



Protesizzazione custom-made del semilunare nel morbo di Kienböck: un nuovo metodo di fissazione

Custom-made lunate prostheses in Kienböck's disease: a new method of fixation

Simonetta Odella¹, Micaela Reina², Ignazio Marcoccio³, Alice Clemente¹, Alessandro Crosio¹, Francesco Locatelli¹, Mauro Magnani¹, Pierluigi Tos¹

¹ Unità Operativa Complessa di Chirurgia della Mano e Microchirurgia Ricostruttiva, ASST Gaetano Pini – CTO, Milano, Italia;

² Dipartimento di Ortopedia e Traumatologia, Fondazione IRCC Policlinico

Universitario A. Gemelli, Roma, Italia; ³ Chirurgia della Mano e Microchirurgia dei Nervi Periferici, Istituto Clinico Città di Brescia, GSD, Brescia, Italia

Riassunto

Introduzione. Il trattamento della necrosi avascolare del semilunare (malattia di Kienböck) rappresenta tuttora una sfida per i chirurghi. In alcuni stadi della malattia, dove il semilunare non è ricostruibile, è stata indicata la protesizzazione dello stesso. Sul mercato sono esistite delle protesi che simulavano in maniera standard il semilunare ma non hanno avuto grosso successo per l'alto numero di complicanze, peraltro poco prevedibili. Negli ultimi anni si è dimostrato interesse nell'utilizzo di protesi di semilunare su misura che riproducono la forma del semilunare del malato negli stadi IIIA-B e 2B di Lichtman e Bain-Begg (3D – custom made). Anche in questo tipo di chirurgia le differenze fondamentali risiedono nella stabilizzazione del semilunare. Abbiamo introdotto da questo punto di vista delle novità che ci sembrano molto interessanti e che sono il tema di questo articolo: una doppia stabilizzazione con emi flessore radiale del carpo.

Materiali e metodi. Abbiamo sottoposto tre pazienti con morbo di Kienböck in stadio IIIA-B di Lichtman e 2B Bain-Begg a sostituzione protesica del semilunare, mediante utilizzo di protesi custom-made 3D printed e doppia stabilizzazione del semilunare mediante tecnica "three-ligament tenodesis" e sul piano sagittale tramite foro palmo-dorsale della protesi. Tutti i pazienti sono stati valutati nel post-operatorio con valutazioni RX, esame clinico e score clinico-funzionali.

Risultati. Tutti i pazienti hanno mostrato un miglioramento in termini di dolore e di soddisfazione, misurati mediante VAS score, QuickDASH, PRWE, Mayo Wrist score e soddisfazione del paziente. Tutti i pazienti hanno mantenuto una forza paragonabile al periodo precedente l'intervento chirurgico, con ritorno all'attività lavorativa in tutti i casi. Il *range of motion* (ROM) residuo è migliorato rispetto al periodo pre-operatorio, ma residua un deficit di movimento soprattutto in flessione. Non si è registrata nessuna mobilizzazione protesica.

Conclusioni. I risultati preliminari, con follow-up di 2 anni, dimostra che l'utilizzo

Corrispondenza:

Simonetta Odella

simonettaodella@gmail.com

Conflitto di interessi

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

Come citare questo articolo: Odella S, Reina M, Marcoccio I, et al. Protesizzazione custom-made del semilunare nel morbo di Kienböck: un nuovo metodo di fissazione. Rivista Italiana di Chirurgia della Mano 2023;60:64-73. <https://doi.org/10.53239/2784-9651-2023-10>

© 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>

della protesi 3D custom-made della protesi di semilunare negli stadi IIIA-B e 2B è una valida alternativa, in pazienti selezionati, alle attuali tecniche di salvataggio del polso (artrodesi scafo-capitata e carpectomia prossimale). Ovviamente sono necessari studi a più lungo termine per confermare la validità della metodica.

Parole chiave: necrosi del semilunare, morbo di Kienbock, semilunare, necrosi avascolare, protesi del semilunare, protesi custom made, stampa 3D

Summary

Introduction. *The treatment of avascular necrosis of the lunate in the carpus (Kienbock's disease) is still a challenge for surgeons. In certain stages of the disease, where the lunate cannot be reconstructed, prosthesis of the lunate has been indicated. There have been prostheses on the market that simulate the lunate in a standard manner, but they have not been very successful due to the high number of complications, and results are not very predictable. In recent years, there has been interest in the use of custom-made prostheses that reproduce the shape of the patient's lunate in Lichtman and Bain-Begg stages IIIA-B and 2B (3D - custom made). Also in this type of surgery, the fundamental differences lie in the stabilisation of the prosthesis. We have introduced some innovations from this point that are described in the paper: a double stabilization with emi flexor carpi radialis.*

Materials and Methods. *We subjected 3 patients with Kienbock's M. stage IIIA-B Lichtman's and 2B Bain-Begg's to prosthetic replacement of the lunate, using custom-made 3D printed prosthesis and double stabilisation of the semilunar by means of the "three-ligament tenodesis" technique and palm-dorsal with a hole in the sagittal plane. All patients were assessed post-operatively with X-ray evaluations, clinical examination and clinical-functional scores.*

Results. *All patients showed improvement in terms of pain and satisfaction as measured by VAS score, Quick DASH, PRWE, Mayo Wrist score and patient satisfaction. All patients maintained strength comparable to the pre-operative period, with return to work in all cases. The residual range of motion (ROM) improved compared to the pre-operative period, but a movement deficit remained, especially in flexion. No prosthetic mobilisation was reported.*

Conclusions. *Preliminary results, with 2-year follow-up, show that the use of the custom-made 3D prosthesis of the lunate in stages IIIA-B and 2B is a viable alternative, in selected patients, to current wrist salvage techniques (scapho-capitate arthrodesis and proximal carpectomy). Long term results should confirm the validity of the employed method.*

Key words: Kienbock, lunate prosthesis, 3D printing, custom made prosthesis

Introduzione

La malattia di Kienböck è causata dalla necrosi avascolare dell'osso semilunare. Non vi è accordo riguardo all'eziopatogenesi e al trattamento di questa entità nosologica¹ che clinicamente è caratterizzata da dolore e progressiva impotenza funzionale².

