POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Biomedica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea Magistrale

Tecniche sperimentali per lo studio e la caratterizzazione del tendine d'Achille in ultrasonografia



Relatore prof. Filippo Molinari

Candidato Lorenzo Racca

INDICE

INDIC	CE	3
INTR	ODUZIONE	6
1. A	CQUISIZIONE DELLE IMMAGINI E DEI DATI	8
1.1	Immagini, parametri e modalità di acquisizione	9
1.2	Nomenclatura delle immagini	12
2. II	L TENDINE	15
2.1	Istologia del tendine	15
2.2	Caratterizzazione meccanica del tendine	17
2.3	Patologie del tendine	20
2.4	La rottura del tendine d'Achille	21
2.5	Metodologie diagnostiche	23
3. L	'ELABORAZIONE DELLE BIOIMMAGINI	24
3.1 defi	Breve storia delle tecniche di imaging più comuni in Medicina Erroined.	r! Bookmark not
3.2	Acquisizione ed elaborazione qualitativa delle bioimmagini	24
3.3	Caratteristiche generali di un immagine	24
3.4	Fondamenti dell'elaborazione delle immagini	27
4. L	E IMMAGINI ULTRASONOGRAFICHE	35
4.1	Propagazione degli ultrasuoni	35
4.2	Generazione e geometria del fascio	35
4.3	Propagazione e riflessione degli ultrasuoni	36
4.4	Attenuazione degli ultrasuoni	37
4.5	Risoluzione di un sistema eco pulsato	37
4.6	Principi di funzionamento di un sistema eco pulsato	38
4.7	Tecnica di scansione e modi di visualizzazione	39
	EGMENTAZIONE AUTOMATICA DEL TENDINE: TENDINI SANI E TE URGICI	
5.1	Image enhancement	41
5.	.1.1 Ricampionamento e ottimizzazione della dinamica	41
5.	.1.2 Filtraggio di Sobel	41
5.	.1.3 Filtraggio FOGD	42
5.	.1.4 Global thresholding e maschera binaria	43
5.2	Sagmentazione della cuta	45

5	5.3	Segmentazione del profilo superiore	46
	5.3.1	Identificazione degli oggetti candidati iniziali	46
	5.3.2	Oggetto principale del bordo superiore	. 46
	5.3.3	Oggetti laterali all'oggetto principale	. 48
	5.3.4	Oggetti principali laterali	49
	5.3.5	Oggetti secondari del profilo superiore	50
	5.3.6	Costruzione del profilo superiore	52
5	5.4	Segmentazione del profilo inferiore	55
	5.4.1	Identificazione degli oggetti candidati iniziali	55
	5.4.2	Oggetti principali del bordo inferiore	58
	5.4.3	Ripescaggio dei candidati	62
	5.4.4	Oggetti inferiori secondari	. 64
	5.4.5	Elaborazione dei frammenti di bordo	. 69
	5.4.6	Costruzione del profilo inferiore del tendine	71
5	5.5	Calcolo automatico dello spessore del tendine	72
6.	SEG	MENTAZIONE AUTOMATICA DEL TENDINE: TENDINI SANI	75
(5.1	Segmentazione del profilo inferiore	75
	6.1.1	Identificazione degli oggetti candidati iniziali	75
	6.1.2	Oggetto principale del bordo inferiore	76
	6.1.3	Ripescaggio del candidato escluso	77
	6.1.4	Oggetti secondari	78
	6.1.5	Elaborazione morfologica dei bordi	79
	6.1.6	Costruzione del profilo inferiore del tendine	80
<i>7</i> .	VAL	IDAZIONE DEL CODICE DI SEGMENTAZIONE	82
7	7.1	Graphical User Interface	82
7	7.2	Strumenti per il confronto tra le segmentazioni ottenute	. 86
	7.2.1	Hausdorff Distance (HDM)	87
	7.2.2	Polyline Distance (PDM)	87
	7.2.3	Centerline Distance (CDM)	87
7	7.3	Risultati della validazione	. 88
8.	ANA	LISI DI TESSITURA	. 90
8	3.1	Descrittori di tessitura	. 90
	8.1.1	Descrittori di tessitura del primo ordine	91
	8.1.2	Descrittori di tessitura del secondo ordine	91
	8.1.3	Descrittori di tessitura del terzo ordine	. 95
5	2 2	Implementazione dei descrittori di tessitura	97

8.2.1 Regioni di interesse per l'analisi di tessitura	97
8.2.2 Parametri matematici dell'analisi di tessitura	98
8.3 Risultati dell'analisi di tessitura	99
8.3.1 Descrittori del primo ordine	
8.3.2 Descrittori del secondo ordine	
8.3.3 Descrittori del terzo ordine	
9. ELASTOSONOGRAFIA QUANTITATIVA	
9.1 La tecnica elastosonografica	
9.2 Acquisizione ed analisi dei dati elastosonografici	
CONCLUSIONI	108
FONTI	
APPENDICI	
APPENDICE A	
APPENDICE B	126
APPENDICE C	129
APPENDICE D	Error! Bookmark not defined.

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'achillodinia, cioè l'affezione dolorosa acuta della regione del tendine d'Achille¹, rappresenta una ragione diffusa per cui, sia atleti, soprattutto podisti, che persone comuni richiedono spesso un consulto medico sia generale che specialistico². Questo anche a causa del fatto che si verificano sempre più casi di rottura di questo tendine, con conseguenze molto spiacevoli per il soggetto colpito, soprattutto nell'ambito della carriera sportiva³.

Detto questo, è facile intuire come i tendini e le loro relative problematiche patologiche e traumatiche rappresentino un tema molto discusso dalla comunità sciantifica. L'aumento costante del numero di sportivi, sia agonisti che amatoriali, impone uno sforzo costante da parte degli studiosi per stimolare la ricerca di base, clinica e chirurgica, in questo campo⁴.

Attualmente, grazie al basso costo e all'elevata disponibilità, quasi tutte le procedure di indagine diagnostica prevedono inizialmente l'utilizzo combinato delle immagini ecografiche B-mode e dell'ecografia Power Doppler²; la fisiologia del tendine, però, è ben lungi dall'essere completamente svelata e i metodi di indagine finora utilizzati presentano notevoli limiti nel campo diagnostico. Ad esempio, né l'imaging ecografica né la risonanza magnetica (altro tipo di imaging utilizzata nel campo), riescono a fornire informazioni sulle proprietà meccaniche del tendine *in vivo*.

L'elastosonografia real time (*Shear Wave Elastosonography*), invece, è una tecnica di imaging basata sugli ultrasuoni recentemente sviluppata, e rende possibile, almeno teoricamente, la valutazione dell'elasticità di un tessuto isotropo. È già stata utilizzata nello studio dei tendini con parziale successo².

In ogni caso, non sono ancora state sviluppate, quindi, delle piattaforme *CAD* (*Computer Aided Diagnosis*) capaci di indagare e di effettuare classificazioni di rilevanza diagnostica sul tessuto tendineo.

In questi ambiti si colloca questa Tesi, che si propone lo scopo di sperimentare metodologie ancora innovative per lo studio e la caratterizzazione del tendine d'Achille, nel campo di indagine delle tecniche ultrasonografiche: le immagini B-mode e l'elastosonografia.

In particolare, lo sudio riguarda l'utilizzo di queste due tecniche di imaging nel monitoraggio dello stato fisiopatologico del tendine durante il processo di guarigione che segue la rottura del tendine achilleo (e il conseguente intervento chirurgico): in ambito sportivo, soprattutto, la possibilità di dichiarare conclusa la guarigione sarebbe estremamente utile per un atleta, in modo che gli possa essere permessa con sufficente sicurezza la ripresa dell'attività agonistica, in modo da evitare la risorgenza di stati traumatici (rirottura) o dolorosi (achillodinia o patologie degenerative).

Questa tesi si pone dunque tre obiettivi principali:

1. Lo sviluppo di un programma informatico in grado di effettuare la segmentazione automatica del tendine, ovvero di riconoscere autonomamente, senza alcun intervento di operatori esterni, la regione corrispondente al tendine all'interno di un immagine ecografica B-mode (tale argomento sarà trattato nei capitoli 5, 6 e 7).

- 2. Lo studio della *tessitura* del tendine rappresentato nelle immagini B-mode, in modo da valutare se i parametri di tessitura possano essere in qualche modo correlati allo stato fisiopatologico del tendine, attraverso il confronto tra immagini relative a tendini sani e immagini relative a tendini lesionati (capitolo 8).
- 3. L'analisi elastosonografica del tendine, sulla scia di altri esperimenti mossi in questo campo dal momento del lancio della nuovissima tecnica *SWE*, per valutare se la velocità di propagazione dell'onda di taglio, parametro che viene calcolato tramite questa tecnica (capitolo 9), possa essere correlato anch'esso con lo stato fisiopatologico del tendine.

Il terzo obiettivo richiede l'utilizzo di dati estratti da immagini elastosonografiche ed è perciò scorrelato dagli altri due, che richiedono esclusivamente ecografie B-mode e che sono pensati per essere applicati in cascata: una volta identificato il tendine, gli studi di tessitura possono essere direttamente svolti nella zona interessata.

Quindi, se i primi due obiettivi ottenessero risultati decisamente positivi, le basi per la progettazione di un sistema *CAD* in l'ambito tendineo potrebbero essere gettate.

Per quanto riguarda la parte iniziale di questa tesi, nel primo capitolo saranno descritti i materiali e i metodi utilizzati durante le sedute di acquisizione dei dati e delle immagini da elaborare.

Nei tre capitoli successivi, ci si concentrerà invece sul *background* di questa tesi, rispettivamente verrà fornita prima una panoramica generale sui tendini e sul problema della rottura del tendine d'Achille, verranno poi descritte le basi dell'elaborazione numerica delle immagini in Medicina, e infine, nel quarto capitolo, sarà illustrata la tecnica di imaging basata sugli ultrasuoni.

1. ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI E DEI DATI

Tra il 17 e il 19 ottobre 2016, presso il centro privato di riabilitazione ortopedica e sportiva Isokinetic® (FIFA Medical Centers of Excellence) di Torino, sono state acquisite 112 immagini ecografiche B-mode (capitolo 1) e 112 immagini elastosonografiche (capitolo 9) relative ai tendini d'Achille di 5 pazienti e di 2 soggetti controllo. Per poter essere selzionati, i pazienti dovevano aver subito, a circa un anno di distanza, un trauma unilaterale che avesse causato completa rottura del tendine, seguito da un operazione chirurgica volta a ricucire il tendine stesso (capitolo 2).

Lo stumento usato per effettuare l'acquisizione (figura 1.1, a sinistra) è un ecografo di ultima generazione, che, oltre ad effettuare le comuni funzioni di una macchina ecografica, quali ad esempio l'ecografia B-mode o l'ecografia doppler, può anche affettuare l'analisi elastosonografica. Siccome è uno dei pochi strumenti del suo genere in circolazione e non è proprietà del centro Isokinetic, il suo utilizzo è stato possibile soltanto per pochissimi giorni.

Lo strumento utilizzato appartiene alla Supersonic Imagine®, azienda nata ad Aix-en-Provence, Francia, nel 2005 e specializzata nel campo delle tecnologie ultrasonografiche di imaging e diagnostica medicale. L'ecografo utilizzato è una macchina Aixplorer®, modello *SSIP92502*, dotata di innovative tecnologie quali la piattaforma UltraFastTM, che può acquisire immagini US con una velocità notevolmente maggiore rispetto a quella degli ecografi tradizionali o la più interessante, almeno ai fini di questa tesi, Real-time ShearWave ElastographyTM (SWETM), che permette la caratterizzazione meccanica del tessuto insonato. Si parlerà dettagliatamente di questa tecnologia nel capitolo 6 di questa tesi. Il trasduttore (figura 1.1, a sinistra⁵), modello *SL18-5*, è una sonda lineare composta da 256 singoli elementi piezoelettrici, la cui banda, secondo le specifiche, può variare tra i 5 e i 18 MHz⁵.





Fig 1.1

1.1 Immagini, parametri e modalità di acquisizione

Per ogni soggetto sono state acquisite 16 immagini B-mode e 16 immagini elastosonografiche, seguendo uno schema di acquisizione ben predefinito, che ha portato successivamente ad una ben definita nomenclatura di tali immagini.

Durante l'acquisizione, il paziente è disteso prono. Tra la sonda e la cute viene disposto un *pad* gelatinoso di materiale anecogeno che impedisce la genesi di interfacce acustiche iperecogene causate dalla presenza di aria.

Per ogni tendine, sono state prelevate 8 immagini, combinando tutti i seguenti parametri di acquisizione:

- Proiezione di acquisizione dell'immagine: sagittale o assiale. Nel primo caso (proiezione longitudinale), il tendine si estende da una parte all'altra dell'immagine, con spessore più o meno uniforme, in cui il lato sinistro corrisponde alla parte distale del tendine e quello destro alla parte prossimale. Nel secondo caso (proiezione trasversale), la sezione di tendine rappresentata presenta una forma vagamente ellissoidale, con l'asse maggiore posto in orizzontale.
- Posizione del piede: flessa o estesa.

 La posizione flessa corrisponde ad una posizione il cui piede del soggetto, che sporge dal lettino, è piegato a 90° rispetto alla gamba (flessione dorsale). La posizione estesa indica invece una posizione in cui il piede compie la massima estensione plantare, ovvero l'angolo tra il piede e la gamba è il massimo possibile. Nella prima posizione il tendine target risulterà teso, nella seconda rilassato.
- Posizione della sonda rispetto al tendine: porzione distale o mediale. La sonda viene posizionata nel primo caso a poca distanza (2-3 cm) dall'inserzione del tendine sulla caviglia: nelle immagini ricavate in questo modo e in proiezione longitudinale, si può notare nella parte sinistra dell'immagine l'attaccatura del tendine sull'osso calcaneale, che è rappresentato da una struttura iperecogena molto ben visibile. Nel secondo caso la distanza dall'inserzione è maggiore (8-9 cm): in questo caso nessuna struttura ossea compare nell'immagine.

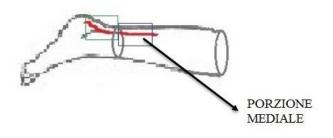
In figura 1.2 sono rappresentate tutte le 8 immagini dovute alle combinazioni dei fattori appena descritti; in rosso è rappresentato il tendine d'Achille. Le immagini acquisite in proiezione trasversale non sono poi state praticamente mai utilizzate durante lo svolgimento di questa tesi; fa eccezione l'ambito elastosonografico (capitolo 9).

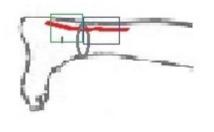
POSIZIONE ESTESA

POSIZIONE FLESSA

Immagini Longitudinali

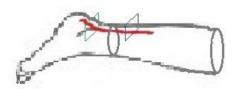






Immagini Trasversali

Immagini Trasversali



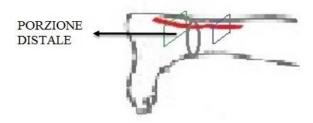


Fig 1.2

Al fine di ottenere una massima standardizzazione del processo, l'operatore che ha effettuato l'acquizione è stato il medesimo per tutte le immagini e tutti i pazienti. I parametri della macchina, e in particolare la frequenza delle onde US e il guadagno dell'amplificatore avrebbero dovuto essere mantenuti costanti per tutte le acquisizioni, ma così è stato solo per quanto riguarda la frequenza, settata e mantenuta a 25 MHz per le immagini B-mode e a 12 MHz per le immagini elastosonografiche: per motivi spiegabili dovuti alla scarsa confidenza con la macchina usata (come già detto, essa è stata disponibile per soli tre giorni), il guadagno non si è mantenuto stabile (il valore desiderato era pari al 50%), ci sono parecchie immagini in cui esso risulta pari a 49% (accettabile) e una decina di immagini in cui esso presenta valori che variano tra 30% e 66%. In ogni caso, questi fattori non incidono in modo rilevante sull'informazione contenuta nelle immagini in quanto, prestandosi poi all'elaborazione numerica, la dinamica delle immagini viene ottimizzata e resa identica per ogni immagine.

È stato scelto di evitare l'applicazione di qualsiasi tipo filtro, sia di base che avanzato, di cui la macchina ecografica fosse fornita: le immagini B-mode ricavate sono perciò relative al solo segnale, grezzo e rumoroso, in uscita dalla sonda. In tal modo si dovrebbero evitare artefatti artificiali dovuti all'effetto di tali filtri, il cui funzionamento non era noto, in quanto di proprietà dell'azienda. Con il senno di poi, credo che questa scelta si sarebbe dovuta evitare, in quanto l'immagine grezza risulta particolarmente rumorosa, mentre l'utilizzo di filtri specifici e commercialmente testati ne avrebbe migliorato decisamente la qualità.

Come già detto, oltre alle 112 immagini B-mode, sono state acquisite anche 112 immagini elastosonografiche. I parametri di acquisizione (posizione del piede, porzione del tendine, proiezione assiale o longitudinale) sono esattamente gli stessi. Nell'immagine elastosonografica, il cui argomento verrà trattato in modo esaustivo nel capitolo 9, viene posizionata manualmente, nel momento dell'acquisizione, una *roi* (region of interest) rettangolare più o meno grande, che va a inglobare una porzione consistente di tendine. All'interno di questa roi, per ogni pixel viene calcolato il valore di elasticità del tessuto (ovvero il valore del modulo elastico, espresso in kPa) e il valore della velocità di propagazione della shear wave.

Non è stato però possibile visualizzare questi valori grezzi relativi ai singoli pixel: una volta acquisita l'immagine, si può posizionare manualmente una piccola roi circolare all'interno di quella rettangolare: i valori relativi alle due grandezze sono definiti come valori statistici relativi ad ogni pixel contenuto in questa roi circolare.

L'immagine rappresentata a video viene splittata in due parti: in quella inferiore si può osservare l'immagine ultrasonografica della zona insonata, sovrapposti alla quale sono ben vibili la roi rettangolare e la roi circolare interna; in quella superiore, all'immagine presente nella zona inferiore viene sovrapposta una mappa colore (il blu rappresenta una bassa velocità di propagazione dell'onda di taglio; ad esso seguono l'azzurro, il giallo, l'arancione e il rosso, che rappresenta le velocità più elevate). La macchina restituisce a video, nel lato destro dell'immagine dieci valori: il valore medio, minimo, massimo e la deviazione standard del modulo elastico all'interno di questa roi; il valore medio, minimo, massimo e la deviazione standard della velocità di propagazione dell'onda di taglio; la profondità dell'immagine in cui è posizionato il centro della roi e il diametro (questi ultimi due parametri sono settati dall'operatore). Nella figura 2.3 è rappresentata un immagine elastosonografica.



FIG 1.3

Per ciascuna immagine, sono stati acquisiti i dati elastosonografici relativi a tre roi circolari diverse, posizionate una a sinistra, una nel centro e una a destra, all'interno della roi rettangolare (tutte e tre sono ovviamente posizionate lungo lo sviluppo del tendine). La dimensione della roi circolare è costante e il raggio è stato settato pari a 3 mm.

Combinando ciascuna immagine con ciascuna roi, vengono ricavati i dati di ciascuna delle 336 roi estratte (tre per ciascuna delle 112 immagini). Non essendo riusciti a trovare un metodo per estrapolare i valori in modo automatico, in quanto i valori cercati compaiono solo a video nell'immagine, per poter poi effettuare un analisi di tali dati è stato necessario copiare manualmente su file .xlsx (Microsoft Excel®) tutti i dati.

1.2 Nomenclatura delle immagini

Le 112 immagini acquisite sono state nominate secondo una spefica codifica, composta da 4 caratteri: una prima lettera, un primo numero, una seconda lettera e un secondo numero.

La prima lettera (che può essere P o C) rappresenta il tipo di soggetto da cui l'immagine proviene: sarà P se il soggetto è un paziente affetto, ovvero se uno dei suoi due tendini è stato operato chirurgicamente, C se il soggetto è sano, ovvero se è un soggetto di controllo. Il numero che segue questa prima lettera indica il numero del soggetto di controllo o del paziente a cui ci si riferisce. Quindi il primo numero e la prima lettera indicano solamente il soggetto a cui appertiene il tendine. Siccome l'esperimento ha coinvolto sette soggetti, essi saranno classificati come segue (tabella 1.1):

SOGGETTO	TIPO DI SOGGETTO	SESSO	ETÁ
C1	Soggetto di controllo n. 1	M	42
C2	Soggetto di controllo n. 2	M	25
P1	Paziente n. 1	F	52
P2	Paziente n. 2	M	43
Р3	Paziente n. 3	M	35
P4	Paziente n. 4	M	43
P5	Paziente n. 6	M	41

TAB 1.1

La seconda lettera può essere L o T, e rappresenta la proiezione di acquisizione dell'immagine, che può essere, come detto precedentemente, longitudinale o trasversale. Il secondo e ultimo numero varia da 1 a 8 e indica contemporaneamente lo stato fisiopatologico del tendine (sano o post chirurgico), la posizione del piede (estensione o flessione) e la porzione di tendine acquisita (mediale o inserzionale). I numeri da 1 a 4 indicano il tendine sano se il soggetto è un paziente o il tendine sinistro se il soggetto è un controllo; quelli da 5 a 8 indicano invece il tendine affetto se il soggetto è un paziente o il tendine destro se il soggetto è un controllo).

Nella tabella 1.2 vengono accuratamente descritte le combinazioni che corrispondono a questi 8 numeri.

NUMERO	TENDINE	POSIZIONE PIEDE	POSIZIONE SONDA
1	Sano se P Sinistro se C	Esteso	Distale
2	Sano se P Sinistro se C	Esteso	Mediale
3	Sano se P Sinistro se C	Flesso	Distale
4	Sano se P Sinistro se C	Flesso	Mediale
5	Affetto se P Destro se C	Esteso	Distale
6	Affetto se P Destro se C	Esteso	Mediale
7	Affetto se P Destro se C	Flesso	Distale
8	Affetto se P Destro se C	Flesso	Mediale

TAB 1.2

Per fare un paio di esempi, l'immagine C1L6 corrisponde al tendine del piede destro del soggetto di controllo numero 1, in cui il piede è in estensione plantare, la sonda è posizionata sulla sezione mediale del tendine, che è acquisito in proiezione longitudinale. Nell'immagine P3T7, invece, il tendine affetto del terzo paziente è acquisito sulla sua sezione trasversale, e in posizione distale; il piede si trova in posizione flessa, a 90° .

In figura 1.4 sono rappresentate due immagini relative alla porzione mediale di un tendine sano; a sinistra la sezione è quellamlongitudinale, a destra è quella trasversale.

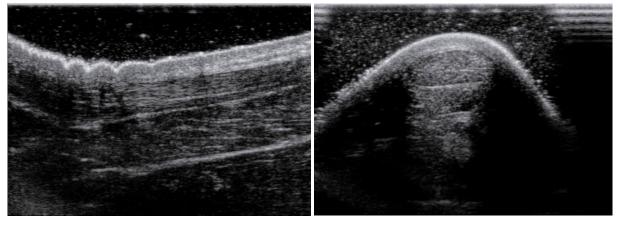


FIG 1.4

Nella prima, che riporta l'immagine C1L2, il piede è in estensione plantare (dettaglio che si può notare visualizzando il profilo della cute, che risulta assumere le pieghe tipiche che si formano il piede in questa posizione). La zona nera nella parte alta dell'immagine rappresenta il pad di gel anecogeno, sotto di esse è molto ben vibile la cute, poco al di sotto della cute si può notare il tendine, che si estende da sinistra a destra seguendo il profilo della cute.

Nella seconda è rappresentata l'immagine C1T8, la sezione questa volta è trasversale, il tendine può essere riconosciuto nella zona centrale dell'immagine, e presenta una forma ellissoidale molto schiacciata.

In figura 1.5 sono rappresentate due immagini (a destra la proiezione è sagittale, a sinistra assiale) relative ad un tendine affetto.

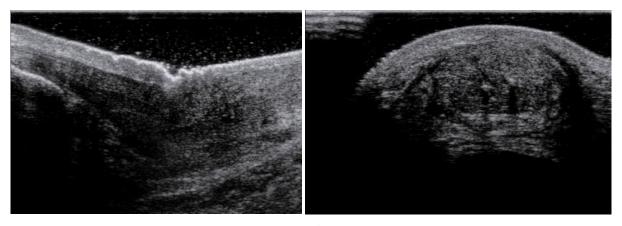


FIG 1.5

Nella prima (immagine P1L5) la porzione di tendine rappresentata è quella distale: è possibile notare, a sinistra dell'immagine, il calcagno, che essendo una struttura ossea e quindi iperecogena (molto luminosa all'interfaccia), lascia al di sotto di essa una zona buia nell'immagine ecografica. Il tendine è invece poco riconoscibile, essendo estremamente ingrossato e presentando una distribuzione più rarefatta delle fibre che lo compongono (capitolo 2). Nella seconda figura (immagine P2T6), il tendine è estremamente difficile da riconoscere e anche questa volta risulta molto ingrossato. Un occhio esperto può riconoscere la presenza di alcuni punti di sutura, che testimoniano l'operazione chirurgica subita.

2. IL TENDINE

I tendini sono organi di tessuto connettivo fibroso che permettono ai muscoli di fissare le loro estremità alle ossa, consentendo all'apparato muscolare di svolgere le sue funzioni. Le loro funzione è strutturale: la loro presenza è fondamentale per permettere il movimento, trasmettendo la forza esercitata dai muscoli alle strutture a cui sono connessi. Non svolgono alcun ruolo attivo, ma devono sopportare molte sollecitazioni, anche molto intense e ripetute nel tempo, perciò sono molto resistenti e al contempo molto poco elastici (uno stiramento del 10% è già sufficiente per lacerare le fibre tendinee più deboli). Il collegamento tra un fascio muscolare terminale e l'osso può essere mediato da un unico tendine (muscolo tricipite) ma ci sono anche casi in cui più tendini svolgono questo ruolo (dita della mano)⁶.

Nel corpo umano ci sono diversi tipi di tendini, classificati a seconda del loro spessore, della loro lunghezza, dell'eventuale rivestimento e dell'apporto sanguigno che ricevono. In generale tendono ad adattarsi agli stimoli meccanici modificando la loro struttura (se sottoposti a sforzi meccanici, sono spinti ad irrobustirsi), anche se si rinnovano molto più lentamente rispetto ai muscoli o alle ossa, a causa della loro scarsa vascolarizzazione (e quindi al correlato ridotto consumo di ossigeno)⁷.

I tendini estremamente simili, a livello istologico, ai legamenti, essendo questi ultimi costituiti da strutture connettive fibrose, ma differiscono per la loro funzione: i legamenti hanno infatti il compito di tenere unite e fissare tra loro due ossa oppure di mantenere stabile un organo nella sua posizione anatomica, quindi svolgono una funzione prettamente stabilizzatrice, e il loro ruolo non riguarda in alcun modo il movimento⁶.

2.1 Istologia del tendine

Gli elementi costitutivi del tendine sono fasci di collagene, elastina e matrice extracellulare, ricca di proteoglicani. Il collagene fornisce al tendine la resistenza a trazione, mentre la matrice extracellulare, presente anche se in piccolissime quantità, fornisce supporto strutturale alle fibre collagene.

