dello sclerosi residua fino a ottenere osso vitale, quindi l'innesto viene posizionato mantenendo la perfusione del peduncolo.

La fissazione è solitamente ottenuta mediante vite compressiva diretta dal polo distale verso quello prossimale (Fig. 4), che garantisce stabilità assiale; nei casi più instabili è possibile aggiungere fili di Kirschner temporanei per protezione meccanica^{5, 6}. Questa tecnica offre un vantaggio meccanico significativo nella correzione strutturale volare, senza necessità di microchirurgia, ma la quantità di osso disponibile è limitata e richiede una pianificazione accurata.

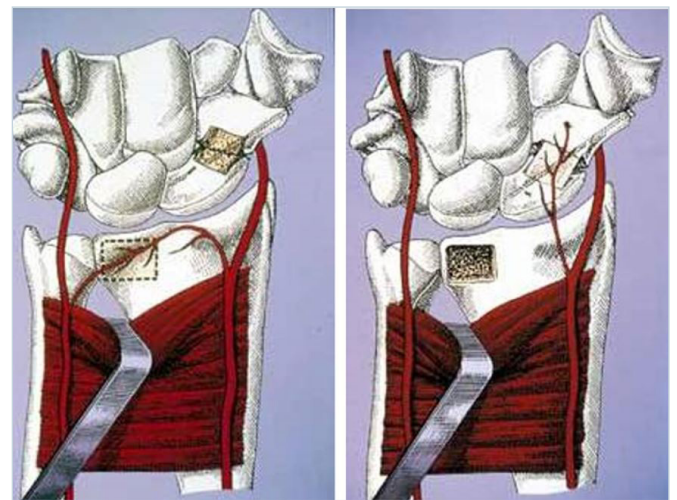


Figura 3. Descrizione del Dr Matoulin dell'anatomia e prelievo del lembo osseo volare descritto da Kuhlmann.



Figura 4. Recidiva di pseudoartrosi dopo innesto tradizionale e cimbra a sinistra – innesto vascolarizzato volare e sintesi con vite nel reintervento – buona evoluzione della pseudoartrosi.

I tassi di consolidazione riportati variano tra 85 e 95 %, con tempi medi di guarigione di 10–12 settimane, mentre le complicanze sono rare e generalmente limitate a rigidità moderata o irritazione cutanea radiale ^{5, 35}.

Innesti liberi (microvascolari)

Lembo osseo libero da condilo femorale mediale (MFC) ± troclea (MFT)

Il lembo libero da condilo femorale mediale (MFC) rappresenta la soluzione di riferimento nei casi complessi con necrosi avascolare completa del polo prossimale, difetti ossei superiori a 5 mm o fallimenti multipli di precedenti ricostruzioni ^{12, 24, 25}. Si tratta di un innesto cortico-spongioso o osteocondrale basato sull'arteria genicolata discendente o supe-

romediale, caratterizzato da flusso costante e da un'elevata versatilità in termini di forma e volume (Fig. 5).

L'incisione mediale del ginocchio, centrata sul condilo femorale mediale, consente di isolare il peduncolo vascolare e di prelevare un blocco osseo di circa 20×10×8 mm, modellato in base al difetto da colmare. Il prelievo viene generalmente eseguito in due équipe operative per ridurre i tempi chirurgici. Dopo accurata preparazione del letto ricevente e verifica della perfusione, l'innesto viene anastomizzato microchirurgicamente ai rami dell'arteria radiale o dell'arteria interossea dorsale, quindi stabilizzato mediante una o due viti compressive; nei casi con qualità ossea compromessa, si possono associare fili di Kirschner di protezione ^{12, 28}.

Dal punto di vista tecnico, si distinguono due varianti principali:

- MFC cortico-spongioso standard, utilizzato per difetti strutturali ossei senza coinvolgimento articolare, in cui l'obiettivo primario è ripristinare la continuità e la stabilità meccanica ^{24, 38}.
- MFT (Medial Femoral Trochlea) osteocondrale, prelevato con superficie cartilaginea integra, indicato nei casi in cui sia necessario sostituire il polo prossimale articolare e ripristinare la congruenza con il carpo ^{25, 41, 42} (Fig. 6).

Questa tecnica garantisce un apporto biologico e strutturale completo, con tassi di consolidazione del 90–95 % e tempi medi di unione di 10–12 settimane, sia nelle pseudoartrosi complesse che negli interventi di revisione. La morbidità del sito donatore è generalmente inferiore al 5 %, limitata a dolore mediale temporaneo o rigidità lieve del ginocchio, senza deficit funzionali permanenti. Grazie alla sua combinazione di perfusione affidabile, capacità strutturale e possibilità di variante osteocondrale, il lembo MFC/MFT rappresenta una delle opzioni più versatili e biologicamente efficaci nella chirurgia ricostruttiva dello scafoide ^{12, 24, 38, 42}.

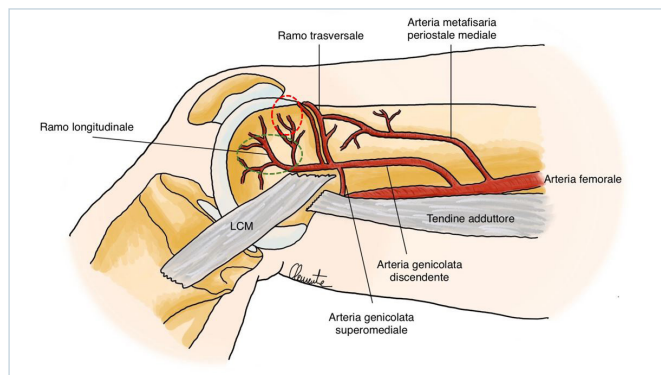


Figura 5. Anatomia della vascolarizzazione de Condilo femorale mediale – si notano bene i due rami trasverso ed ascendente che provengono dal vaso principale l'arteria genicolata discendente. Il ramo trasverso è il ramo su cui si basa il lembo osteoperiosteo ed il ramo ascendente è quello su cui si basa la vascolarizzazione per il lembo Osteocondrale.