Sono diversi i metodi classificativi per l'inquadramento della patologia che indirizzano il trattamento. Lichtman³ distingue 4 stadi della malattia sulla base di una valutazione radiologica, così come Bain e Begg, che invece si basano su una valutazione artroscopica⁴. Il trattamento può essere di tipo incruento o cruento in base allo stadio della malattia. Vi è indicazione alla sostituzione protesica del semilunare a partire dallo stadio IIIA e 2B della classificazione Lichtman e Bain-Begg, rispettivamente. Molti tentativi sono stati fatti per costruire una protesi che potesse essere usata e diffusa sul mercato, ma purtroppo quelle in commercio si sono dimostrate molto poco simili alla conformazione naturale del semilunare, con risultati spesso poco prevedibili^{5,6}. Tra le

più frequenti complicanze della protesizzazione del semilunare vi sono il dolore da "overstaffing"⁶, la dislocazione dorsale⁷ e la necrosi del polo prossimale dello scafoide^{8,9}. La stabilità dinamica dell'impianto è il punto nevralgico del buon successo della procedura. In letteratura, infatti, sono stati documentati numerosi casi di sublussazione, prevalentemente dorsale⁶, portando di conseguenza a una diminuzione del *range of motion* (ROM), ad artrosi precoce e alla necessità di rimuovere l'impianto e adottare tecniche di salvataggio¹⁰⁻¹². Lo scopo di questo lavoro è introdurre un nuovo metodo di sostituzione protesica che mira a eliminare le cause di fallimento, con l'utilizzo di protesi "custom made" che prevede un metodo di fissazione originale.

Le protesi custom made si sono negli anni evolute e nel semilunare sono state impiegate da Mei-ming Xie et al.¹³, Ma et al.¹⁴ e Yuan et al.¹⁵. Abbiamo eseguito uno studio di fattibilità con gli ingegneri della ditta Adler, dove abbiamo valutato di pianificare un impianto di dimensioni adeguate con un foro di stabilizzazione che prevenisse la rotazione

dell'impianto attraverso una stabilizzazione anteroposteriore sul piano sagittale e laterale sul piano frontale. Abbiamo quindi introdotto il concetto di doppia stabilizzazione: una prima stabilizzazione, con parte del flessore radiale del carpo attraverso una "three ligament tenodesis" secondo Garcia Elias ¹⁶ che evita "l'apertura" delle ossa del carpo, la flessione dello scafoide e il collasso carpale, e una seconda stabilizzazione, sempre con una porzione di flessore radiale del carpo attraverso il foro nel centro della protesi. Il materiale è titanio nitrurato.

Materiali e metodi

Nella nostra Unità Operativa sono stati trattati tre pazienti, due maschi di 19 e 21 anni e una femmina di 16 anni con un follow-up minimo di 2 anni. Clinicamente presentavano dolore, presente anche a riposo, al polso destro (mano dominante in due casi) resistente alle terapie farmacologiche, localizzato prevalentemente in regione dorsale, con limitazione della flessione-estensione, in assenza di trauma riconosciuto. Agli esami RX si evidenziava deformità strutturale del semilunare alle proiezioni antero-posteriore e laterale. Agli esami TC e RM si riscontrava il collasso del semilunare e la sua frammentazione, classificati in stadio IIIA/IIIB secondo Lichtman, 2B secondo Bain-Begg (Fig. 1) che non permetteva una ricostruzione ma solo interventi eventuali di salvataggio. Date le richieste funzionali e l'età dei pazienti si è cercato di evitare la chirurgia di salvataggio (artrosi scafo-capitata o resezione della prima filiera del carpo) e ci si è orientati verso il trattamento sostitutivo custom-made come già effettuato da colleghi in precedenza ¹³⁻¹⁵.

Le immagini mostrano la necrosi avascolare e la frammen-

tazione del semilunare, classificati come stadio IIIA secondo Lichtman e 2B secondo Bain-Begg.

Abbiamo deciso di mantenere lievemente sottodimensionata la protesi rispetto al polso controlaterale poiché il carpo presentava altezza ridotta, data dall'evoluzione della malattia. I pazienti sono stati edotti di come un tale trattamento fosse nuovo, ma che avrebbe potuto rappresentare la possibilità di allungare la vita del polso, con eventualmente la necessità di nuova chirurgia in futuro. La ditta Adler Ortho® si è resa disponibile nella costruzione e progettazione degli impianti. È stata eseguita una TC del polso bilaterale secondo protocollo Adler con ricostruzione 3D, 0,6 mm lo spessore degli strati, acquisizione spirale, e da questa è stata prodotta e stampata una protesi che riproducesse il semilunare presente prima dell'instaurarsi della patologia, lievemente sottodimensionato per potersi meglio adattare al nuovo polso in cui vi era un abbassamento dell'altezza del carpo; la protesi risultava quindi, al termine della progettazione, perfettamente congruente con le varie superfici articolari trasversali, della medio-carpica e della radio-carpica. In un caso è stata stampata un'area della superficie volare della protesi con geometria porotica, che aveva lo scopo di permettere l'adesione di piccole porzioni di osso presenti nella capsula volare e nei legamenti radio lunati, preservati durante l'intervento chirurgico, per tentare di garantire ulteriormente una stabilità dorso-palmare. È stato inoltre ideato un foro apposito, antero-posteriore, che permettesse un ancoraggio con parte del flessore radiale del carpo per una stabilizzazione nel piano antero-posteriore (vengono passati nel foro 2 parti del FRC che vengono poi solidarizzate allo scafoide e al triquetro per ricreare i legamenti tra le ossa ed evitare la rotazione del semilunare protesico) (Fig. 2). Inoltre per evitare l' "apertura" delle ossa della prima filiera,