Il collagene risulta ordinato dapprima in catene di tropocollagene, che si uniscono per formare fibrille (che sono strutture sottili, lunghe, ondulate e strutturate in modo parallelo: costituiscono la cosiddetta fascia primaria), fibre (fascia secondaria), fascicoli (fascia terziaria) e, infine, il tendine stesso.

È ricoperto dall'epitenonio, una guaina di tessuto connettivo molto ben vascolarizzato. L'epitenonio penetra all'interno del tendine, andando a delimitare le superfici delle le tre fascie interne, e prendendo il nome di endotenonio. In superfice, l'epitenonio è ricoperto dal paratenonio, tessuto connettivo costituito essenzialmente da fibre di collagene di tipo I e di tipo III, fibre elastiche e uno strato interno di cellule sinoviali. L'epitenonio e il paratenonio costituiscono il peritendine³.

Nella figura 2.1⁸ è riportata una rappresentazione dell'organo tendineo, in cui sono rappresentate le strutture anatomiche appena descritte, suddivise in base alla dimensione metrica cui appartengono.

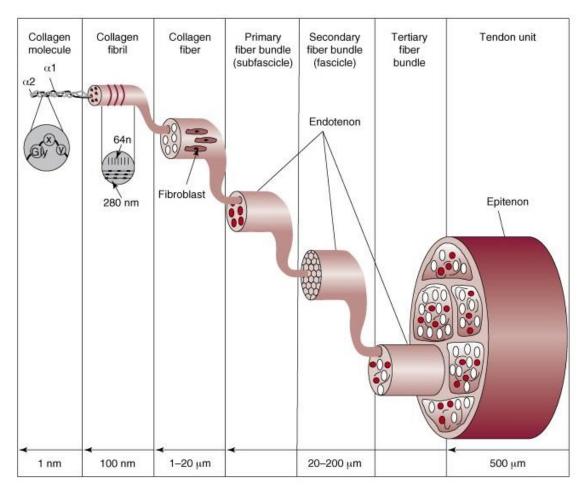


FIG 2.1

Distribuite tra le fibre collagene si possono osservare, anche se in basso numero, le cellule tendinee (tenociti e fibroblasti), che sono responsabili della sintesi della matrice extracellulare e del procollagene. All'interno del tessuto tendineo sono localizzati corpuscoli nervosi collegati al sistema nervoso afferente, detti recettori, che compongono gli organi tendinei del Golgi (OTG), strutture formate anche da capsule di tessuto connettivo intrecciato alle fibre di collagene, che hanno funzione propriocettiva, che permette cioè la misura percettiva della tensione del muscolo connesso. Gli OTG vengono attivati sia per stiramento attivo (dovuto alla contrazione muscolare) che per stiramento passivo del tendine⁹.

In determinate regioni (ad esempio nel polso o nel collo del piede, ovvero nei tendini sottoposti agli stress meccanici più elevati) i tendini sono avviluppati da particolari guaine fibrose e da borse mucose che li mantengono in situ, ne facilitano lo scorrimento e ne preservano l'integrità durante il movimento, impedendo lo sfregamento (ed il conseguente deterioramento nel corso del tempo) con le superfici ossee. Tali strutture fanno parte della cosiddetta guaina tendinea, e assicurano anche un incremento della performance muscolare. Hanno uno strato esterno, la guaina fibrotica, ed uno interno, la guaina o membrana sinoviale, composta sottili fogli viscerali

e parietali, che possono andare incontro a flogosi, che compromette il corretto svolgimento delle attività muscolari³.

La natura connettivale fibrosa dei tendini permette di classificarli all'interno dei tessuti molli non contrattili. I tendini sono specializzati, come già detto, nel resistere alle forze di trazione e in particolar modo alle tensioni generate dall'azione muscolare. Questa specializzazione influisce in maniera marcata nella composizione del tessuto: il collagene ricopre la quasi totalità delle fibre del tessuto, che si dispongono parallelamente tra loro per aumentare la resistenza ai carichi di tensione (una disposizione casuale delle fibre ridurrebbe ovviamente questa qualità). L'intensità del legame covalente tra le fibre rappresenta un altro fattore determinante nella stabilità biomeccanica del tessuto¹⁰.

Oltre al collagene, ma in minor quantità, nei tendini si trova anche l'elastina, una fibra proteica dotata di grandi proprietà elastiche. La matrice extracellulare sarà composta soprattutto da proteoglicani e glicoproteine con il compito di consolidare la struttura fibrosa e di richiamare acqua per idratare il tessuto. Alla composizione dei tendini partecipa la tendomucina sostanza strettamente affine alle mucine del tessuto osseo e cartilagineo¹¹.

Il tendine è connesso con il muscolo dalla giunzione miotendinea, regione anatomica specializzata che rappresenta la sede in cui la tensione generata dalle fibre muscolari viene trasmessa. Questa regione è generalmente poso esposta a tendinopatie.

La giunzione osteotendinea, invece, connette il tendine all'osso. È divisa in quattro regioni quattro zone: al tendine seguono la fibrocartilagine, la fibrocartilagine mineralizzata e il tessuto osseo³.

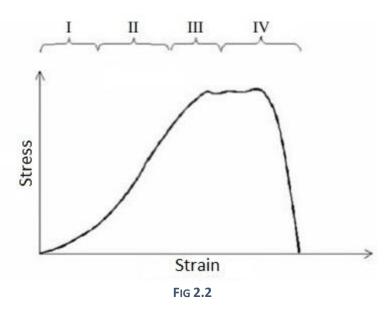
L'invecchiamento, uno stile di vita sedentario, l'obesità, i microtraumi ripetuti o l'utilizzo di corticosteroidi e anabolizzanti sono alcuni dei principali nemici dei tendini, e colpiscono principalmente le fibre di collagene, riducendolo e stravolgendo la loro normale distribuzione ad architettura parallela. Il risultato dell'esposizione del tendine a questi finale sarà una riduzione delle qualità del tessuto, che esporrà il soggetto ad un maggior rischio di lesioni, strappi e rotture tendinee¹².

2.2 Caratterizzazione meccanica del tendine

La caratterizzazione meccanica del tendine viene effettuata prevalentemente in vitro, in modo simile a quelle effettuate per la caratterizzazione dei materiali non biologici: il tendine viene isolato dal cadavere e sottoposto a svariate prove di trazione, in cui viene fissato alle estremità tramite due morsetti, uno fisso ed uno mobile, sottoposto a forze di trazione esterne note. La misura dello spostamento e della forza applicata permette il calcolo di diagrammi forza/spostamento, in cui la pendenza della curva è associata alla rigidezza (N/mm) e l'area sottesa all'energia di deformazione (J), da cui possono essere facilmente ricavati i diagrammi sforzo/deformazione. Queste prove sono quasi sempre di tipo distruttivo¹³.

Un tipico diagramma sforzo/deformazione di un tendine isolato viene mostrato in figura 2.2¹³. Possono essere identificate quattro zone. Una prima regione, in cui la rigidezza aumenta progressivamente all'aumentare della forza applicata (la curva è concava e crescente), è associata ad un allungamento del tendine causato dalla riduzione del grado di arriciamento delle

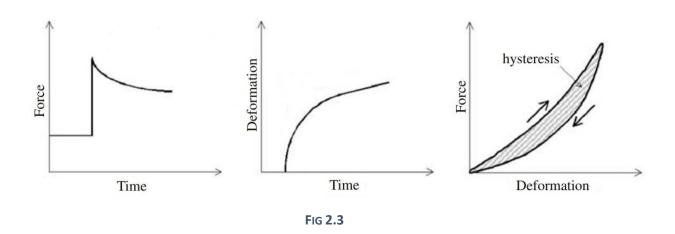
fibrille di collagene. La seconda regione presenta un comportamento lineare, in cui la rigidezza è costante. Il limite elastico non viene ancora superato: se la forza di trazione viene rimossa, il tendine torna alla sua lunghezza originale a riposo. Al termine della seconda zona, invece, viene raggiunto e superato il limite elastico: alcune delle fibre del tendine iniziano a rompersi. Quindi la rigidezza del tendine inizia a decrescere, mentre se la forza viene rimossa il tendine non riacquista completamente la sua lunghezza originale. Nella terza regione le fibre iniziano a rompersi in maniera non prevedibile, e si assiste pertanto ad un drammatico calo della rigidezza. Nella quarta regione si assiste alla completa rottura del tendine. In generale, comunque, tendini diversi possono presentare curve sforzo/deformazione anche molto diverse tra loro, a seconda del tipo di tendine, dell'area della sezione, della lunghezza (generalmente i tendini più corti sono anche i più rigidi), della storia pregressa del tendine esaminato¹³.



Le variabili che si possono estrarre da una curva sforzo/deformazione sono il modulo elastico di Young (Gpa), la tensione di rottura (MPa), la deformazione di rottura (%) e il modulo di resilienza a trazione (J/kg). Per il calcolo del modulo di Young viene moltiplicata la rigidezza per il rapporto tra la lunghezza e l'area della sezione trasversale originali: i vari esperimenti effettuati mostrano che, per valori di tensione superiori a 30 Mpa, il valore del modulo elastico può variare tra 1 e 2 Gpa, la tensione di rottura varia tra i 50 e i 100 Mpa, la deformazione percentuale di rottura tra il 4% e il 10%, mentre il modulo di resilienza (che corrisponde al lavoro effettuato sul tendine fino alla rottura, ovvero all'area sottesa dalla curva), varia tra i 1000 e i 4500 J/kg¹³.

Il comportamento meccanico di un tendine, come si è visto, non è perfettamente elastico, neanche nelle regioni I e II della figura 2.2. Le fibre di collagene che costituiscono il tendine, e soprattutto le interazioni tra le varie fibre, conferiscono al tendine anche proprietà viscose, che ottimizzano la trasmissione delle forze tra osso e muscolo agendo come smorzatori passivi. Il tendine può essere quindi modellizzato, a livello meccanico, con un modello in cui una molla e uno smorzatore sono disposti in parallelo. Le proprietà meccaniche associate ad un modello di questo tipo sono due, l'elasticità (rigidezza) k, e la viscosità μ , ed entrambe giocano un ruolo fondamentale, permettendo al tendine di tendersi ed immagazzinare energia nello stesso momento¹⁴.

Grazie alla presenza della viscosità, il tendine subisce fenomeni meccanici quali il rilassamento della forza nel tempo, lo scorrimento (o creep) e l'isteresi. Il rilassamento della forza nel tempo (figura 2.3¹³, a sinistra) indica un comportamento in cui la forza richiesta per mantenere una deformazione costante diminuisce nel tempo. Il creep indica un comportamento per cui, mantendo costante la forza che agisce sul provino, esso tende ad aumentare la deformazione nel tempo (figura 2.3, in centro). Il fenomeno di isteresi indica che la curva tensione / deformazione in fase di carico (aumento della forza applicata) è differente dalla curva ottenuta in fase di scarico (diminuzione della forza applicata). L'area compresa tra le due curve rappresenta l'energia dissipata durante l'intero ciclo di carico e scarico (figura 2.3, a destra). L'isteresi viene espressa in termini relativi (%) rispetto al lavoro totale svolto dal tendine durante la fase di allungamento. I valori ottenuti variano tra Il 5% e il 25% (la maggior parte delle misure si attesta intorno al 10%¹³.



Vi sono vari fattori che influiscono sulle proprietà meccaniche dei tendini. Il disuso, ad esempio, causa un decremento generalizzato della rigidezza, della tensione di rottura e del modulo di resilienza. Lo sport, al contrario, va in generale a migliorare le caratteristiche meccaniche del tendine, influendo anche sulla dimensione. Anche la posizione anatomica del tendine influisce sulle proprietà meccaniche. L'età sembra peggiorare le caratteristiche meccaniche dei tendini, anche se, in alcuni studi, viene riportato un miglioramento della rigidezza, della forza e della resilienza¹³. I corticosteroidi, spesso usati per il trattamento delle infiammazioni articolari, sembrano avere un pessimo effetto sulla fisiologia tendinea, andando addirittura ad aumentare la predisposizione verso future lesioni e a peggiorare il successivo processo di guarigione.

Le proprietà meccaniche dei tendini possono anche essere studiate *in situ*, in quanto risulta chiaro che i risultati ottenuti tramite le prove in vitro vanno considerati usando molta cautela. Il fissaggio dei tendini tramite morsetti, infatti, può causare slittamento delle fibre più esterne e concentrazioni delle tensioni assolutamente non fisiologiche. Inoltre, spesso vengono utilizzati tendini conservati, che possono avere proprietà biofisiche alterate.

Gli esperimenti in situ vengono svolti su animali uccisi o anestetizzati, dai quali viene chirurgicamente estratto l'intero complesso osso-tendine-muscolo. L'osso viene fissato tramite dei morsetti, e la forza viene erogata dallo stesso muscolo, che viene stimolato elettricamente.

I risultati ottenuti sono molto simili a quelli ottenuti tramite gli esperimenti in vitro, anche se la regione in cui il comportamento meccanico risulta lineare non viene più osservata¹³.

Recentemente, come si vedrà nel capitolo 9 sono state sviluppate delle tecniche che permettono la valutazione quantitativa non invasiva delle proprietà elastiche del tendine *in vivo*. I primi esperimenti effettuati di questo tipo riportano un valore di rigidezza che varia tra i 400 e i 1300 kPa per il tendine d'Achille¹⁴.

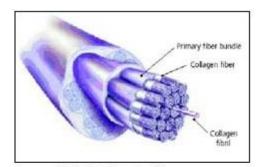
2.3 Patologie del tendine

Le maggiori cause che portano a condizioni patologiche dei tendini sono: l'invecchiamento, l'obesità, la vita sedentaria, l'utilizzo di anabolizzanti e soprattutto i microtraumi ripetuti.

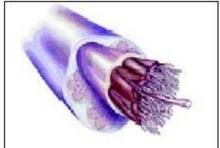
La tendinite, anatomicamente, è l'infiammazione del peritenonio, una sottile lamina di tessuto connettivale a fibre intrecciate che avvolge tutto il tendine (per questo viene chiamata anche peritendinite).

Il termine tendinite (che corrisponde all'infiammazione del peritenonio), spesso viene usato impropriamente, per definire tutti gli stati patologici del tendine che provocano dolore, acuto o cronico. Il suffisso *ite*, però indica la presenza di infiammazione, mentre è stato dimostrato che molte patologie tendinea è priva di cellule infiammatorie. Pertanto, per queste effezioni, il termine tendinite non pare adeguato¹⁵.

Una delle più comuni patologie croniche e dolorose del tendine è la tendinosi, in cui si assiste alla degenerazione delle fibre di collagene, che perdono il loro orientamento parallelo in favore di un organizzazione più caotica (fig 2.4¹⁶). Questa condizione è accompagnata dell'incremento della sostanza di base acquosa e da neovascolarizzazione. Questa patologia è quindi caratterizzata da manifestazioni degenerative del tendine. Per poter distinguere tra tendinosi e tendinite, occorre un analisi istopatologica del tessuto, per confermare la presenza o l'assenza di cellule infiammatorie. Putroppo i medini non hanno spesso la possibilità di effettuare un esame di questo tipo.



Istologia di un tendine sano.



Istologia di un tendine danneggiato. Da notare la disorganizzazione del collagene e la separazione fibrillare.

FIG 2.4

A questo problema dà una soluzione il termine tendinopatia, che si riferisce genericamente alla tutte le condizioni patologiche e dolorose croniche che si sviluppano all'interno del tendine sottoposto a sovraccarico, in assenza di infiammazione¹⁵.

La tenosinovite è invece l'infiammazione della guaina sinoviale nel cui interno scorre il tendine. L'infiammazione di questa guaina ne provoca l'ispessimento e il tendine inizia a scorrere in modo non ottimale. La tenosinovite affligge soprattutto i tendini della mano e del piede, ¹⁵.

Per i disturbi tendinei, sono stati proposti numerosi tipi di trattamento (esercizi fisioterapeutici, terapie basate sulle onde d'urto ultrasoniche, infiltrazioni di corticosteroidi, di acido ialuronico, di polidocanolo, di plasma arricchito con piastrine, cellule staminali, etc..)¹⁷, ma solo alcuni forniscono evidenze cliniche valide⁴.

2.4 La rottura del tendine d'Achille

Il tendine d'Achille è uno dei tendini più importanti e multifunzionali del corpo umano, in quanto ha un ruolo da protagonista in tutte le attività di locomozione. È il tendine più grande e più forte, ma anche quello che più spesso va incontro a rottura. È situato nella parte posteriore della caviglia e congiunge due muscoli del polpaccio (soleo e gastrocnemio) al calcagno (figura 2.5¹⁸). Siccome esso provvede ad una larghissima gamma di movimenti relativi alla locomozione, una lesione al tendine d'Achille può essere devastante per la qualità di vita del paziente infortunato.

In ambito sportivo professionistico, la rottura del tendine d'Achille ha un pessimo impatto sulla carriera, tanto da condurre, in molti casi, anche al definitivo abbandono.

Le patologie associate al tendine d'Achille possono essere acute o croniche, possono andare dalla tendinosi allo strappo completo, possono interessare sia atleti che soggetti più o meno sedentari.



Le lesioni a questo tendine sono spesso multifattoriali, e possono essere causate da forze e concause sia esterne che interne al corpo. È stato verificato che alcune caratteristiche individuali dei pazienti, come ad esempio la senilità, il sesso maschile, l'obesità, l'uso di corticosteroidi possono portare ad un indebolimento generale del tendine, incrementando il rischio di rottura e di tendinopatie croniche.

L'eziologia delle lesioni al tendine d'Achille è ancora sconosciuta, ma sono state proposte due teorie largamente accettate. La prima di queste asserisce che la degenerazione cronica del

tendine può facilmente condurre alla rottura, senza che siano necessarie forze eccessive (in uno studio, viene detto che l'85 % delle rotture del tendine d'Achille vengono causate da tendinosi cronicizzate). La teoria meccanica asserisce invece che particolari movimenti o forze esercitate sul tendine possano condurre facilmente alla rottura (parziale o totale) di tendini anche sani¹⁹.

Spesso la causa finale della rottura del tendine d'Achille è un violento stiramento che può allungare il tendine fino a provocarne rottura. Solitamente anche un non adeguato riscaldamento seguito da intenso esercizio sportivo può andare a definire una situazione del genere²⁰.

Le tendinopatie del tendine d'Achille possono interessare sia la porzione mediale del tendine (55-60% dei casi), che la loro porzione inserzionale (20-25% dei casi)¹⁹.

Le persone più colpite sono generalmente uomini di mezza età che che praticano sport come il la corsa, il calcio, il basket o il tennis in maniera non continuativa. Sembra che gli uomini siano più colpiti da questo infotunio rispetto alle donne²¹.

Il tempo alla guarigione e quello che serve per ritornare alla pratica dell'attività sportiva dipende da molti fattori, tra cui compaiono l'etá, il tipo di intervento e il programma di riabilitazione effettuato. L'intervento chirurgico non è sempre necessario, e, spesso gli atleti possono ritornare alle loro attività sportive in tempi accettabili, che comunque durano alcuni mesi.

Alcuni medici consigliano la chirurgia, mentre altri non lo fanno, in quanto i rischi e le complicanze legate alla chirurgia non sono trascurabili. Gli atleti più attivi e più giovani però preferiscono però l'intervento chirurgico, perché il tempo di guarigione è inferiore¹⁷.

L'intervento chirurgico consiste nella sutura del tendine, e viene eseguita generalmente in anestesia locale. Dopo l'intervento, al paziente viene consigliato l'utilizzo di un tutore, da portare per un mese prima di cominciare la riabilitazione.

La procedura non chirurgica, invece, prevede l'immobilizzamento dell'articolazione mediante l'utilizzo del gesso o di un tutore, per almeno due o tre mesi¹⁹.

Per decenni, l'intervento chirugico è stato considerato il procedimento standard per il trattamento della rottura del tendine d'Achille, soprattutto a causa dell'elevato tasso di ri-rottura da cui era accompagnato l'intervento conservativo. Se però insieme al trattamento conservativo viene adottato un protocollo di riabilitazione funzionale, il tasso di ri-rottura è equiparabile a quello che segue l'intervento chirurgico, e inoltre, in queste condizioni, il rischio di compicazioni post chirugiche (infezioni, formazione di adesioni, danni ai nervi) viene ridotto del 15,8%²².

2.5 Metodologie diagnostiche

I metodi diagnostici primari sono ovviamente costituiti dall'anamnesi del paziente, dalla valutazione del dolore e della capacità di movimentazione dell'articolazione. L'imaging riveste un ruolo fondamentale nella diagnostica delle patologie tendinee (infiammatorie, degenerative, traumatiche). I metodi di imaging utilizzati sono principalmente tre. Le radiografie (raggi X), hanno una bassa efficienza diagnostica, ma possono risultare utili per investigare eventuali calcificazioni dovute a particolari tendiniti. La risonanza magnetica, invece, sebbene non sia necessaria alla diagnosi della patologia, può risultare molto utile nella valutazione del danno e nella preparazione all'intervento chirurgico. Il suo uso sarebbe il più indicato, ma gli alti costi di esercizio tendono a limitarne notevolmente l'utilizzo. Essa viene usata solamente nei casi ambigui, in cui l'ecografia non è sufficiente al medico per effettuare la diagnosi. L'imaging ecografica quindi, grazie al suo basso costo, è la tecnica più largamente utilizzata per la diagnosi e l'investigazione di quasi tutte le patologie associate ai tendini¹⁷.

3. L'ELABORAZIONE DELLE BIOIMMAGINI

Con il termine *bioimmagini* si indicano le immagini relative all'anatomia (immagini morfologiche) o alla fisiologia (immagini funzionali) di parti interne del corpo di un essere vivente. Particolarità delle bioimmagini è l'assenza di colore: esse sono generalmente immagini *monocromatiche*, espresse da diversi *livelli di toni di grigio*.

In Medicina, le bioimmagini hanno attualmente un'importanza fondamentale, per diagnosticare una patologia o uno stato traumatico ed effettuarne il *follow-up*, per motinorare gli effetti delle terapie, per capire le cause di una malattia, per effettuare prognosi.²³

3.1 Acquisizione ed elaborazione qualitativa delle bioimmagini

La formazione di una *bioimmagine* necessita che un'opportuna forma di energia interagisca con l'oggetto in esame in modo che una grandezza fisica associata riproduca spazio-temporalmente la distibuzione di altre grandezze, di interesse diagnostico, caratteristiche dell'oggetto. Le varie metodologie sono basate su differenti interazioni tra la forma energetica utilizzata e il tessuto vivente e quindi forniscono informazioni su differenti proprietà fisiche dei tessuti. Ogni immagine è perciò una rappresentazione *parziale* della realtà. L'integrazione delle informazioni ottenute con diverse metodiche è molto auspicabile: se due oggetti risultano simili rispetto ad una data proprietà fisica, possono essere differenti rispetto ad altre proprietà.

Una tecnica di immagine può essere *invasiva* o *non invasiva*, può essere innocua o meno (utilizzo di radiazioni *ionizzanti*), può essere usato o meno un *mezzo di contrasto*.

3.2 Caratteristiche generali di un immagine

Un immagine può essere descritta come funzione a valori reali, positivi e limitati in ampiezza i(x,y) di due variabili spaziali. Al variare di queste due coordinate, i(x,y) rappresenta quindi la grandezza fisica che il processo di imaging va ad indagare.

Oggigiorno, una bioimmagine è quesi sempre un immagine di tipo digitale: i vantaggi sono notevoli; anzitutto sistemi di imaging stessi restituiscono immagini acquisite direttamente in forma numerica, inoltre, tali immagini possono prestarsi all'analisi quantitativa, e possono essere immagazzinate in forma digitale. Un immagine digitale definita in uno spazio bidimensionale può essere assimilata ad una matrice 2D: I[m,n]. L'intersezione di ogni riga e di ogni colonna della matrice viene detta *pixel* (*picture element*) e rappresenta l'unità elementare della matrice. In caso di immagini 3D, si aggiungono strati alla matrice: non si parla più di pixel ma di *voxel* (*volume element*).

Un immagine digitale può essere monocromatica (toni di grigio) o rappresentata tramite uno spazio colore. Nel primo caso si ha una stretta corrispondenza tra l'immagine e la matrice (fig 3.1²⁴, a sinistra), l'immagine viene quantizzata su N bit, che corrispondono a 2^N livelli di tono di grigio (per le immagini mediche si va dagli 8 ai 14 bit). Nel secondo caso vengono utilizzati

degli spazi colore, il più usato dei quali è la codifica *RGB*: ogni pixel è costituito da una terna di valori, che rappresentano i tre colori fondamentali rosso, verde e blu; ogni valore rappresenta il peso relativo del colore primario associato al pixel (fig 3.1, a destra). Come già accennato, comunque, tutte le immagini mediche sono rappresentate in toni di grigio. Un immagine digitale può anche essere espressa come una maschera binaria o *logica*, codificata con due soli livelli: un pixel potrà quindi essere o totalmente bianco, o totalmente nero. Questo tipo di immagini possono risultare molto utili nei processi di segmentazione²⁴.

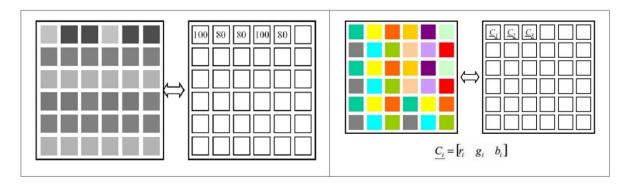


Fig 3.1

Ovviamente, se l'immagine è digitale e viene ingrandita i bordi degli oggetti diventano squadrati: la digitalizzazione, per forza di cose, affligge la risoluzione dell'immagine.

I parametri numerici di un immagine digitale bidimensionale sono quattro: numero di colonne, numero di righe, dimensioni del pixel (parametro fornito dalla tecnologia di acquisizione dell'immagine) e la dinamica, ovvero il numero di valori che ogni pixel può assumere (espresso in livelli di toni di grigio).

Le caratteristiche analizzate di un immagine possono essere la luminosità, il contrasto, la risoluzione spaziale, la risoluzione temporale (numero di immagini acquisibili in un determinato intervallo temporale), la risoluzione in ampiezza (numero di livelli di toni di grigio) e il rapporto segnale rumore.

La risoluzione spaziale è la minima distanza per cui due oggetti vicini tra loro risultino distinti all'occhio, essa dipende non tanto dalla dimensione dei pixel (è sempre peggiore della risoluzione determinata dal solo pixel) quanto da una funzione bidimensionale detta *Point Spread Function* (PSF)²³, che, facendo ricorso all'analisi armonica di Fourier, può essere intesa come funzione di risposta impulsiva del sistema. La PSF(x,y) può essere interpretata come l'immagine di un un punto: esso apparirà sull'immagine come una piccola macchia dai contorni sfocati, mentre la PSF ideale di tale immagine è in realtà modellizzata come una delta di Dirac. La risoluzione viene calcolata come *Full Width at Half Maximum (FWHM)*, ovvero come raggio di tale rappresentazione sfuocata del punto, calcolato tra punti di metà ampiezza della PSF (fig 3.2²³)²⁴.