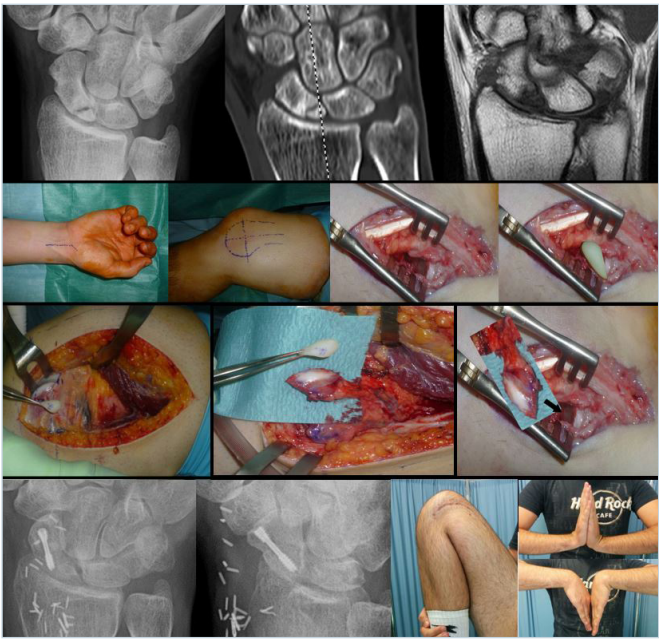


Figura 6. Ricostruzione del polo prossimale dello scafoide con innesto osteocondrale da condilo femorale mediale – in altromil quadro RX preoperatorio – la tecnica chirurgica al centro – risultato clinico e radiografico in basso.

Altri innesti liberi o vascolarizzati selettivi

Oltre al lembo libero da condilo femorale mediale, sono state descritte altre opzioni microvascolari o a basso volume

biologico con indicazioni limitate. Tra queste, l'innesto da cresta iliaca microvascolare trova impiego nei difetti ossei ampi quando il MFC non è disponibile, ma è oggi poco utilizzato per la minore modellabilità del blocco e per la maggiore morbidità del sito donatore, che ne limitano l'applicazione clinica^{5,6}.

Un'alternativa biologica meno invasiva è rappresentata dal *lembo periosteo vascolarizzato dalla base del secondo metacarpo*, basato sull'arteria metacarpale dorsale. Si tratta di una procedura rapida e mini-invasiva, indicata nelle pseudoartrosi fibrose o parzialmente ischemiche con gap inferiore a 3 mm, dove fornisce un efficace stimolo osteogenico mantenendo una morbidità donatrice trascurabile⁴³.

L'accesso dorsale radiale consente di identificare il peduncolo vascolare e sollevare il lembo periosteo mantenendone la perfusione. Dopo il curettage della pseudoartrosi e la preparazione del letto ricevente, il lembo viene fissato direttamente al focolaio mediante fili di Kirschner sottili, agendo come stimolo biologico senza fornire supporto meccanico. Nelle casistiche riportate, il tasso di consolidazione varia tra 85 e 90 %, con tempi medi di unione di 8–10 settimane^{5,6,14}.

Questa metodica, classificabile come mini-VBG locale, rappresenta una soluzione semplice, sicura e biologicamente efficace nei casi con deficit limitato o polo prossimale parzialmente vitale, ma non è indicata nei difetti maggiori o nelle necrosi complete, dove è necessario un apporto strutturale. Infine, altri lembi pedunculati locali — come i *2,3-ICSRA*, i *lembi metacarpali* o il *pisiforme vascolarizzato* — trovano

Tabella 1. Confronto sintetico delle tre opzioni principali – Union rate riportato (range) in AVN; tempo medio di unione (settimane); complicanze minori.

Tecnica	Tipo	Indicazioni principali	Vantaggi chiave	Limiti	Mezzo di sintesi preferito	Riferimenti
1,2-ICSRA (Zaidenberg)	Pedunculato locale	AVN/prossimale; difetti piccoli-medi; revisione NVBG	Nessuna microanastomosi; morbidità bassa	Volume e arco di rotazione limitati; tecnica specialistica	Vite se possibile; K-wire nei poli piccoli	Zaidenberg et al., 1991; Pinder et al., 2015; Testa et al., 2022; McCarty et al., 2023
Volare (Mathoulin/Kuhlmann)	Pedunculato locale	Terzo medio con hump-back ; correzione strutturale	Cuneo volare strutturale; correzione dell'allineamento	Volume limitato; richiede accesso volare	Vite compressiva ± K	Kuhlmann et al., 1987; Mathoulin & Haerle, 1998; Mathoulin et al., 2010; Testa et al., 2022
MFC/MFT libero	Libero microvascolare	AVN severa; grandi difetti; revisione; ostecondrale	Grande volume/qualità; opzione osteocondrale	Microchirurgia; morbidità donatore	Vite compressiva ± K	Bürger et al., 2013; Keller et al., 2020 Testa et al., 2022

oggi impiego solo in circostanze eccezionali e con indicazioni estremamente ristrette e non abbiamo esperienza.

La presente revisione si concentra pertanto sui tre pilastri principali del trattamento vascularizzato dello scafoide: il lembo dorsale 1,2-ICSRA, il volare tipo Mathoulin, e il lembo libero da condilo femorale mediale (Tab. I).

Sintesi e orientamento terapeutico

La scelta del lembo vascularizzato più appropriato dipende essenzialmente da tre fattori: la vitalità ossea, l'ampiezza del difetto e le esigenze biomeccaniche della ricostruzione. Nei casi di necrosi completa del polo prossimale, fallimenti chirurgici precedenti o difetti ampi, la soluzione più indicata è il lembo libero da condilo femorale mediale (MFC/MFT), capace di fornire un apporto biologico e strutturale superiore grazie alla possibilità di modellazione volumetrica e, se necessario, di sostituzione osteocondrale^{5,41}.

Quando il polo prossimale è ancora parzialmente vitale o il difetto è contenuto, ma si desidera potenziare la biologia locale, trova indicazione il lembo peduncolato 1,2-ICSRA, caratterizzato da affidabilità, semplicità tecnica e morbidità minima^{29,36}.

