

Biomeccanica del legamento trasverso con riferimento all'equazione di stabilità e al modello carpale biarticolare concentrico

Transverse carpal ligament's role referring stability equation and biarticular concentric carpal model

GRIPPI G.M.

Relazione presentata al XXXVII Congresso nazionale S.I.C.M., Treviso, 22-25 settembre 1999

Parole chiave: biomeccanica, cinematica carpale, polso, instabilità carpale, modello carpale biarticolare concentrico, complesso PUPT, legamento trasverso del carpo, sezione e rapporto aureo, numeri di Fibonacci
Key words: biomechanics, carpal kinetics, wrist, carpal instability, biarticular concentric carpal model, PUPT complex, transverse carpal ligament, golden section and ratio, Fibonacci's numbers

SUMMARY

In this study, transverse carpal ligament's biomechanics is discussed and linked to the PUPT complex and the new Biarticular Concentric Carpal Model. This model makes clear and adequately determines the gears and the reciprocal adjustments between the two carpal rows. And it gives with biomechanic terms the reason for the carpal single bone's peculiar form or, in general, for wrist's architecture and stability of its geometrical order, that is directed to the stationary maintenance of rotation carpal centre's position, displaced in the capitate's head. The famous golden ration ϕ (ϕ) = 1,618 is hidden in mentioned geometrical order; because "the ratio, between the carpal's height and the rotation carpal centre's height, is constant and equal to $(1 + \phi) = (1 + 1,618) = 2,618$ ". Therefore it is possible to formulate the Carpal stability Index (ISC) and the Carpal Stability Equation (ESC). The ISC and the ESC signify that the normal wrist's geometrical order is founded on an exact architectural Nature's canon and that the interaction between the osseus (O), ligamentous (L) and muscular-tendon (F) components is addressed to maintain the centre-carpal stability. The transverse carpal ligament's role is detected for its characteristics of micro and macroscopic anatomy. In fact, besides being the flexor's pulley, also storing up and transferring mechanic energy between the carpal bones embracing and directing the capitate and this way to stabilize, more or less actively, the mentioned rotation carpal centres.

INTRODUZIONE

Il legamento trasverso del carpo (LTC) ed i suoi annessi, costituiscono una struttura dall'architettura complessa la cui funzione comprende il supporto ed il mantenimento del buon assetto meccanico del polso e della mano.

Tradizionalmente, la principale funzione riconosciuta a questa struttura è quello di essere la puleggia carpale dei flessori. Inoltre, un qualche ruolo nel man-

tenimento della stabilità del carpo, è stato sostenuto. Questo aspetto, tuttavia, non è mai stato compiutamente chiarito (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7).

In questo studio esporremo la suddetta questione così come viene definita e spiegata, dal ruolo di stabilità trasversa attiva e passiva svolto dal LTC, nell'ambito del complesso PUPT (Piso-Unco-Palmo-Trasverso) relativo al Modello bioarticolare concentrico di meccanica carpale (8).

Inoltre, a corollario, si svolgerà la notazione mate-

matica dell'instabilità carpale con la formulazione e la discussione dell'Indice e dell'Equazione di Stabilità Carpale: concetti, questi, elaborati sul riscontro della presenza del famoso rapporto aureo (ϕ) nella geometria carpale.

IL CONCETTO DI CARPO BIARTICOLARE CONCENTRICO

Il concetto di carpo biarticolare concentrico assume che, nei movimenti della mano, il condilo carpale mentre scorre sul radio adattandosi alla sua conformazione (a causa della sua capacità di torcersi sull'asse orizzontale – poiché costituito e segmentato nelle 3 ossa della 1^a filiera carpale –), induce degli spostamenti assiali del capitato (attraverso la mediazione delle ossa carpali poste ai suoi lati – rispettivamente, del trapezoide sul versante radiale e dell'uncinato sul versante ulnare –), finalizzati al mantenimento stazionario della posizione del centro di rotazione del carpo dislocato in corrispondenza della testa del capitato stesso (Fig. 1).

In altri termini, muovendo la mano nei tre piani dello spazio, la filiera prossimale e quella distale del carpo autoregolano, l'un l'altra reciprocamente, la propria conformazione geometrica in modo tale da mantenere, di continuo, la convergenza dell'asse della radio-carpica su quello della mano in un punto ideale identificato col centro di rotazione del carpo e a cui corrisponde morfologicamente la testa del capitato. Ciò, in pratica, si realizza mediante la conservazione della equidistanza della testa del capitato dalla superficie articolare del radio distale, in ogni grado di movimento (Fig. 2).



Fig. 1 - Il condilo carpale rispetto ad altre strutture condilari costituite da un unico segmento osseo indeformabile ha la peculiarità di potersi deformare sull'asse orizzontale. Questa capacità ha conseguenze di rilievo per tutta la cinematica carpale. Infatti, le tre ossa che lo costituiscono mentre scorrono sul radio subiscono una torsione il cui punto focale individua una regione (virtualmente immobile) in cui l'asse della radiocarpica e l'asse della mano si incrociano a costituire il centro di rotazione del carpo. Questa regione corrisponde, morfologicamente, alla testa del capitato (v. testo).

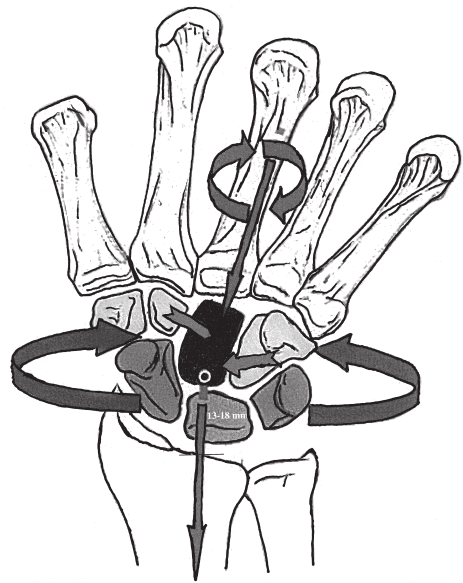


Fig. 2 - Il concetto di Carpo Biarticolare Concentrico assume che, nei movimenti della mano, il condilo carpale (mentre scorre sul radio adattandosi alla sua conformazione) induce degli spostamenti torsionali al corpo del capitato (attraverso la mediazione delle ossa carpali poste ai suoi lati – rispettivamente, del trapezoide sul versante radiale e dell'uncinato sul versante ulnare –) finalizzati al mantenimento stazionario della posizione del centro di rotazione carpale dislocato in corrispondenza della testa del capitato stesso. La conseguenza più appariscente di questo fatto è l'invarianza dell'altezza del carpo (v. testo).