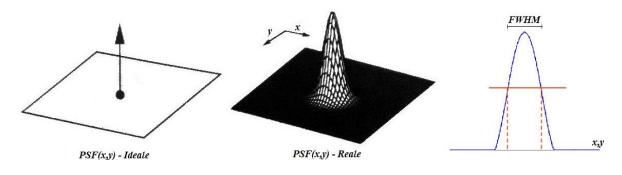


Fig 3.2

La luminosità dipende dal valore numerico del pixel in esame: esso è tanto più luminoso quanto più il suo valore è elevato. Il contrasto, che esprime la variazione relativa della luminosità, è anch'esso un parametro fondamentale, soprattutto nella diagnostica per immagini.

L'Istogramma delle Luminosità (fig 3.3), riporta invece la distribuzione del numero di pixel in funzione del loro valore (per ogni livello di grigio viene riportato il numero di pixel corrispondenti a quel livello). È utilizzato come base matematica di partenza per tutte le operazioni matematiche di modifica del contrasto e della luminosità²⁴.

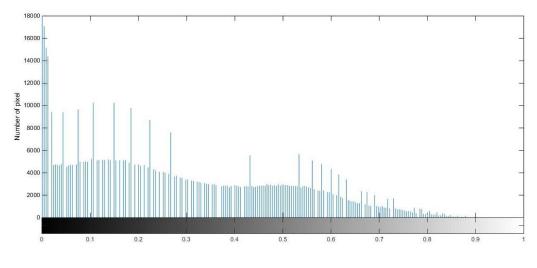
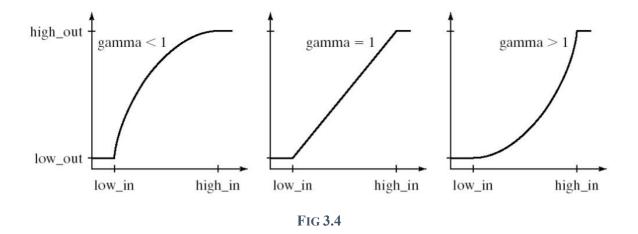


FIG 3.3

Una aumento di luminosità, che porta ad un aumento della IOD, comporta, ad esempio, una traslazione verso destra dell'istogramma; un aumento di contrasto, che innalza il valore dei pixel più luminosi andando ad abbassare il valore a quelli meno luminosi, comporta una rarefazione dell'istogramma, una diminuzione ne provoca al contrario una compressione laterale. In generale un operazione di modifica del contrasto, che è legata strettamente ad un operazione di modifica della dinamica, è di tipo lineare: i livelli di grigio dell'immagine in uscita dal sistema di modifica dipende linearmente dai livelli di grigio dell'immagine in ingresso. A volte tale relazione può non essere lineare (fig 3.4^{23}): ci può essere concavità verso l'alto ($\gamma < 1$: i valori alti sono pesati maggiormente e l'immagine risulterà nel complesso più chiara) o verso il basso ($\gamma > 1$: i valori bassi sono pesati maggiormente e l'immagine risulterà nel complesso più scura).



3.3 Fondamenti dell'elaborazione delle immagini

Lo studio di un immagine da parte di un operatore, al fine di ottenere ad esempio un risultato diagnostico, può solamente fornire risultati di tipo *qualitativo*, a prescindere dalle competenze dell'operatore in questione. Spesso un approccio qualitativo è sufficiente ai fini diagnostici, ma spesso occorrono risultati di tipo numerico, *quantitativo*.

L'image processing (IP), o elaborazione numerica delle immagini, fornisce appunto un approccio numerico rispetto a ciò che l'occhio umano può solamente indagare in modo qualitativo. Fanno parte dell'image processing, l'image enhancement,

L'image enhancement, che rappresenta solitamente lo step iniziale dell'IP, consiste nella trasformazione di un immagine in modo che essa risulti più adatta per essere analizzata. Sia per l'immage enhancement che per la segmentazione non esiste una teoria generale: l'approccio è generalmente empirico, caso per caso vengono applicate procedure specifiche diverse. Le procedure usate nel primo caso includono operazioni per la modifica dei livelli di grigio, per il miglioramento del rapporto segnale-rumore e per manipolare la geometria dell'immagine; per il secondo (*segmentazione*) viene fatto largo uso di maschere binarie ricavate dalle immagini, cui vengono applicati procedimenti euristici che variano caso per caso.

Descrivento le immagini secondo uno spazio cartesiano, le coordinate di un immagine crescono a partire dal punto (0,0), situato in alto a sinistra: dato il numero di colonne N, i valori delle ascisse sono numeri naturali che crescono da sinistra a destra, da 0 fino a N-1; dato il numero di righe M, i valori delle ordinate crescono dall'alto verso il basso, da 0 fino a M-1.

Le operazioni svolte sull'immagine in fase di enhancement possono riguardare una sola immagine o possono coinvolgere due o più immagini. In questa tesi verranno viste e utilizzate solo operazioni del primo tipo: tra di esse, si possono distinguere operazioni *puntuali*, *locali* o *geometriche*²³.

Le operazioni puntuali trasformano l'immagine di partenza a[m,n] in un immagine b[m,n] i cui valori sono funzioni solo degli elementi corrispondenti dell'immagine originale. Un esempio è la modifica della dinamica, del contrasto o della luminosità dell'immagine. La funzione è generalmente monotona rispetto ai livelli di grigio.

$$b[x,y] = f(a[x,y])$$

Le operazioni locali trasfomano l'immagine di partenza a[m,n] in una immagine b[m,n] formata da pixel i cui valori dipendono da un determinato gruppo di elementi della matrice di partenza, generalmente appartenenti ad un intorno del pixel analizzato. Si tratta quasi sempre di operazioni di *filtraggio*. Per definire correttamente un intorno di un pixel, occorre prima definire il tipo di *connessione* adottata, ovvero occorre assegnare una regola in base alla quale due pixel risultano adiacenti. Solitamente ci si riferisce a connessioni di tipo 8, a volte a connessioni di tipo 4 (in cui non si considerano adiacenti due pixel vicini in direzione diagonale)²³.

La base di tutte le procedure di enhancement e di filtraggio è la *convoluzione bilineare*. La matrice che opera la convoluzione viene detta *kernel*. Considerando un kernel h[k,l], di dimensioni [2K+1; 2L+1], quindi avente un numero di righe e di colonne dispari, dove il punto (k,l) = (0,0) è il centro del kernel, la convoluzione è data da:

$$g[x,y] = h[k,l] * a[x,y] = \sum_{k=-K}^{K} \sum_{l=-L}^{L} h[k,l] \cdot a[x-k,y-l]$$

La convoluzione descritta è un operazione lineare e discreta, e gode di proprietà commutativa, distributiva e associativa. Un kernel bidimensionale è detto *separabile* se è possibile scriverlo nella forma:

$$h[k, l] = h_{row}[k] \cdot h_{col}[l]$$

La convoluzione, a questo punto, risulta semplificata in termini di calcolo, ed è equivalente ad un doppio filtraggio con un kernel monodimensionale²⁴.

$$g[x,y] = \sum_{l=-L}^{L} \left\{ \sum_{k=-K}^{K} h_{row}[x-k] a[x-k,y-l] \right\} h_{col}[y-l]$$

Il filtraggio, com'è noto dalla Teoria dei Segnali e dei sistemi LTI, è sempre un operazione di convoluzione. I processi appena descritti possono essere descritti molto facilmente immaginando il kernel bidimensionale come una matrice mobile h[k,l], i cui elementi h_{kl} vengono detti pesi: la finestra può essere fatta scorrere sull'immagine, e il suo centro viene fatto corrispondere ad ognuno dei suoi pixel. Per ogni posizione (x,y) della finestra, il valore dell'immagine di uscita b[x,y] si ottiene moltiplicando ciascun pixel dell'immagine originale che cade all'interno del kernel per il peso corrispondente, e sommando tutti i valori ottenuti in questo modo.

Si noti che la convoluzione bilineare non è definita ai bordi dell'immagine: parti della finestra possono cadere al di fuori di essa. A seconda dei casi, si può risolvere il problema in modi diversi: l'immagine può essere replicata per periodicità, può essere replicato verso l'esterno

l'ultimo valore appartenente all'immagine, si può restringere il risultato al solo dominio dell'equazione, ecc..

Con le medie mobili e la convoluzione bilineare possono essere effettuati vari tipi di elaborazione corrispondenti a filtraggi spaziali, quali operazioni passa-basso (*smoothing*) o passa-alto (*sharpening*, *edge enhancement*) di vario genere²³.

Il filtraggio di tipo passabasso, detto *smoothing*, viene solitamente applicato per ridurre il rumore sovrapposto all'immagine. Detta h[k,l] la funzione di trasferimento di un filtro passabasso bidimensionale, essa è caratterizzata, nella sua forma più semplice, esclusivamente dalla dimensione della matrice, in quanto tutti i pesi hanno lo stesso valore e la loro somma è unitaria: se ad esempio la matrice ha dimensione 3x3, il pixel b[x,y] dell'immagine in uscita dalla convoluzione è data dalla media dei valori dei pixel dell'intorno 8 connesso del pixel a[x,y]. L'effetto è quello di attenuare notevolmente le variazioni rapide dei livelli di grigio. Il filtro passa basso è sempre un operazione di media.

Vi sono altre matrici di trasferimento, più performanti, per effettuare il filtraggio passabasso: la più comunemente usata è il kernel bidimensionale di tipo gaussiano. Esso non è necessariamente quadrato, ed è definito da tre parametri: le dimensioni K ed L e l'apertura della curva gaussiana σ (fig 3.5: rappresentazione 3D di un kernel 19x13 gaussiano, con coefficienti di apertura $\sigma_k = 2$ e $\sigma_l = 3$). Il punto di massimo della matrice si trova nel suo centro (0,0), mentre i valori minimi si trovano per i valori $k = \pm 1$. Un kernel gaussiano è sempre separabile²⁴.

$$h_g[k,l] = e^{-\frac{k^2+l^2}{2\sigma^2}}$$

$$h[k,j] = \frac{h_g[k,l]}{\sum_k \sum_l h_g[k,l]}$$

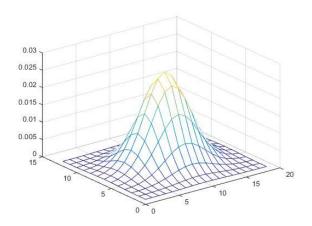


FIG 3.5

Analogamente al filtraggio passabasso, è possibile effettuare il filtraggio passa-alto dell'immagine, in grado di accentuare le alte frequenze spaziali e di discriminare quelle basse. Secondo la definizione matematica di derivata, però, essendo l'immagine una quantità discreta e non continua, la derivata può solo essere approssimata, e occorre quindi scegliere adeguatamente il modello approssimativo da utilizzare.

Il filtraggio passaalto, così come le derivate, può essere del primo ordine o di ordini superiori al primo. Inoltre, va sempre specificata la direzione di derivazione, che di solito è quella orizzontale o quella verticale, ma può essere anche di un angolo qualsiasi.

Un kernel monodimensionale discreto che approssima la derivazione in una direzione specifica può essere, ad esempio, uno dei due vettori seguenti:

$$h' = [-1 \ 1]$$

$$h' = [-1 \ 0 \ 1]$$

Il primo dei due però, pur essendo molto efficiente nel mantenere le alte frequenze, al contrario del secondo, che attenua però le frequenze più elevate dello spettro, provoca una distorsione di fase delle armoniche che compongono l'immagine, ed è quindi da evitare. Generalmente, questo filtro monodimensionale non viene utilizzato. Si ottengono risultati migliori effettuando il prodotto scalare tra questo vettore e un kernel monodimensionale passabasso: si ottiene un kernel bidimensionale quadrato con dimensione 3x3, detto *gradiente*. Esso effettua l'operazione di derivazione in una direzione effettuandone contemporaneamente una di mediazione nella direzione perpendicolare ad essa. I più comumenente utilizzati sono il gradiente di Prewitt, generato con un kernel a media uniforme, e il gradiente di Sobel, generato con un kernel a media triangolare. Applicati in direzione derivativa orizzontale, questi kernel trasformano l'immagine originale in un immagine in cui compaiono solo le discontinuità verticali, e viceversa²⁴.

$$h_{Prewitt \, x} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$h_{Prewitt y} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$h_{Sobel\ x} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$h_{Sobel\ y} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Sempre nell'ambito dell'elaborazione delle immagini e degli operatori locali, troviamo le operazioni morfologiche, strumenti utili per tentare di ottenere dall'immagine delle precise morfologie (come forme geometriche, oggetti piccoli, oggetti grandi, linee, etc..).

Il loro utilizzo è prevalente su maschere B/W, ma possono anche essere usate su immagini monocromatiche. Assume notevole importanza, in questo ambito, l'elemento strutturale, definito come intorno connesso di date dimensioni e forma²⁴.

Dato l'elemento di una matrice bidimensionale, questo avrà degli elementi vicini: i punti direttamente connessi si dicono *adiacenze*, quelli in diagonale *contorni*. Si formano degli *insiemi connessi*, che possono essere 8-connessi se vengono considerate sia adiacenze che contorni, 4-connessi se vengono considerate le sole adiacenze.

Un elemento strutturale è una maschera logica (fig 3.6²⁵), in cui gli elementi attivi appartengono ad un dato intorno n-connesso di elementi. Questi intorni hanno generalmente una forma e delle dimensioni precise: si possono avere dischi, rombi, segmenti rettilinei, etc.. Tale maschera deve avere dimensioni dispari e si sviluppa intorno ad un centro (0,0), ed è essa stessa che definisce la località dell'operatore morfologico.

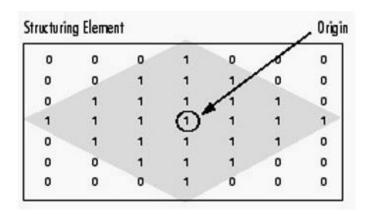


FIG 3.6

L'*erosione* è un operazione morfologica di base, che prevede che l'elemento strutturale venga fatto scorrere e possa essere centrato su ogni pixel dell'immagine: il valore del pixel dell'immagine in uscita è il minimo tra tutti i valori dei pixel selezionati sull'immagine originale dall'elemento strutturale (fig 3.7²⁴, a sinistra). Nella *dilatazione* (fig 3.7, a destra), il valore del pixel dell'immagine in uscita è il massimo dei valori dei pixel selezionati sull'immagine originale dall'elemento strutturale.

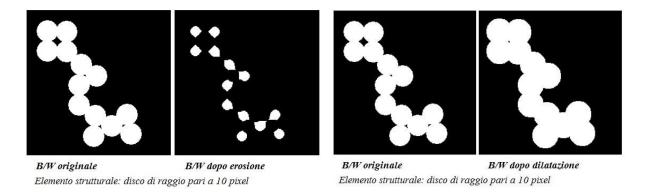


FIG 3.7

La combinazione dei due operatori morfologici visti, genera a sua volta altri due operatori morfologici di rilievo: l'*apertura* e la *chiusura*. L'apertura è una erosione seguita da dilatazione, la chiusura una dilatazione seguita da un erosione. L'elemento strutturale rimane il medesimo nei due passaggi: l'effetto dell'apertura è quello di rimuovere i frammenti più piccoli di un certo oggetto preservando il background, sfavorendo le connessioni tra oggetti; quello della chiusura è la rimozione del background in favore degli oggetti, favorendo il 'riempimento di buchi' e le connessioni²⁴.

La *segmentazione* delle immagini mediche è un altro importante ambito dell'*image processing*, che si differenzia dall'image enhancement: generalmente, per segmentazione si intende un processo volto a suddividere l'immagine in *regioni*, che sono simili rispetto a una o più caratteristiche dell'immagine.

I settori applicativi possono essere il riconoscimento nell'immagine di oggetti di interesse (come nel caso, relativo a questa tesi e discusso nel capitolo 4, della segmentazione dei profili dei tendini), il riconoscimento di regioni di determinata forma, il calcolo di aree e di volumi di tali regioni, ecc...

Non esiste, in generale, un algoritmo ottimale e predefinito per effettuare la segmentazione, di solito ci si attiene ad un *flow chart* molto schematico (fig 3.8²⁴), l'algoritmo va definito caso per caso, a seconda dell'immagine che si vuole segmentare e a seconda dell'obiettivo della segmentazione. Occorre tentare di mantenere il più possibile la correlazione con il mondo fisico, ad esempio mantenendo il più possibile la dinamica (i valori dei pixel hanno correlato fisico) e/o basando i procedimenti sull'istogramma delle luminosità.

Si può notare come, in un generale, algoritmo di segmentazione di immagini, ad un certo punto la dinamica venga nettamente ridotta e l'immagine venga trasformata in una maschera B/W. Questo passaggio risulta essenziale per stabilire un confine netto tra gli oggetti di potenziale interesse presenti sull'immagine e il background.

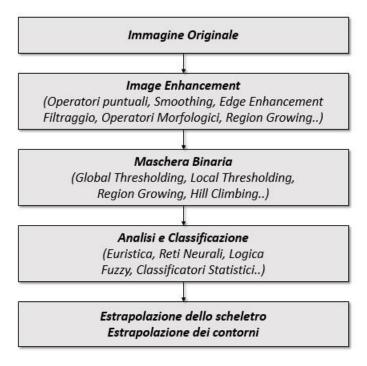
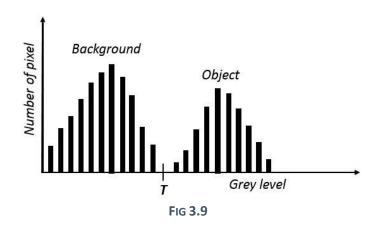


FIG 3.8

Questo può essere fatto in modi diversi, il più comune dei quali è il *global thresholding*: esso si basa sull'idea che i livelli di grigio dei pixel appartenenti agli oggetti possano essere considerati simili tra loro e diversi dai toni di grigio cui appartiene lo sfondo. Questo passaggio deve essere precedentemente supportato da un buon image enhancement, al fine di favorire la situazione appena descritta. Se l'ipotesi è ritenuta valida, ovvero se l'istogramma delle luminosità può essere considerato almeno approssimativamente bimodale (fig 3.9), viene fissata una soglia che definisce il valore del livello di grigio discriminante: tutti i pixel con valore superiore a quello della soglia diventano bianchi, tutti quelli con valore inferiore diventano neri²⁴.



Ovviamente, la criticità del procedimento sta nel trovare un valore soglia ottimale: viene cercato un valore, in modo matematico o empirico, tale che se effettuate piccole variazioni della soglia medesima, il risultato, ovvero la maschera binaria, sia il più possibile invariante rispetto a queste variazioni della soglia T. La soglia è detta globale se dipende esclusivamente dall'istogramma delle luminosità e in nessun caso dalle posizioni dei pixel nell'immagine.

$$b[x,y] = \begin{cases} 1 & if \ a[x,y] \ge T \\ 0 & if \ a[x,y] < T \end{cases}$$

Il global thresholding può avere delle varianti: ad esempio si possono scegliere come bianchi i valori sottosoglia rispetto a quelli sopra soglie o possono essere scelte più soglie andando a identificare bande di toni di grigio limitate inferiormente sia superiormente.

Una volta estrapolata la maschera binaria, i successivi passaggi di un algoritmo di segmentazione possono essere molto vari, a seconda dell'obiettivo che si vuole raggiungere. Possono essere estrapolati i contorni e gli scheletri degli oggetti. Lo *skeleton* di un oggetto è una rappresentazione ridotta capace di catturare le figure essenziali dell'oggetto in questione: se ad esempio la maschera binaria è una rappresentazione dei vasi sanguigni presenti in un immagine, effettuando lo skeleton si otterrà una maschera in cui ciascuno dei vasi verrà ridotto ad una semplice linea.

Altri metodi di segmentazione successivi all'estrapolazione della maschera binaria possono essere di tipo euristico: ad esempio, sulla base delle caratteristiche geometriche e posizionali degli oggetti della maschera sarà effettuata la classificazione, tramite uno o più step applicati in cascata.

La classificazione può anche essere effettuata tramite classificatori fuzzy, reti neurali, algoritmi statististici basati su descrittori di forma, ecc²⁴

4. LE IMMAGINI ULTRASONOGRAFICHE

L'ecografia, o tecnica a eco-impulsi, è una tecnica di *bio-imaging* che, a differenza delle altre più comuni tecniche di imaging, non sfrutta radiazioni ionizzanti o campi elettromagnetici, bensì la riflessione e la diffusione di onde ultrasonore (US) generate da interfacce acustiche.

L'importanza delle tecniche ultrasonografiche in Medicina è dovuta essenzialmente alla la completa o quasi innocuità per il paziente, che permette l'acquisizione prolungata o ripetuta anche in pazienti a rischio, come le donne in gravidanza. Anche i costi e le difficoltà di esercizio sono molto più bassi a tecniche complementari ad esse, quali ad esempio TC o MRI²³.

4.1 Propagazione degli ultrasuoni

Gli ultrasuoni sono onde sonore longitudinali (che generano cicli di compressione e rarefazione del mezzo insonato) che presentano una frequenza armonica superiore alla banda di percezione degli esseri umani (f > 20 kHz). La velocità di propagazione dell'onda nel mezzo dipende dalla natura del mezzo e dalla frequenza dell'onda secondo la formula seguente:

$$v = \lambda f$$

Nell formula, v è la velocità di propagazione, f è la frequenza dell'onda, λ la lunghezza d'onda all'interno del mezzo considerato. Per ottenere un'alta risoluzione spaziale, la frequenza dev'essere quindi elevata e λ dev'essere commensurabile con le misure delle strutture che si vogliono studiare.

Nel corpo umano i tessuti molli hanno valori di velocità di propagazione dell'onda che sono molto simili tra loro, e che possono essere approssimati ad un valore medio pari a 1540 m/s (simile alla velocità del suono in acqua, pari a 1500 m/s). Si noti che la velocità degli US in aria e quindi all'interno dei polmoni, è molto più bassa, intorno ai 300 m/s, mentre quella nei tessuti compatti, come l'osso, è molto più alta (4000m/s)²⁶.

Una caratteristica importantissima del mezzo insonato è l'*impedenza acustica* (Z), che è una grandezza che misura quanto la materia si oppone al passaggio dell'onda sonora e dipende linearmente dalla densità del mezzo insonato e dalla velocità di propagazione dell'US in quel mezzo. Si esprime in [Kg/m²s].

Tutti i tessuti molli (e quindi organi anche molto diversi tra loro) hanno valori di impedenza abbastanza simili, mentre per quanto riguarda polmoni e ossa i valori si discostano sensibilmente²³.

4.2 Generazione e geometria del fascio

Gli US vengono generati per effetto piezoelettrico. Quest'ultimo è una proprietà di alcuni materiali cristallini di convertire onde meccaniche (US) in segnali elettrici. Esso può essere *diretto*, se sono le onde meccaniche ad essere convertite in segnali elettrici, o *inverso*, se avviene l'opposto. Entrambi

questi effetti vengono usati per generare un immagine ecografica. Un singolo trasduttore funziona quindi come sia come generatore che come ricevitore di US²⁶.

La geometria del fascio US generato da un singolo trasduttore può essere divisa in una parte prossimale, caratterizzata da un diametro pressochè costante, e in una parte distale, in cui il fascio tende a divergere (fig 4.1, immagine a sinistra). Per concentrare maggiormente l'energia del fascio in un punto preciso si può utilizzare la focalizzazione statica, che può essere ottenuta applicando una lente davanti al trasduttore (fig 4.1²⁶, immagine a destra).

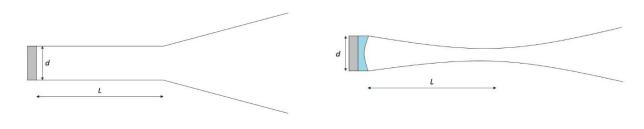


FIG 4.1

4.3 Propagazione e riflessione degli ultrasuoni

Gli ultrasuoni si propagano in un qualsiasi mezzo di densità apprezzabile, seguendo le stesse leggi di riflessione e di rifrazione applicate nell'ottica geometrica. In un mezzo d omogeneo (Z costante) un'onda US viaggia in linea retta. Quando il fronte incontra un interfaccia tra due mezzi caratterizzati da due impedenze acustiche differenti ($Z_1 \neq Z_2$), allora una parte dell'onda viene trasmessa, ovvero prosegue la sua propagazione, eventualmente deviata, un'altra parte dell'onda viene riflessa all'indietro o diffusa (fig 4.2^{23}).

Se le velocità di propagazione all'interno dei due mezzi $(v_1 e \, v_1)$ sono uguali, la direzione dell'onda non subisce deviazioni e prosegue in linea retta. Se è presente un interfaccia acustica, allora $Z_1 \neq Z_2$ e una parte di onda viene riflessa indietro. In ultrasonografia è ritenuta sempre valida l'ipotesi di incidenza normale, quindi viene assunto che la porzione dell'onda che viene trasmessa prosegue la sua corsa lungo la medesima direzione²⁶.

La frazione di energia dell'onda riflessa è data dal coefficiente di riflessione R:

$$R = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2$$

La frazione di onda trasmessa è espressa quindi dal coefficiente di trasmissione T:

$$T = 1 - R$$

Se Z_1 » Z_2 o Z_2 « Z_1 (ovvero se uno dei due mezzi è un materiale molto denso, come ad esempio l'osso, o è un gas, come l'aria all'interno dei polmoni), si ha che $R \to 1$ e quindi la maggior parte dell'onda US viene riflessa indietro, mentre la parte trasmessa in avanti può essere trascurata.

Per questo motivo è impossibile fare esami ultrasonografici che riguardano questi due tessuti ed è estremamente difficile fare ecografia cerebrale transcranica. Sempre a causa di questo problema, occorre impiegare un gel (che la maggior parte delle volte è un mezzo liquido, anche se a volte può essere utilizzato anche un *pad* solido gelatinoso, spesso all'incirca un centimetro) tra sonda e paziente in modo da eliminare le bolle d'aria. Se invece le impedenze sono simili tra loro, la percentuale di onda riflessa è bassissima.

4.4 Attenuazione degli ultrasuoni

Propagandosi in un mezzo, l'onda US è affetta da processi di assorbimento, e perde perciò energia in modo esponenziale decrescente con la distanza, secondo la Legge di Lambert - Beer:

$$A(z) = A_0 e^{-\alpha z}$$

Dove α è il coefficiente di attenuazione lineare [m⁻¹], A(z) è l'ampiezza dell'onda in funzione della profondità z e A₀ è l'ampiezza iniziale dell'onda. Il coefficiente di attenuazione lineare α è funzione del mezzo e, soprattutto dipende dalla frequenza dell'onda US. Si deduce quindi che occorre una soluzione di compromesso per la scelta della frequenza; essa deve essere elevata, per vedere e discriminare i dettagli più piccoli (dalla frequenza dipende la lunghezza d'onda), ma deve essere bassa, per avere maggiore potere di penetrazione.

A causa dell'attenuazione e della perdita di energia dell'onda dovuta alle interfacce acustiche, le sonde ecografiche possono raggiungere una profondità di scansione massima pari a 10-15 cm²⁶.