Nelle pseudoartrosi del terzo medio con deformità hump-back e necessità di correzione strutturale volare, l'approccio preferibile è quello volare di Mathoulin/Kuhlmann, che consente di ripristinare la lunghezza e l'allineamento dello scafoide, riservando invece il lembo MFC ai casi con perdita

più estesa di sostanza ossea^{35,40,41}.

In condizioni meno complesse o con deficit biologico limitato, può essere preso in considerazione il lembo periosteale vascularizzato del secondo metacarpo, che fornisce uno stimolo osteogenico efficace con morbidità trascurabile, pur non offrendo un contributo strutturale significativo^{5,6} (Fig. 7).

Complessivamente, tutte le tecniche descritte mostrano tassi di consolidazione elevati (80-95%) e tempi medi di guarigione di circa 10-12 settimane, con differenze che riguardano principalmente la complessità chirurgica, il volume osseo fornito e la capacità di correzione strutturale.

Il principio tecnico fondamentale resta invariato: mantenere l'equilibrio tra biologia e stabilità meccanica. Un innesto perfuso ma instabile fallirà tanto quanto una sintesi rigida su osso necrotico. La pianificazione chirurgica deve quindi basarsi su una valutazione accurata della vitalità del letto osseo, dell'entità del difetto e della possibilità di garantire una fissazione compressiva efficace.

Mezzi di sintesi e principi biomeccanici della fissazione

La scelta del mezzo di sintesi, più ancora del tipo di innesto, determina la qualità della stabilità locale e quindi la probabilità di ottenere un'unione primaria in tempi fisiologici. L'obiettivo è combinare compressione interframmentaria, stabilità rotazionale e neutralizzazione delle forze di taglio, adattando il costrutto alla biologia disponibile^{9,13}. In termini pratici, viti a compressione "headless" e fili di Kirschner rappresentano gli strumenti principali; in scenari selezionati si impiegano configurazioni ibride⁵.

Vite a compressione tipo Herbert

La vite a compressione (Herbert-like o equivalenti) è la soluzione elettiva quando l'anatomia lo consente, perché fornisce compressione assiale controllata e rigidità superiore rispetto al solo filo, riducendo micromovimenti e rischio di cedimento in rotazione^{5,9,13}. È particolarmente indicata nel lembo volare di Mathoulin/Kuhlmann, dove l'innesto è spesso un cuneo strutturale che necessita di una compressione stabile per mantenere la correzione della *hump-back* (Fig 8); è ugualmente preferibile nel lembo libero MFC, in cui il blocco cortico-spongioso modellato richiede un ancoraggio rigido per trasmettere carichi precoci senza perdita della riduzione^{5,35,41}. I vantaggi includono migliore controllo della riduzione, minore necessità di immobilizzazione prolungata e assenza di rimozione routinaria dell'impianto. I limiti emergono quando il polo prossimale è molto piccolo o fragile: in tali casi, il tunnel della vite rischia di sacrificare eccesso di stock osseo o di "spaccare" il frammento, vanificando l'apporto biologico dell'innesto²⁹ (Fig. 9).



Figura 7. Indicazione al tipi di ricostruzione a seconda della sede e dimensioni del difetto osseo.



Figura 8. Ampio innesto vascolarizzato da condilo femorale mediale per la parte intermedia dello scafoide sintetizzato con vite di Herbert.

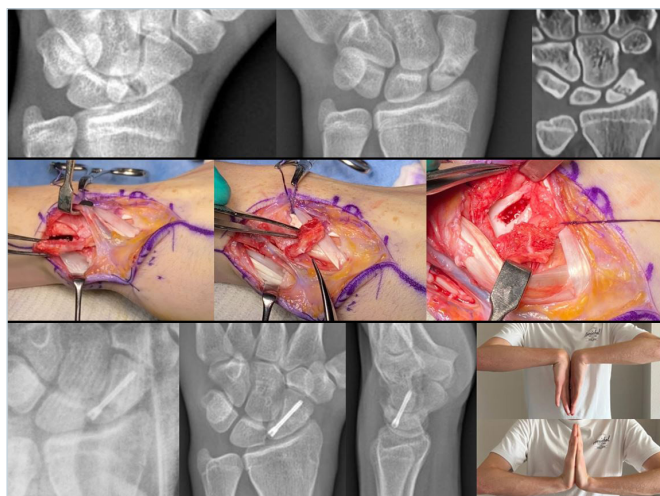


Figura 9. Sintesi con vite di Herbert di un polo prossimale – tecnica I-II intercomartmentale/Zeidemberg – preop, in-trope e evoluzione radiografica e clinica.

Fili di Kirschner

I fili di Kirschner garantiscono un fissaggio meno rigido ma meno invasivo rispetto alla vite, occupano meno spazio favorendo quindi un maggior contatto fra l'innesto e lo scafoide. Risultando particolarmente utili quando il frammento prossimale è di dimensioni ridotte o quando si desidera proteggere temporaneamente un costrutto già compresso da vite^{5,6,11,16}. Sono spesso la scelta prudente nel lembo 1,2-ICSRA quando il polo prossimale non consente un passaggio sicuro della vite, e costituiscono la fissazione di elezione nel lembo periosteo del II metacarpo, dove l'obiettivo è prevalentemente biologico e il supporto strutturale limitato^{6,36}. I punti critici sono la minor resistenza al carico torsionale e la necessità di rimozione (di norma a consolidazione avviata), con potenziale rischio di infezione del tragitto cutaneo se i fili sono tran-

scutanei. In termini di outcome, quando l'immobilizzazione è adeguata e la biologia è favorevole, i risultati in termini di unione sono sovrapponibili alla vite in molti scenari selezionati, pur con tempi talora leggermente più lunghi^{18,29}. Sono