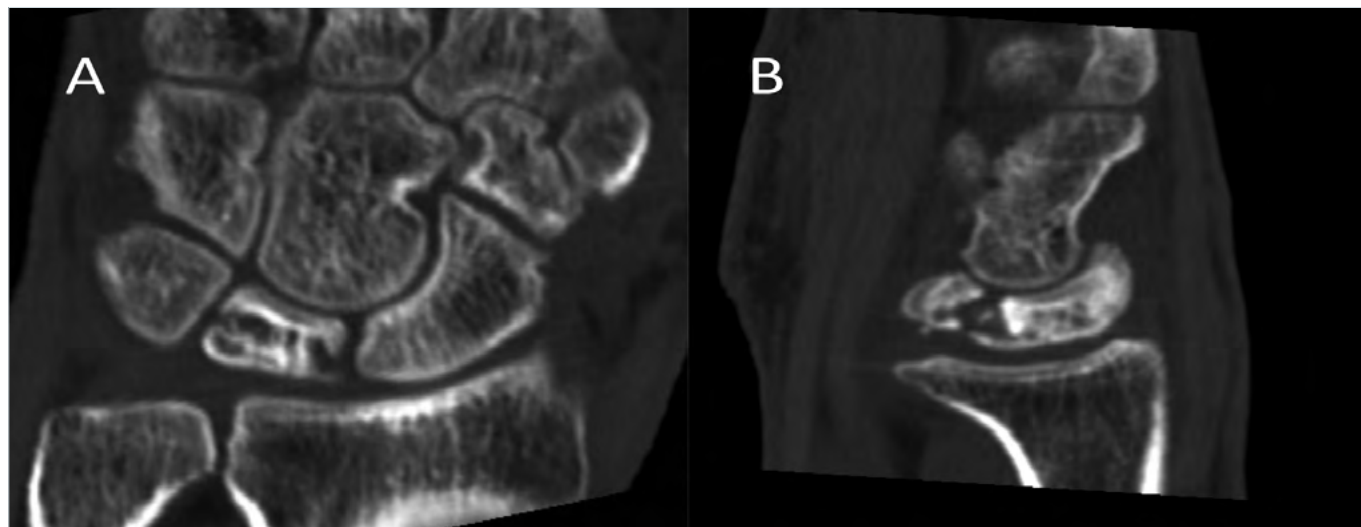


Figure 1. Esempi di TC pre-operatori. Taglio coronale nell'immagine A e sagittale nell'immagine B.

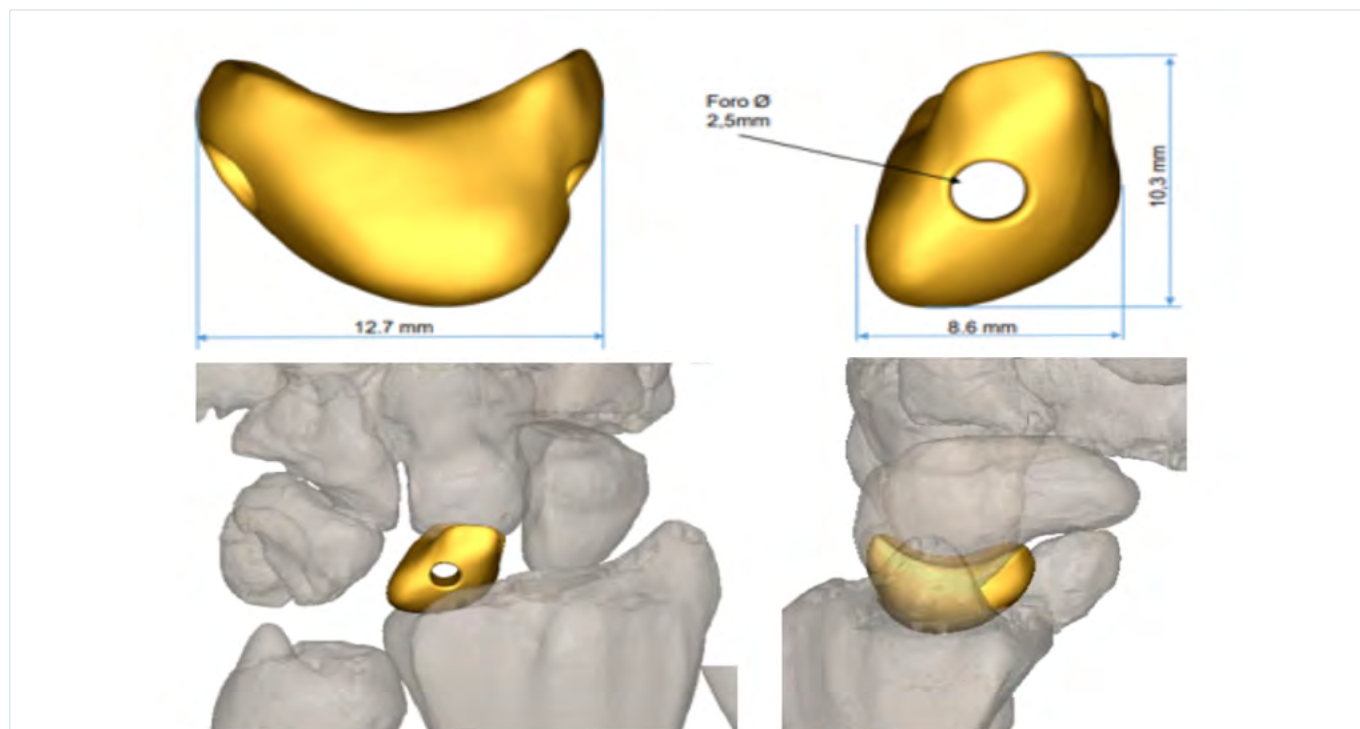


Figure 2. L'immagine mostra la protesi di semilunare custom made con foro anteroposteriore.

prive del segmento intercalare con legamenti di stabilizzazione, abbiamo utilizzato una seconda stabilizzazione sul piano frontale utilizzando la tecnica della "three ligament tenodesis" descritta da Garcia Elias ¹⁶.