4.5 Risoluzione di un sistema eco pulsato

La massima risoluzione ottenibile da un singolo trasduttore è teoricamente pari alla lunghezza d'onda di quella degli ultrasuoni che esso emette. A causa di limiti tecnologici associati alla Teoria dei Segnali, ogni impulso deve però avere una durata T tale da permettere l'emissione di almeno due o tre cicli, per cui la minima risoluzione reale Δx ottenibile è vincolata alla durata di questo impulso emesso ($\Delta x = T \cdot v$).

Una sonda ecografica, comunque, non è mai costituita da un singolo trasduttore, ma da una schiera (array). La risoluzione, quindi, non dipende solo dalla frequenza di emissione del cristallo, ma da moltre altri fattori: vengono considerate tre diverse risoluzioni (fig 4.3^{23}): una assiale, lungo la direzione di propagazione dell'impulso (pari a minimo 3λ), una laterale in direzione laterale e perpendicolare alla direzione assiale, e un'elevazione, che definisce lo spessore della slice insonata²³.

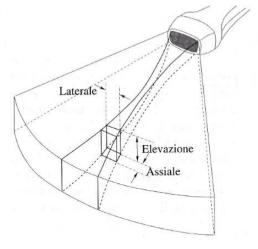


Fig 4.3

4.6 Principi di funzionamento di un sistema eco pulsato

Un sistema eco pulsato è costituito da un singolo trasduttore pilotato, che si comporta sia come trasmettitore che come ricevitore, e da un sistema elettonico di analisi del segnale, composta da un blocco detto *TGC* (*Time Gain Compensation*) e da un demodulatore (fig 4.4²⁶).

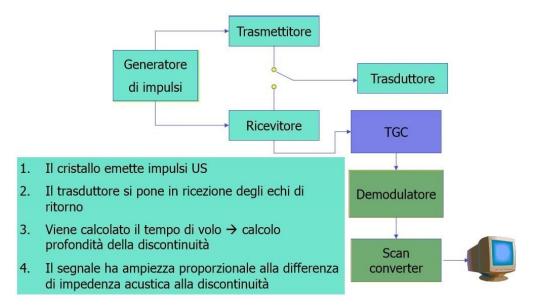


FIG 4.4

Il trasduttore prima emette l'impulso US e poi viene commutato in ricevitore per acquisire le onde riflesse dalle interfacce acustiche attraversate dall'impulso emesso precedentemente. Il tempo che intercorre tra l'invio dell'impulso e la ricezione dell'eco, viene utilizzato per calcolare la profondità dell'interfaccia che ha generato l'eco²⁶.

L'ampiezza del segnale ricevuto, opportunamente corretta per compensare l'attenuazione subita, indica la differenza di impedenza acustica tra i due mezzi separati dall'interfaccia.

La dinamica del segnale utile in uscita è pari a circa 30-35 dB, ovvero a 56 livelli di grigio (6 bit, che vengono poi rappresentati con 1 byte)²³.

4.7 Tecnica di scansione e modi di visualizzazione

Come già detto, in una singola sonda vi sono trasduttori multipli. Essi possono essere lineari (*linear array*) o a ventaglio (*convex array*). Gli elementi vengono utilizzati singolarmente, uno dopo l'altro, in rapida successione (fig 4.5^{26}).

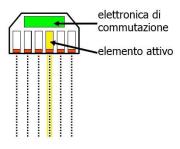


Fig 4.5

La modalità che più comunemente viene utilizzata per rappresentare il segnale ecografico è la modalità B-mode: un'immagine di questo tipo è un immagine digitale *grayscale*, ed è in tutto e per tutto una mappa delle interfacce acustiche appartenenti ad una *slice* di tessuto insonato.

5. SEGMENTAZIONE AUTOMATICA DEL TENDINE: TENDINI SANI E TENDINI POST CHIRURGICI

L'obiettivo principale di questa tesi, come accennato nella sezione introduttiva, è la stesura di un codice Matlab® in grado di effettuare in modo totalmente automatico la segmentazione del tendine d'Achille. Tutte le *routine* scritte appositamente per la stesura di questo codice sono riportate nell'appendice D.

Le immagini da fornire in ingresso a questo codice sono immagini ecografiche B-mode in cui il tendine compare in proiezione longitudinale: il codice è stato compilato basandosi sulle 56 immagini B-mode, acquisite presso Isokinetic (vedere capitolo 1) che rappresentano il tendine in proiezione longitudinale. Una delle 56 immagini è riportata in basso (fig 5.1), così come data in uscita dall'ecografo.

Questo primo codice realizzato effettua automaticamente la segmentazione di tendini sia sani che patologici senza che lo stato fisiopatologico del tendine sia noto a priori.

Le immagini da fornire in ingresso al codice sono immagini B-mode in formato *double* (i pixel che le compongono hanno valori a virgola mobile che variano tra 0 e 1) e in *grayscale*. Tutte le immagini presentano 1027 colonne, e quasi tutte 719 righe. Fanno eccezione le immagini relative al tendine sano del primo paziente, che presentano 621 righe. Siccome queste ultime sono state le prime immagini acquisite, il motivo della discrepanza nel numero di righe è presumibilmente da ricercarsi nell'iniziale settaggio dei parametri di della macchina, successivamente variato dall'operatore. Tale errore è comunque irrilevante, in quanto la profondità aggiuntiva delle altre immagini è inutile, essendo tutti i tendini, inclusi quelli trattati chirurgicamente, presenti a livello più superficiale nelle immagini.



Fig 5.1

Il codice di segmentazione automatica si divide in due grandi blocchi: una prima parte di operazioni matematiche volte ad ottenere una maschera binaria che presenta diversi oggetti bianchi su sfondo nero. Tra questi, nel secondo blocco, più consistente, basato su procedimenti euristici, andranno selezionati gli oggetti che corrispondono ai bordi superiori e inferiori dei tendini.

5.1 Image enhancement

5.1.1 Ricampionamento e ottimizzazione della dinamica

L'immagine data in pasto al codice viene inizialmente sottocampionata (fig 5.2, immagine a sinistra) tramite la funzione esterna *imresample*, il numero di righe e di colonne viene dimezzato per eccesso, perciò il numero totale di pixel si riduce di un fattore pari a circa 4: il valore di intensità dei pixel della nuova immagine viene calcolato interpolando linearmente i valori dei pixel vicini della vecchia immagine. Tale operazione viene effettuata in modo da ridurre l'informazione contenuta nell'immagine, abbattendo così il rumore che inevitabilmente affligge l'immagine.

Dopo questa prima operazione, che può essere considerata a tutti gli effetti un filtraggio passabasso, viene ottimizzata la dinamica dell'immagine (fig 5.2, immagine a destra), ovvero viene aumentato il contrasto, tramite la funzione di Matlab *imadjust*, che satura l'1% dei pixel alla minima e alla massima intensità possibile.

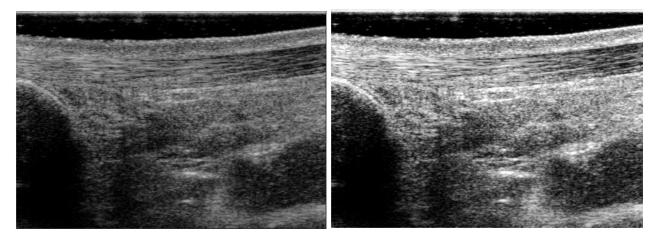


FIG 5.2

5.1.2 Filtraggio di Sobel

A questo punto viene effettuato un filtraggio passaalto (edge enhancement filtering) tramite l'applicazione di un gradiente di Sobel (vedere capitolo 3.4).

Il filtraggio di Sobel viene effettuato attraverso la convoluzione del kernel omonimo con l'immagine, che permette di effettuare un operazione di derivazione discreta lungo la direzione verticale e uno smoothing triangolare lungo quella orizzontale. L'operazione di derivazione è utile per esaltare i bordi orizzontali. La fig 5.3 mostra l'evoluzione delle immagini della fig 5.2 dovuta a questo tipo di filtraggio.

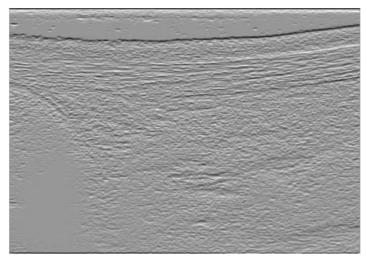


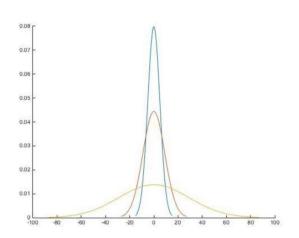
Fig 5.3

5.1.3 Filtraggio FOGD

Successivamente viene implementato un filtraggio FODG (First-Order Derivative of Gaussian)²⁷.

L'applicazione di questa tipologia di filtro risulta essere fondamentale per individuare strutture connesse di una specifica dimensione e lungo una direzione preferenziale (in questo caso, tali strutture risulteranno essere lunghe e strette, orientate in direzione orizzontale). Il filtraggio viene effettuato tramite la convoluzione dell'immagine con un kernel gaussiano bidimensionale, dato dalla combinazione di due kernel monodimensionali separati, uno in direzione orizzontale (gaussiana di ordine zero, fig 5.4, a sinistra) e l'altro in direzione verticale (gaussiana di ordine 1, fig 5.4, a destra). Risulta critico il settaggio del valore sigma della gaussiana (uguale in entrambe le direzioni), in quanto da esso dipende la dimensione specifica delle strutture connesse da individuare: tale dimensione è pari ad un numero di pixel circa doppio del valore di sigma.

Nel caso dei bordi dei tendini, occorre evidenziare strutture estremamente sottili: il valore scelto di sigma è pari a 4, che corrisponde a strutture larghe circa 8 pixel; scegliere valori di sigma più bassi non conviene, in quanto il rumore diventerebbe in tal caso molto rilevante, e verrebbero evidenziate troppe strutture.



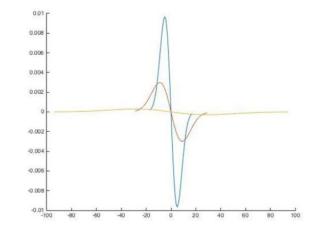


FIG 5.4

La matrice in uscita dal filtraggio FODG (fig 5.5) presenta pixel il cui valore è generalmente molto piccolo, e può essere sia positivo che negativo (il kernel di ordine 1 presenta valori negativi, così come l'immagine filtrata con il gradiente di Sobel). Osservando tale immagine, risulta immediato che le regioni connesse di interesse presentano pixel di valore negativo. Vengono quindi posti a zero tutti i pixel positivi, viene ricalcolata l'intera immagine in valore assoluto, e viene nuovamente ottimizzata la dinamica.

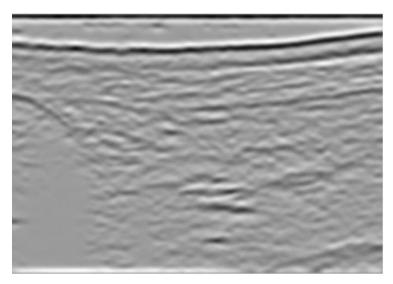


FIG 5.5

5.1.4 Global thresholding e maschera binaria

A questo punto viene effettuato un global thresholding: una volta fissato un valore soglia, tutti i pixel il cui valore è maggiore di tale soglia vengono posti a 1, tutti quelli con valore inferiore vengono posti a zero. Si genera così una maschera binaria black-white, che chiameremo MAT, contenente numerosi oggetti bianchi su sfondo nero, tra i quali occorrerà discernere quelli di essi appartengono al bordo superiore o inferiore del tendine da quelli generati dal rumore o da strutture acustiche simili per intensità.

Per settare al meglio il valore di soglia occorre effettuare un procedimento empirico e iterativo, andando a valutare immagine per immagine la maschera binaria in uscita dal thresholding e variando di conseguenza il valore scelto. Il valore di soglia scelto è pari a 0.085, e risulta valido per tutte le 56 immagini usate per la costruzione del codice.

Una volta ottenuta la maschera binaria (fig 5.6), vengono utilizzate su di essa due funzioni preimpostate di Matlab® molto utili, richiamate più volte anche in seguito, *bwlabeln* e *regionprops*.

La prima delle due etichetta i vari oggetti della maschera binaria, imponendo un valore pari a 1 per tutti i pixel del primo oggetto (generalmente in alto a sinistra), un valore pari a 2 per tutti quelli del secondo oggetto, e così via, fino all'oggetto n-esimo, i cui pixel presenteranno un valore pari a n.

La connettività tra i pixel per discernere tra un oggetto e l'altro è, in questo caso, pari a 8 (default). Ciò significa che due pixel non nulli vicini sia in orizzontale (o verticale) che in diagonale sono considerati appartenenti allo stesso oggetto. La connettività, per maschere 2D, può anche essere imposta pari a 4 (solo pixel vicini orizzontalmente o verticalmente sono considerati vicini).

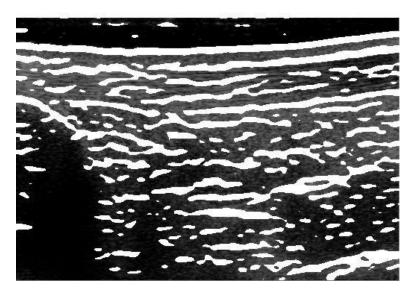


FIG 5.6

La seconda funzione è più complessa. Essa genera una struttura contenente una serie di parametri geometrici relativi a ciascun oggetto della maschera, tra i quali i più importanti e utili sono sicuramente l'area (espressa in numero di pixel), la lunghezza dell'asse maggiore (l'unità di misura è il pixel), la lunghezza dell'asse minore, le coordinate dei centroidi, l'eccentricità (se il valore tende a 1, l'oggetto in questione è lungo e stretto), l'orientamento rispetto all'orizzontale. In questo caso viene calcolata la sola area.

Le maschere in uscita contengono moltissimi oggetti (in media più di 150), e conviene senza dubbio ridurre drasticamente il loro numero prima di effettuare analisi complesse. Perciò tutti gli oggetti 'piccoli', ovvero che presentano aree minori di 300 pixel (valore scelto empiricamente) vengono eliminati (fig 5.7). Rimangono in media meno di una trentina di oggetti, un numero molto più gestibile. A questo punto, avendo modificato la maschera MAT, occorre rietichettare gli oggetti e ricalcolarne le proprietà.

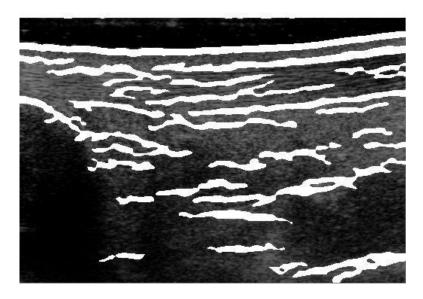


Fig 5.7

5.2 Segmentazione della cute

Occorre per prima cosa identificare l'oggetto che rappresenta la cute, molto facile da individuare, in quanto non è frammentato, mentre i bordi dei tendini lo sono quasi sempre, e, oltre ad allungarsi da un bordo all'altro dell'immagine, presenta un area molto grande.

Tuttavia ci sono casi in cui tale oggetto risulta unito, più o meno marcatamente, ad altri oggetti, tra i quali spesso anche al profilo superiore del tendine, che è superficiale. Occorre perciò separare tali oggetti tra loro.

Viene lanciato quindi un precesso iterativo, che compie un massimo di tre iterazioni: per ogni step, viene innanzitutto ricercato l'oggetto cute, andando a cercare i primi tre oggetti in alto che presentano un area pari ad almeno 3000 pixel e un asse maggiore lungo più dell'80% del numero di colonne dell'immagine. L'oggetto la cui ordinata del centroide è intermedia a quella degli altri due è la cute. L'oggetto con ordinata più bassa rappresenta l'interfaccia tra la sonda dell'ecografo e il pad di gel anecogeno posizionato sulla cute (figura 5.8: l'oggetto bianco nelle due immagini a sinistra è l'oggetto inizialmente identificato con la cute)

Una volta evidenziata la cute, ne viene estrapolata la maschera binaria e tale maschera viene sottoposta ad una particolare operazione morfologica: viene divisa in tre parti uguali (una di destra, una centrale e una di sinistra) per ognuna di esse viene calcolato in modo approssimato l'orientamento dell'oggetto-cute, e viene effettuata un'operazione di apertura il cui operatore morfologico è un segmento lineare di lunghezza pari a 20 pixel, il cui orientamento è quello appena calcolato. Con lo stesso operatore viene poi effettuata una chiusura.

In questo modo, oggetti che risultano parzialmente uniti vengono facilmente separati (figura 5.8, immagine centrale in alto).

La maschera della cute viene poi ricomposta e gli oggetti ottenuti vengono sostituiti *in totum*, all'interno della maschera MAT, all'oggetto precedentemente identificato come cute. Quest'operazione non viene effettuata nelle iterazioni successive alla prima.

Nella seconda iterazione, vengono valutati gli oggetti che risultano uniti in modo molto consistente, (in cui, presumibilmente l'oggetto cute e l'oggetto profilo superiore risultano totalmente uniti) se l'oggetto cute identificato ha un area maggiore di 7000 pixel, dopo averne riempito gli eventuali buchi, ne viene calcolato lo skeleton tramite un apposita funzione di Matlab. Lo scheleton viene usato per dividere longitudinalmente in due l'oggetto (figura 5.8, immagine centrale inferiore).

Nella terza e ultima iterazione, viene semplicemente ricercato l'oggetto cute per l'ultima volta.

A questo punto viene calcolato il profilo della cute effettuando un'operazione di skeleton (vedere capitolo 3.4) e ne vengono estrapolate le coordinate. Poi si procede all'eliminazione della cute e di tutti gli oggetti ad essa superiori nella maschera binaria MAT (in figura 5.8, immagini a destra; il profilo della cute è rappresentato in blu).

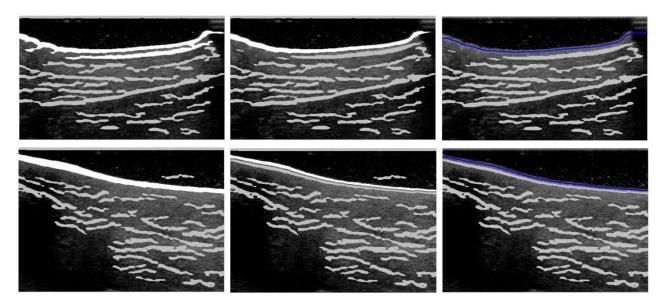


Fig 5.8

5.3 Segmentazione del profilo superiore

5.3.1 Identificazione degli oggetti candidati iniziali

Una volta acquisito il profilo della cute e ridotta l'informazione contenuta nella maschera binaria, viene eseguita una chiusura morfologica della maschera, volta ad unire eventuali oggetti separati ma estremamente vicini, tramite un piccolo segmento orizzontale di raggio pari a 2 pixel.

A questo punto, dopo aver nuovamente rietichettato e ricalcolato i parametri geometrici degli oggetti, vengono ricercati gli oggetti che potrebbero appartenere al profilo superiore del tendine.

Tali oggetti, il cui insieme chiameremo *Ogg*, vengono selezionati se l'ordinata del loro centroide dista verticalmente dalla cute meno di 39 pixel. Tale valore è stato scelto in modo empirico, come quasi tutti i valori critici scelti nei vari criteri su cui lavora il codice di segmentazione tendinea automatica.

Nella figura 5.9, a sinistra, è riportata un immagine di esempio in cui si possono vedere, rappresentati in bianco, gli oggetti selezionati tramite questo criterio. In blu è evidenziato il profilo della cute.

5.3.2 Oggetto principale del bordo superiore

Tra gli oggetti selezionati, occorre ora stabilire quale tra essi appartiene in modo più consistente al profilo superiore. È chiaro che spesso più di un oggetto degli *Ogg* appartiene al profilo superiore, ma ne viene cercato solo uno, che verrà definito oggetto principale.

Vengono considerati, banalmente, i due oggetti più grandi tra gli oggetti selezionati allo step precedente. Tra questi due, se il rapporto tra l'area dell'oggetto più piccolo e l'area dell'oggetto più grande è maggiore di ¾ e se l'eccentricità dell'oggetto più piccolo è maggiore di quella dell'oggetto

più grande allora l'oggetto più piccolo tra i due è il l'oggetto principale superiore, altrimenti tale ruolo spetta all'oggetto più grande tra gli *Ogg*.

Nella figura 5.9, a destra, l'oggetto principale è rappresentato in verde.

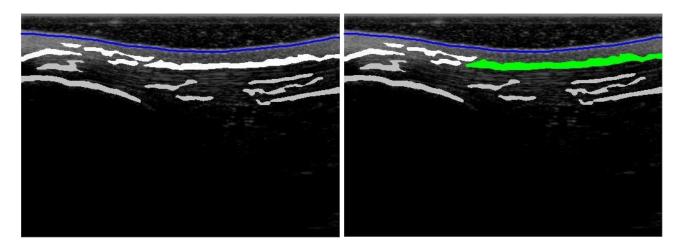


Fig 5.9

Viene quindi estrapolata una maschera contenente questo oggetto, ne viene effettuata una chiusura morfologica con un disco di raggio 11 per renderne i bordi più lisci, l'oggetto così modificato viene sostituito a quello grezzo nella maschera MAT (fig 5.10, immagine a sinistra e centrale).

Viene poi estrapolato, tramite la funzione esterna *bordo*, il bordo inferiore dell'oggetto, e ne vengono calcolate le coordinate degli estremi laterali tramite le funzioni esterne *estremo_sx* ed *estremo_dx* (fig 5.10, immagine a destra: è rappresentato il bordo inferiore dell'oggetto principale e i suoi estremi destro e sinistro, rappresentati in verde).

La funzione *bordo* è una funzione che, presa in ingresso una maschera binaria contenente uno o più oggetti, restituisce una maschera contenente i soli bordi (inferiori o superiori, a scelta) degli oggetti contenuti. Tale bordo può essere discontinuo, ad esempio se il perimetro presenta delle brusche variazioni in verticale. È possibile scegliere se ottenere il bordo effettivo, o il bordo parzialmente ricostruito (in questo caso viene scelta questa soluzione; funzione esterna *edgecleaner*, che elimina i frammenti di bordo considerati piccoli e trascurabili e unisce i frammenti adiacenti se il gap è relativamente piccolo). Se la maschera contiene più oggetti, è possibile scegliere se mantenere tutti i bordi degli oggetti, oppure se mantenere un solo pixel per colonna, andando a conservare solo il pixel più alto se il bordo scelto è quello superiore e viceversa.

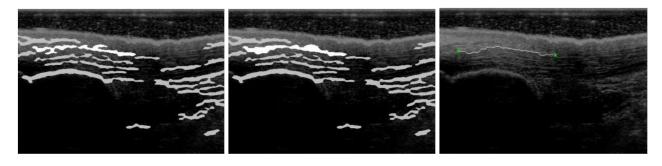


Fig 5.10

L'oggetto principale può essere più o meno esteso. Ci sono casi fortunati in cui esso si estende per tutta l'immagine: in tal caso la ricerca del profilo superiore del tendine è da considerarsi praticamente conclusa, ma ciò avviene poche volte. Negli altri casi, una volta ottenuto l'oggetto principale, si cercano gli altri potenziali oggetti che costituiscono il profilo superiore lateralmente a quello principale.

5.3.3 Oggetti laterali all'oggetto principale

A destra e a sinistra dell'oggetto principale, viene definita una roi (region of interest) nel modo seguente: vengono virtualmente tracciate due curve perfettamente parallele al profilo della cute, in modo che i loro estremi coincidano con gli estremi dell'oggetto principale calcolati precedentemente. Tali curve rappresentano il profilo centrale delle roi, che si estendono superiormente e inferiormente rispettivamente di 19 e di 10 pixel, se la distanza tra il bordo dell'immagine e l'estremo in questione è maggiore di 120 pixel (oggetto principale lontano dal bordo), o di 5 pixel (sia superiormente che inferiormente) in caso contrario, ovvero se l'oggetto principale è considerato vicino al bordo dell'immagine.

Se un oggetto cade all'interno di queste due regioni di interesse e presenta un eccentricità maggiore di 0.7 (quasi tutti gli oggetti presentano questa caratteristica), viene selezionato e aggiunto a uno dei due cluster, OggSx e OggDx.

Nella figura 5.11 si può notare la roi di ricerca, i cui bordi sono evidenziati in verde, e gli oggetti che cadono al suo interno, evidenziati in bianco. Tali oggetti sono gli oggetti appartenenti al cluster OggSx. Il cluster OggDx è in questo caso vuoto, per il fatto che l'oggetto principale si spinge fino all'estremità destra dell'immagine.

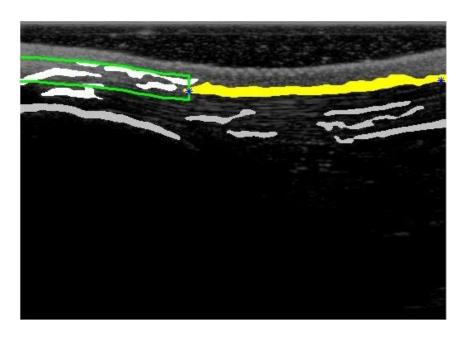


Fig 5.11

A questo punto, viene effettuata un analisi sugli oggetti dei due cluster: immaginiamo innanzitutto una zona d'ombra che si estende tra i due estremi laterali di un oggetto, ovvero dal suo estremo sinistro a quello destro, per tutte le colonne. Se un altro oggetto cade in questa zona d'ombra, che si estende per tutta l'immagine dall'alto in basso, diremo che questo secondo oggetto e il primo si "sovrappongono".

Gli oggetti che cadono nella zona d'ombra dell'oggetto principale, ovvero che si sovrappongono a questo in modo consistente (che in questo caso sta a significare che la sovrapposizione è maggiore del 10% dell'estensione orizzontale di questi oggetti) vengono esclusi dai cluster (fig 5.12, immagine centrale).

Oltre a questo, se un oggetto del cluster è completamente contenuto nella zona d'ombra di un altro oggetto del cluster, il primo e più piccolo oggetto viene escluso dal cluster (fig 5.12, immagine a destra).

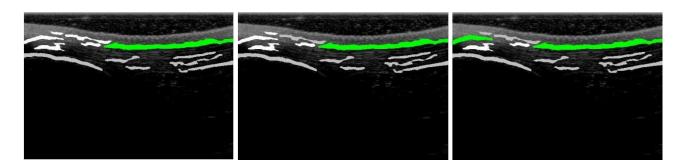


Fig 5.12

5.3.4 Oggetti principali laterali

Tra gli oggetti rimanenti, vengono determinati gli oggetti principali all'interno dei due cluster, che chiameremo oggetti principali secondari (o laterali). Per ogni immagine, possono esistere un massimo di due oggetti di questo tipo, uno a sinistra e l'altro a destra dell'oggetto principale.

Vengono innanzitutto selezionati tutti gli oggetti la cui area è maggiore dell'area dell'oggetto più grande diminuita di 150 pixel. Tra questi, vengono selezionati tutti gli oggetti la cui eccentricità è maggiore dell'eccentricità dell'oggetto con eccentricità maggiore diminuita di un valore pari a 0.05. A questo punto, viene selezionato, tra i rimanenti, l'oggetto per cui la distanza verticale tra la cute e il centroide è minore.