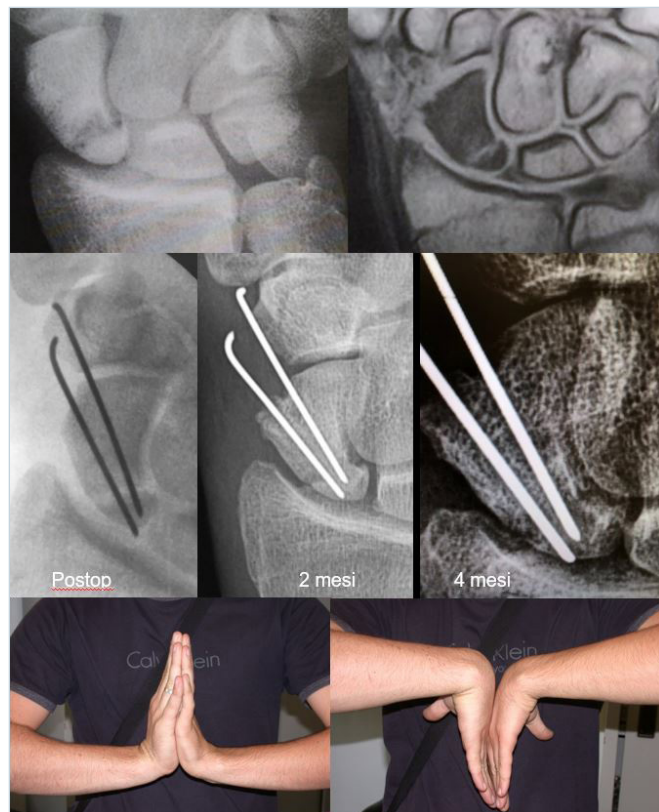


Figura 10. Osteosintesi con 2 fili di K per la sintesi di un piccolo polo prossimale che è stato riparato con un innesto vascolarizzato dorsale da I-II compartimento sec Zeidemberg – buona guarigione a 2 mesi con buon risultato clinico finale.

di norma due ma possono essere anche 3. Non è consigliato un filo singolo (Fig. 10).

Configurazioni ibride e scelte contestuali

Nel lembo libero MFC, una strategia frequente prevede vite compressiva principale associata a uno o due fili di K di protezione in presenza di osso ricevente fragile o di gap ampio, con rimozione secondaria dei fili una volta stabilizzata la guarigione⁴¹. Nel lembo 1,2-ICSRA, l'utilizzo della vite è raccomandato solo quando il frammento prossimale è sufficientemente voluminoso da accettare un canale centrale senza compromettere la perfusione residua; in caso contra-

rio, l'opzione "all-K-wire" riduce il rischio di frammentazione iatrogena e di eccessiva devascularizzazione^{6,11,36}. Per il lembo volare, la vite è preferibile per mantenere la correzione del cuneo; eventuali K-wire possono essere impiegati come "anti-rotazionali" temporanei fino alla maturazione dell'innesto^{33,35,44}.

Immobilizzazione post-operatoria e tempi

L'entità dell'immobilizzazione dipende dal tipo di fissazione e dalla qualità del letto osseo. Dopo fissazione con vite in osso vitale e costruito stabile, l'immobilizzazione può essere più breve, con progressione controllata della mobilizzazione una volta superata la fase infiammatoria iniziale; in presenza di K-wire o di osso parzialmente ischemico, l'immobilizzazione tende a essere più lunga, con rimozione dei fili a consolidazione clinico-radiografica avviata^{5,13}. L'obiettivo rimane evitare micro-movimenti di taglio nelle prime settimane, periodo in cui l'innesto vascolarizzato integra il proprio apporto ematico con il letto ricevente.

Complicanze correlate ai mezzi di sintesi

Le complicanze tipiche della vite includono malposizionamento, perdita della compressione per "settling" dell'innesto, o conflitto intra-articolare se la traiettoria non è corretta; la loro incidenza si riduce con un accurato controllo fluoroscopico nelle proiezioni dedicate dello scafoide^{24,28}. Nei costrutti con K-wire, le criticità più frequenti sono migrazione, pin-track irritation/infection e perdita della riduzione in rotazione se l'immobilizzazione è inadeguata; la rimozione dei fili riduce il rischio infettivo e facilita la ripresa della mobilità^{16,24}. In termini di esito finale, la letteratura conferma che la stabilità meccanica adeguata è un determinante indipendente di unione, a prescindere dal tipo di innesto, con risultati migliori quando compressione e controllo rotazionale sono ottimizzati^{18,29}.

Criteri pratici di scelta

Quando è necessario mantenere una correzione strutturale (cuneo volare) o ancorare un blocco cortico-spongioso (MFC), la vite headless è generalmente la scelta più appropriata, eventualmente coadiuvata da K-wire di protezione. Nelle pseudoartrosi con polo prossimale piccolo e fragile, specie in presenza di innesto peduncolato 1,2-ICSRA, i K-wire offrono un buon compromesso tra stabilizzazione e risparmio di stock osseo; lo stesso vale per l'innesto periosteo del II metacarpo, in cui la finalità è soprattutto biologica. In tutti i casi, la pianificazione deve evitare qualunque scelta che, in nome della rigidità, sottragga vascolarità o indebolisca il frammento al punto da vanificare l'apporto dell'innesto^{5,35,36,41}.

Complicanze e morbidità

Le complicanze nel trattamento chirurgico della pseudoartrosi dello scafoide con innesti vascolarizzati possono interessare sia il **sito ricevente**, dove la stabilità e la perfusione dell'innesto sono determinanti per l'unione, sia il **sito donatore**, la cui morbidità dipende dall'estensione del prelievo e dal tipo di lembo scelto. La loro incidenza complessiva, pur contenuta, costituisce un elemento cruciale nella valutazione dell'efficacia globale della procedura.