Tecnica chirurgica

La procedura prevede un accesso curvilineo dorsale al carpo, centrato sul tubercolo del Lister (Fig. 3A). Successivamente si identifica e si allestiscono lembi a Z del retinacolo degli estensori, divaricando ulnarmente i tendini dal III canale (Fig. 3B). Alla base capsulare si identifica il nervo interosseo posteriore e si procede alla sua denervazione (Fig. 3C). Si procede a capsulotomia dorsale a 3 mm dalla radiocarpica per eseguire l'escissione del semilunare ¹⁷, si espone e si rimuove il semilunare patologico (Fig. 3D). Verificato il corretto alloggiamento con l'impianto protesico di prova (Fig. 3E), si procede quindi al prelievo e allestimento dei due innesti tendinei dal flessore radiale del carpo (FRC) (Fig. 3F). Il prelievo del FRC avviene sollevando in senso disto prossimale un emi FRC che viene mantenuto inserito distalmente, il segmento prelevato viene diviso longitudinalmente in modo da ottenere due segmenti inseriti distalmente: uno viene fatto passare in senso palmo-dorsale attraverso il foro creato nel corpo dello scafoide e l'altro viene passato, sempre in senso palmo-dorsale, nel foro protesico. Una parte

del FRC viene utilizzato per eseguire la tenodesi 3-ligament secondo Garcia-Elias attraverso un foro transosseo nello scafoide e il passaggio intorno ai legamenti radio-triquetrali e poi con ancoraggio sullo scafoide con il fine di mantenere "chiusa" la prima filiera del carpo (Fig. 4).

Con l'altra parte del flessore radiale del carpo si esegue una stabilizzazione in senso antero posteriore: viene passato nel foro del semilunare in senso anteroposteriore una porzione di FRC e viene diviso a sua volta in due parti: una parte verrà suturata allo scafoide (ricreando il legamento scafo lunato), l'altra parte al piramidale (ricreando il legamento luno-triquetrale). Al termine il FRC residuo viene suturato al di sopra della capsula dorsale per stabilizzare ulteriormente (Fig. 5).

In conclusione, si vanno a tensionare correttamente gli innesti che vengono suturati, ricreando una stabilità trasversale, col fine di mimare i legamenti scafo-lunati e luno-piramidali. Si esegue poi accurata capsulorrafia dorsale, sutura del retinacolo e sutura cutanea. La durata media della chirurgia è di 90 minuti.

Risultati

Nei primi 2 anni di follow-up in tutti i pazienti non c'è stata nessuna modifica allo stile di vita, cambi lavorativi o nelle attività ricreative. Abbiamo utilizzato score clinici per le

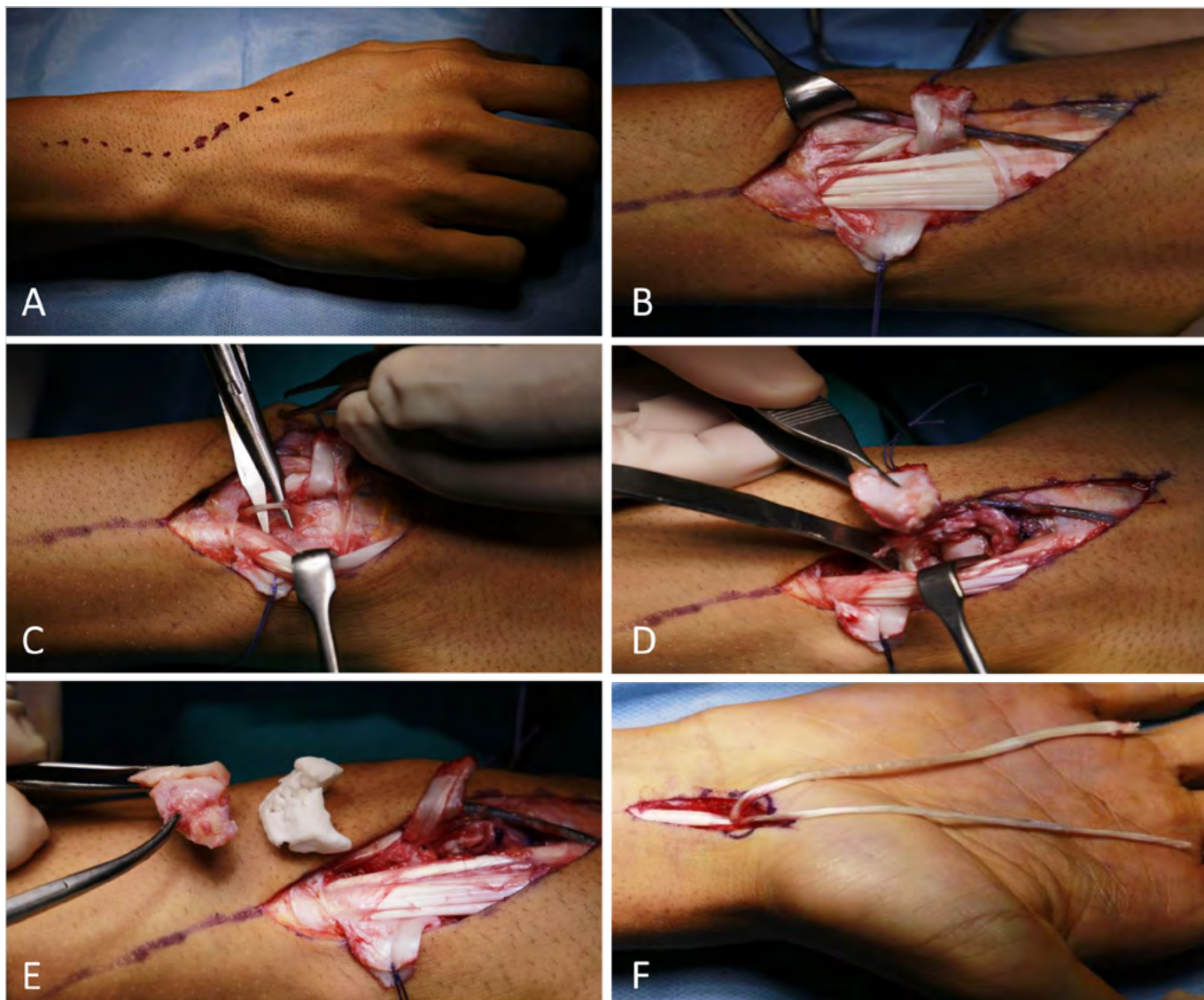


Figura 3. In sequenza i passaggi della tecnica chirurgica spiegati nel testo: incisione cutanea (A), capsulotomia (B), escissione semilunare patologica (E), prelievo del tendine FRC (F).