La conseguenza più appariscente di questo fatto è l'invarianza dell'altezza del carpo.

Adottando un'efficace analogia il sistema carpale sembra funzionare secondo lo stesso principio con cui funziona una comune endoprotesi biarticolare di femore per cui ad ogni spostamento angolare del condilo carpale sul radio, corrisponde, automaticamente uno spostamento rotazionale corrispondente della testa del capitato nella mediocarpica e, viceversa (Fig. 3).



Fig. 3 - Il concetto di Carpo Biarticolare Concentrico deriva il nome dal fatto che il sistema carpale sembra funzionare secondo lo stesso principio con cui funziona una comune endoprotesi biarticolare di femore (a). In questo contesto, il condilo carpale rappresenta la struttura meniscale che tutela la "vera" articolazione del polso. Ossia, il distretto pericefalico della testa del capitato (Coxa Manus) (b) (v. testo).

Nel polso normale questo assetto cinetico e cinematico delle ossa e questo reciproco controllo fra le due filiere conferisce ed esprime il maggior grado possibile di stabilità meccanica.

Viceversa, *l'instabilità carpale consiste in un'anomalia della suddetta funzione, cui corrisponde, nella semeiotica clinica e come dato patognomonico, la sub e/o lussazione della testa del capitato e di conseguenza la dislocazione del centro di rotazione carpale* (Fig. 4).

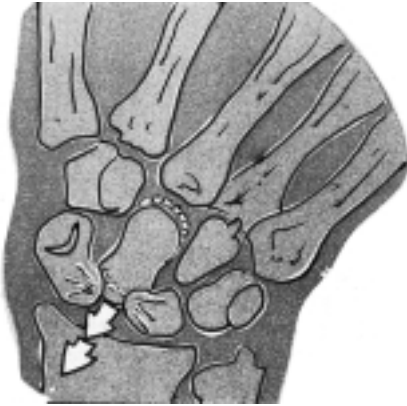


Fig. 4 - La sconnessione della Coxa Manus realizza l'Instabilità Carpale: ossia, "la dislocazione (potenziale o attuale) del centro di rotazione del carpo con conseguente divergenza dell'asse meccanico della mano da quello della radio-ulno-carpica". Ciò, in pratica corrisponde alla dislocazione della testa del capitato. Infatti, sia nelle DISI che nelle VISI la sub-lussazione del segmento intercalato è costantemente associata alla migrazione prossimale del capitato (v. testo).

DETERMINAZIONE DEL CENTRO DI ROTAZIONE DEL CARPO

Quando si voglia determinare la posizione del centro di rotazione del carpo, nella rx-grafia in A-P si può tracciare una retta che tangente alla corticale diafisaria interna del radio, raggiunge la testa del capitano e, poi, misurare la lunghezza del segmento (AC) che intercorre fra questa e il radio (Fig. 5). Nella proiezione in L-L si può tracciare una retta che tangente alla corticale diafisaria anteriore del radio, raggiunge la testa del capitato e, poi, misurare la lunghezza del segmento (AC) fra questa e il radio. Normalmente, questi segmenti sono uguali e simmetrici in entrambi i polsi (in media 13-18 mm). La posizione del centro di rotazione del polso patologico può essere considerata indicativa di instabilità se asimmetrica e/o con uno scarto maggiore di 1-1,5 mm, rispetto al polso sano controlaterale.

È interessante rilevare che, nel polso normale, *il segmento AC che così individua l'altezza del centro di rotazione del carpo corrisponde alla porzione aurea**

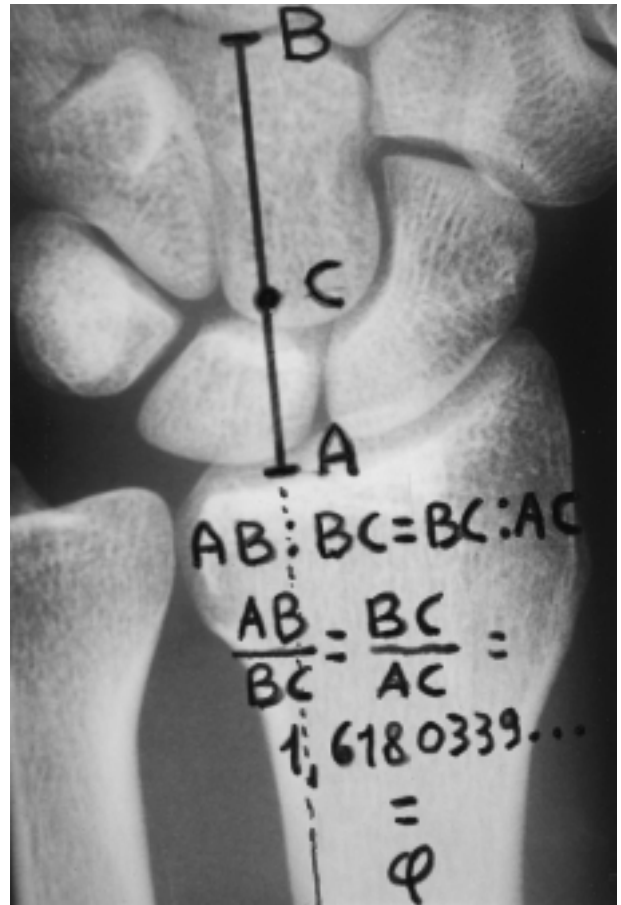


Fig. 5 - Quando si voglia determinare la posizione del centro di rotazione del carpo, nella rx-grafia in A-P si può tracciare una retta che tangente alla corticale diafisaria interna del radio, raggiunge la testa del capitato e, poi, misurare la lunghezza del segmento AC che intercorre fra questa ed il radio. È interessante rilevare che, nel polso normale, il segmento AC corrisponde alla porzione aurea del segmento AB che a sua volta individua l'altezza del carpo. Ossia (indipendentemente dalle dimensioni del polso in esame) il rapporto CB/CA corrisponde a $\phi = 1,618\dots$ (v. testo).

del segmento AB che a sua volta individua l'altezza del carpo.