Complicanze del sito ricevente

Le complicanze locali derivano prevalentemente da errori tecnici o da fattori biologici sfavorevoli. Tra le più frequenti si annoverano il ritardo o mancato attecchimento dell'innesto, la perdita della riduzione e la necrosi residua del polo prossimale. Nelle serie di Merrell et al. (2002) e Pinder et al. (2015) la pseudoartrosi persistente si verifica in circa il 10 % dei casi, più frequentemente nei pazienti con necrosi avascolare totale o in cui la stabilità meccanica era insufficiente. Complicanze minori comprendono rigidità articolare transitoria ($\leq 5\%$), dolore dorsoradiale, e irritazione tendinea secondaria al materiale di sintesi^{11,24}. L'infezione superficiale del tragitto dei fili di Kirschner è riportata in meno del 3 % dei casi e si risolve generalmente con rimozione precoce del filo e terapia antibiotica¹⁶. Nel lembo libero MFC, la perdita parziale della perfusione dell'innesto è rara ($< 5\%$) se l'anastomosi è eseguita con adeguato flusso; la necrosi completa del lembo è eccezionale ($< 1\%$) e quasi sempre correlata a errore tecnico^{33,38}. La recidiva di deformità o il collasso secondario possono comparire nei casi in cui la fissazione non mantenga la correzione strutturale, in particolare nei lembi volari quando la vite non garantisce compressione costante. Per questo motivo la stabilità del costrutto deve essere verificata sotto scopia intraoperatoria in proiezioni dedicate dello scafoide^{5,33}.

Complicanze del sito donatore

La morbidità del sito di prelievo varia notevolmente a seconda dell'origine del lembo. Nel lembo 1,2-ICSRA e nel lembo volare, le complicanze sono generalmente lievi e limitate a dolore locale o ipoestesia radiale transitoria; l'instabilità tendinea o la frattura del radio distale sono eccezionali ($< 1\%$)^{5,35,36}. Per l'innesto periosteo del II metacarpo, non sono riportate complicanze clinicamente rilevanti: la procedura lascia un difetto minimo e non altera la funzione metacarpale⁶. Nel lembo libero MFC, le complicanze specifiche riguardano il ginocchio donatore. Dolore mediale post-operatorio di lieve entità è osservato nel 5-10 % dei casi, generalmente autolimitante; alterazioni della sensibilità cutanea o ematomi superficiali sono occasionali^{24,42,44}. In rari casi ($< 1\%$) è descritta rigidità articolare temporanea, mentre non sono

riportate instabilità o deficit funzionali significativi. La ricostruzione accurata del periostio e una mobilitazione precoce riducono ulteriormente tale rischio ^{5,6}.

Cause di fallimento e prevenzione

Le principali cause di fallimento identificabili in letteratura sono tre: inadeguata perfusione, instabilità meccanica e mancata correzione dell'allineamento. La necrosi residua del polo prossimale è più frequente quando il letto osseo ricevente non viene sbrigliato fino a osso vitale o quando la perfusione del lembo è compromessa da eccessiva trazione del peduncolo ²⁹. La perdita della riduzione deriva più spesso da fissazioni insufficientemente compressive o da uso improprio dei soli fili di K in costrutti strutturali. La prevenzione consiste nell'accurata verifica intraoperatoria del sanguinamento osseo, nella stabilizzazione compressiva stabile e nel controllo radiografico in più proiezioni. Nei lembi liberi, l'impiego del microscopio operatorio e il monitoraggio del flusso riducono in modo significativo il rischio di trombosi precoce ^{5, 24, 28}.

Discussione

Evidenza attuale

L'analisi complessiva della letteratura mostra che, nonostante la crescente diffusione degli innesti ossei vascolarizzati, non esiste una superiorità statistica assoluta rispetto agli innesti non vascolarizzati nei casi di pseudoartrosi dello scafoide con osso vitale ^{9, 16}. Gli NVBG restano un'opzione affidabile, con tassi medi di consolidazione compresi tra il 75 e il 90 %, soprattutto nei casi non complicati, senza necrosi avascolari e con allineamento mantenuto ^{18, 27}. L'introduzione degli innesti vascolarizzati ha tuttavia migliorato i risultati nei casi più complessi, in particolare in presenza di AVN del polo prossimale, pseudoartrosi croniche o fallimenti chirurgici precedenti. In questi contesti, la perfusione garantita dal peduncolo arterioso aumenta i tassi di consolidazione e riduce i tempi di guarigione ^{6, 24}.

Un limite importante della letteratura è la qualità metodologica complessivamente modesta: la maggior parte degli studi è retrospettiva, con campioni ridotti e follow-up eterogenei, rendendo difficile trarre conclusioni definitive sulla superiorità di una tecnica rispetto all'altra ^{5, 20}.

Un'ulteriore fonte di variabilità deriva dalla mancanza di criteri uniformi per definire la necrosi avascolare: alcuni studi si basano sulla sola RMN, altri sulle evidenze intraoperatorie di sanguinamento o sulla correlazione istologica ^{32, 34}.

Confrontando le diverse tecniche, il lembo dorsale 1,2-ICSRA rimane il più utilizzato nelle pseudoartrosi del polo prossimale, con risultati clinici costantemente favorevoli ^{17, 37}. Il lembo volare di Mathoulin è invece preferibile nelle defor-

mità "hump-back" o nei difetti strutturali centrali, grazie alla sua capacità di ripristinare la colonna volare e la morfologia dello scafoide ^{35, 40}. Il lembo libero MFC rappresenta infine l'opzione biologicamente più potente e versatile, con ottimi risultati nei casi di AVN avanzata o dopo fallimenti multipli ^{24, 28}.

In sintesi, la scelta dell'innesto ottimale non dipende dal tipo di lembo in sé, ma dalla capacità di adattare la strategia terapeutica al contesto biologico e meccanico specifico di ciascun paziente, integrando criticamente le evidenze disponibili ^{10, 33}.

Considerazioni pratiche e decisionali

Dal punto di vista clinico, la decisione terapeutica deve poggiare su una valutazione integrata di biologia, meccanica e tempistica. L'innesto non vascolarizzato resta il gold standard nei casi semplici, con vascolarizzazione intatta e assenza di deformità, grazie alla sua semplicità tecnica, ai tempi operatori ridotti e ai risultati prevedibili ^{18, 29}. Tuttavia, nei casi in cui la biologia sia compromessa, l'apporto vascolare diventa il fattore limitante della guarigione: in queste situazioni, l'innesto vascolarizzato — sia esso locale o libero — rappresenta una strategia di "biological augmentation" che offre un vantaggio significativo.