Nella figura 5.13, nell'immagine a sinistra, viene rappresentato in verde l'oggetto principale, in giallo l'oggetto principale laterale di destra, in bianco gli oggetti appartenenti al cluster *OggSx* (non ci sono oggetti nel cluster *OggDx* in questo caso).

I cluster originali OggSx e Ogg Dx vengono per il momento mantenuti: altri oggetti che li costituiscono potrebbero appartenere al profilo superiore del tendine.

Vengono però eliminati dai due cluster gli oggetti che si sovrappongono alla zona d'ombra degli oggetti principali secondari, a meno di un margine minimo di sovrapposizione, ovvero minore del 10% dell'estensione orizzontale dell'oggetto principale secondario (fig 5.13, immagine a destra).

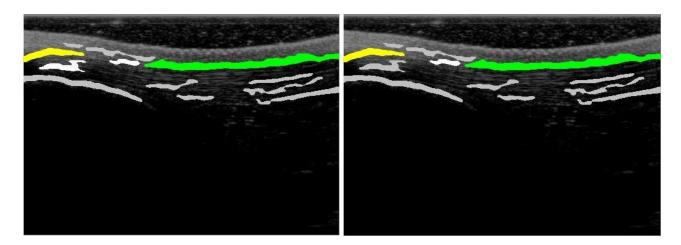


Fig 5.13

Si può parlare ora di nuovo cluster, definitivo, che contiene gli oggetti che rappresentano il profilo superiore del tendine (fino ad ora contenente l'oggetto principale ed eventualmente i due oggetti principali secondari) e che chiameremo nuovamente *Ogg*.

5.3.5 Oggetti secondari del profilo superiore

A questo cluster definitivo vengono aggiunti gli oggetti dei due cluster (OggDx e OggDx) presenti nel gap tra l'oggetto principale e i due oggetti principali secondari. Per essere aggiunti, gli oggetti devono cadere all'interno di due zone di ricerca (roi) che si costruiscono a partire da segmenti che congiungono linearmente gli estremi del del candidato principale con gli estremi (rivolti verso il principale) dei candidati principali laterali. La roi si estende per 5 pixel in verticale: (due pixel superiori e due inferiori ai pixel costituenti il segmento).

Nella figura 5.14 vengono mostrati in giallo l'oggetto principale (a destra) e l'oggetto principale secondario (a sinistra), in blu sono rappresentati i due estremi (calcolati usando i bordi inferiori dei due oggetti), in verde è mostrata la roi, in bianco sono rappresentai gli oggetti del cluster OggSx rimanenti: quelli che cadono all'interno della roi verde verranno aggiunti al cluster Ogg degli oggetti appartenenti al profilo superiore del tendine; nell'immagine è rimasto un solo oggetto di OggSx, che viene anche selezionato dalla roi, ma occorre ricordare non è così per tutte le immagini.

Vengono poi aggiunti ad Ogg, gli oggetti che cadono lateralmente ai due oggetti principali secondari: la roi si basa su una curva parallela alla cute che include gli estremi dei candidati principali laterali, e si estende per 7 pixel in verticale (±3 rispetto alla curva direttrice).

Nella figura 5.15 sono rappresentati in giallo il candidato principale (a sinistra) e quello principale laterale (a destra), in verde la roi di ricerca, in bianco gli oggetti selezionabili (ce n'è solo uno e viene selezionato).

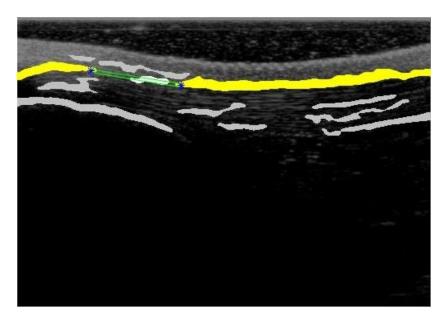


Fig 5.14

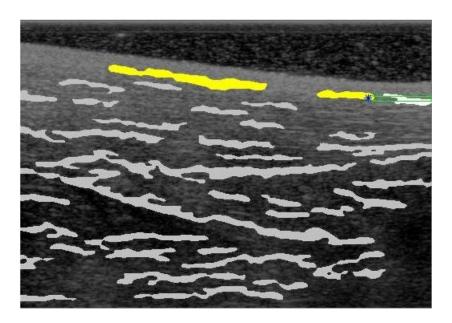


FIG 5.15

A questo punto, il codice euristico di ricerca degli oggetti appartenenti al profilo superiore è praticamente terminato, almeno per la stragrande maggioranza dei casi. Vi sono però maschere particolari che richiedono l'inserimento di ulteriori oggetti.

Vi è ad esempio un caso in cui l'oggetto principale si estende da un lato all'altro dell'immagine e presenta una concavità in cui si annida un oggetto più piccolo, ovviamente sempre scartato fino a questo punto, ma che dovrebbe essere aggiunto affinchè il profilo del tendine risulti più corretto.

Per includere questo oggetto, viene valutata innanzitutto l'area dell'oggetto principale (in questo caso è l'unico oggetto presente nel cluster). Se essa è superiore a 5000 pixel, vengono calcolati gli estremi superiori e inferiori di questo oggetto. Se all'interno del rettangolo (roi) che inscrive questo oggetto enorme cadono degli oggetti ancora non considerati (fig 5.16, immagine a sinistra: in verde la roi, in giallo il candidato principale, in bianco gli oggetti che cadono nella roi), allora questi ultimi vengono

analizzati, e vengono aggiunti al cluster *Ogg* se e solo appartengono alla roi rettangolare per più del 95% della sua estensione e se la sua distanza con l'oggetto enorme è pari solamente ad 1 pixel (fig 5.16, immagine a destra: in giallo è rappresentato l'oggetto principale e l'oggetto inserito in questo step).

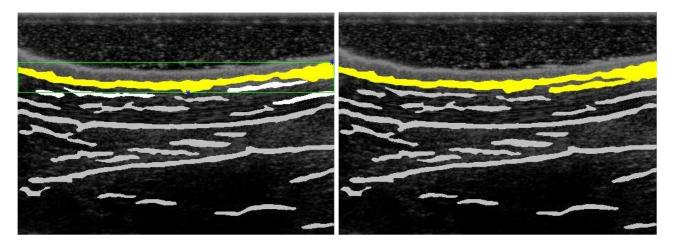


Fig 5.16

5.3.6 Costruzione del profilo superiore

Arrivato a questo punto, il condice genera una maschera binaria contenente i soli oggetti presenti nel cluster principale *Ogg* (ovvero contenente tutti, o quasi, gli oggetti che rappresentano il profilo superiore del tendine). Dopo aver effettuato una chiusura morfologica utilizzando un disco di raggio 10, in modo da rendere più lisci i confini degli oggetti ed eventualmente unire tra loro oggetti distinti vicini, vengono estrapolati i bordi inferiori di questi oggetti. Se il bordo relativo ad un oggetto cade nella zona d'ombra del bordo relativo ad un altro oggetto, vengono mantenuti solo i pixel del bordo più profondo, in modo che le due zone d'ombra rimangano adiacenti e non sovrapposte (fig 5.17).

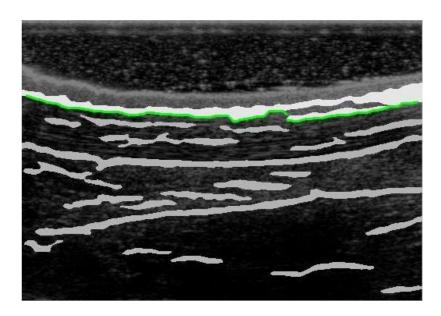


FIG 5.17

Una volta ottenuta una maschera binaria detta *S* contenente tutti i frammenti di bordo, essi vengono innanzitutti etichettati e ne vengono estratte le caratteristiche geometriche, poi eliminati i frammenti troppo piccoli, ovvero quelli che presentano un estensione minore di 5 pixel.

Successivamente vengono analizzati i frammenti con estensione minore di 40 pixel: se il loro centroide cade nella metà sinistra dell'immagine e l'orientamento del frammento è maggiore di 10 essi vengono eliminati, così come quelli che cadono nella metà destra dell'immagine e che presentano un orientamento minore di -10.

Nella figura 5.18 a destra, vengono rappresentati tutti i frammenti di bordo (è evidenziata tramite uno zoom la saparazione tra due frammenti adiacendi) immediatamente precedenti a questa sezione di codice; nella figura 5.18 a sinistra si può notare che uno dei frammenti, che presenta un orientamento abbastanza scostato da quello orizzontale, è stato eliminato.

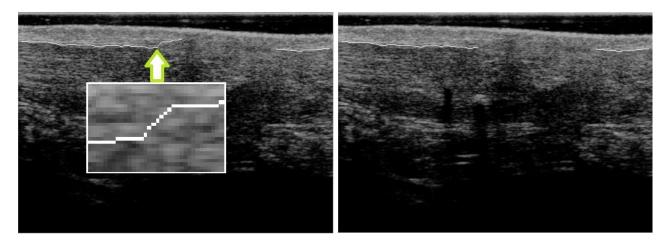


Fig 5.18

A questo punto si torna per un attimo ad effettuare un procedimento euristico classico per reinserire eventuali oggetti che prima non erano stati considerati, in quanto esclusi a causa di criteri di sovrapposizione con i candidati principali, ma che effettivamente dovrebbero esserlo. In ogni caso, solamente in una delle 56 immagini interviene questa nuova operazione.

Viene considerato il gap (come numero di colonne) tra due frammenti di bordo non adiacenti (un frammento ulteriore, non considerato, cade nel gap): se tale gap è minore di 120 pixel, allora viene tracciato virtualmente un segmento lineare che collega i due estremi del gap. Se tale segmento incrocia un solo oggetto, diverso da quello già contenuto nel gap, e questa intersezione si ripete per almeno 20 pixel, allora il nuovo oggetto viene aggiunto al cluster principale, e ne viene estrapolato il bordo inferiore, che viene aggiunto alla maschera S. Dalla stessa maschera viene quindi rimosso il frammento di bordo ulteriore precedentemente compreso nel gap in analisi.

Nella figura 5.19, nell'immagine di sinistra, vengono rappresentati i tre frammenti di bordo, evidenziando la separazione tra il primo e il secondo di essi; viene considerato il gap tra il primo e il terzo (segmento rappresentato in blu nell'immagine centrale della figura 5.19,), in cui è presente un oggetto prima non considerato (rappresentato in giallo). Nella stessa figura, a destra, vengono rappresentati i nuovi frammenti di bordo calcolati in seguito all'applicazione del procedimento appena descritto.

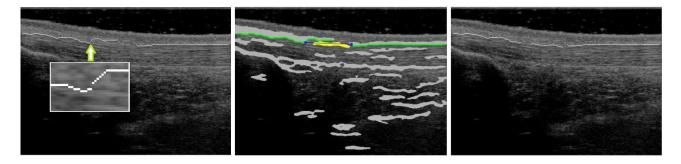


Fig 5.19

Dopo questa piccola parentesi, si torna alla costruzione del profilo superiore: vengono applicati due ulteriori criteri per scremare i frammenti di bordo non corretti.

Innanzitutto, quelli che presentano un estensione minore di 70 pixel e un orientamento che in valore assoluto è maggiore di 20 vengono eliminati.

Successivamente, per ogni frammento viene calcolato il centroide. Se il segmento congiungente gli estremi dei frammenti adiacenti al frammento in esame ha un'estensione orizzontale minore di 100 pixel e passa a più di 3 pixel di distanza (verticale) dal centroide, allora il frammento in esame va eliminato dalla maschera S (figura 5.20).

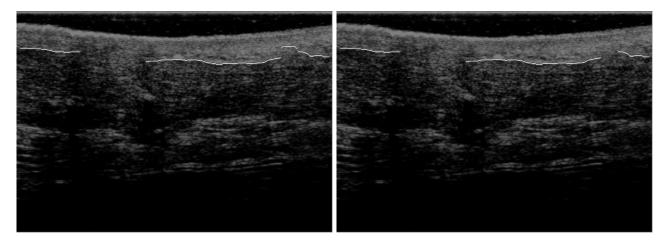


Fig 5.20

A questo punto, non resta che ricostruire il profilo superiore del tendine a partire dai frammenti di bordo che rimangono. Dopo una procedura morfologica volta a rifinire (fig 5.21) i vari estremi dei frammenti di bordo (avendo oggetti di forma vagamente ellissoidale, i bordi inferiori estrapolati da essi avranno estremi che possono curvare verso l'alto, e la cosa è da evitare), si procede con la costruzione del profilo, tramite la funzione esterna *interpolazione frammenti*.

I vari frammenti vengono uniti a due a due e i due frammenti più esterni vengono uniti con i bordi dell'immagine. Il procedimento fa riferimento a interpolazioni polinomiali di terzo grado, e anche ad un profilo direttore esterno, che in questo caso coincide con il profilo della cute (fig 5.22, immagine a sinistra).

Viene poi effettuato uno smoothing del profilo ottenuto utilizzando un kernel gaussiano di ordine 0 e un coefficiente di apertura (sigma) pari a 16. Si ottiene così definitivamente il profilo superiore del tendine (figura 5.22, immagine a destra).

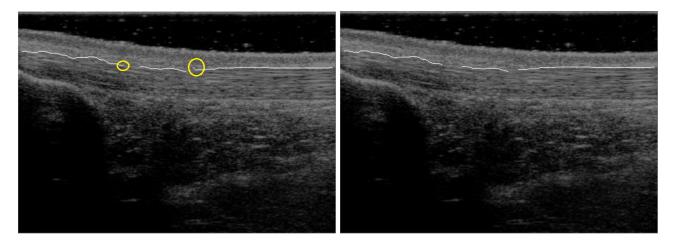


Fig 5.21

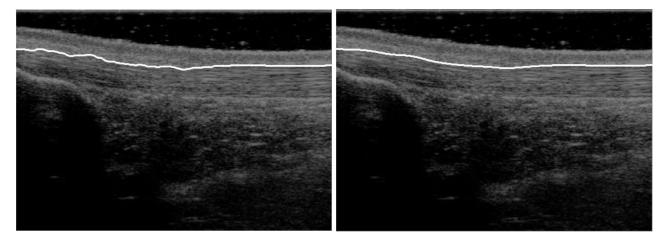


Fig 5.22

5.4 Segmentazione del profilo inferiore

5.4.1 Identificazione degli oggetti candidati iniziali

Quando il profilo superiore del tendine è stato segmentato, il codice inizia ad effettuare i procedimenti euristici necessari alla segmentazione del profilo inferiore. Si vogliono inizialmente selezionare gli oggetti candidati, tra i quali selezionare poi quelli principali: essi saranno al massimo 5, e tra di essi almeno uno sarà un oggetto che appartiene al profilo inferiore.

Vengono selezionati tutti gli oggetti che cadono in una zona di ricerca estesa dal bordo sinistro a quello destro i cui bordi superiore ed inferiore distano verticalmente, colonna per colonna, rispettivamente 50 e 130 pixel dal profilo superiore.

Di questi, vengono confermati tutti gli oggetti i cui centroidi distano verticalmente dal profilo superiore non meno di 40 pixel e non più di 145 pixel. Queste distanze sono state scelte in modo empirico; in ogni caso, già a occhio nudo si nota immediatamente una marcata differenza tra i tendini sani e quelli post operati: questi ultimi sono molto più spessi dei primi, perciò si è dovuto incrementare notevolmente il range di ricerca degli oggetti appartenenti al profilo inferiore, che occupa una zona molto vasta. Si può facilmente intuire come un fatto del genere introduca un elevato grado di complessità nella ricerca euristica dei profili inferiori.

Gli oggetti selezionati entrano a far parte dell'insieme dei candidati iniziali.

Nella figura 5.23, è evidenziato il blu il profilo superiore del tendine, in verde la roi all'interno della quale deve cadere almeno un pixel degli oggetti candidati (righe spesse) e la roi all'interno della quale devono cadere i centroidi (asterischi blu) degli oggetti candidati (righe sottili); gli oggetti selezionati da queste due roi sono evidenziati in bianco.

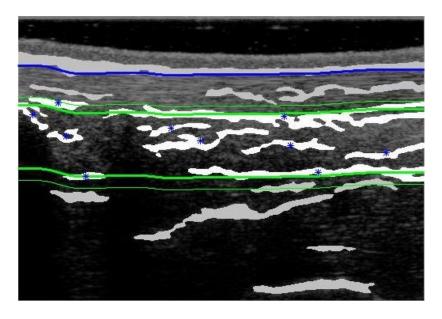


Fig 5.23

Tra questi, vengono mantenuti solo i 4 oggetti più grandi (fig 5.24, immagine a sinistra). Se tra gli oggetti precedentemente selezionati ed esclusi da questo passaggio vi è un oggetto con area pari a quella dell'oggetto più piccolo tra quelli mantenuti, allora esso viene anche considerato e solo in questo caso gli oggetti mantenuti saranno 5.

Si effettua quindi un ulteriore restrizione del numero degli oggetti candidati selezionati: vengono eliminati dall'insieme dei candidati gli oggetti che presentano un area minore del 29% di quella dell'oggetto più grande (fig 5.24, immagine a destra).

Vengono inoltre estrapolati e salvati in una maschera binaria chiamata D tutti i bordi superiori di questi oggetti, calcolati usando la funzione bordo, che a sua volta li elabora usando la funzione edgecleaner. In questo caso, logicamente, la presenza di più bordi su una stessa colonna è consentita.

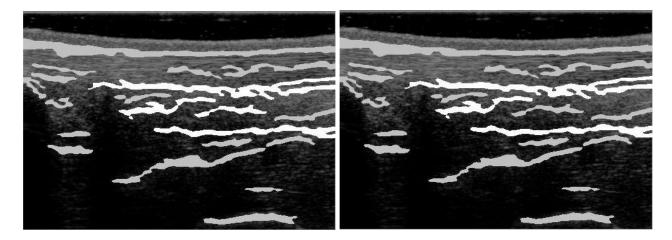


Fig 5.24

I candidati sono ancora una volta sottoposti ad un criterio di eliminazione: se uno di essi è molto grande, ovvero se presenta un asse maggiore più esteso della larghezza dell'immagine, e se presenta una forma concava accentuata (valutata tramite la posizione degli estremi superiore, destro e sinistro del bordo superiore dell'oggetto) la cui concavità è rivolta verso il basso, allora l'oggetto in questione viene eliminato dal gruppo dei candidati e dalla maschera contenente i loro bordi (figura 5.25, l'oggetto incriminato è rappresentato in giallo, quelli che vengono mantenuti in verde). In ogni caso, in relazione alle 56 immagini con cui è stato costruito il codice, questa casistica si presenta una sola volta.

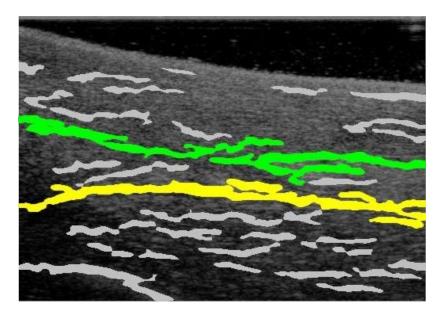


Fig 5.25

5.4.2 Oggetti principali del bordo inferiore

A questo punto, occorre stabilire quali dei candidati corrispondono ad un oggetto costituente del profilo inferiore del tendine. Si cercano cioè gli oggetti principali del profilo inferiore. A differenza di quanto è stato fatto per il profilo superiore, essi possono essere più di uno.

La ricerca di tali oggetti viene fatta usando 5 criteri diversi, eseguiti successivamente: se ad esempio gli oggetti principali vengono trovati utilizzando il primo criterio, allora tutti i criteri successivi non vengono applicati, e la stessa cosa succede se tali oggetti vengono scoperti utilizzando il criterio numero 2, 3 o 4.

Se i primi quattro criteri non riescono ad identificare gli oggetti principali inferiori, allora essi saranno identificati tramite l'ultimo criterio.

Primo Criterio

Se nel cluster dei candidati è presente un solo oggetto, questo sarà obbligatoriamente il candidato principale inferiore. Viene ricavato il bordo superiore (funzione *bordo* con uso della funzione *edgecleaner*) di tale oggetto in una maschera etichettata *W*.

Nella figura 5.26 è rappresentato in verde l'unico oggetto candidato rimanente, in rosso è evidenziato il suo bordo superiore (come si può notare in questo caso il profilo inferiore del tendine è quasi completamente segmentato).

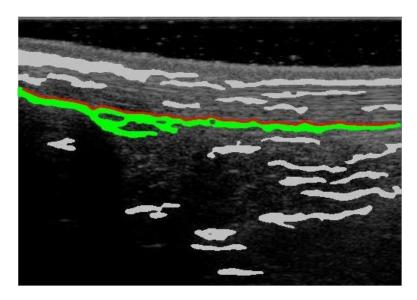


Fig 5.26

Secondo Criterio

Vengono analizzate tutte le coppie possibili tra gli oggetti candidati. Si procede con l'analisi solo se la distanza tra i due oggetti è maggiore di 40 o minore di 190 colonne, e se il segmento che congiunge i due oggetti presenta un coefficiente angolare minore di 0,5.

Se le condizioni appena descritte sono soddisfatte, vengono calcolati l'estremo generalizzato destro dell'oggetto a sinistra, e l'estremo generalizzato sinistro dell'oggetto a destra. Tali 'estremi generalizzati' sono il punto medio tra l'estremo (sinistro o destro) e il centroide dell'oggetto. Viene calcolato un terzo punto (oltre a questi due estremi generalizzati), la cui coordinata colonna è la media delle coordinate colonne degli estremi generalizzati, mentre la coordinata riga dista verticalmente dal profilo superiore del tendine di una misura pari alla media delle due distanze verticali dei due estremi generalizzati dal profilo superiore del tendine. Su questi tre punti viene interpolata una curva polinomiale di terzo grado.

Se la curva ricavata interseca un nuovo oggetto (non presente nel cluster degli oggetti candidati), questo oggetto viene esaminato accuratamente:

- Se la sua area è maggiore di 500 pixel;
- Se la sua estenzione da sinistra a destra è magiore del 50% del gap (numero di colonne) tra i due oggetti della coppia;
- Se le distanze verticali curva estremo sinistro, curva centroide e curva estremo destro del nuovo oggetto sono tutte e tre minori di 10 pixel;

Allora, se tutte queste condizioni sono vere, i due oggetti candidati che costituiscono la coppia di ricerca e il nuovo oggetto trovato, tra di essi intercalato, sono tutti e tre selezionati come oggetti principali del profilo inferiore del tendine.

Nella figura 5.27, i quattro candidati di partenza sono rappresentati in bianco e in verde, in verde è evidenziata, in particolare, la coppia che risulterà tra gli oggetti vincitori; sono rappresentati anche i due estremi generalizzati (sterischi blu) e la curva di ricerca (in blu); il terzo oggetto vincitore, trovato dalla curva blu, è evidenziato in giallo.

Nelle 56 immagini di base, questo criterio (numero 2) interviene 6 volte, di cui solo una volta in una immagine rappresentante un tendine sano.

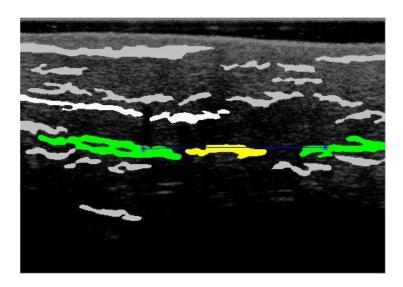


Fig 5.27

Una volta ricavati questi tre oggetti, ne vengono estrapolati i bordi superiori (funzione *bordo*, funzione *edgecleaner*, in questo caso non è ammessa la presenza di più di un pixel bianco sulla stessa colonna) in una maschera binaria W.

Oltre all'elaborazione di questi bordi, dovuta alla funzione *bordo*, i profili presenti in W vengono ulteriormente raffinati: se l'oggetto centrale è troppo vicino (meno di 40 pixel) ad uno dei due oggetti laterali, e se il segmento lineare che li congiunge virtualmente presenta un coefficiente angolare elevato (maggiore di 0.2, in valore assoluto), l'oggetto laterale viene via via eroso lateralmente fino a quando una delle due condizioni cessa di sussistere. In ogni caso, l'erosione non può superare i 20 pixel.

Terzo Criterio

Il terzo criterio è il più singolare di tutti, ed è stato implementato ad hoc per una singola immagine delle 56 sulle quali il codice è stato costruito, anche se si tratta di un ecografia di un tendine acquisito sulla gamba sana; essendo così particolare, le condizioni di attivazione sono molto stringenti.

Viene analizzato ogni oggetto candidato. A destra e a sinistra dei suoi estremi viene prolungato virtualmente un segmento orizzontale, fino ad intersecare un secondo oggetto candidato. La ricerca procede solo nel caso in cui questo segmento orizzontale virtuale è più lungo del 25% del numero delle colonne dell'immagine.

Se questo segmento interseca un solo nuovo oggetto (non presente nel cluster dei candidati) in un numero di pixel pari ad almeno il 60% dei pixel costituenti la lunghezza del segmento, allora sia l'oggetto candidato di base sia il nuovo oggetto trovato sono selezionati come oggetti principali del profilo inferiore del tendine.

Anche il secondo oggetto candidato, viene considerato oggetto principale, ma prima viene effettuata una notevole operazione morfologica su di esso: supponendo che il nuovo oggetto trovato sia a destra del candidato di base, dall'estremo destro di questo nuovo oggetto viene nuovamente esteso virtualmente verso destra un segmento orizzontale e calcolato il nuovo punto di intersezione con il secondo oggetto candidato; a questo punto tutta la porzione del secondo candidato che cade a sinistra del nuovo punto di intersezione viene eliminata (i pixel vengono posti a zero) dalla stessa maschera globale MAT. Ovviamente, dell'oggetto in questione vengono ricalcolate le informazioni geometriche.

Come per il criterio precedente, una volta ricavati ed elaborati questi tre oggetti principali, ne vengono estrapolati i bordi superiori (funzione *bordo*, funzione *edgecleaner*, in questo caso non è ammessa la presenza di più di un pixel bianco sulla stessa colonna) in una maschera binaria chiamata W.

Nella figura 5.28 sono rappresentati in bianco e in verde i due candidati iniziali; dal candidato sinistro si estende il segmento orizzontale (blu) verso destra, che trova l'oggetto vincitore intermedio (giallo) e il candidato di sinistra (bianco e verde); dall'oggetto intermedio trovato si estende verso destra un ulteriore segmento orizzontale (blu) per trovare le coordinate per la scissione (interfaccia bianco vs verde) del candidato di sinistra (la parte bianca di quest'ultimo viene poi eliminata completamente dalla maschera degli oggetti).

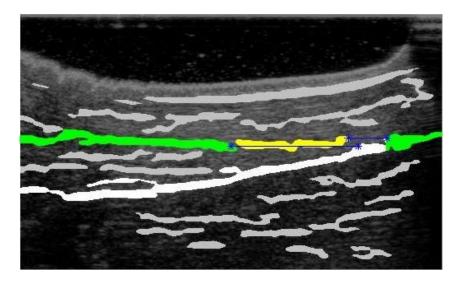


Fig 4.28

Quarto Criterio

Vengono analizzate tutte le coppie possibili tra gli oggetti candidati. Se entrambi gli oggetti della coppia presentano elevata eccentrocità (maggiore di 0.99) e se gli estremi vicini distano tra loro molto poco (meno di 25 pixel in orizzontale e meno di 6 pixel in verticale), allora entrambi gli oggetti della coppia sono selezionati come oggetti principali del profilo inferiore del tendine.