valutazioni dei pazienti. Nella Tabella I riassuntiva si evidenziano gli indici valutativi nel follow-up a 2 anni.

La flessione attiva media del polso è stata di $30^{\circ} 0^{\circ}$ (± 5 SD); l'estensione media di 70° ($\pm 10^{\circ}$ SD); Dev radiale 30° e deviazione ulnare 40° .

Non abbiamo evidenziato episodi di sublussazione e mobilizzazione dell'impianto. In termini di movimento, abbiamo evidenziato una riduzione del ROM in flessione (di media del 30-35%), più accentuata rispetto alle tecniche classiche, che possiamo attribuire a una tecnica che prevede una doppia stabilizzazione dell'impianto e che quindi può dare in parte una rigidità cicatriziale (Fig. 6).

Discussione

Numerosissime tecniche sono state proposte per il trattamento della malattia di Kienböck. Nel 1993 Lichtman propose un algoritmo terapeutico, poi modificato nel 2017, dove venivano selezionati i migliori trattamenti possibili a seconda dello stadio della patologia¹⁸. Le opzioni chirurgiche comprendono tecniche mini-invasive come immobilizzazione temporanea con fissatore esterno e pinning STT temporaneo¹⁹⁻²³, decompressioni del semilunare open²⁴ oppure artroscopiche²⁵, e tecniche più impegnative come osteotomie in accorciamento del capitato²⁶, osteotomie radiali o ulnari^{27,28}, innesti vascolarizzati locali²⁹, lembi liberi^{30,31}, diversi

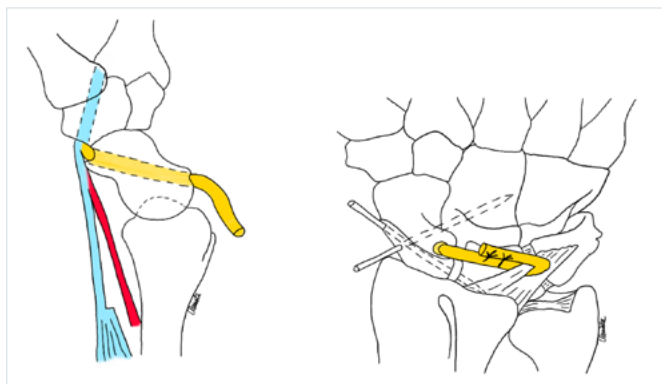


Figure 4. Rappresentazione schematica del passaggio dell'emitendine del FRC attraverso foro transosseo nello scafoide e intorno ai legamenti radio-triquetrali.

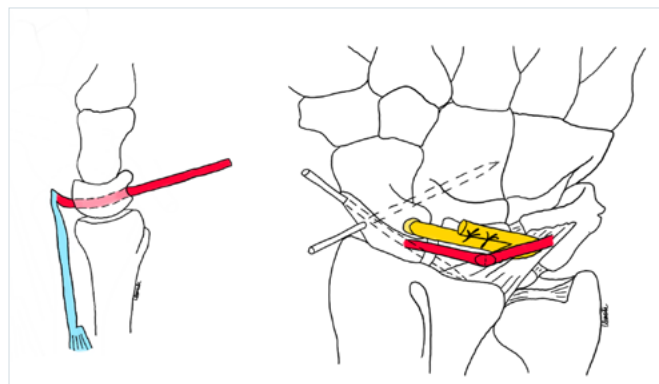


Figura 5. Rappresentazione schematica della stabilizzazione in senso antero-posteriore con emitendine di FRC, fatto passare attraverso la protesi di semilunare e poi diviso in 2 parti, a ricreare il legamento scafo-lunato e il legamento luno-triquetrale (in rosso).

Tabella I. Mostra i risultati degli score clinico-funzionali.

Patient	VAS no stress	VAS night	VAS under stress	Quick DASH	PRWE	Mayo score	Satisfaction
1 19yo	0	0	1	2.6	20	75	Very satisfied
2 21yo	0	0	3.2	3.33	22	70	Satisfied
3 16 yo	0	0	2.1	1.32	20	80	Very satisfied

tipi di artrodesi con o senza escissione del semilunare^{11,32-35}, resezione della prima filiera del carpo^{36,37} e altre ancora. Tuttavia, resta ancora oggi difficile stabilire la tecnica più efficace nel singolo caso: i risultati post-operatori sono spesso imprevedibili e associati a numerose complicanze. La prima descrizione di una sostituzione protesica del semilunare è stata pubblicata da Danis nel 1951³⁸. I vantaggi teorici di eseguire un impianto protesico del semilunare sono di mantenere la normale cinematica del polso e garantire la congruenza articolare per poter distribuire in maniera ottimale i carichi. La difficoltà maggiore risiede nel mantenimento dei rapporti articolari trasversali, garantiti nella normale fisiologia dai legamenti scafo-lunati e luno-piramidali. Frederick e Werner nel 2021 hanno pubblicato uno studio cadaverico sulle forze tensili dei legamenti scafolunati durante cicli di movimento ripetuti (50 Newton), durante attività pesanti (110 N) e durante una caduta (357 N), affermando che negli interventi di ricostruzione di queste strutture bisogna tenere conto delle imponenti forze pressorie a cui il polso è sottoposto³⁹.