In altri termini, misurando, è possibile verificare che il rapporto fra i segmenti CB e AC (la cui somma è l'altezza del carpo AB) è *una costante pari al famoso rapporto aureo ϕ (fi)*.

Ossia: $CB/AC = \phi$ (fi) = 1,618.

* La "sezione aurea" o il suo inverso "rapporto aureo" sono rapporti proporzionali riscontrabili nella geometria di molte forme e configurazioni naturali: conchiglie marine, disposizione dei semi del girasole, dei petali dei fiori, embriogenesi e segmentazione degli insetti e degli animali, crescita delle piante, crescita dei cristalli, strutturazione degli orbitali atomici, distribuzione delle linee di forza in un campo magnetico, distribuzione e forma delle galassie ecc.

Il rapporto aureo e la sezione aurea (golden ratio o golden section, in inglese), dal punto di vista matematico sono

Quindi riteniamo che *al di là di ipotetiche congetture sul significato metafisico ed estetico di questa corrispondenza, che sembra stigmatizzare il segreto canone architettonico seguito dalla natura per edificare le sue strutture*, tale misterioso rapporto poiché è presente nella geometria del carpo può ben rappresentare un indice della sua idoneità strutturale e (quindi) stabilità meccanica.

Cioè, *“nel polso stabile ideale, l'indice di stabilità carpale ISC, ossia il rapporto tra l'altezza del carpo AB e l'altezza del centro di rotazione carpale AC è una costante pari a $(1 + \phi) = 1 + 1,618 = 2,618$ ”* che indica e connota la sua naturale normalità geometrica e (quindi) idoneità meccanica. In formula:

$$(1) \text{ ISC (Indice di stabilità carpale)} = \text{AB/AC} = \text{Costante (k)} = (1 + \phi) = 2,618$$

Trasponendo l'ISC = 2,618 nella pratica clinica (sulle Rx-grafie dei polsi normali e indenni), è possibi-

strettamente collegati ai *numeri della famosa serie di Fibonacci (1170-1235): (0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89...)* ogni numero è somma dei due precedenti e il rapporto tra due numeri successivi tende al valore aureo” (v. al sito internet <http://www.ce.surrey.ac.uk/Personal/R.knott/Fibonacci/fib.html>) e sono stati utilizzati, soprattutto nell'arte greca e nel Rinascimento, nella progettazione delle forme in architettura, in pittura e nella grafica. Devono il loro nome alla bellezza e all'equilibrio delle proporzioni che da essi derivano, come ha evidenziato il matematico francescano Luca Pacioli (1450-1515), contemporaneo ed amico di Leonardo da Vinci, nel suo trattato *De Divina Proportione* e nel *Libellus Corporium Regularium* dove viene svolta la costruzione proporzionale del corpo umano (v. al sito internet: <http://math/truman.edu-thammond/history/LucaPacioli.html>).

Nell'epoca attuale, da alcune revisioni dei fondamenti epistemologici e delle basi della fisica teorica è stata elaborata una nuova *“Fisica Unigravitazionale”* che, nella formulazione della c.d., *Equazione Cosmologica* (v. al sito internet: <http://www.provincia.napoli.it/clip/fisica.htm>), sostiene, fra l'altro, che **“tutte le strutture aggregative biologiche o no esistenti in natura nascondono nella loro conformazione geometrica il valore della sezione aurea che ne costituisce così il naturale fondamento matematico”**.

Geometricamente, la sezione aurea è la parte di un segmento media proporzionale tra l'intero segmento e la parte restante. In altre parole, un punto C suddivide un segmento AB secondo la sezione aurea quando si verifica la proporzione $AB : BC = BC : AC$. Nel caso del polso ciò significa che, nello scheletro o su una rx-grafia AP, il segmento BC che individua la differenza tra l'altezza del carpo AB e l'altezza del centro di rotazione carpale AC è medio proporzionale tra AB ed AC (Fig. 5). Dal punto di vista matematico la proporzione assume il seguente valore:

$$\text{AB/BC} = \text{BC/AC} = 1,6180339... = \phi (\text{fi}) = \sqrt{5 + 1}$$

= numero irrazionale detto numero aureo.

Nel polso indenne e normale ϕ vale indipendentemente dalle dimensioni delle ossa considerate; esattamente come un altro numero irrazionale: $\pi = 3,14$ (pi greco: ossia, il rapporto tra la circonferenza e il diametro) vale in ogni cerchio o, $\sqrt{2} = 1,414$ (radice di 2: ossia, il rapporto tra la dia-

le derivare l'altezza del centro di rotazione carpale AC a partire dall'altezza del carpo AB, con un'accuratezza sovrapponibile (se non migliore) a quella del suddetto metodo empirico.

Ossia: AC = AB/2,618

È utile segnalare che, essendo ϕ un numero irrazionale, la misurazione rx-grafica dell'ISC può fornire valori lievemente discordanti da 2,618, esattamente come misurare e rapportare il diametro e la circonferenza di un cerchio, sul disegno, può fornire valori di π lievemente discordanti da 3,14.

La precisione assoluta è matematicamente e strumentalmente impossibile, al massimo si può essere accurati al centesimo di millimetro, e comunque, l'approssimazione (purché minima) non modifica i termini del suddetto rapporto.

Pur con tali limiti, l'ISC può rappresentare una “misura” oggettiva della instabilità carpale, poiché, di fat-

gonale ed il lato) vale in ogni quadrato.