Ricavati questi due oggetti principali, ne vengono estrapolati i bordi superiori (funzione *bordo*, funzione *edgecleaner*, in questo caso non è ammessa la presenza di più di un pixel bianco sulla stessa colonna) nella maschera binaria chiamata W.

Nella figura 5.29 sono rappresentati i tre oggetti candidati (in verde e in bianco); in verde sono rappresentati i due oggetti vincitori, mentre gli asterischi blu rappresentano i due estremi vicini nominati sopra.

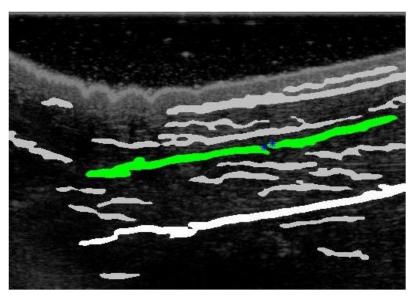


Fig 5.29

Ouinto Criterio

Per ogni oggetto candidato, viene ricavato il bordo superiore dalla maschera D. Questi bordi superiori, relativi a singoli oggetti, spesso risultano divisi in più pezzi, separati tra loro da gap verticali. L'oggetto candidato che presenta il pezzo di bordo superiore con estensione maggiore è l'oggetto principale del profilo inferiore del tendine. Viene quindi ricalcolato il bordo superiore (funzione bordo, funzione edgecleaner) di tale oggetto in una maschera etichettata W.

Nella figura 5.30, nell'immagine a sinistra, sono riportati i due oggetti candidati (in giallo e in verde), l'oggetto verde è quello vincitore; nell'immagine a destra sono riportati i frammenti di bordo dei due oggetti candidati (maschera *D*): come si può notare, anche se l'oggetto giallo è il più esteso nell'immagine di sinistra, sarà l'oggetto verde a risultare vincitore, avendo il pezzo di bordo più lungo.

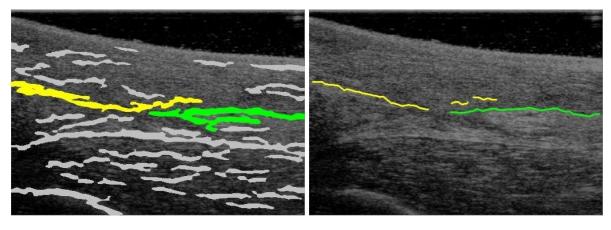


Fig 5.30

A questo punto sono stati ottenuti gli oggetti principali del profilo inferiore del tendine, che possono essere tre (criteri 2 e 3), due (criterio 4) oppure uno solo (criteri 1 e 5). Di tali oggetti, sono stati ricavati e ed eleborati i bordi superiori, immagazzinati nella maschera W.

5.4.3 Ripescaggio dei candidati

Gli oggetti rimanenti nel cluster dei candidati e non selezionati come principali non devono necessariamente essere scartati. Anzi, viste le loro peculiarità è probabile che siano oggetti appartenenti al profilo inferiore a tutti gli effetti. Per trovare gli ulteriori oggetti del profilo inferiore si inizia pertanto dall'analisi di questi oggetti candidati scartati dai criteri precedenti.

Innanzitutto, viene usata una funzione esterna appositamente creata, chiamata *overlap cleaner*, che elimina dal cluster dei candidati gli oggetti di esso i cui bordi (contenuti nella maschera binaria *D*) cadono nelle colonne in cui cadono anche i bordi degli oggetti principali (contenuti in *W*), a meno che non siano rispettate tutte le seguenti condizioni:

- L'oggetto candidato in esame dista verticalmente meno di 20 pixel dall'estremo (destro o sinistro) degli oggetti principali;
- Il numero di colonne condivise è minore di 15;

- Il numero di colonne condivise è minore del 10% dell'estensione dell'oggetto candidato in esame.

Poi, per il reinserimento degli oggetti candidati precedentemente esclusi, intervengono due criteri in cascata. Il primo di essi, descritto in seguito, vale per quelli che cadono in posizioni relativamente vicine agli oggetti principali inferiori.

Vengono ricavati tre punti, che sono l'estremo sinistro, il punto centrale e l'estremo destro degli oggetti principali, calcolati utilizzando i bordi di tali oggetti (contenuti nella maschera W). Una curva polinomiale cubica viene interpolata su questi 3 punti, e viene estesa per 50 pixel lateralmente, sia a destra che a sinistra rispetto agli oggetti principali.

Se un oggetto candidato non principale cade a meno di 15 pixel verticali di distanza da questi prolungamenti della curva, allora viene aggiunto al cluster degli oggetti principali inferiori. Nella figura 5.31 si notano l'oggetto principale iniziale (verde) e due oggetti candidati, uno per lato, riselezionati (gialli); rimane un ulteriore oggetto candidato (bianco) che non viene reinserito. Il bordo dei candidati riselezionati viene copiato dalla maschera D nella maschera W.

Siccome in questo step il numero di oggetti principali può aumentare, il cluster dei candidati viene nuovamente sottoposto alla funzione *overlap cleaner*, in modo da escludere nuovamente candidati non idonei ad essere ammessi tra i futuri principali.

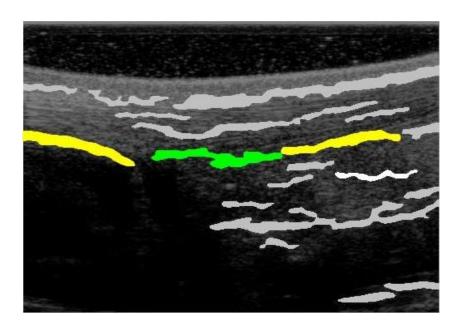


Fig 5.31

Il secondo criterio vale per oggetti candidati sia vicini che lontani dagli oggetti principali inferiori.

Per ogni oggetto ancora presente nel cluster dei candidati e non in quello dei principali inferiori, vengono considerati gli estremi del gap (estremo destro del candidato ed estremo sinistro dei principali, se il candidato cade a sinistra dei principali e viceversa).

Se la distanza orizzontale tra questi due estremi è minore di 50 pixel (oggetti vicini tra loro) e lo scarto tra le distanze verticali di questi due estremi con il profilo superiore del tendine è minore di 30 pixel allora l'oggetto viene aggiunto al cluster dei principali.

Se invece gli oggetti sono lontani tra loro, ovvero se la distanza orizzontale tra questi due estremi è compresa tra 50 e 200 pixel, l'oggetto viene aggiunto al cluster dei principali se lo scarto tra le distanze verticali di questi due estremi con il profilo superiore del tendine è minore di 60 pixel. I bordi degli oggetti aggiunti vengono copiati dalla maschera D nella maschera W.

Nella figura 5.22 si può notare come il candidato vincitore (verde), trovi e selezioni, seguendo i criteri descritti sopra, uno degli oggetti candidati rimanenti (giallo).

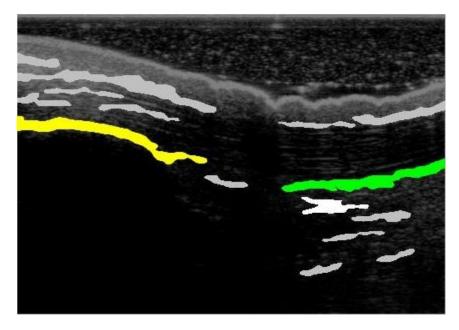


Fig 5.32

5.4.4 Oggetti inferiori secondari

Definiti una volta per tutte quali tra gli oggetti candidati corrispondono ad oggetti rappresentativi del profilo inferiore del tendine, si passa all'analisi di oggetti non ancora considerati.

In questo punto del codice, interviene un criterio ideato ad hoc per una sola delle 56 immagini, in cui, due oggetti riconosciuti precedentemente come principali sono separati da un numero consistente di colonne, in cui cade un oggetto considerevolmente grande, ancora mai considerato, che appartiene evidentemente al profilo inferiore del tendine.

Uno dei due oggetti principali, inoltre, condivide delle colonne con questo oggetto, e si può notare nelle immagini sottostanti come in queste colonne l'oggetto da mantenere non sia il principale, bensì il nuovo oggetto trovato. La sezione di codice relativa a questa immagine deve quindi contenere un criterio per identificare il nuovo oggetto come principale e poi un criterio che gestisca in modo logico le sovrapposizioni per colonna di questo oggetto con gli oggetti principali da cui parte la ricerca.

Gli oggetti principali vengono accoppiati tra loro in modo consecutivo, da destra a sinistra. Per ogni coppia, se il gap tra i due oggetti è maggiore di 100 colonne, tra gli estremi interni dei due oggetti viene interpolato un segmento lineare di congiunzione.

Se un oggetto cade nella zona contenuta fino a 28 righe al di sotto di questo segmento, allora esso viene analizzato: se la sua area è maggiore di entrambe le aree dei due oggetti principali inferiori che costituiscono la coppia di ricerca e se l'ascissa del centroide cade nel gap tra i due oggetti principali, allora l'oggetto in questione viene aggiunto al cluster degli oggetti che costituiscono il profilo inferiore del tendine.

Nella figura 5.33, (immagine di sinistra), si notano i due oggetti vincitori in verde; in blu è rappresentata la roi di ricerca tra questi due oggetti vincitori, che va a selezionare un ulteriore oggetto (giallo), prima mai considerato.

A questo punto, come precedentemente annunciato, occorre gestire la condivisione delle colonne tra questi tre oggetti. Prendendo ad esempio la situazione destritta dall'immagine sottostante, si agisce nel modo seguente: dall'estremo destro dell'oggetto a sinistra della sovrapposizione si prolunga un segmento orizzontale di lunghezza pari a 20 colonne verso destra. Poi si calcola la distanza verticale media tra questo segmento orizzontale e il pezzo di bordo superiore dell'oggetto di sinistra, che è sovrapposto al segmento.

Si fa la stessa cosa, speculare, a partire dall'estremo sinistro dell'oggetto a destra: si prolunga un segmento orizzontale a sinistra e si calcola la distanza media tra questo e il pezzo di bordo sovrapposto. Poi si confrontano le due distanze medie: l'oggetto il cui prolungamento ha distanza media più bassa dal bordo corrispondente viene mantenuto integro, mentre il bordo superiore (maschera *W*) dell'altro oggetto viene ridimensionato fino ad annullare totalmente la sovrapposizione tra i due oggetti.

Nella figura 5.33 (immagine di destra) si possono notare i bordi dei tre oggetti vincitori, in verde sono rappresentati i bordi finali: il bordo del terzo oggetto (in parte bianco) è stato ridimensionato al fine di evitare sovrapposizioni con i bordi del secondo oggetto.

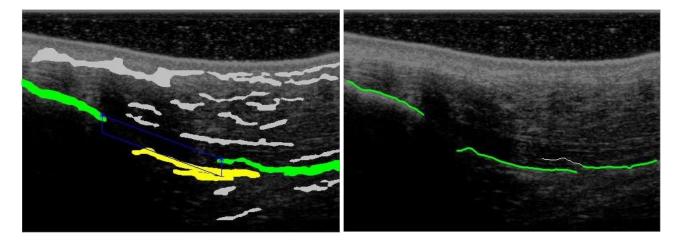


Fig 5.33

A questo punto viene effettuata una classificazione dell'immagine, in base alla percentuale di profilo superiore già identificata.

Se la porzione di profilo già identificata (maschera *W*) cade in più del 37% delle colonne dell'immagine, allora si procede con la ricerca di oggetti laterali appartenenti al profilo inferiore. La ricerca di questi oggetti è iterativa, e si compone di quattro sezioni diverse per ogni iterazione, nella quale al massimo viene trovato un nuovo oggetto; supponiamo che la ricerca avvenga a sinistra degli oggetti principali (la ricerca sul lato destro avviene specularmente nello stesso modo):

- 1. Se l'estremo sinistro degli oggetti principali dista più di 50 colonne dal bordo dell' immagine, allora vengono ricercati gli oggetti appartenenti ad una roi rettangolare che si spinge 40 colonne a sinistra dell'estremo, 10 righe al di sopra dell'estremo e 8 righe al di sotto. Viene selezionato solo l'ultimo oggetto trovato in questa zona (quello più spostato a sinistra). Se tale oggetto non si sovrappone con i pricipali viene etichettato come di tipo 0, se si sovrappone leggermente (meno di 10 colonne), viene chiamato di tipo 1.
- 2. Gli oggetti trovati allo step precedente, se non si sovrappongono ai principali (tipo 0), potrebbero non essere corretti (valutazione empirica): viene calcolato l'estremo sinistro dagli oggetti di tipo 0 trovati precedentemente. Se tale estremo si trova tra le 50 e le 100 colonne dal bordo dell'immagine, da questo estremo viene esteso verso il basso un segmento verticale lungo 20 righe: se questo segmento interseca un oggetto la cui area è maggiore di quella dell'oggetto di tipo 0, cui appartiene l'estremo, il nuovo oggetto sostituisce l'oggetto di tipo 0 trovato allo step precedente.
- 3. Se allo step n. 1 non vengono trovati oggetti, viene tentata una nuova ricerca variando i parametri: la ricerca viene eseguita se la distanza dell'estremo degli oggetti principali dal bordo è almeno pari a 25 pixel, la roi rettangolare di ricerca si estende per un massimo di 40 righe, e si estende di 20 righe al di sopra e 5 righe al di sotto dell'estremo di ricerca. Viene selezionato al massimo un oggetto, che si deve sovrapporre al massimo di 10 colonne con gli oggetti principali e che abbia un coefficiente angolare di orientamento maggiore di 0,11 (per gli oggetti laterali di destra questo orientamento dovrà essere minore di -0,11).
- 4. L'oggetto laterale così trovato ad ogni iterazione vengono aggiunti agli oggetti principali inferiori, e il loro bordo superiore viene aggiunto alla maschera W. Se l'oggetto è di tipo 1, ovvero se comporta sovrapposizioni, le colonne interessate dalla sovrapposizione e quelle vicine ad esse vengono annerite completamente nella maschera W.

Se viene trovato un oggetto laterale, si effettua una nuova ricerca tornando al punto 1. Quando non vengono più trovati oggetti, il ciclo si arresta.

Nella figura 5.34 si possono notare l'oggetto vincitore di base (verde) e i due oggetti piccoli laterali (gialli), aggiunti seguendo la procedura appena descritta.

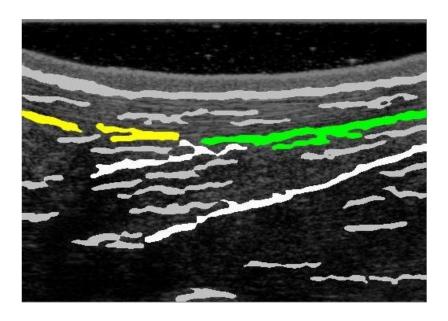


Fig 5.34

Tornando un passo indietro, prima di questo step appena descritto in cui vengono ricercati gli oggetti laterali, se la porzione di profilo già identificata (maschera W) cade in meno del 37% delle colonne dell'immagine, allora la procedura descritta sopra non viene effettuata e si procede con la ricerca degli altri oggetti del profilo inferiore. Tale casistica si presenta raramente (compare in sole 3 immagini delle 56 di base), ma risulta essere di gestione complessa.

La ricerca è di tipo iterativo, e comprende fino ad un massimo di 5 iterazioni, ovvero possono essere selezionati un massimo di 5 oggetti laterali. Per ogni iterazione, se viene trovato un oggetto, esso viene aggiunto al cluster dei principali, e il suo estremo (sinistro nel caso si stia effettuando la ricerca a sinistra e viceversa) sarà il punto in cui verrà sistemata la roi di ricerca (rettangolare) per l'iterazione successiva. Se questo estremo dista meno di 40 colonne dal bordo dell'immagine, il ciclo di ricerca viene arrestato. Stessa cosa succede se all'iterazione corrente non vengono trovati nuovi oggetti.

Per le prime 3 iterazioni, si ricercano oggetti tramite roi che si estendono dall'estremo di 20 colonne, di 5 righe verso l'alto e di 15 righe verso il basso. Se non vengono trovati nuovi oggetti, la ricerca viene forzata ampliando la zona di ricerca di 15 ulteriori colonne e di 35 ulteriori righe verso il basso.

Per le ultime 2 iterazioni, la zona di ricerca si estende lateralmente per 75 colonne e verso l'alto di 25 righe.

Nelle immagini esposte a sinistra in figura 5.35, sono rappresentati in verde gli oggetti principali, in giallo gli oggetti selezionati con questa procedura, in blu le roi (notare la variazione dopo il 3 oggetto rilevato, e l'ampliamento nel caso all'n-esima ricerca non abbia raggiunto un risultato), in rosso i profili superiori degli oggetti ricavati.

Trovati gli oggetti laterali, i loro bordi superiori vengono inseriti nella maschera W, ma occorre effettuare modifiche morfologiche di rilievo in modo da evitare sovrapposizioni e da rendere i vari bordi più conformi possibile all'andamento del profilo inferiore del tendine, effettuando un operazione di ricerca dei punti di concavità degli oggetti ed andando ad eliminare i pezzi di bordo laterali a questi punti di concavità che presentano orientamento non conforme a quello previsto dal generico profilo del tendine.

Nelle immagini posizionate sulla destra in figura 5.35, si possono notare i vari pezzi di profilo superiore trovati: in bianco vi è il profilo semplice, in verde il profilo morfologicamente modificato in questo ultimo passaggio.

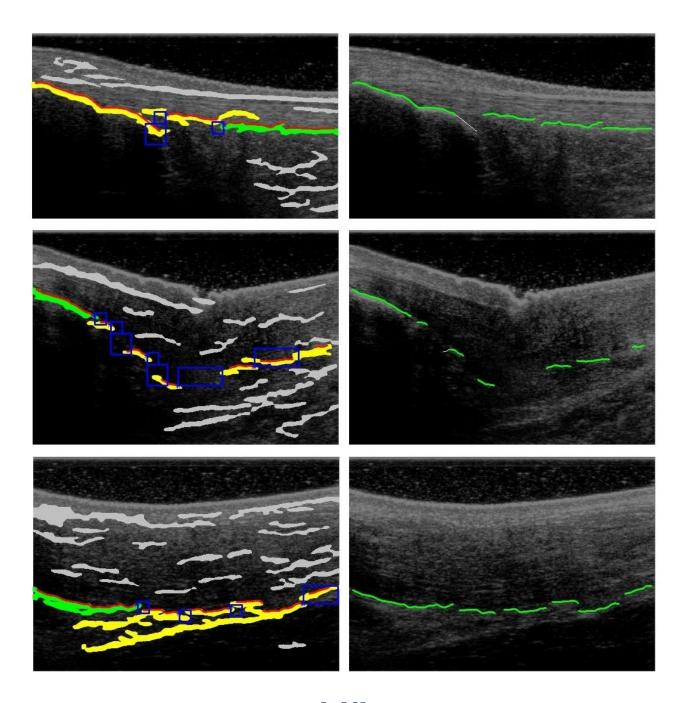


FIG 5.35

5.4.5 Elaborazione dei frammenti di bordo

In questa sezione del codice intervengono dei criteri che permettono di rimediare ad alcuni errori morfologici svolti dal codice stesso, in particolare dalla funzione *bordo*, che, tramite la funzione *edgecleaner*, può a volte andare ad eliminare totalmente pezzi di bordo estrapolati dagli oggetti (a titolo d'esempio, vedere, nella figura 5.35, nelle due immagini a metà altezza, come il bordo dell'oggetto più a destra viene drasticamente ridotto).

Alcuni di questi pezzi di bordo, in particolare quelli laterali, devono essere reinseriti, al fine di ottimizzare la segmentazione del profilo del tendine.

Il procedimento si applica, come al solito, sia sul lato sinistro che sul lato destro (in modo speculare) dei pezzi di profilo già segmentati (oggetti principali inferiori). Per il lato sinistro, vengono calcolati sia l'estremo sinistro dell'oggetto principale inferiore estratto dalla maschera MAT, che chiamaremo SX (oggetto 'pieno', 2D), sia lo stesso estremo estratto dalla maschera W (si tratta di un bordo, di un oggetto 1D). Se la differenza tra le due coordinate colonna di questi estremi è maggiore di 50, allora presumibilmente un frammento di bordo non trascurabile è stato eliminato dalla funzione edgecleaner. Viene considerata soltanto la parte della matrice MAT compresa a sinistra dell'estremo SX, viene estrapolato il bordo superiore dell'oggetto principale che cade in questa zona e viene aggiunto alla maschera W.

Nella figura 5.36 si possono notare i frammenti di bordo già esistenti (blu) e il nuovo frammento di bordo inserito (verde), appartenente allo stesso oggetto a cui appartiene anche un frammento blu.

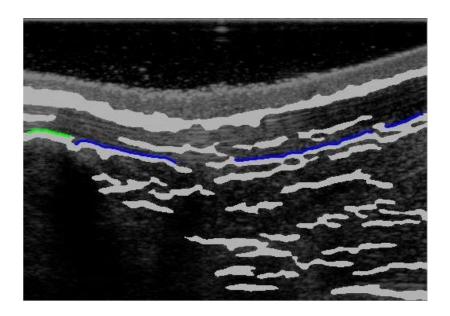


Fig 5.36

Possono esserci oggetti che sarebbero corretti, se non fossero stati ignorati in quanto sganciati da altri oggetti principali con i quali sono sovrapposti (condividono con essi in parte o completamente le colonne su cui cadono).

Tali oggetti andrebbero reinseriti, e la parte di oggetto principale ad essi sovrapposti dovrebbe essere eliminata, contrariamente a quanto avviene nella gran maggioranza degli step precedenti del codice.

Si crea perciò una maschera globale MAT temporanea. Su di essa viene effettuata una chiusura con un disco di raggio pari ad 1 pixel. Ovviamente, se uno o più oggetti sono stati uniti insieme dalla chiusura, la maschera temporanea avrà oggetti etichettati diversamente da quella originale. Perciò si vanno a cercare gli oggetti nella maschera temporanea che cadono nelle stesse posizioni di quelli principali nella maschera originale. Una volta accoppiati gli oggetti, si confrontano tra loro: se un oggetto principale della nuova maschera presenta un'area maggiore di almeno 300 pixel rispetto allo stesso oggetti principale della maschera originale, allora l'oggetto nella maschera originale MAT viene sostituito dall'oggetto più grande identificato nella maschera temporanea, e ne viene ricalcolato il bordo superiore.

Nella figura 5.37 sono rappresentati gli oggetti precendenti del bordo inferiore (verde), in giallo è rappresentato l'oggetto inserito dopo che questo procedimento è stato applicato, in blu vengono rappresentati i frammenti di profilo inferiore aggiornati.

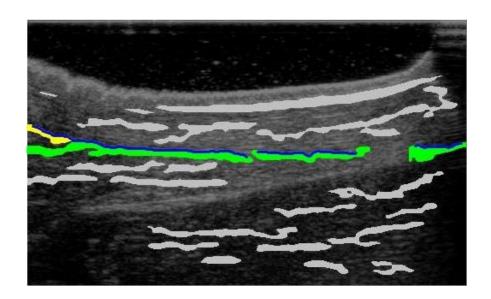


Fig 5.37

A questo punto, il codice di segmentazione è quasi terminato. Restano da eliminare alcuni frammenti di profilo, contenuti nelle maschere W, che si trovano in posizioni evidentemente sfasate rispetto agli alti e al profilo del tendine. Ai fini di ottimizzare l'andamento del profilo essi vanno eliminati.

Per ogni oggetto (frammento di bordo), vengono considerati il vicino di sinistra e quello di destra.

Devono valere le seguenti condizioni:

- La distanza tra i vicini di destra e sinistra è maggiore di 100 colonne
- L'oggetto in esame ha un'estensione pari ad almeno il 70% di questa distanza
- I coefficienti angolari dei segmenti che virtualmente collegano l'oggetto con i suoi due vicini misurano più di 45° in valore assoluto
- La distanza verticale tra gli estremi dell'oggetto e quelli dei suoi vicini, per ciascun lato è maggiore di 10 righe.

Se tutte le condizioni sono valide allora l'oggetto in questione viene eliminato.

Nella figura 5.38 i pezzi di profilo mantenuti sono rappresentati in verde; in bianco (sottile) è rappresentato il frammento di bordo eliminato in quanto palesemente scostato dal resto del profilo.

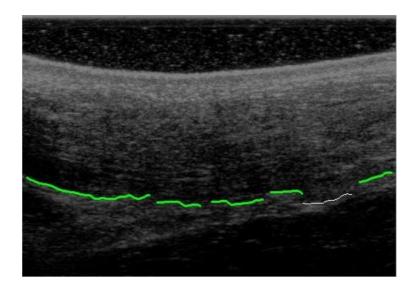


Fig 5.38

5.4.6 Costruzione del profilo inferiore del tendine

Da questo punto in poi, si agisce esattamente come si è fatto per il calcolo finale del profilo superiore del tendine. Il profilo inferiore del tendine viene ricostruito a partire dai frammenti di bordo che rimangono (contenuti nella maschera *W*). Dopo una procedura morfologica volta a rifinire i vari estremi dei frammenti di bordo, identica a quella vista per il profilo superiore, si procede con la costruzione del profilo inferiore, utilizzando nuovamente la funzione esterna *interpolazione* frammenti.

I vari frammenti vengono uniti a due a due e i due frammenti più esterni vengono uniti con i bordi dell'immagine. Il procedimento fa riferimento a interpolazioni polinomiali di terzo grado (cubiche), e anche ad un profilo direttore esterno, che in questo caso coincide non con il profilo della cute, ma con il profilo superiore del tendine (fig 5.39, immagine a sinistra).

Il profilo ottenuto viene smussato da lla convoluzione con un kernel gaussiano di ordine 0 (figura 5.39, immagine a destra).

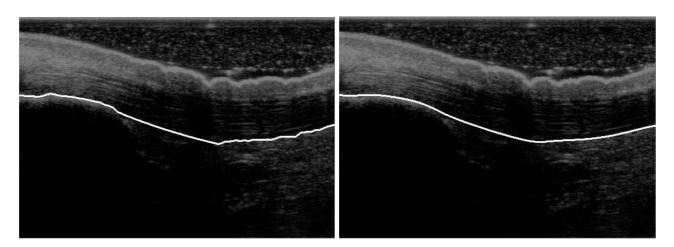


Fig 5.39

Segmentato anche il profilo inferiore del tendine, la segmentazione del tendine in proiezione longitudinale, valida sia per tendini sani che post operati, a partire da immagini ecografiche B-mode, è definitivamente conclusa (in figura 5.40 viene rappresentata la segmentazione di un tendine sano; in figura 5.41 la segmentazione di un tendine affetto).