I primi impianti protesici erano pensati come liberi, senza inserzioni per i tessuti molli a stabilizzazione, in funzione di spaziatore^{40,41}. L'evoluzione ingegneristica ha portato poi alla creazione di protesi che prevedono tempi chirurgici secondari di tensionamento con suture e ancorette ossee⁸. I materiali di costruzione protesica sono stati diversi: silicone, polimeri acrilici, titanio e pirocarbonio^{5,42}. Un'ulteriore sviluppo delle protesi si è verificato con la progettazione di un impianto sviluppato in pirocarbonio con disegno simile alla morfologia del semilunare (Ascension® PyroCarbon Lunate) e stabilizzazione sul piano frontale: questo dispositivo presentava due fori passanti sulle superfici mediale e laterale, per permettere una stabilizzazione utilizzando suture oppure innesti tendinei attraverso fori allestiti nello scafoide e nel piramidale ricostruendo, così, i legamenti interossei trasversali⁴³. Una complicanza descritta in questo passaggio è la possibile necrosi avascolare dello scafoide determinata dall'allestimento dei fori⁸. Ulteriore complicanza che ne limita l'utilizzo è la grande incidenza di sublussazione sul piano sagittale (la protesi può ruotare), che comporta interventi di revisione.



Figura 6. Nelle immagini si evidenzia il ROM attivo con limitazione della flessione, ma con recupero completo di estensione e prono-supinazione.

La sublussazione risulta essere una complicanza relativamente frequente delle protesi presenti in commercio, concentrati nel periodo di 6-12 mesi dall'intervento^{6,14,44}. Dovuta probabilmente alla non perfetta congruenza dimensionale dell'impianto e all'assenza di stabilizzazione diretta, causa frequente di revisione chirurgica per impingement, mobilizzazione o danni osteocondrali alle ossa circostanti^{1,8}. Ulteriore impulso nella progettazione di protesi efficaci è stato dato dallo sviluppo delle tecnologie di stampa 3D^{1,45}. In letteratura, da pochi anni, appaiono case report di trattamento della malattia di Kienböck con questo tipo di impianto¹³⁻¹⁵. La stampa 3D garantisce una forma il più possibile simile a quella originaria, garantendo in primo luogo una stabilità statica dai corretti rapporti articolari. Il problema rimane sempre garantire la stabilità dinamica: nei pochi casi presentati dalla letteratura solo una tecnica prevede la stabilizzazione intrinseca ma con fili di sutura¹⁴. Nessuna delle tecniche presentate a oggi hanno una stabilizzazione volta

a ristabilire i legamenti scafo-lunato e luno-triquetrale. Si aggiunge a questa (*three ligament tenodesis*) una stabilizzazione palmo-dorsale con tessuto biologico (tendine). Il razionale sui cui poggia la nostra tecnica è di bilanciare la stabilità dell'impianto con la libertà di movimento garantita dall'impianto protesico. Le sfide da affrontare riguardano il design protesico e i suoi rapporti con le strutture circostanti, la stabilità a riposo, la stabilità dinamica e la capacità di resistere al carico e al movimento. Nel nostro studio, durante i due anni di follow-up non abbiamo evidenziato mobilizzazioni dell'impianto, il quale è rimasto correttamente allineato. Diverse ragioni possono essere addotte per spiegare questo buon risultato. Innanzitutto, il semilunare stampato in 3D riproduceva l'esatta morfologia del semilunare nativo. La stabilità anatomica è stata dunque ripristinata. In secondo luogo, abbiamo applicato tecniche combinate di stabilizzazione passanti per la protesi ed esterne a essa, al fine di ristabilire la stabilità dinamica dell'impianto.



Figura 7. Rx a 2 anni in proiezione postero-anteriore e laterale di polso.

Conclusioni

A nostro parere il miglior modo di mantenere in sede un impianto protesico che non può avvalersi di legamenti intrinseci è una doppia stabilizzazione: una "esterna alla protesi" (che permette la "chiusura" delle ossa del carpo ed evita la flessione dello scafoide) e una "interna alla protesi" (attraverso la protesi stabilizzandola palmo-dorsalmente; ricreando i legamenti intrinseci scafo-lunato e luno-piramidale, dorsalmente). La tecnica di Garcia-Elias¹⁶ è mutuata dalla tecnica di Brunelli⁴⁶ e non solo favorisce la "chiusura" tra le ossa della prima filiera, ma permette inoltre l'estensione dello scafoide evitandone la flessione. L'associazione della stabilizzazione dorso-palmare evita la rotazione dell'impianto e dovrebbe prevenirne la lussazione, garantendo una buona funzione del polso con una corretta distribuzione dei carichi articolari. Certamente bisognerà valutare a lungo termine la durata dell'impianto e la possibile conversione a tecniche di salvataggio. Sembrerebbe che il metallo nitrurato sia "amico" della cartilagine e permetterà eventuali interventi di salvataggio preservando le cartilagini. Solo il tempo potrà confermare queste ipotesi. Ci fa piacere diffondere subito le nostre impressioni poiché di norma questi impianti protesici, se hanno complicanze, le hanno dopo i primi 4-6 mesi. Se si supera questo periodo, di norma, le complicanze diminuiscono molto.

La restrizione del movimento (circa della metà in tutti i pazienti) non costituisce a parere nostro una problematica importante, resta comunque un arco di movimento funzionale che permette tutte le attività. In definitiva, riteniamo che l'impianto di una protesi custom-made del semilunare associato a tenodesi sia una valida opzione chirurgica nel trattamento del morbo di Kienböck in quei pazienti che, per età, richieste funzionali e stadio di patologia, non siano disposti a interventi demolitivi come prima scelta.

Siamo perfettamente coscienti di aver necessità di un lungo follow-up, attualmente di due anni, ma comunque fiduciosi in questa procedura, che presenta a nostro parere una solida elaborazione pre-operatoria.