Un facile riscontro che ϕ è soggiacente l'architettura e la fenomenologia dinamica delle strutture viventi deriva dal considerare che sono rettangoli aurei tutti gli infiniti rettangoli i cui lati stanno tra loro come 1,618 sta a 1. Sottraendo da un rettangolo aureo il quadrato costruito col suo lato minore si ottiene la struttura della spirale logaritmica, facilmente disegnabile descrivendo una serie progressiva di quarti di circonferenza, come è, per esempio, nel grafico riferito alla conchiglia del Nautilus (Fig. 6). Ciò non è certamente casuale; poiché proprio la spirale logaritmica si rende manifesta in altri fenomeni biologici come, per citare qualche esempio, la crescita esponenziale di tutte le popolazioni biologiche che dispongano di risorse e spazi illimitati, la fisiologia della conduzione e del reclutamento nervoso, il de-

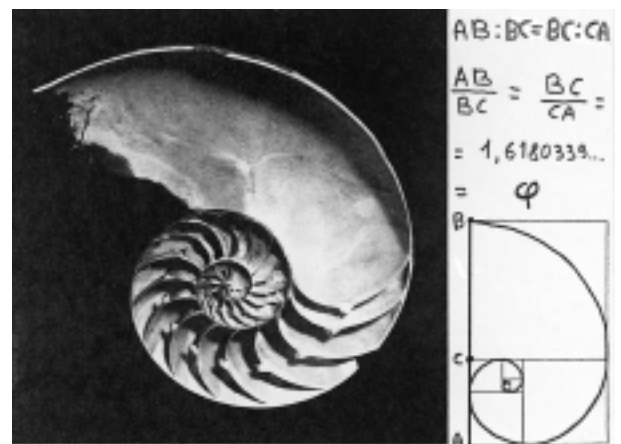


Fig. 6 - Un facile riscontro che ϕ è soggiacente l'architettura e la fenomenologia dinamica delle strutture viventi deriva dal considerare che sono rettangoli aurei tutti gli infiniti rettangoli i cui lati stanno tra loro come 1,618 sta a 1. Sottraendo da un rettangolo aureo il quadrato costruito col suo lato minore si ottiene la struttura della spirale logaritmica, facilmente disegnabile descrivendo una serie progressiva di quarti di rirconferenza, come è, per esempio, nel grafico riferito alla conchiglia del Nautilus (v. testo).

to, non è che un altro modo (intrinseco alla geometria naturale del polso in esame) per valutare (con un numero) l'entità di un eventuale collasso carpale, *senza la necessità del confronto con il polso controlaterale*.

Infatti, nelle instabilità in DISI o in VISI (9, 10) e in tutti i casi in cui la dislocazione prossimale della testa del capitato ha comportato la diminuzione dell'altezza del carpo (come, p.e. nello SLAC o nel Kienboeck avanzato) il suo valore sarà tanto maggiore di 2,618 quanto più grave è il danno strutturale e l'instabilità che da ciò ne deriva (p.e., un ISC di 2,850 indica una diminuzione dell'altezza del centro di rotazione di almeno 1-1,5 mm che già appartiene ad un'instabilità (forse) non ancora strutturata (dinamica); mentre un ISC >3,000 è già indicativo di un collasso carpale più o meno avanzato con un'instabilità (quasi sicuramente) strutturata (statica) ed in evoluzione artrosica (Fig. 7 a, b, c).

L'EQUAZIONE DI STABILITÀ DEL CARPO

L'indice ISC si basa sulla geometria naturale dei rapporti ossei, ossia, sulla pertinenza o meno della conformazione e congruenza delle ossa carpali alla struttura anatomicamente normale ed indenne del polso ideale concepito dalla natura.

Nel concreto, alla stabilità (S) del polso normale (e reale) concorrono molti fattori. Fra questi fattori,

quello osseo (O) (ossia, la suddetta conformazione geometrica normale) è di gran lunga il più importante. Altri fattori, non meno importanti, sono quello legamentoso (L) e quello tendineo muscolare (F) che presiedono, rispettivamente, *alla stabilità passiva e alla stabilità attiva*.

Il polso stabile è, pertanto, il risultato dell'interazione di fattori ossei, capsulo-legamentosi e tendineo muscolari pertinenti ad una struttura anatomicamente normale e indenne; tendenzialmente identica (poiché naturale) a quella del suddetto polso ideale.

Questa interazione, indipendentemente dalla possibilità o meno che i suddetti fattori possano essere in qualche modo quantizzati, è traducibile in termini matematici. Ossia, con una formula:

$$(2) \text{ Stabilità carpale} = S = [O] \cdot [L] \cdot [F]$$

Ma poiché anche l'indice di stabilità carpale (1) rappresenta la stabilità S, in termini geometrici. Sostituendo S con l'ISC, la (2) diventa l'Equazione di Stabilità del Carpo (ESC).

$$(3) \text{ ESC} = S = [O] \cdot [L] \cdot [F] = \text{ISC} = k = (1 + \varphi) = 1 + 1,618 = 2,618$$

che, scritta in altra forma diventa:

$$[O] \cdot [L] \cdot [F] = AB/AC$$

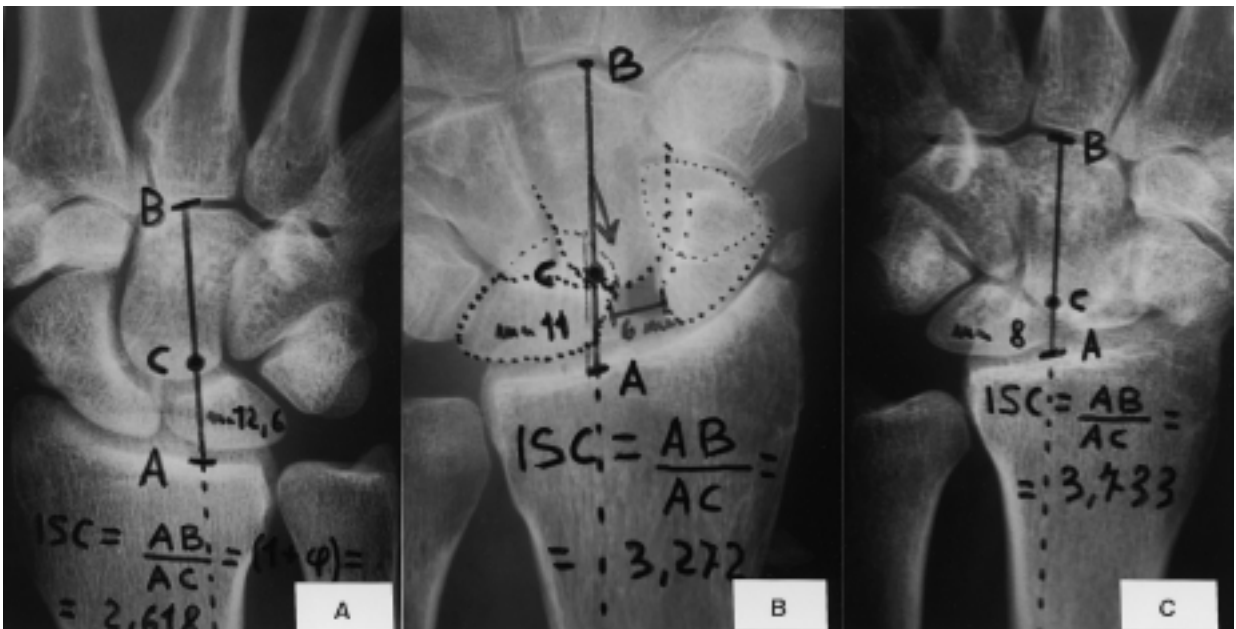


Fig. 7 - Nel polso stabile ideale, l'indice di stabilità carpale ISC, ossia, il rapporto tra l'altezza del carpo AB e l'altezza del centro di rotazione carpale AC è una costante pari a $(1 + \varphi) = 1 + 1,618 = 2,618$ che indica e connota la sua normalità geometrica e idoneità meccanica. Il valore dell'ISC aumenta progressivamente alla gravità del collasso carpale (e/o dislocazione della testa del capitato); da ciò la possibilità di quantizzare l'instabilità, indipendentemente dal confronto con il polso sano controlaterale. A confronto: l'ISC di un polso normale = 2,618 (a), di un polso con dissociazione scafo-lunare = 3,272 (b) e di un polso collassato per pseudoartrosi scafoidea = 3,733 (c) (v. testo).

CONDIZIONI DI STABILITÀ PRIMARIA E SECONDARIA DEL POLSO

Sinteticamente, la suddetta formula esprime il fatto che la conformazione, la stabilità e l'assetto funzionale del polso normale seguono un ben preciso canone architettonico presente in natura e che l'interazione dei fattori (O), (L), (F) tende a conservare la geometria del sistema carpale e, quindi, la costanza dell'indice carpale k (o, in altri termini, la posizione del centro di rotazione), in ogni condizione funzionale. (Letteralmente: "l'interazione tra le ossa, i legamenti e i muscoli equivale (mantiene) il rapporto (costante, di 2,618) tra l'altezza del carpo e la posizione del centro di rotazione (testa del capitato)".

Ciò significa che le interazioni osteo-legamentose e muscolo-tendinee tendono, autoregolandosi a vicenda, a mantenere stabile l'assetto geometrico del carpo. Impegnandosi, in pratica, a non modificare la posizione del centro di rotazione in tutte le possibili, normali, prestazioni funzionali; adeguandosi e minimizzando anche – all'occorrenza e nei limiti del fisiologico adattamento – ogni prestazione eccezionale e/o eventuale danno.

Così, nel polso indenne, a riposo e in condizioni di assetto meccanico fisiologico, la coerenza geometrica del carpo viene mantenuta principalmente dal contributo stabile (praticamente fisso e costante) del fattore osseo (O) e legamentoso (L), proporzionalmente alla qualità specifica della congruenza ossea e/o della tenacia dei legamenti. **Questa è la stabilità passiva o primaria o strutturale.**

Al contrario, necessariamente variabile viene ad essere il contributo del fattore tendineo-muscolare (F) il quale agisce, principalmente in condizioni di stress meccanico, a controbilanciare gli effetti di qualsivoglia forza esterna (f) intervenuta a sollecitare le strutture carpalie (es. un carico agente sulla mano, uno sforzo in torsione ecc.) o a correggerne le debolezze della componente osteolegamentosa O ed L secondarie ad eventuali esiti lesivi o costituzionali (es. da rottura legamentosa, da frattura e/o pseudoartrosi, da lassità costituzionale ecc.). **Questo contributo è la stabilità attiva o secondaria o funzionale.**

Infatti, nel caso il polso debba controbilanciare una forza esterna (f) (p.e. durante il sollevamento di un oggetto con la mano) la (3) diventa:

$$(f) \cdot (O \cdot L \cdot F) = k$$

Ora, affinché l'equilibrio k rimanga invariato il fattore tendineo muscolare F dovrà produrre una forza aggiuntiva (e inversa) $1/(f)$ tale che:

$$(f) \cdot (O \cdot L) \cdot [F \cdot 1/(f)] = k$$

In altri termini, l'apparato muscolo-tendineo del

braccio e della mano, mediante la regolazione nervosa propriocettiva e al fine di mantenere la coerenza geometrica del carpo (k), sviluppa una forza (di reazione) inversa $1/(f)$; cioè, uguale (per intensità e direzione) e contraria (per verso) a quella della forza (f) (peso) dell'oggetto che si sta sollevando.

Normalmente, il principale produttore della forza F e/o $F + 1/(f)$ sono i muscoli intrinseci e i tendini degli estrinseci che ingabbiano il polso.

Questi effettori motori si attivano automaticamente anche nel caso in cui sia necessario bilanciare i carichi e gli sforzi aggiuntivi originati da eventuali strutture indebolite e/o danneggiate dal trauma. Per esempio, *alcune minime lesioni legamentose del carpo spesso danno segno di se proprio a causa dell'aumento dell'attività degli effettori muscolari preposti a supportare e/o a vicariare la perdita stabilità passiva che da quei legamenti dipendeva.*

A volte questo compito, corrispondentemente alla gravità ed alla sede del danno, può diventare molto oneroso: e, certamente, squilibri biomeccanici di questo tipo stanno alla base di alcuni dei sintomi e della facile faticabilità che affliggono il polso costituzionalmente lasso o con instabilità di tipo dinamico (p.e., nella forma dinamica della disgiunzione scafo-lunare, l'evoluzione verso la DISI e la strutturazione verso il collasso carpale può, in qualche caso essere parecchio lenta tanto da, essere clinicamente ininfluenza in ragione dell'entità del danno e dell'utilizzo specifico di "quel" polso. Ciò per merito dei fenomeni adattativi della componente tendineo-muscolare F) o, in relazione all'argomento di questo studio, i soggetti che hanno subito recentemente la sezione del legamento trasverso del carpo per STC (quando, per esempio, insorga la pillar sindrome).

IL COMPLESSO PUPT (PISO-UNCO-PALMO-TRASVERSO DEL CARPO)

Fra i dispositivi teno-muscolari automatici (il suddetto fattore F) preposti al controllo attivo della coerenza geometrica del carpo, di particolare importanza è una struttura situata all'esterno del complesso articolare carpale denominata "Complesso PUPT". Il complesso risulta costituito dall'osso pisiforme con il FUC (flessore ulnare del carpo) dall'apofisi uncinata dell'uncinata e dal legamento trasverso del carpo in seno al quale è attivo il piccolo muscolo palmare breve (Fig. 8).