Il chirurgo deve pertanto riconoscere precocemente le condizioni che richiedono un approccio vascolarizzato:

Necrosi del polo prossimale con assenza di sanguinamento intraoperatorio;

Pseudoartrosi croniche (> 12 mesi) con sclerosi marcata;

Recidive o fallimenti di NVBG;

Difetti strutturali estesi o deformità instabili.

La personalizzazione dell'approccio è la chiave del successo. Le tecniche peduncolate (1,2-ICSRA, Mathoulin) sono preferibili quando è possibile limitare la morbidità e garantire un peduncolo di lunghezza adeguata; il lembo libero MFC deve invece essere considerato la soluzione di salvataggio definitiva, in grado di unire volume, perfusione e adattabilità anatomica ^{24, 28, 38}.

Dal punto di vista funzionale, il recupero medio di range of motion e forza di presa è simile tra VBG e NVBG, con valori rispettivamente del 90–95 % e 85–90 % rispetto al controlaterale, purché l'unione sia ottenuta ^{5, 29}. Inoltre, gli studi indicano che la soddisfazione soggettiva del paziente è più correlata al ritorno alla funzione che al tipo di innesto eseguito, sottolineando l'importanza del protocollo riabilitativo postoperatorio.

In conclusione, la biologia orienta la scelta, ma la meccanica ne garantisce il risultato. Una perfusione adeguata è necessaria ma non sufficiente: solo un costrutto stabile consente la guarigione. È quindi essenziale mantenere un equilibrio costante tra apporto vascolare e stabilità compressiva.

Prospettive future

Le prospettive evolutive della chirurgia dello scafoide si muovono in tre direzioni principali. La prima è l'affermazione di approcci mini-invasivi e artroscopici, che mirano a ridurre la morbidità e a preservare la vascolarità residua. Gli studi più recenti hanno mostrato che l'utilizzo di micro-innesti spongiosi autologhi o bone chips vascolarizzati inseriti per via artroscopica, associati a vite compressiva, può ottenere risultati comparabili a quelli degli approcci tradizionali, con minore rigidità e recupero più rapido^{8,13}.

La seconda è rappresentata dalla pianificazione 3D e dalla chirurgia personalizzata. La ricostruzione tridimensionale preoperatoria e la stampa di modelli anatomici consentono oggi di simulare il posizionamento dell'innesto, pianificare l'orientamento della vite e ridurre il tempo di adattamento intraoperatorio, con potenziale impatto positivo sulla precisione e sulla stabilità del costrutto¹³.

Infine, la terza direzione — ancora sperimentale — è quella della rigenerazione tissutale e dell'ingegneria biologica. L'associazione di cellule staminali mesenchimali e scaffold biomimetici rappresenta un campo di ricerca promettente per migliorare l'osteogenesi e ridurre la necessità di innesti vascolarizzati tradizionali. Sebbene i dati clinici siano ancora preliminari, questi approcci suggeriscono una possibile evoluzione verso strategie meno invasive e più biologicamente mirate¹¹.

Nel complesso, la direzione futura sembra convergere verso una chirurgia dello scafoide sempre più biologicamente consapevole e tecnologicamente assistita, in cui la precisione meccanica si integra con l'ottimizzazione vascolare e rigenerativa, aprendo prospettive di trattamento personalizzato anche nei casi finora considerati di difficile guarigione.

Conclusioni

La pseudoartrosi dello scafoide rimane una condizione complessa, in cui il successo dipende dall'integrazione equilibrata tra biologia, stabilità meccanica e valutazione clinica individuale.

Gli innesti vascolarizzati non rappresentano una soluzione universalmente superiore, ma uno strumento selettivo da impiegare nei casi in cui si verificano necrosi, fallimenti precedenti o deficit biologici marcati.

Nei casi semplici e vitali, l'innesto non vascolarizzato mantiene risultati eccellenti e deve rimanere il gold standard.

La chiave del successo chirurgico risiede nella selezione accurata del paziente, nella valutazione intraoperatoria della vitalità ossea e nella fissazione compressiva stabile, principi che restano validi indipendentemente dalla tecnica adottata. Le prospettive future — dagli approcci mini-invasivi e artroscopici alla pianificazione 3D e alle strategie rigenerative —

mirano non tanto a sostituire le tecniche attuali, quanto a raffinarne l'indicazione e la precisione, rendendo la chirurgia dello scafoide sempre più personalizzata, predittiva e biologicamente orientata.

Bibliografia

- Kawamura K, Chung KC. Treatment of scaphoid fractures and nonunions. *J Hand Surg Am.* 2008 Jul-Aug;33(6):988-97. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2008.04.026>. PMID: 18656779; PMCID: PMC4405116.
- Labèr R, Lautenbach G, Schweizer A. Reasons for scaphoid non-union: Analysis of behavior of health care providers and patients. *Hand Surg Rehabil.* 2024 Apr;43(2):101662. <https://doi.org/10.1016/j.hansur.2024.101662>. Epub 2024 Feb 13. PMID: 38354948.
- Steinmann SP, Adams JE. Scaphoid fractures and nonunions: diagnosis and treatment. *J Orthop Sci.* 2006 Jul;11(4):424-31. <https://doi.org/10.1007/s00776-006-1025-x>. PMID: 16897211; PMCID: PMC2780658.
- Patterson ED, Elliott C, Dhaliwal G, et al. Risk Factors for the Development of Persistent Scaphoid Non-Union After Surgery for an Established Non-Union. *Hand (N Y).* 2025 May;20(3):371-379. <https://doi.org/10.1177/15589447231219523>. Epub 2024 Jan 9. PMID: 38193424; PMCID: PMC11571442.
- Testa G, Lucenti L, D'Amato S, Sorrentino M, Cosentino P, Vescio A, Pavone V. Comparison between Vascular and Non-Vascular Bone Grafting in Scaphoid Nonunion: A Systematic Review. *J Clin Med.* 2022 Jun 14;11(12):3402. <https://doi.org/10.3390/jcm11123402>.
- Karaismailoglu B, Kaynak G, Kabukcuoglu YS. Vascularized bone grafting for scaphoid nonunion. *World J Orthop.* 2020;11(11):480-93. <https://doi.org/10.1302/2058-5241.5.190021>
- Nagura N, Naito K, Sugiyama Y, Obata H, Goto K, Kaneko A, Tomita Y, Iwase Y, Kaneko K, Ishijima M. Correction of hump-back and DISI deformities by vascularized bone grafting in patients with scaphoid nonunion. *SICOT J.* 2021;7:13. <https://doi.org/10.1051/sicotj/2021011>. Epub 2021 Mar 11. PMID: 33704058; PMCID: PMC7949886.
- Baamir MA, Al Harthi MS, Alhazmi MH, et al. Vascularized bone grafts in scaphoid nonunion: a systematic review and meta-analysis. *J Hand Surg Glob Online.* 2024;6(3):281-93.
- Fujihara, Y., Yamamoto, M., Hidaka, S., Sakai, A., & Hirata, H. (2023). Vascularised versus non-vascularised bone graft for scaphoid nonunion: Meta-analysis of randomised controlled trials and comparative studies. *JPRAS Open*, 35, 76-88.
- Higgins, J. P., & Giladi, A. M. (2021). Scaphoid Nonunion Vascularized Bone Grafting in 2021: Is Avascular Necrosis the sole determinant? *Journal of Hand Surgery (American Volume)*, 46(9): 801-806.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2021.05.014>
- Bandinelli, D., Pagnotta, A., Piperno, A., Marsiolo, M., Aulisa, A. G., & Falciglia, F. (2025). Surgical Treatment of Scaphoid Non-Union in Adolescents: A Modified Vascularized Bone Graft Technique. *Children*, 12(9): 1135 <https://doi.org/10.3390/>