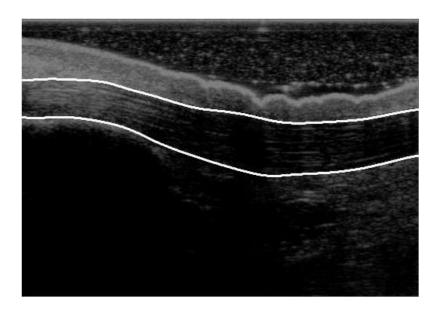


Fig 5.40

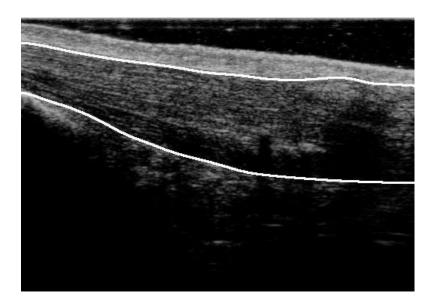


Fig 5.41

Le 56 immagini segmentate sono riportate nell'appendice B.

5.5 Calcolo automatico dello spessore del tendine

Una volta che i bordi del tendine sono stati definitivamente segmentati, si può procedere al calcolo dello dello spessore del tendine. Innanzitutto è doveroso stabilire una corrispondenza tra l'unità di misura utilizzata fin'ora, ovvero il pixel, e un unità di misura reale quali i centimetri.

Tale spessore si può calcolare facilmente andando ad analizzare le immagini prima che sia effettuato il *cropping*, ovvero dall'immagine che presenta il formato della figura 4.1. In essa, è possibile osservando la scala, espressa in cm, della profondità dell'immagine.

Procedendo con la misurazione, si ottiene che per ogni centimetro la distanza corrispondente è pari a 203 pixel, valore costante per tutte le immagini.

Occorre poi ricordare che nei primi step del codice di segmentazione automatica, l'immagine è stata sottocampionata tramite un fattore 2: le colonne sono state dimezzate, e così le righe. Nella pratica, è come se il lato di ogni pixel sia stato raddoppiato. Occorre perciò dimezzare anche la misura in pixel riportata precedentemente.

In definitiva, il fattore di conversione, nelle immagini ottenute in uscita dal codice di segmentazione automatica, vale: 1 mm = 10.15 pixel.

A questo punto è possibile effettuare una misurazione dello spessore del tendine. In prima approssimazione si potrebbe pensare di considerare la media di tutte le differenze, valutate acissa per ascissa, tra l'ordinata del profilo superiore e l'ordinata corrispondente del profilo inferiore. Il tendine in proiezione longitudinale, però, presenta una forma che, sebbene sia orientata prevalentemente in direzione orizzontale, presenta spesso una forma arcuata e concava. Il procedimento per il calcolo dello spessore del tendine quindi si complica.

Vengono presi in considerazione tutti i pixel del profilo superiore, tralasciando quelli che distano meno di 20 pixel dal bordo dell'immagine e quelli che presentano una distanza verticale dal profilo inferiore inferiore a 20 colonne (questo può accadere nella zona sinistra delle immagini che rappresentano la porzione distale del tendine, in cui l'inserzione del tendine sul calcagno è parte del domino dell'immagine). Per ogni pixel del profilo superiore viene calcolata la distanza euclidea da tutti i pixel del profilo inferiore: la minima tra queste distanze è lo spessore del tendine relativo al pixel considerato sul profilo superiore (fig 4.42).

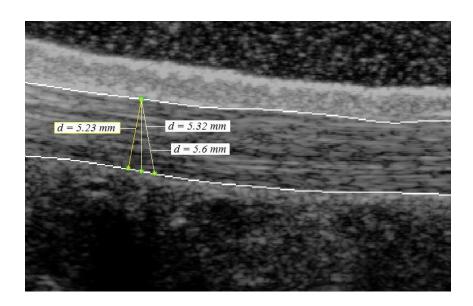


FIG 5.42

L'operazione viene eseguita, allo stesso modo, per il profilo inferiore.

Per calcolare lo spessore globale del tendine viene effettuata un operazione di media su tutte le misure ottenute in questo modo, considerando sia quelle valutate dal profilo superiore a quello inferiore, sia quelle valutate dal profilo inferiore a quello superiore.

I risultati sono riportati nella tabella 4.1, e sono espressi in mm. Le deviazioni standard associate riguardano le variazioni dello spessore del tendine all'interno di una singola immagine.

TENDON	C1	C2	P1	P2	P3	P4	P5
L1	$5,36 \pm 0,31$	$5,96 \pm 0,58$	$3,38 \pm 1,02$	$4,79 \pm 0,75$	$5,56 \pm 0,91$	$4,81 \pm 0,50$	$4,49 \pm 0,36$
L2	$5,29 \pm 0,72$	$4,\!25\pm0,\!31$	$5,14 \pm 1,01$	$4,71\pm0,\!43$	$5,\!36\pm0,\!37$	$4,\!66\pm0,\!56$	$4{,}13\pm0{,}71$
L3	$5,55 \pm 0,46$	$4,\!52\pm0,\!45$	$3,47 \pm 1,00$	$5,44 \pm 0,33$	$5,67 \pm 0,38$	$5,09 \pm 1,46$	$4,59 \pm 0,59$
L4	$5,37 \pm 0,24$	$4,\!41\pm0,\!57$	$4,77 \pm 0,56$	$5,\!34\pm0,\!60$	$4,\!85\pm0,\!13$	$4,\!39 \pm 0,\!49$	$4,\!06\pm0,\!39$
L5	$5,86 \pm 0,76$	$4,28 \pm 0,75$	$8,47 \pm 2,40$	$9,35 \pm 2,22$	$10,65 \pm 3,57$	$7,50 \pm 0,30$	$8,65 \pm 2,24$
L6	$5,29 \pm 0,50$	$4,73\pm0,\!42$	$9,04 \pm 1,46$	$10,66 \pm 1,44$	$13,\!82\pm0,\!43$	$10,\!41\pm0,\!77$	$10,\!96\pm0,\!94$
L7	$5,62 \pm 0,53$	$4,95 \pm 0,22$	$9,57 \pm 2,07$	$10,68 \pm 2,18$	$8,07 \pm 1,94$	$9,06 \pm 1,66$	$8,51 \pm 2,60$
L8	$5,77 \pm 0,25$	$4,\!87\pm0,\!14$	$7,52 \pm 0,98$	$11,95\pm0,51$	$12,\!44\pm0,\!99$	$10{,}73\pm0{,}70$	$9,\!59\pm1,\!50$

TAB 5.1

Nella tabella, le colonne riportano tutti soggetti (C1 e C2 sono i soggetti di controllo, e presentano entrambi i tendini sani; P1, P2, P3, P4, P5 sono i pazienti, in cui un tendine è sano e uno è post chirurgico); le righe riportano il tendine (da L1 a L4 gli spessori sono relativi al tendine sano, o sinistro nel caso dei due soggetti di controllo; da L5 a L8 sono riportati gli spessori dei tendini post chirurgico) e le 4 immagini acquisite da ciascun tendine (L1 ed L5 fanno riferimento a tendini rilassati acquisiti in posizione distale; L2 ed L6 a tendini rilassati acquisiti in posizione mediale; L3 ed L7 a tendini tesi acquisiti in posizione distale, L4 ed L8 a tendini tesi acquisiti nella loro porzione mediale).

Le misure medie dello spessore del tendine sono, discernendo tra tendini sani e tendini affetti (post chirurgici):

Health Tendon Thickness = 4.91 ± 0.26 mm

Post Surgical Tendon Thickness = 9.88 ± 0.64 mm

Risulta piuttosto marcata, come previsto, la differenza di spessore tra i tendini sani e i tendini post chirurgici: tre il minimo spessore dei tendini post chirurgici e il massimo spessore dei tendini sani c'è una differenza pari a 1,55 mm. Fissando un valore soglia appartenente a questo intervallo, ad esempio, pari a 6,73 mm, risulta immediata la classificazione del tendine tra stato fisiopatologico 'sano' e stato fisiopatologico 'post chirurgico'.

6. SEGMENTAZIONE AUTOMATICA DEL TENDINE: TENDINI SANI

Il codice di segmentazione automatica discusso nel capitolo precendente (capitolo 5), lavora su 56 immagini, 36 delle quali si riferiscono a tendini presumibilmente sani, che non hanno mai subito né traumi né interventi chirurgici, mentre le restanti 20 si riferiscono a tendini affetti (lacerazione del tendine seguita da intervento chirurgico, avvenuto all'incirca un anno prima dell'acquisizione delle immagini).

I tendini affetti, come viene fatto notare, sono molto più spessi e ingrossati dei loro colleghi sani. Si nota ad occhio nudo, analizzando le ecografie, che le fibre che li compongono sono più distaccate tra loro, segno di infiltrazione di liquidi tra le stesse. Nei tendini sani, le fibre sono ben organizzate e orientate parallelamente tra loro, in quelli operati spesso questa organizzazione strutturale viene meno, mostrando una distribuzione più disordinata. In alcune immagini relative e tendini operati si possono notare tracce dei mezzi chirurgici di sutura.

Il diverso spessore tra i tendini sani e i tendini affetti ha reso estremamente complessa la segmentazione del profilo inferiore dei tendini, in quanto i criteri di posizione per la ricerca del primo oggetto appartenente a tale profilo includono una zona molto vasta dell'immagine. Tale complessità potrebbe influire negativamente sull'affidabilità della segmentazione.

E stato perciò implementato un codice di segmentazione semplificato, che ha validità soltanto per i tendini sani. In tal modo, esso risulta essere molto più robusto del codice di segmentazione valido per ciascun tipo di tendine.

Per quanto riguarda la segmentazione del profilo superiore, il procedimento è praticamente uguale a quello visto nella parte 1 di questo capitolo: non ci sono differenze notevoli tra immagini rappresentanti i tendini sani o quelle rappresentanti i tendini affetti. Le cose cambiano decisamente quando il profilo superiore è stato segmentato e si passa alla segmentazione di quello inferiore.

6.1 Segmentazione del profilo inferiore

6.1.1 Identificazione degli oggetti candidati iniziali

Si vogliono inizialmente selezionare gli oggetti candidati corretti tra i quali selezionare poi un solo oggetto principale del profilo inferiore, al contrario di quanto visto nel capitolo precedente, in cui gli oggetti principali del profilo inferiore variano tra uno e tre.

Vengono selezionati tutti gli oggetti che cadono in una zona di ricerca estesa dal bordo sinistro a quello destro i cui bordi superiore ed inferiore distano verticalmente, colonna per colonna, rispettivamente 50 e 70 pixel dal profilo superiore. Di questi, vengono confermati tutti gli oggetti i cui centroidi distano verticalmente dal profilo superiore non meno di 40 pixel e non più di 80 pixel. Le due zone di ricerca così generate hanno uno spessore di soli 20 e 40 pixel, contro gli 80 e 105 del codice di segmentazione descritto nella parte 1 di questo capitolo.

Gli oggetti selezionati entrano a far parte dell'insieme dei candidati iniziali.

Nella figura 6.1, è evidenziato il blu il profilo superiore del tendine, in verde la roi all'interno della quale deve cadere almeno un pixel degli oggetti da selezionare (righe spesse) e la roi (righe sottili) all'interno della quale devono cadere i centroidi (asterischi blu) degli oggetti selezionati; gli oggetti selezionati da queste due roi sono evidenziati in bianco.

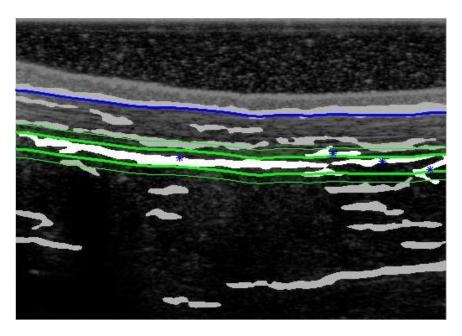


Fig 6.1

Tra gli oggetti selezionati in questo modo vengono mantenuti solo i due oggetti più grandi (contro ai 4 del codice precedente). Se il loro rapporto di area è sufficientemente grande (maggiore di 0.29), entrambi gli oggetti vengono considerati candidati, altrimenti solo il più grande dei due viene considerato.

6.1.2 Oggetto principale del bordo inferiore

Una volta individuati gli oggetti candidati, deve essere scelto tra i due l'oggetto principale del profilo inferiore. Vengono estrapolati i bordi superiori di tali oggetti. Se è presente un solo oggetto candidato, allora esso coinciderà con l'oggetto principale cercato, altrimenti tale ruolo è destinato all'oggetto che presenta il frammento di bordo superiore più lungo (si ricorda che l'estrapolazione del bordo di un oggetto può generare più di un solo pezzo, a seconda della complessità della forma dell'oggetto stesso). Viene così selezionato l'oggetto principale superiore.

Si può notare qui l'enorme semplificazione svolta rispetto al codice descritto nella prima parte di questo capitolo, in cui i criteri per la scelta degli oggetti principali erano numerosi e alcuni di essi erano abbastanza complessi.

Nella figura 6.2 viene evidenziato l'oggetto principale in verde, mentre in bianco è rappresentato l'oggetto candidato escluso dal criterio precedente.

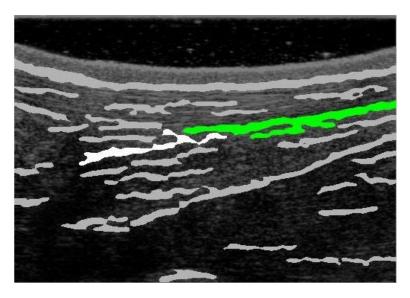


FIG 6.2

6.1.3 Ripescaggio del candidato escluso

A questo punto, si vuole valutare se l'oggetto candidato escluso debba essere riselezionato e considerato parte identificativa del profilo inferiore del tendine.

Viene costruita una roi che si estende dagli estremi dell'oggetto vincitore fino ai bordi sinistro e destro dell'immagine. Tale roi è spessa verticalmente solo 10 righe in prossimità (50 colonne) degli estremi dell'oggetto principale e raddoppia il suo spessore se la zona analizzata è distante da tali estremi. Essa segue l'andamento del profilo superiore del tendine. Se il candidato escluso precedentemente cade in questa roi, allora esso viene aggiunto all'insieme degli oggetti vincitori.

Nella figura 4.49 è evidenziato in verde l'oggetto principale, in blu i suoi estremi, in bianco l'oggetto candidato, mentre le righe verdi sottili indicano la roi di ricerca: in questo caso il candidato viene riselezionato.

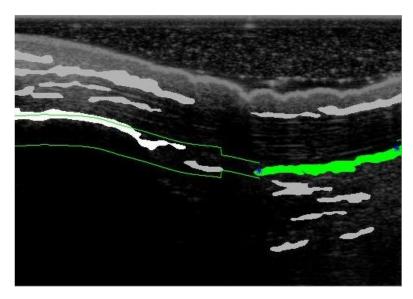


Fig 6.3

6.1.4 Oggetti secondari

Una volta analizzati tutti i candidati, si passa alla ricerca di ulteriori oggetti che, pur essendo meno prominenti, identificano anch'essi il profilo inferiore del tendine.

Per prima cosa vengono cercati gli oggetti secondari centrali: se gli oggetti vincitori sono due e se la distanza tra di loro è compresa tra le 80 e le 155 colonne, viene interpolato un segmento lineare che congiunge tra di loro i due oggetti: viene analizzata la zona che cade fino a tre pixel al di sotto di questo segmento. Se in questa zona viene trovato un oggetto di area non trascurabile, tale oggetto viene aggiunto al cluster degli oggetti vincitori.

In figura 6.4 sono rappresentati in verde i due oggetti vincitori, in blu i loro estremi e il segmento congiungente, in bianco l'oggetto selezionato dal segmento.

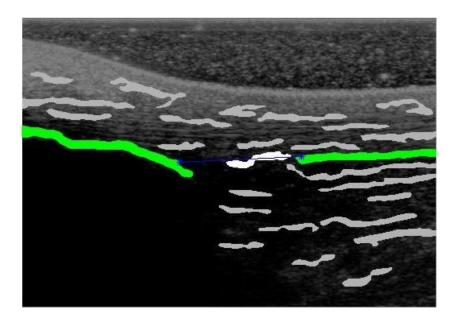


Fig 6.4

A questo punto si passa alla ricerca di oggetti secondari che cadono lateralmente rispetto agli oggetti principali. La ricerca viene effettuata solo se tra l'estremo dell'oggetto principale e il bordo dell'immagine intercorrono più di 50 colonne. La ricerca è reiterata (se un oggetto viene aggiunto, ad esempio a destra, verrà effettuata un'altra indagine utilizzando come estremo di partenza l'estremo, destro nell'esempio, dell'oggetto aggiunto) fino a quando non vengono selezionati oggetti o si raggiunge questo limite.

A partire dagli estremi degli oggetti principali vengono estese verso i bordi delle immagini due roi, di lunghezza pari a 40 colonne, il cui andamento segue quello del profilo superiore. La roi si protende in alto per 8 pixel e in basso per 15. Se un oggetto che non è mai stato un candidato cade all'interno di questa roi e se la sua sovrapposizione con il principale è limitata in relazione all'estensione orizzontale di tale oggetto, allora esso viene selezionato.

In figura 6.5 viene rappresentato questo step iterativo: in verde è rappresentato l'oggetto principale, in bianco i due oggetti identificati e inseriti iterativamente, in blu le roi di ricerca.

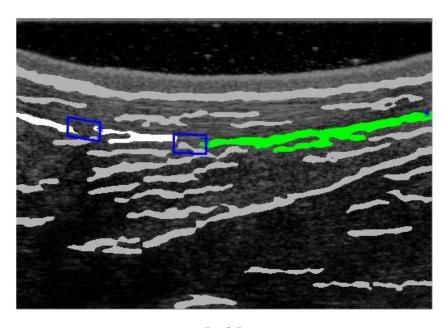


FIG 6.5

Se gli oggetti selezionati all'interno di una stessa roi sono più di uno, viene effettuata una scelta, applicando in ordine alcuni criteri per decidere quale di essi debba essere selezionato:

- Se uno degli oggetti presenta un orientamento troppo inclinato rispetto alla direzione orizzontale, allora viene escluso.
- Se gli oggetti sono ancora più di uno, viene effettuata una ricerca utilizzando una roi più contenuta, rettangolare, estesa lateralmente venti colonne e di cinque righe sia sopra che sotto l'estremo che la genera: se un solo oggetto è presente all'interno di tale roi, allora esso viene selezionato e aggiunto ai vincitori.
- Se gli oggetti sono ancora più di uno (cioè se i criteri precedenti non hanno funzionato), allora viene selezionato e aggiunto quello che presenta l'area più grande.

6.1.5 Elaborazione morfologica dei bordi

A questo punto sono stati inseriti tutti gli oggetti e di essi ne vengono estrapolati i bordi. Se i bordi di più oggetti si sovrappongono, ovvero se due bordi hanno pixel che condividono la stessa colonna (l'estremo destro del pezzo di bordo a sinistra cade a sinistra dell'estremo sinistro del pezzo di bordo a destra), tale sovrapposizione va corretta. Inoltre il profilo del tendine dovrebbe seguire un andamento approssimativamente orizzontale, perciò se il segmento che unisce due pezzi di bordo presenta un coefficiente angolare troppo discorde (più di 5 in valore assoluto) da questa direzione, i bordi vanno elaborati morfologicamente in modo da correggere tale discrepanza. Per fare queste due cose è stata ideata la funzione *cleanoverlap*.

Nel caso di sovrapposizione, la sovrapppozione viene virtualmente incrementata andando ad estendere i due oggetti orizzontalmente per una ventina di colonne: in queste zone viene calcolata l'area compresa verticalmente tra questa estrusione orizzontale e il bordo dell'altro oggetto. Il pezzo di bordo la cui estrusione presenta la minima area è quello da mantenere intatto, l'altro pezzo viene invece eroso fino ad eliminare la sovrapposizione ed anche oltre, di una 15 di colonne, in modo da eliminare eventuali segmenti congiungenti con elevato coefficiente angolare.

Nel caso di segmento congiungente troppo inclinato rispetto all'orizzontale, il procedimento è simile. Vengono innanzitutto virtualmente estrusi i due estremi in orizzontale, nel momento in cui l'estrusione di un pezzo inizia a sovrapporsi all'altro pezzo, vengono calcolate tutte le distanze (fino a un massimo di 50) verticali tra questi elementi, colonna per colonna. L'oggetto la cui estrusione presenta la distanza minima è quello da mantenere integro: l'altro oggetto viene invece eroso fino al punto in cui è stata individuata la distanza minima dall'estrusione del primo oggetto.

Nella figura 6.6 vengono mostrati in bianco i pezzi di bordo precedenti all'uso di *cleanoverlap* e in verde i pezzi di bordo mantenuti dopo l'applicazione della funzione: in essa sono presenti quattro frammenti di bordo, e la funzione agisce su tutte e tre le interfacce tra questi pezzi, nella prima e nella terza interfaccia per correggere l'inclinazione del segmento congiungente, nella seconda per correggere la notevole sovrapposizione.

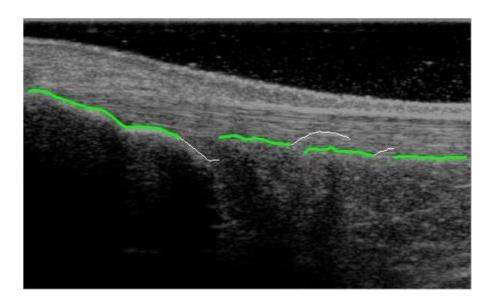


Fig 6.6

6.1.6 Costruzione del profilo inferiore del tendine

Arrivati a questo punto, il codice torna a seguire fedelmente le sottosezioni 5.4.5 e 5.4.6 descritti nel capitolo precedente. Fa eccezione un singolo step, che risulta inutile per questo specifico caso (tandini sani), in quanto utile soltanto per una specifica immagine rappresentante un tendine operato. Potrebbe essere comunque inserito per completezza, non è assolutamente escluso che la casistica in questione possa presentarsi anche per immagini relative a tendini sani.

Per ogni immagine, gli oggetti identificati da questo nuovo codice come appartenenti al profilo inferiore sono esattamente gli stessi identificati dal vecchio codice, perciò i risultati finali della segmentazione non cabiano. Fa eccezione una singola immagine, in cui uno degli oggetti prima considerati non viene più identificato dal nuovo codice. Questo avviene a causa della variazione dei criteri di selezione dei primi oggetti vincitori. Le segmentazioni di questa immagine sono riportate in figura 6.7, in cui la segmentazione è effettuata dal codice descritto nella prima parte di questo capitolo, e in figura 6.8, in cui la segmentazione è effettuata da questo nuovo codice relativo a soli tendini sani (la zona incriminata si trova a destra nell'immagine).

Ad occhio, sembra che la segmentazione effettuata da questo secondo codice sia più corretta, ma mentre essa, nella regione in cui si discosta dal risultato emesso dal primo codice, è costruita matematicamente, quella calcolata tramite il primo di questi due codici è estratta dalla maschera di segmentazione.

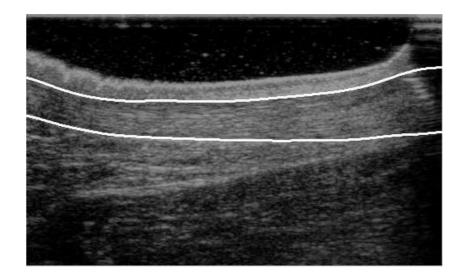


Fig 6.7

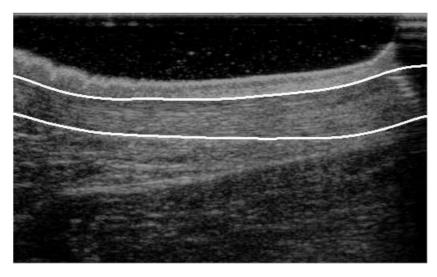


Fig 6.8

7. VALIDAZIONE DEL CODICE DI SEGMENTAZIONE

Quando il codice di segmentazione tendinea automatica è stato completato e tutte le 56 immagini in proiezione sagittale sono state segmentate automaticamente tramite questo, occorre verificare che le segmentazioni automatiche siano effettivamente corrette, andando a confrontarle con più segmentazioni manuali dei tendini, effettuate da diversi operatori.

Per questo scopo è stata implementata una GUI (Graphical User Interface) in Matlab®, che permette di segmentare manualmente immagini sia in proiezione longitudinale che in proiezione trasversale. Ottenute le queste segmentazioni manuali, si procede con la validazione del codice automatico.

7.1 Graphical User Interface

La GUI da implementare deve essere uno strumento semplice, e deve poter svolgere le seguenti consegne:

- Permettere la rapida visualizzazione delle immagini, sia trasversali che longitudinali, nella finestra dedicata, utilizzando un menù a tendina, e mostrare il nome dell'immagine rappresentata a video;
- Permettere di effettuare la segmentazione manuale delle immagini selezionate, andando ad inserire manualmente i punti di segmentazione (dovrà esistere quindi un comando specifico per effettuare questa operazione) nell'immagine.
- Permettere di salvare la segmentazione svolta (ovvero l'insieme di punti inseriti) in un documento di testo esterno alla GUI e, se esiste già una segmentazione svolta dell'immagine in esame, i nomi dei documenti di testo devono essere gestiti adeguatamente in fase di salvataggio, in modo da evitare sovrascirzioni o incomprensioni;
- Permettere di visualizzare a video una segmentazione salvata precedentemente, e mostrare il nominativo della segmentazione rappresentata.

Nella figura 7.1 è rappresentata la GUI con tutti gli oggetti che ne permettono l'utilizzo. Una volta lanciata tramite l'apposito codice Matlab®, per essere attiva dovrà, prima di qualunque altra cosa, essere premuto il bottone *START*.

Esso rende attivi i due menù a tendina, *Longitudinal Image* Selection e *Trasversal Image Selection*, tramite i quali è possibile selezionare e visualizzare a video l'immagine desiderata (figura 7.2).

Al di sotto della finestra in cui è mostrata l'immagine selezionata, vi è una barra di testo in cui è evidenziato il tipo di immagine rappresentata (assiale o sagittale), il numero che indica la posizione dell'immagine all'interno dell tendina e il nome codificato dell'immagine stessa (P1T8, C2L3, etc.. vedere capitolo 1).

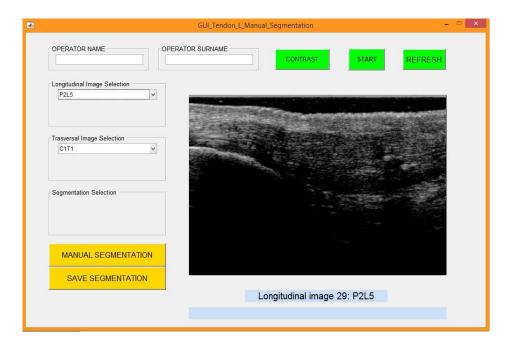


Fig 7.1

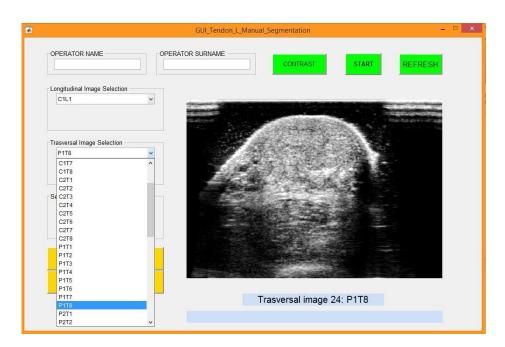


Fig 7.2

Una volta selezionata l'immagine desiderata, è possibile effettuare la segmentazione, tramite il bottone *MANUAL SEGMENTATION*. La segmentazione è lievemente differente a seconda del fatto che l'immagine selezionata rappresenti una sezione sagittale o assiale del tendine. In entrambi i casi, vengono inseriti un massimo di 30 punti sull'immagine tramite il tasto sinistro del mouse; nel primo caso occorre prima inserire tutti i punti di un profilo (superiore o inferiore, massimo 30 punti), poi tutti i punti del secondo profilo (massimo 30). L'inserimento dei punti non deve per forza essere consecutivo, ma può essere casuale (figura 7.3). Nel secondo caso, i punti devono invece essere inseriti consecutivamente in senso orario (figura 7.4).