Questa struttura chiude volarmente la doccia carpale e, disposta sul piano frontale, assolve una funzione unitaria che consiste *nel trasferimento del moto da un versante all'altro del carpo, anche in modo incrociato: da scafoide e trapezio, rispettivamente, a pisiforme e uncinato e, viceversa.* Il tutto con la mediazione del legamento palmare trasverso che funziona



Fig. 8 - Il complesso PUPPT (Piso-Unco-Palmo-Trasverso) del carpo risulta costituito dall'osso pisiforme con il FUC (Flessore Ulnare del Carpo) dall'apofisi uncinata dell'uncinato e dal legamento trasverso del carpo in seno al quale è attivo il muscolo palmare breve (v. testo).

come una *molla a tensione variabile, capace di immagazzinare e trasferire energia meccanica*. L'osso pisiforme rappresenta il centro nevralgico del complesso e, in condizioni di carico (per es. nella deviazione ulnare contro la resistenza (f), quando è messo in tensione dal tendine del flessore ulnare del carpo, dagli ipotenari e dal palmare breve agisce (spinge, secondo necessità, con forza $\pm 1/(f)$, con doppio effetto: *cinetico - di trasmissione delle forze - e cinematico - di movimento -*) direttamente sul piramidale (mediante l'articolazione piso-piramidale) stabilizzando quest'osso e/o coadiuvandolo attivamente nella sua azione derotativa sull'uncinato (trasmessa, poi al capitato). Viceversa, in condizioni di scarico (per es. nella deviazione ulnare passiva), la componente cinetica tende ad azzerarsi e, durante l'avvitamento del condilo carpale sul radio, l'identico effetto (solo più) cinematico sull'uncinato (e, indirettamente, sul capitato) è ottenuto dalla semplice congruenza ossea mantenuta dai vincoli legamentosi.

Il muscolo palmare breve, invece, funziona da regolatore della tensione elastica del legamento trasverso del carpo, impedendo che questa aumenti troppo o (al contrario) troppo poco; principalmente, quando scafoide e trapezio trazionano sul lungo braccio di leva dell'apofisi dell'uncinato a favorire ancor meglio la suddetta derotazione di quest'osso.

Il complesso PUPPT, pertanto, esplica un'importante regolazione intercarpica attiva (che coinvolge i musco-

li) e che si manifesta, principalmente, in condizioni di stress meccanico (quando la mano è sollecitata da un carico (f). A riposo e in scarico, invece, l'autoregolazione tra il condilo carpale ed il resto del carpo avviene passivamente mediante la congruenza ossea e la tenuta legamentosa.

A condividere con il complesso PUPPT il fattore di stabilizzazione attiva F e la produzione di forze cinetiche di reazione $1(f)$ è, anche, il meccanismo di coattazione del condilo carpale sul radio distale da parte dei tendini flessori ed estensori che ingabbiano il polso.

Con questi dispositivi, in equilibrio cinetico, è consentito il movimento e garantita la cinematica ottimale del complesso carpale anche in caso di forze (f) (sollecitazioni di carico) agenti, dall'esterno, sulla mano.

BIOMECCANICA DEL LEGAMENTO TRASVERSO DEL CARPO (LTC)

Il ruolo che il legamento trasverso del carpo possiede nel complesso PUPPT è desumibile dalla sua topografia, dalle sue caratteristiche anatomiche macro e microscopiche e dagli effetti che si manifestano dopo la sua sezione (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 14, 15, 16). Questi i dati salienti:

Il LTC è inserito dal lato radiale, sulla cresta del trapezio e sul tubercolo dello scafoide; mentre, dal lato ulnare, tra apofisi unciforme dell'uncinato e pisiforme (cioè tra gli estremi laterali del condilo carpale) è teso, al davanti dell'arco carpale, come una molla e *perfettamente centrato sulla testa del capitato*. In media, misura 3 cm di lunghezza 2,5 cm di larghezza e, la sua sezione trasversale ha un aspetto a virgola, più spesso (3-5 mm), distalmente, in corrispondenza dei fasci di fibre che connettono l'apofisi unciforme al trapezio (*porzione unco-trapezoidea*) e meno spesso (1-2 mm), prossimalmente, in corrispondenza dei fasci che connettono il pisiforme allo scafoide (*porzione piso-scafoidea*) (Fig. 9).

Costituito prevalentemente da fibre collagene molto fini (200 μm) e ondulate a decorso trasversale è, anche *ricchissimo di fibre elastiche*. Tanto che, sotto tensione, l'allungamento ottenibile è dal 50 al 70% della lunghezza iniziale.

Questa tensione, è normalmente presente, anche a riposo. In particolare con la sezione longitudinale del legamento si produce l'ampliamento del diametro del canale ($\pm 3-6$ mm); lo scafoide ed il piramidale derotano lievemente, sotto la spinta del pisiforme che subisce una traslazione laterale interna di 1-4 mm. Il trapezio ed il trapezoide pivotano verso l'esterno, mentre l'uncinato, verso l'interno. *Il capitato sembra rimanere immobile, tuttavia ai suoi lati, le ossa si divaricano lievemente e risultano meno compatte*.



Fig. 9 - Il Legamento Trasverso del Carpo è normalmente in tensione; infatti con la sua sezione longitudinale (come illustrato in figura, sul preparato anatomico) si produce un ampliamento del canale di ($\pm 3-6$ mm). Inoltre, la superficie di taglio (evidenziata, con il blu di metilene) ha un aspetto a virgola, più spesso (3-5 mm) distalmente, in corrispondenza dei fasci di fibre che connettono l'apofisi unciforme al trapezio; meno spesso (1-2 mm) prossimalmente, in corrispondenza dei fasci che connettono il pisiforme allo scafoide. La differenza strutturale del settore prossimale e distale della "virgola" implica corrispondenti e diversificati ruoli funzionali (v. testo).