Bibliografia

- Bain GI, Yeo CJ, Morse LP. Kienböck disease: recent advances in the basic science, assessment and treatment. *Hand Surg* 2015;20:352-365. <https://doi.org/10.1142/S0218810415400079>
- Rioux-Forker D, Shin AY. Osteonecrosis of the lunate: Kienböck disease. *J Am Acad Orthop Surg* 2020;28:570-584. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-20-00020>
- Lichtman DM, Lesley NE, Simmons SP. The classification and treatment of Kienböck's disease: the state of the art and a look at the future. *J Hand Surg Eur* 2010;35:549-554. <https://doi.org/10.1177/1753193410374690>
- Bain GI, Begg M. Arthroscopic assessment and classification of Kienböck's disease. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2006;10:8-13. <https://doi.org/10.1097/00130911-200603000-00003>
- Bellemère P, Maes-Clavier C, Loubersac T, Gaisne E, Kerjean Y, Collon S. Pyrocarbon interposition wrist arthroplasty in the treatment of failed wrist procedures. *J Wrist Surg*. 2012 Aug;1(1):31-8. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1323641>
- Viljakka T, Tallroth K, Vastamäki M. Long-term clinical outcome after titanium lunate arthroplasty for Kienböck disease. *J Hand Surg Am* 2018;43:945.e1-945.e10. <https://doi.org/10.1016/j.jhna.2018.02.009>
- Muller C, Ardouin L, Fournier A, et al. Pyrocarbon interposition implant after lunate resection in Kienböck's disease: A case series. *Hand Surg Rehabil* 2023;42:34-39. <https://doi.org/10.1016/j.hansur.2022.10.003>
- Henry M. Outcomes assessment of lunate replacement arthroplasty with intrinsic carpal ligament reconstruction in Kienböck's disease. *Hand (NY)* 2014;9:364-369. <https://doi.org/10.1007/s11552-014-9624-z>
- Lamas C, Carrera A, Proubasta I, et al. The anatomy and vascularity of the lunate: considerations applied to Kienböck's disease. *Chir Main* 2007;26:13-20. <https://doi.org/10.1016/j.main.2007.01.001>
- Bain GI, Watts AC. The outcome of scaphoid excision and four-corner arthrodesis for advanced carpal collapse at a minimum of ten years. *J Hand Surg Am* 2010;35:719-725. <https://doi.org/10.1016/j.jhna.2010.01.025>