- children12091135
- ¹² Kilic, E., Unal, K. O., Ozdemir, G., Bingol, O., Keskin, O. H., Akinci, M. Evaluation of free vascularized medial femoral condyle bone grafts in the treatment of avascular scaphoid waist nonunion. *Jt Dis Relat Surg.* 2023;34(3):661–668. <https://doi.org/10.52312/jdrs.2023.1009>
 - ¹³ Bocchino G, Cannella A, Santoro A, El Motassime A, Cavola F, Sassari GM, Caruso L, Comodo RM, Liuzza F, De Vitis R. Surgical treatment of carpal scaphoid non-union: a systematic review. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology.* 2025;35:287. <https://doi.org/10.1007/s00590-025-04410-5>
 - ¹⁴ Çolak İ, Akgün E, Kılıç Z, Özel M. Vascularized bone grafting in the treatment of scaphoid nonunion: a clinical and functional outcome study. *J Wrist Surg.* 2021;11(4):288–294. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1733941>
 - ¹⁵ Nandi SK, Roy S, Mukherjee P, Kundu B, De DK, Basu D. Orthopaedic applications of bone graft & graft substitutes: a review. *Indian J Med Res.* 2010 Jul;132:15-30. PMID: 20693585.
 - ¹⁶ Fan S, Suh N, MacDermid JC, Ross D, Grewal R. Vascularized versus non-vascularized bone grafting for scaphoid nonunion without avascular necrosis: a randomized clinical trial. *J Hand Surg Eur Vol.* 2023;48(7):648–653. <https://doi.org/10.1177/17531934231158992>
 - ¹⁷ Mohiuddin, M., Das, B. K., Manzur, R. M., Alam, J., & Shaude, S. E. (2023). The Outcome of Scaphoid Fracture Nonunion Managed by 1,2 Intercompartmental Supraretinacular Artery (1,2 ICSRA) Vascularized Bone Graft. *Cureus*, 15(10), e47489. <https://doi.org/10.7759/cureus.47489>
 - ¹⁸ Merrell GA, Wolfe SW, Slade JF 3rd. Treatment of scaphoid nonunions: quantitative meta-analysis of the literature. *J Hand Surg Am.* 2002 Jul;27(4):685-91. <https://doi.org/10.1053/jhsu.2002.34372>. PMID: 12132096.
 - ¹⁹ Guria, A., Vaibhav, K., Kumar, N., & Kullu, S. (2025). Vascularized Versus Non-vascularized Bone Grafting for Scaphoid Non-union: A Meta-Analysis. *Cureus*, 17(1), e77711. <https://doi.org/10.7759/cureus.77711>.
 - ²⁰ Ferguson, D.O., Shanbhag, V., Hedley, H., Reichert, I., Lipscombe, S., Davis, T.R.C. Scaphoid Fracture Non-Union: A Systematic Review of Surgical Treatment Using Bone Graft. *The Journal of Hand Surgery (European Volume)*. 2016;41(5):492–500. <https://doi.org/10.1177/1753193415604778>
 - ²¹ Malizos KN, Dailiana Z, Varitimidis S, Koutalos A. Management of scaphoid nonunions with vascularized bone grafts from the distal radius: mid- to long-term follow-up. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2017 Jan;27(1):33-39. <https://doi.org/10.1007/s00590-016-1867-7>. Epub 2016 Oct 26. PMID: 27785580.
 - ²² Pulos N, Kollitz KM, Bishop AT, Shin AY. Free Vascularized Medial Femoral Condyle Bone Graft After Failed Scaphoid Nonunion Surgery. *J Bone Joint Surg Am.* 2018 Aug 15;100(16):1379-1386. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.00955>. PMID: 30106819.
 - ²³ De Cheveigne C, Mares O, Lenoir H, et al. Revision surgery after failed reconstruction for scaphoid non-union. *Hand Surg Rehabil.* 2016;35(5):334–9.
 - ²⁴ Keller M, Kastenberger T, Anoar AF, Kaiser P, Schmidle G, Gabl M, Arora R. Clinical and radiological results of the vascularized medial femoral condyle graft for scaphoid non-union. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020 Jun;140(6):835-842. <https://doi.org/10.1007/s00402-020-03386-7>. Epub 2020 Mar 2. PMID: 32124031; PMCID: PMC7244456.
 - ²⁵ Jones DB Jr, Bürger H, Bishop AT, Shin AY. Treatment of scaphoid waist nonunions with an avascular proximal pole and carpal collapse. A comparison of two vascularized bone grafts. *J Bone Joint Surg Am.* 2008 Dec;90(12):2616-25. <https://doi.org/10.2106/JBJS.G.01503>. PMID: 19047706.
 - ²⁶ Hovius SE, de Jong T. Bone Grafts for Scaphoid Nonunion: An Overview. *Hand Surg.* 2015;20(2):222-7. <https://doi.org/10.1142/S0218810415400043>. PMID: 26051764.
 - ²⁷ Munk B, Larsen CF. Bone grafting the scaphoid nonunion: a systematic review of 147 publications including 5,246 cases of scaphoid nonunion. *Acta Orthop Scand.* 2004 Oct;75(5):618-29. <https://doi.org/10.1080/00016470410001529>. PMID: 15513497.
 - ²⁸ García-González, L. A., Aguilar-Sierra, F. J., Gómez-Cadavid, D., Rodríguez-Ricardo, M. C., & Gomez-Eslava, B. (2023). Clinical outcomes in patients with scaphoid non-union treated with the vascularized medial femoral condyle technique a case series. *Injury*, 54(Suppl 6), 110727. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2023.04.014>.
 - ²⁹ Pinder RM, Brkljac M, Rix L, Muir L, Brewster M. Treatment of Scaphoid Nonunion: A Systematic Review of the Existing Evidence. *J Hand Surg Am.* 2015 Sep;40(9):1797-1805.e3. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2015.05.003>. Epub 2015 Jun 24. PMID: 26116095.
 - ³⁰ Herbert TJ, Fisher WE. Management of the fractured scaphoid using a new bone screw. *J Bone Joint Surg Br.* 1984 Jan;66(1):114-23. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.66B1.6693468>. PMID: 6693468.
 - ³¹ Slade JF III, Dodds SD. Minimally invasive management of scaphoid nonunions. *Clin Orthop Relat Res* 2006; 445: 108-119. PMID: 16601412
 - ³² Gernot Schmidle 1, Hannes Leonhard Ebner 2, Andrea Sabine Klausner 3, Josef Fritz 4, Rohit Arora 2, Markus Gabl 2 Correlation of CT imaging and histology to guide bone graft selection in scaphoid non-union surgery. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2018 Oct;138(10):1395-1405.
 - ³³ McCarty, J. C., Dahan, M., & Eberlin, K. R. (2023). Vascularized Bone Flaps in Scaphoid Nonunion. *Clinics in Plastic Surgery*, 50(2), 271–284. <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2023.08.004>
 - ³⁴ Meaike JJ, Meaike JD, Collins MS, Bishop AT, Shin AY. Utility of preoperative MRI for assessing proximal fragment vascularity in scaphoid nonunion. *Bone Joint J.* 2023 Jun 1;105-B(6):657-662. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.105B6.BJJ-2022-0835.R2>. PMID: 37257849.
 - ³⁵ Mathoulin C, Gras M, Roukos S. Le transfert osseux vascularisé prélevé sur la face antérieure du radius dans la reconstruction des os du carpe [Vascularized bone grafting from the volar distal radius for carpal bones reconstruction]. *Chir Main.* 2010 Dec;29 Suppl 1:S65-76. French. <https://doi.org/10.1016/j.main.2010.09.010>. Epub 2010 Nov 5. PMID: 21093345.