Dal punto di vista funzionale, la sezione del legamento (come p.e. si ottiene nel trattamento chirurgico della STC) produce una riduzione della forza di presa, almeno fino a quando la cicatrizzazione non abbia prodotto un rigenerato sufficientemente tenace. Ciò può avere delle serie conseguenze sul recupero, poiché, *soprattutto nei lavori ripetitivi e/o di forza*, la ripresa dell'occupazione prima di una buona cicatrizzazione può evocare l'insorgenza di dolore antibrachio e/o carpale sub-cronico (*pillar syndrome*).

Ciò sembra avvenire, oltre che per l'indebolimento della puleggia flessoria, anche per il fatto che – essendo la tensione del LTC calibrata dall'azione dei muscoli appartenenti al suddescritto complesso PUPT (flessore ulnare del carpo, ipotenari, tenari, palmare breve e lungo ecc) – *con la sezione del legamento i suddetti muscoli lavorano "a vuoto"* producendo una specie di "ingorgo propriocettivo" con dolore, possibile blocco funzionale e, nei casi più gravi, anche algodistrofia.

In ogni caso, la porzione unco-trapezoide del LTC è quella più impegnata nella funzione tensile. Infatti, mediante la connessione pisiforme – legamento-piso-

uncinato - LTC - trapezio le forze di tensione vengono trasferite da un versante all'altro del carpo e impiegate, *oltre che per stabilizzare il capitato e con esso il centro di rotazione carpale, anche per stabilizzare il I metacarpale durante la presa e/o la compressione assiale del pollice contro una resistenza.*

Meno tenace è, invece, la porzione piso-scafoidea che essendo più sottile, nei lavoratori manuali (a causa dell'adattamento ex uso) spesso viene a rinforzarsi con digitazioni muscolari trasversali originate dal muscolo palmare breve che, in tal modo, coadiuva attivamente e secondo necessità al suddetto sostegno tensile.

A questo proposito, *mediante ecotomografia* abbiamo osservato che durante la flessione attiva delle dita il diametro del canale carpale diminuisce di un paio di millimetri, per poi rinormalizzarsi a dite estese. In altri termini, *a causa della sua elasticità e delle suddette connessioni muscolo-tensive il LCT si comporta come una specie di "legamento che respira", in grado di generare una vera e propria "sistole" e "diastole" canalare.*

Probabilmente questa attività è funzionale al mantenimento del trofismo locale ed una sua eventuale alterazione potrebbe, forse, concorrere alla genesi di una Sindrome del Tunnel Carpale.

CONCLUSIONI

In conclusione, pertanto, le suddette caratteristiche anatomiche e funzionali indicano chiaramente che il legamento trasverso del carpo, oltre che rappresentare la puleggia dei flessori, possiede anche il ruolo, forse ancor più impegnativo ed interessante, di struttura propriocettiva integrata agli effettori muscolari del complesso PUPT e sollecitata da forze che si immagazzinano e si trasmettono (come in una molla a tensione variabile) da un versante all'altro del carpo, *intente a connettere e a sostenere l'arco osseo di cui chiave di volta è il capitato* (Fig. 10 a, b).

Queste sollecitazioni possono diventare alquanto elevate nella sua porzione distale; là, dove lo scafoide ed il trapezio inviano un robusto contingente di fibre ad inserirsi su lungo braccio di leva dell'apofisi uncinata dell'uncinato ed i flessori hanno la loro puleggia e possono, quindi, esercitare il loro maggiore effetto contribuendo (sotto sforzo) con un'ulteriore trazione.

Il LTC, in tal modo, contribuisce significativamente sia alla stabilità primaria (o, passiva) che secondaria (o, attiva) del carpo e, quindi, alla costanza dell'Indice di Stabilità Carpale (ISC); ovvero, alla geometria complessiva e al mantenimento stazionario del centro di rotazione carpale dislocato nella testa del capitato stesso, *principalmente sul piano trasversale e frontale.*

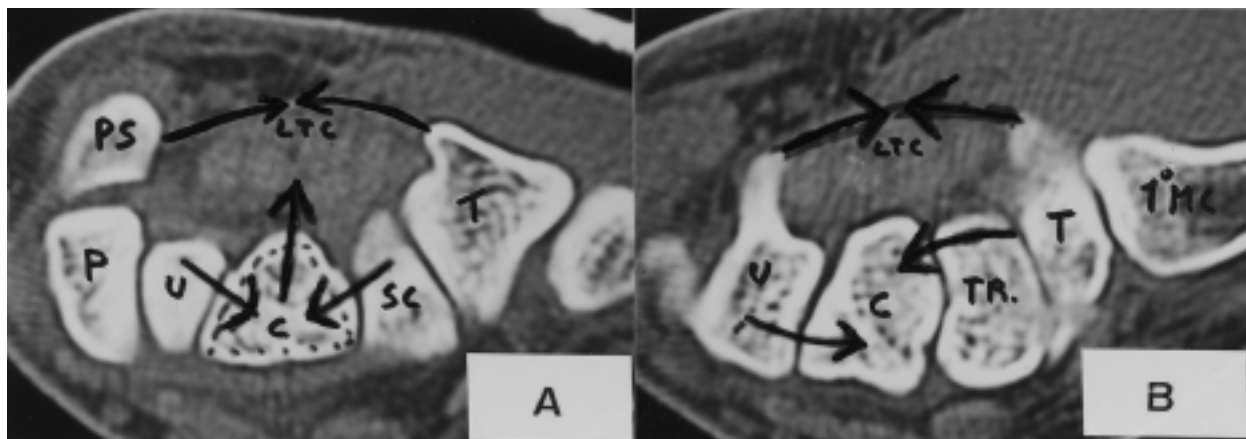


Fig. 10 - Le due immagini TAC, consentono di illustrare il ruolo del LTC a sostegno della stabilità carpale. In (a) la sequenza attraversa la porzione prossimale e più sottile del legamento (piso-scafoidea) (LTC) che si presenta come la corda di un arco ulteriormente tensionabile dal muscolo palmare breve. A tale livello, infatti, il capitato (C) ha sezione triangolare (come una chiave di volta) ed è perfettamente controllabile, nei suoi spostamenti torsionali, dallo scafoide (SC) e dall'uncinato (U). In (b) la sequenza attraversa la porzione distale e più spessa del legamento (unco-trapezoidea) (LTC). A tale livello, sul capitato (C) agisce la coppia ossea uncinato (U) - trapezoide (TR). Mentre la corda tesa del LTC, diretta dall'apofisi uncinata al trapezio (T), può agire in due direzioni: sul trapezoide (TR) e quindi sul capitato (C) e (in più) stabilizzare il pollice attraverso il I metacarpale (1° MC).