- 11 Ferreres A, Garcia-Elias M, Plaza R. Long-term results of lunocapitate arthrodesis with scaphoid excision for SLAC and SNAC wrists. *J Hand Surg Eur* 2009;34:603-608. <https://doi.org/10.1177/1753193409105683>
- 12 Richou J, Chuinard C, Moineau G, et al. Proximal row carpectomy: long-term results. *Chir Main* 2010;29:10-15. <https://doi.org/10.1016/j.main.2009.10.003>
- 13 Xie MM, Tang KL, Yuan CS. 3D printing lunate prosthesis for stage IIIC Kienböck's disease: a case report. *Arch Orthop Trauma Surg* 2018;138:447-451. <https://doi.org/10.1007/s00402-017-2854-0>
- 14 Ma ZJ, Liu ZF, Shi QS, et al. Varisized 3D-printed lunate for Kienböck's disease in different stages: preliminary results. *Orthop Surg* 2020;12:792-801. <https://doi.org/10.1111/os.12681>
- 15 Yuan CS, Tang Y, Xie HQ, et al. Application of 3 dimension-printed injection-molded polyether ether ketone lunate prosthesis in the treatment of stage III Kienböck's disease: A case report. *World J Clin Cases* 2022;10:8761-8767. <https://doi.org/10.12998/wjcc.v10.i24.8761>
- 16 Garcia-Elias M, Lluch AL, Stanley JK. Three-ligament tenodesis for the treatment of scapholunate dissociation: indications and surgical technique. *J Hand Surg Am* 2006;31:125-134. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2005>
- 17 Berger RA, Bishop AT, Bettinger PC. New dorsal capsulotomy for the surgical exposure of the wrist. *Ann Plast Surg* 1995;3:54-9. <https://doi.org/10.1097/0000637-199507000-00011>
- 18 Lichtman DM, Pientka WF 2nd, Bain GI. Kienböck disease: a new algorithm for the 21st Century. *J Wrist Surg* 2017;6:2-10. <https://doi.org/10.1055/s-0036-1593734>. Erratum in: *J Wrist Surg* 2017;6:e1-e2.
- 19 Yajima H, Ono H, Tamai S. Temporary internal fixation of the scaphotrapezio-trapezoidal joint for the treatment of Kienböck's disease: a preliminary study. *J Hand Surg Am* 1998;23:402-410. [https://doi.org/10.1016/S0363-5023\(05\)80457-5](https://doi.org/10.1016/S0363-5023(05)80457-5)
- 20 Yasuda M, Okuda H, Egi T, et al. Temporary scapho-trapezoidal joint fixation for Kienböck's disease in a 12-year-old girl: a case report. *J Hand Surg Am* 1998;23:411-414. [https://doi.org/10.1016/S0363-5023\(05\)80458-7](https://doi.org/10.1016/S0363-5023(05)80458-7)
- 21 Shigematsu K, Yajima H, Kobata Y, et al. Treatment of Kienböck disease in an 11-year-old girl with temporary fixation of the scaphotrapeziotrapezoidal joint. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg* 2005;39:60-3. <https://doi.org/10.1080/02844310410017988>
- 22 Kazuki K, Uemura T, Okada M, et al. Time course of magnetic resonance images in an adolescent patient with Kienböck's disease treated by temporary scaphotrapezoidal joint fixation: a case report. *J Hand Surg Am* 2006;31:63-67. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2005.08.015>
- 23 Ando Y, Yasuda M, Kazuki K, et al. Temporary scaphotrapezoidal joint fixation for adolescent Kienböck's disease. *J Hand Surg Am* 2009;34:14-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2008.09.019>
- 24 Mehrpour SR, Kamrani RS, Aghamirsalim MR, et al. Treatment of Kienböck disease by lunate core decompression. *J Hand Surg Am* 2011;36:1675-1677. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2011.06.024>
- 25 Bain GI, Smith ML, Watts AC. Arthroscopic core decompression of the lunate in early stage Kienböck disease of the lunate. *Tech Hand Up Extrem Surg* 2011;15:66-69. <https://doi.org/10.1097/BTH.0b013e3181e1d2b4>
- 26 Leblebicioğlu G, Doral MN, Atay A öA, et al. Open treatment of stage III Kienböck's disease with lunate revascularization compared with arthroscopic treatment without revascularization. *Arthroscopy* 2003;19:117-130. <https://doi.org/10.1053/jars.2003.50009>
- 27 Illarramendi AA, Schulz C, De Carli P. The surgical treatment of Kienböck's disease by radius and ulna metaphyseal core decompression. *J Hand Surg Am* 2001;26:252-260. <https://doi.org/10.1053/jhsu.2001.22928>
- 28 Jorge-Mora A, Pretell-Mazzini J, Marti-Ciruelos R, et al. Distal radius definitive epiphysiodesis for management of Kienböck's disease in skeletally immature patients. *Int Orthop* 2012;36:2101-2105. <https://doi.org/10.1007/s00264-012-1597-3>
- 29 Saffar P. [Vascularized pisiform transfer in place of lunatum for Kienböck's disease]. *Chir Main* 2010;29(Suppl 1):S112-8. <https://doi.org/10.1016/j.main.2010.09.005>
- 30 Higgins JP, Bürger HK. Osteochondral flaps from the distal femur: expanding applications, harvest sites, and indications. *J Reconstr Microsurg* 2014;30:483-490. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1372484>
- 31 Bürger HK, Windhofer C, Gaggl AJ, et al. Vascularized medial femoral trochlea osteocartilaginous flap reconstruction of proximal pole scaphoid nonunions. *J Hand Surg Am* 2013;38:690-700. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2013.01.036>
- 32 Goyal N, Singh V, Barik S, et al. Limited Carpal Fusion in Kienböck's Disease: Early Results following Scaphocapitate Arthrodesis. *J Wrist Surg* 2020;9:404-410. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1712517>
- 33 Acar B, Turan A, Kose O, et al. Scaphotrapeziotrapezoid Arthrodesis Using Limited Wrist Fusion Plates in Kienböck's Disease. *Cureus* 2019;11:e4025. <https://doi.org/10.7759/cureus.4025>
- 34 Özdemir G, Akgül T, Çiçekli Ö, et al. Lunatum excision and scaphocapitate arthrodesis in Kienböck's disease. *J Orthop Surg (Hong Kong)* 2017;25:2309499017692704. <https://doi.org/10.1177/2309499017692704>
- 35 Rhee PC, Lin IC, Moran SL, et al. Scaphocapitate arthrodesis for Kienböck disease. *J Hand Surg Am* 2015;40:745-751. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2014.12.013>
- 36 Marcuzzi A, Colantonio F, Petrella G, et al. Stage IV Kienböck's disease: Proximal row carpectomy and application of RCPI implant. *Hand Surg Rehabil* 2017;36:102-108. <https://doi.org/10.1016/j.hansur.2016.12.005>
- 37 Croog AS, Stern PJ. Proximal row carpectomy for advanced Kienböck's disease: average 10-year follow-up. *J Hand Surg Am* 2008;33:1122-1130. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2008.02.031>
- 38 Danis A. Ostéomalacie du semi-lunaire traitée par exérèse et prothèse acrylique; résultat après trois ans [Osteomalacia of the semilunar treated by excision and acrylic prosthesis; results after three years]. *Acta Chir Belg* 1951;50:120-126.
- 39 Werner FW. Design Requirements for Scapholunate Interosse-

- ous Ligament Reconstruction. *J Wrist Surg* 2021;10:484-491. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1728802>
- ⁴⁰ Kaarela OI, Raatikainen TK, Torniaainen PJ. Silicone replacement arthroplasty for Kienböck's disease. *J Hand Surg Br* 1998;23:735-740. [https://doi.org/10.1016/s0266-7681\(98\)80086-7](https://doi.org/10.1016/s0266-7681(98)80086-7)
- ⁴¹ Alexander AH, Turner MA, Alexander CE, et al. Lunate silicone replacement arthroplasty in Kienböck's disease: a long-term follow-up. *J Hand Surg Am* 1990;15:401-407. [https://doi.org/10.1016/0363-5023\(90\)90050-2](https://doi.org/10.1016/0363-5023(90)90050-2)
- ⁴² Werthel JD, Hoang DV, Boyer P, et al. [Treatment of Kienböck's disease using a pyrocarbon implant: case report]. *Chir Main* 2014;33:404-409. French. <https://doi.org/10.1016/j.main.2014.09.002>
- ⁴³ Henry M. Reconstruction of both volar and dorsal limbs of the scapholunate interosseous ligament. *J Hand Surg Am* 2013;38:1625-1634. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2013.05.026>
- ⁴⁴ AGERHOLM JC, Goodfellow JW. Avascular necrosis of the lunate bone treated by excision and prosthetic replacement. *J Bone Joint Surg Br* 1963;45-B:110-116. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.45B1.110>
- ⁴⁵ Kuehn BM. Clinicians embrace 3D printers to solve unique clinical challenges. *JAMA* 2016;315:333-335. <https://doi.org/10.1001/jama.2015.17705>
- ⁴⁶ Brunelli GA, Brunelli GR. A new technique to correct carpal instability with scaphoid rotary subluxation: a preliminary report. *J Hand Surg Am* 1995;20:S82-S85. [https://doi.org/10.1016/s0363-5023\(95\)80175-8](https://doi.org/10.1016/s0363-5023(95)80175-8)