- ³⁶ Zaidenberg C, Siebert JW, Angrigiani C. A new vascularized bone graft for scaphoid nonunion. *J Hand Surg Am*. 1991 May;16(3):474-8. [https://doi.org/10.1016/0363-5023\(91\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0363-5023(91)90017-6). PMID: 1861030.
- ³⁷ Bugeja, M., et al. (2023). Patient outcome scores between 1,2- and 2,3-intercompartmental supra-retinacular artery pedicled vascularised bone grafts in proximal pole scaphoid non-union: a systematic review and meta-analysis. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 24(1), 768. <https://doi.org/10.1186/s12891-023-06870-4>.
- ³⁸ Scampa, M., Valenti, V., Orsaria, M. C., & Masia, C. (2024). Medial Femoral Condyle Free Flap: A Systematic Review and Proportional Meta-analysis of Applications and Surgical Outcomes. *Plastic and Reconstructive Surgery Global Open*, 12(4), e5708. <https://doi.org/10.1097/GOX.0000000000005708>.
- ³⁹ Kuhlmann JN, Mimoun M, Boabighi A, Baux S. Vascularized bone graft pedicled on the volar carpal artery for non-union of the scaphoid. *J Hand Surg Br*. 1987 Jun;12(2):203-10. https://doi.org/10.1016/0266-7681_87_90014-3. PMID: 3624978.
- ⁴⁰ Mathoulin C, Haerle M. Vascularized bone graft from the palmar carpal artery for treatment of scaphoid nonunion. *J Hand Surg Br*. 1998 Jun;23(3):318-23. [https://doi.org/10.1016/s0266-7681\(98\)80049-1](https://doi.org/10.1016/s0266-7681(98)80049-1). PMID: 9665517.
- ⁴¹ Burger HK, Windhofer C, Gaggl AJ, et al. Vascularized medial femoral trochlea osteocartilaginous flap reconstruction of proximal pole scaphoid nonunions. *J Hand Surg Am*. 2013;38(4):690-700.
- ⁴² Sivakumar, B., Graham, D. J., Moir, J., & Lawler, R. (2024). Vascularized Medial Femoral Trochlea Osteochondral Flap for Scaphoid Proximal Pole Resurfacing: A Systematic Review. *HAND*, 19(6), 895–903. <https://doi.org/10.1177/15589447231151430>
- ⁴³ Mathoulin C, Brunelli F. Further experience with the index metacarpal vascularized bone graft. *J Hand Surg Br*. 1998 Jun;23(3):311-7. [https://doi.org/10.1016/s0266-7681\(98\)80048-x](https://doi.org/10.1016/s0266-7681(98)80048-x). PMID: 9665516.
- ⁴⁴ Koriem I, Agina AA & El Ghazawy AK (2023) Treatment of failed scaphoid nonunion fixation using free medial femoral condyle vascularized bone grafting. *SICOT-J* 9, 7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/sicotj/2023004>