Tutto ciò, è perfettamente in accordo con il suddescritto Modello Biarticolare Concentrico di meccanica carpale, e chiarisce l'importante contributo che il LTC apporta al fattore legamentoso (L) col variabile contributo del fattore tendineo-muscolare (F) nell'Equazione di Stabilità del Carpo (ESC).

In altri termini, il LTC (oltre che guidare i flessori e connettere passivamente alcuni elementi ossei del carpo) presiede al compito di immagazzinare e trasferire l'energia meccanica (generata dai vari effettori muscolari limitrofi) sulle ossa carpali che abbracciano il capitato; al fine di contribuire (più o meno) attivamente (e controllare propriocettivamente) che si mantenga senza danno l'assetto geometrico del centro di rotazione e (quindi favorire) la stabilità del massiccio carpale (primaria e/o secondaria) in ogni atteggiamento funzionalmente normale (statico e/o dinamico) richiesto alla mano, nel corso delle sue attività.

RIASSUNTO

In questo studio è discussa la biomeccanica del legamento trasverso del carpo (LTC) in relazione al complesso PUPT (Piso-Unco-Palmo-Trasverso) e al Modello Biarticolare Concentrico (MBC) di meccanica carpale. Il suddetto MBC chiarisce e definisce adeguatamente i meccanismi di reciproca regolazione che intercorrono tra le ossa delle due filiere carpali, rendendo ragione, in termini biomeccanici, della peculiare conformazione del carpo e più in generale della stabilità del suo assetto geometrico coincidente con il mantenimento stazionario della posizione del centro di rotazione, localizzato nella testa del capitato. L'osservazione che nel suddetto assetto geometrico è nascosto il famoso rapporto aureo ϕ (fi) =

1,618, poiché "il rapporto tra l'altezza del carpo e l'altezza del centro di rotazione carpale è una costante pari a $(1 + \phi) = (1 + 1,618) = 2,618$ "rende possibile formulare l'Indice di Stabilità Carpale (ISC) e l'Equazione di Stabilità del Carpo (ESC). L'ISC e l'ESC esprimono il fatto che l'assetto geometrico del polso normale segue un ben definito canone architettonico presente in natura e che l'interazione della componente ossea (O), legamentosa (L) e tendineo-muscolare (F) è subordinata al controllo ed al mantenimento della stabilità centrocarpica in maniera attiva e/o passiva e in ogni condizione funzionale. In questo contesto, il ruolo del Legamento Trasverso del Carpo è desumibile dalle sue peculiarità anatomiche micro e macroscopiche. E sarebbe, oltre quello di fornire una puleggia ai flessori, di immagazzinare e trasferire energia meccanica tra le ossa carpali che abbracciano e dirigono il capitato e contribuire, in tal modo e più o meno attivamente, alla stabilizzazione del suddetto centro di rotazione.

BIBLIOGRAFIA

1. LANZ T, WASCHSMUTH W: *Praktische Anatomie (Anatomia Pratica - traduzione italiana a cura di Marino V), Vol. I. Piccin Editore, Padova, p. III: 1973.*
2. BONOLA A, CAROLI A, CELLI L: *La Mano. Piccin Editore, Padova, 63-64: 1981.*
3. GARCIA-ELIAS M, AN KN, COONEY WP, ET AL: *Transverse stability of carpus. An analytical study. J Orth Res 7: 733-743, 1989.*
4. TUBIANA R: *Traité de chirurgie de la Main, Vol. 4. Masson Editore, Parigi, 469: 1991.*
5. GARCIA-ELIAS M, SANCHEZ FREIJO JM, SALO JM, ET AL: *Dynamic changes of the transverse carpal arch during flexion-extension of the wrist: effect of sectioning the transverse carpal ligament. J Hand Surg (Am) 17: 1017-1019, 1992.*

6. KLINE SC, MOORE JR: The transverse carpal ligament. An important component of the digital flexor pulley system. *J Bone Joint Surg Am* 74: 1478-1485, 1992.
7. KOBBS TK, DALLEY BK, POSTERARO RH, ET AL: Anatomy of the flexor retinaculum. *J Hand Surg (Am)* 18: 91-99, 1993.
8. GRIPPI GM: Cinematica del condilo carpale con introduzione al Modello Carpale Biarticolare Concentrico (MBC) e sua applicazione al problema dell'instabilità carpale. *Riv Chir Riab Mano Arto Sup* 34 (3): 389-401, 1997.
9. LINSCHIED RL, DOBYNS JH, BEABOUT JW, BRYAN RS: Traumatic. In Bryan RS «Traumatic instability of the wrist. Diagnosis, classification and pathomechanism». *JBS* 54-A: 1612-1632, 1972.
10. DOBYNS JH: Carpal instability. A review. In «Wrist disorders». Springer-Verlag, Tokio, 1992.
11. FISK GR: Influence du ligament annulaire antérieur du carpe (retinaculum flexorum) sur la stabilité carpienne. *Ann Chir Main* 3: 297-299, 1980.
12. KUHLMANN JN, MAYER-OTETEA G: Nerfs cutanés palmaires et voies d'abord de la face antérieure du poignet et de la paume. *Ann Chir* 30 (11-12): 856-865, 1976.
13. KUHLMANN JN, TUBIANA R, LINSFRANC R: Apport de l'anatomie dans la compréhension des syndromes de compression du canal carpien et des séquelles des interventions décompressives. *Rev Chir Orthope* 64: 59-70, 1978.
14. KUHLMANN JN: Etude anatomique et fonctionnelle du canal carpien. In Tubiana R «Traité de Chirurgie de la Main», vol. 4. Masson Editore, Parigi: 472-486, 1991.
15. GELLMAN H, KAN D, GEE V, KUSCHNER SH, BOTTE MJ: Analysis of pinch and grip strength after carpal tunnel release. *J Hand* 14A: 863-864, 1989.
16. GARTSMAN GM, KOVAK JC, CROUCH CC, NOBLE PC, BENNETT JB: Carpal arch alteration after carpal tunnel release. *J Hand Surg* 11A: 372-374, 1989.

Dott. Gaetano Maurizio Grippi
Via dell'Acquedotto 7/1
12051 ALBA (CN)

grado entropico della senescenza ecc.