In caso di errore, è possibile eliminare l'ultimo punto inserito usando il tasto *canc* della tastiera del computer, oppure uscire dalla fase di segmentazione usando il tasto *esc*. In entrambi i casi, per terminare la segmentazione di un determinato profilo, è possibile inserire il punto finale tramite tasto destro del mouse (devono essere stati precendentemente inseriti almeno 4 punti). Nel secondo caso (immagini trasversali) la segmentazione viene terminata in maniera automatica se il punto n-esimo viene inserito molto vicino al primo punto inserito.

Una volta inseriti tutti i punti di un profilo, viene effettuata un interpolazione cubica su di essi al fine di ricavarne una curva, che andrà ad essere mostrata a video, sull'immagine. Tale interpolazione ha solo uno scopo di rappresentazione, potranno essere salvate solo le coordinate dei punti inseriti.

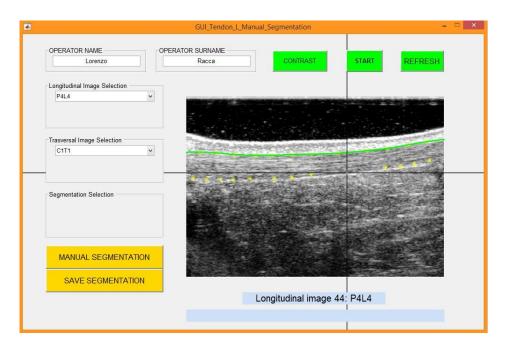


Fig 7.3

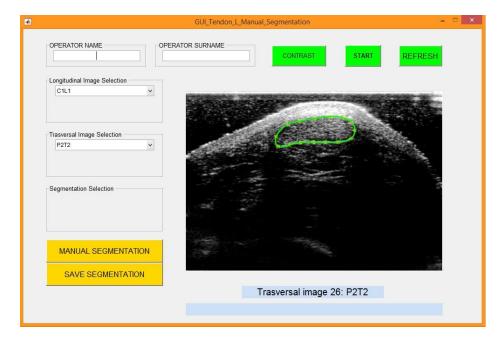


FIG 7.4

Esse possono essere salvate usando il bottone *SAVE SEGMENTATION*: il codice permette il salvataggio soltanto se prima vengono inseriti, nelle caselle in alto a sinistra *OPERATOR NAME* e *OPERATOR SURNAME*, il nome e il cognome dell'operatore che ha effettuato la segmentazione.

Il salvataggio viene effettuato in un subfolder della directory su cui la GUI opera. Tale sottocartella viene chiamata *Manual Segmentation Data* (se non esiste viene appositamente creata dal codice) e contiene tutti i file di testo (.txt) di tutte le segmentazioni salvate precedentemente.

La prima parte del nome di tali file di testo è il nome dell'immagine, ad esso seguono il nome e il cognome dell'operatore e per ultimo, tra parentesi tonde, viene indicato il numero di volte che uno stesso operatore ha effettuato una segmentazione sulla stessa immagine (figura 7.5: contenuto della cartella *Manual Segmentation Data*).

All'interno del documento di testo le coordinate dei punti segmentati sono riportate in due colonne: la prima contiene le coordinate colonna (x), la seconda le coordinate riga (y) dei vari punti, che sono espressi in modo ordinato per ascissa crescente. Per quanto riguarda le immagini in proiezione longitudinale, sarà il codice ad effettuare in seguito la separazione tra i due profili.

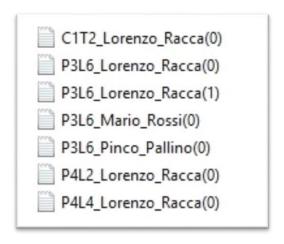


FIG 7.5

Una volta che per una specifica immagine viene salvata almeno una segmentazione, quando l'immagine verrà selezionata, compariranno tutte le segmentazioni effettuate e salvate nel menù a tendina appostito, ovvero *Segmentation Selection*. Selezionando dal menù il documento di testo desiderato, i punti di segmentazione di tale documento e la loro interpolazione verranno mostrati a video, sovrascritti all'immagine. Al di sotto dell'immagine, nella barra di testo più bassa, verrà mostrato il nome della segmentazione richiamata (figura 7.6).

Gli ultimi due bottoni dell'interfaccia grafica non hanno importanza rilevante: tramite il bottone *CONTRAST* è possibile aumentare il contrasto dell'immagine rappresentata a video, tramite il bottone *REFRESH* la GUI viene invece chiusa e riavviata.

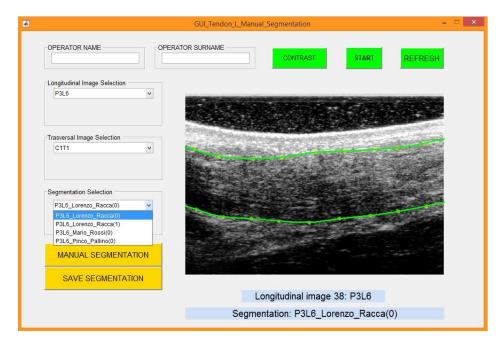


Fig 7.6

7.2 Strumenti per il confronto tra le segmentazioni ottenute

Una volta ottenute le segmentazioni manuali, tracciate tramite la Graphic User Interface di Matlab® descritta nella sezione precedente, occorre effettuare un analisi quantitativa per stabilire quanto sono simili tra loro i profili tracciati dalla segmentazione automatica e i profili tracciati manualmente. Per fare ciò, viene calcolato un parametro di distanza tra i due profili, più esso risulterà basso, più risulterà verificata l'effettiva funzionalità del codice di segmentazione automatica. I parametri di distanza calcolati sono tre: la Hausdorff distance (HDM), la Polyline distance (PDM) e la Centerline distance (CDM)²⁸.

Questi tre parametri descrivono la distanza tra due curve che, per definizione, sono rappresentate da n punti distinti. La curva tracciata dal codice di segmentazione automatica, che, sebbene sia discreta, non presenta gap tra i punti che la costituiscono, viene perciò decimata: solo un decimo dei pixel che la costituiscono vengono mantenuti.

Questa operazione viene svolta in modo che le due curve (manuale e automatica) risultino essere definite entrambe definite come insieme di punti cartesiani, il cui numero sia confrontabile (i punti saranno una cinquantina per i profili automatici, una trentina per quelli manuali). Per ogni punto è nota l'ascissa e l'ordinata. Siccome i bordi del tendine acquisiti in proiezione longitudinale si sviluppano prevalentemente in orizzontale, i punti saranno ordinati per ascissa crescente, mentre i valori delle ordinate saranno poco dissimili tra i vari punti considerati.

Nella decimazione dei profili automatici, il punto inziale (quello più a sinistra) viene settato in modo da avere la medesima ascissa del punto più a sinistra tra i punti inseriti manualmente; lo stesso discorso vale per il punto finale (quello più a destra): la sua ascissa non potrà essere maggiore di quella del punto più a destra tra quelli inseriti manualmente.

Le segmentazioni automatiche possono spesso presentare, in corrispondenza dei bordi sinistro e destro delle immagini, degli scostamenti dal reale profilo del tendine. Questo può capitare a causa di effetti dovuti al processo di segmentazione automatica, come l'insorgenza di effetti di bordo durante l'image enhancement (capitolo 3), come il fatto che gli oggetti più laterali vengono inseriti per ultimi e quindi sono più facilmente affetti da errori di tipo euristico; ma anche a causa di possibili distorsioni del campo insonato durante l'acquisizione dell'immagine, o a causa del fatto che l'inserzione del tendine d'Achille sul calcagno può risultare parte della porzione tendinea rappresentata nell'immagine (e quindi va esclusa, in quanto a sinistra dell'inserzione il tendine non esiste, anche se il codice di segmentazione automatica fornisce comunque un risultato).

In seguito sono descritti i tre parametri HDM, CMD e PDM.

7.2.1 Hausdorff Distance (HDM)

Preso un punto specifico del profilo A viene calcolata la distanza euclidea che separa questo punto da ogni punto del profilo B. La minore tra queste distanze è la distanza associata al punto di A in esame. Per ogni punto del profilo A viene calcolata questa distanza, e la stessa cosa viene fatta, specularmente, per ogni punto del profilo B: ad ogni punto dei due profili viene quindi associato un valore di distanza minimo da quel punto e dall'altro profilo. Tra tutte queste distanze, la distanza di Hausdorff è quella maggiore (vedere figura 7.7, in alto)²⁸.

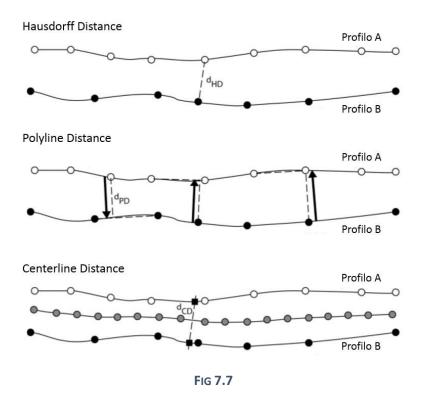
7.2.2 Polyline Distance (PDM)

Una *polyline* è un segmento retto che connette due punti adiacenti dello stesso profilo. La *PDM*, quindi, è la distanza perpendicolare tra un punto a sul profilo A e la polyline che unisce i punti b_1 e b_2 sul profilo B opposto. Essa viene calcolata per ogni punto appartenente ad A rispetto alle polylines calcolate sul profilo B e viceversa, per ogni punto appartenente a B rispetto alle polylines calcolate sul profilo A (vedere figura 7.7, in centro). La polyline distance è la media tra tutte queste distanze d_{PD} calcolate²⁸.

7.2.3 Centerline Distance (CDM)

Per prima cosa, viene calcolata una curva centrale (*centerline*) tra quelle rappresentati i due profili. I punti di questa curva ottenuta vengono poi interpolati, ottenendo il profilo di una curva centrale rispetto ai due profili.

Per ogni punto di questa curva centrale viene calcolata la lunghezza del segmento perpendicolare alla tangente questa curva, che si estende dal profilo A al profilo B (fig 7.7²⁸, in basso). La *centerline distance* è la media tra tutte le lunghezze così calcolate²⁸.



I profili A di cui si è parlato rappresentano i bordi tendinei segmentati in modo automatico, mentre i profili B rappresentano le segmentazioni manuali dei bordi dei tendini.

7.3 Risultati della validazione

Ciascuna delle 56 immagini rappresentanti i tendini in posizione longitudinale, su cui è stato costruito il codice di segmentazione automatico, è stata segmentata manualmente da tre differenti operatori. Per ognuna di queste segmentazioni sono state calcolate le tre distanze riportate sopra (HDM, PDM, CDM). Nell'appendice B sono riportate, per ciascuna immagine e per ciascuno degli operatori, i valori di queste distanze.

Nella tabella 7.1 sono riportati i valori medi (per ciascuna immagine e ciascun operatore) di queste distanze, espressi in mm, relativi al profilo superiore del tendine. Nella tabella 7.2 sono invece riportati questi valori medi relativi al profilo inferiore del tendine.

<i>HDM</i>	PDM	CDM
$0,991 \pm 0,672$	$0,359 \pm 0,277$	$0,\!376 \pm 0,\!278$
	TAB 7.1	
HDM	PDM	CDM
$0,963 \pm 0,611$	$0,306 \pm 0,332$	$0,323 \pm 0,336$
	TAB 7.2	

Per come sono definite queste tre distanze, risulta ovvio che la misura della distanza di Hausdorff (che è il massimo tra i valori di d_{HD}) è più accentuata (di circa tre volte) rispetto alla Polyline distance e alla Centerline distance, che sono calcolate come valori medi delle distanze d_{PD} e d_{CD} , e che hanno valori complessivamente simili.

8. ANALISI DI TESSITURA

La segmentazione automatica delle immagini tendinee non porta in sé alcun risultato. Essa è piuttosto un modo per velocizzare e standardizzare il processo di segmentazione, che altrimenti andrebbe fatto manualmente. Una volta segmentato il tendine, possono essere immediatemente ricavati i parametri quantitativi di tipo geometrico, come lo spessore del tendine e la *cross sectional area* (per calcolare quest'ultima è necessario effettuare anche la segmentazione delle immagini acquisite in proiezione trasversale).

Con la segmentazione si ottiene, immagine per immagine, la maschera del tendine. Essa può essere usata per ricavarne i parametri di tessitura. Attualmente, siccome gli esperimenti scientifici riguardanti lo studio della tessitura del tessuto tendineo sono pochi e inconcludenti, con qualche rara eccezione, non è dato sapere a priori se lo studio dei parametri di tessitura estratti possa essere un valido strumento per il monitoraggio dello stato di guarigione del tendine d'Achille. Uno degli scopi di questa tesi riguarda appunto il calcolo e lo studio di questi parametri, per tendini sani ed affetti, al fine di verificare se essi possano essere considerati strumenti utili all'indagine diagnostica del tessuto tendineo.

8.1 Descrittori di tessitura

Nel campo dell'elaborazione delle immagini il termine tessitura si riferisce alla disposizione geometrica e ripetitiva dei toni di grigio di una immagine. L'occhio umano è capace di determinare e riconoscere facilmente diversi tipi di tessiture, classificandole, però, in modo soggettivo.

L'analisi della tessitura è sviluppata attraverso grandezze statistiche e/o strutturali tra gli elementi primitivi della tessitura, anche dette *textel*.

Contrariamente alla media dei toni di grigio di un immagine a agli altri parametri di tessitura del primo ordine, i parametri degli ordini superiori che posson essere estratti dalle immagini ultrasonografiche sono invarianti rispetto all'intensità, e hanno già dimostrato efficacia nello studio della struttura del muscolo scheletrico, nell'analisi del contenuto di grasso intramuscolare animale, nella caratterizzazione della rugosità delle pareti dei vasi arteriosi, nello studio dei tumori al seno e delle ovaie, lesioni tiroidee e in alcuni studi sul fegato umano²⁹.

In letteratura si evince anche come i parametri quantitativi estratti dalle immagini US sono già stati utilizzati per valutare l'integrità dei tendini d'Achille: quelli di tipo geometrico (spessore, cross sectional area), mostrano notevole accuratezza e affidabilità, al contrario dei parametri di tipo statistico (parametri di tessitura del primo ordine, calcolati tramite l'istogramma delle luminosità). Sono stati usati anche, con risultati mediocri in termini di accuratezza e affidabilità, parametri di tessitura del secondo ordine. Non esistono attualmente studi che utilizzino descrittori di tessitura di ordine superiore al secondo per quanto riguarda il tendine.

I descrittori di tessitura di interesse per lo studio del tessuto tendineo sono parametri di tipo statistico, quindi legati al valore del pixel e alla sua posizione all'interno della regione di interesse dell'immagine, del primo, del secondo e del terzo ordine. Questi descrittori cercati vengono calcolati utilizzando un codice Matlab® appostitamente compilato.

8.1.1 Descrittori di tessitura del primo ordine

I descrittori di tessitura del primo ordine sono operatori statistici basilari, del primo ordine appunto. Essi non dipendono dalla direzione o dalla posizione dei pixel all'interno della roi, ma dipendono soltanto dall'istogramma delle luminosità.

Sono stati calcolati i seguenti sei parametri di questo tipo: la media dei toni di grigio dell'immagine (μ) , la deviazione standard (σ) , la varianza (σ^2) , la skewness (S_k) , la kurtosis (K_t) e l'entropia (E_1) . Per il calcolo dell'entropia viene utilizzata la formula di Shennon. Per i sei descrittori del primo ordine calcolati sono riportate le formulazioni matematiche: come facilmente intuibile, M è il numero di righe, N il numero di colonne della roi in esame²⁹.

Mean
$$(\mu) = \sum_{x=1}^{M} \sum_{y=1}^{N} \frac{I(x,y)}{M \cdot N}$$

Standard deviation
$$(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{M} \sum_{y=1}^{N} \{I(x,y) - \mu\}^2}{M \cdot N}}$$

$$Variance (\sigma^2) = \frac{\sum_{x=1}^{M} \sum_{y=1}^{N} \{I(x, y) - \mu\}^2}{M \cdot N}$$

Skewness
$$(S_k) = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=1}^{M} \sum_{y=1}^{N} \{I(x, y) - \mu\}^3}{\sigma^3}$$

$$Kurtosis \; (K_t) = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \frac{\sum_{x=1}^{M} \sum_{y=1}^{N} \{I(x,y) - \mu\}^4}{\sigma^4}$$

Entropy
$$(E_1) = -\sum_{x=1}^{M} \sum_{y=1}^{N} I(x, y) \cdot \log_2 I(x, y)$$

8.1.2 Descrittori di tessitura del secondo ordine

I descrittori di tessitura del secondo ordine sono più complessi di quelli del primo: essi dipendono dalla posizione relativa dei pixel e vanno calcolati secondo specifiche direzioni. I parametri di tessitura del secondo ordine sono basati sulla GLCM (*Gray Level Co-occurence Matrix*).

La GLCM, o matrice delle co-occorrenze, che verrà indicata con la lettera C, è una matrice quadrata di dimensioni pari al numero di livelli di toni di grigio nell'immagine (roi). In essa, il termine C(i,j) misura il numero di volte in cui, nella roi di partenza un pixel pari a i (livello di grigio) si trova adiacente ad un pixel di valore j. Siccome due pixel possono essere adiacenti in orizzontale, in verticale e nelle due direzioni diagonali (fig 8.1³¹), verranno calcolate quattro matrici delle co-occorrenze diverse, ognuna basata sulla specifica direzione angolare (0°, 45°, 90° e 135°)³¹.

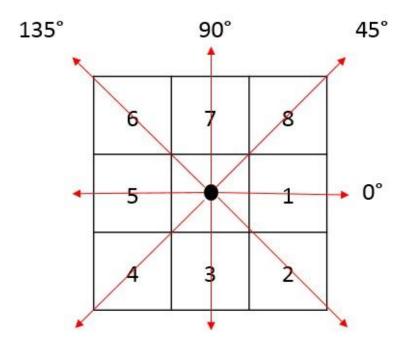


Fig 8.1

Siccome in una direzione un pixel si trova adiacente a due pixel (ad esempio, con riferimento alla figura 5.1, il pixel centrale è adiacente in orizzontale sia al pixel indicato con il numero 1 che al pixel indicato con il numero 5), occorre effettuare una scelta: se per ogni pixel vengono considerati entrambi i pixel adiacenti (con riferimento alla figura 5.1, viene considerato sia il pattern $\{5, \bullet\}$ che il pattern $\{\bullet,1\}$, allora la GLCM sarà una matrice simmetrica (fig 8.2^{31}).

Image	Grey Tone				
	0 1 2 3				
0 0 1 1	g 0 (0,0) (0,1) (0,2) (0,3)				
0 0 1 1	E 1 (1,0) (1,1) (1,2) (1,3)				
0 2 2 2	0 (0,0) (0,1) (0,2) (0,3) 0 1 (1,0) (1,1) (1,2) (1,3) 0 2 (2,0) (2,1) (2,2) (2,3) 0 3 (3,0) (3,1) (3,2) (3,3)				
2 2 3 3	© 3 (3,0) (3,1) (3,2) (3,3)				
(a)	(b)				
GLCM θ° $P_{H} = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$	GLCM 90° $ P_{V} = \begin{pmatrix} 6 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix} $ (d)				
(c)					
GLCM 135° $P_{LD} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix}$ (e)	GLCM 45° $P_{RD} = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 2 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$				
(e)	(f)				

Fig 8.2

Se invece viene mantenuto solo uno dei due pixel adiacenti (ad esempio, per la direzione orizzontale, viene considerato solo il pattern {•,1}, con riferimento alla figura 5.1), allora non risulterà, in generale, simmetrica. Inoltre, la somma di tutti gli elementi della GLCM calcolata in questo modo sarà la metà di quella simmetrica (fig 8.3²⁹).

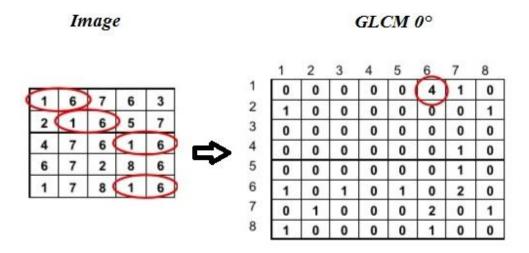


FIG 8.3

Una volta calcolata la GLCM, i descrittori di tessitura del secondo ordine vengono calcolati come parametri statistici di questa matrice. Sono stati scelti sei parametri per definire le caratteristiche di tessitura del tessuto tendineo. Tali parametri sono il contrasto, la correlazione, l'energia, l'omogeneità, l'entropia e la simmetria. La formulazione matematica di tali descrittori è riportata nella figura 8.4²⁹, in cui P è la matrice delle co-occorrenze di grigio normalizzata²⁹.

Alcuni di questi parametri si riferiscono a specifiche caratteristiche di tessitura, come l'omogeneità, il contrasto e la presenza di strutture organizzate all'interno delle immagini, altre caratterizzano la complessità e la natura delle transizioni dei toni di grigio che si presentano nell'immagine. È comunque difficile identificare quale specifica caratteristica di tessitura è rappresentata da ciascun parametro matematico³¹.

Haralick feature	Description			
Symmetry (I_{sym})	$I_{sym} = 1 - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} i-j P(i,j)$			
Contrast (I_{con})	$I_{con} = \sum_{n=0}^{N-1} n^2 \{ \sum_{i=0}^{N} \sum_{j=0}^{N} P(i,j) \}$			
Homogeneity (I_{hmg})	$I_{hmg} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{1}{1+(i-j)^2} P(i,j)$			
Entropy (I_{Entr})	$I_{Entr} = -\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i,j) \log(P(i,j))$			
Energy (I_{Enrg})	$I_{Enrg} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} P(i,j)^2$			
Correlation* (I_{cor})	$I_{cor} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (i,j) P(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y}$			

^{*} σ_x , σ_y , μ_x , μ_y are the standard deviations and means of P_x , P_y , which are the partial probability density functions. $p_x(i) = i^{th}$ entry in the marginal–probability matrix obtained by summing the rows of P(i,j).

8.1.3 Descrittori di tessitura del terzo ordine

I parametric di tessitura del terzo ordine sono basati sulla GLRLM (*Gray Level Run Lenght Matrix*). Una corsa di un dato livello di grigio (*gray level run*) è un set di punti appartenenti all'immagine consecutivi lungo la stessa direzione e aventi lo stesso livello di grigio. Si può subito intuire come anche la GLRLM, come la GLCM, sia una matrice che deve essere definita lungo una specifica direzione di quattro possibili (0°, 40°, 90° e 135° - vedere la figura 5.1). La lunghezza della corsa (length run) corrisponde al numero di pixel appartenenti a tale corsa³².

In una GLRLM, gli elementi R(i,j) indicano il numero di corse aventi lunghezza pari a j il cui livello di grigio è pari a i. Tutte le corse a cui la matrice fa riferimento sono definite, come già accennato, lungo una specifica direzione, che può essere orizzontale, verticale o diagonale. Il numero di righe della matrice RLM è pari al numero di livelli di grigio nell'immagine, mentre il numero di colonne è pari alla massima, teorica, lunghezza di una corsa di un dato livello di grigio. In particolare, se la direzione scelta è quella orizzontale, le colonne della RLM saranno pari al numero di colonne dell'immagine di partenza, se è verticale, alle righe dell'immagine, se è diagonale, al minore tra il numero di righe e quello di colonne dell'immagine²⁹.

Nella figura 8.5^{29} è mostrata la costruzione di una RLM per le direzioni orizzontale e diagonale (45°) a partire da una piccola roi quadrata di lato pari a quattro e quattro livelli (da 0 a 3).

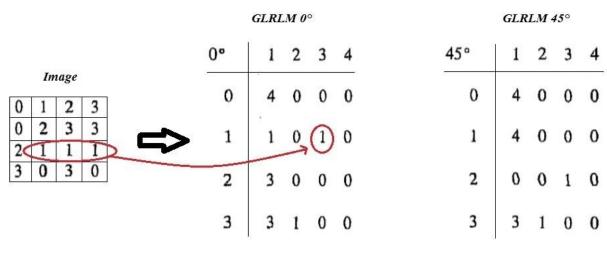


FIG 8.5

La *Run Lenght Matrix*, per come è definita, dipende strettamente dal numero di livelli considerati: se essi sono molti (es se viene mantenuta la discretizzazione originale di 256 livelli), risulta chiaro che le fluttuazioni statistiche impedirebbero un buon uso di questo strumento, e le RLM risultanti mostrerebbero valori elevatissimi nelle colonne di sinistra e valori pressochè nulli nelle colonne di destra. Perciò conviene ridurre drasticamente (fino a 8 o 16 livelli) la discretizzazione della dinamica dell'immagine.

Una volta calcolata la GLRLM, si passa al calcolo dei descrittori di tessitura. Essi sono in tutto cinque, e sono riportati nella figura 8.6²⁹. Questi parametri sono tutti normalizzati. La *Short Run Emphasis* (SRE) è un parametro il cui valore è tanto più elevato quanto più elevato è il numero di corse brevi, la *Long Run Emphasis* (LRE) esalta invece le corse più lunghe, la *Gray Level Non-Uniformity* (GLN)

che è tanto più basso quanto le corse sono equamente distribuite in funzione dei toni di grigio; la *Run Length Non-Uniformity* (RLN), impostata in modo molto simile alla GLN (basta trasporre la GLRLM), tenta di mostrare la nonuniformità della lunghezza delle corse rispetto al tono di grigio. La *Run Percentage* (RP) è il rapporto tra il numero totale di corse e il numero totale di pixel nell'immagine di partenza (quest'ultimo definito come il numero totale di possibili corse di lunghezza pari a 1)³².

Galloway feature	Description
Short run emphasis (SRE)	$SRE = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{R(i,j)}{j^2}}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}$
Long run emphasis (LRE)	$LRE = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} j^2 R(i,j)}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}$
Gray level nonuniformity (GLN)	$GLN = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} (\sum_{j=1}^{N_r} R(i,j))^2}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}$
Run length nonuniformity (RLN)	$RLN = \frac{\sum_{j=1}^{N_r} (\sum_{i=1}^{N_g} R(i,j))^2}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}$
Run percentage (RP)	$RP = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} R(i,j)}{N_g \cdot M_r}$

 N_g represents the number of gray values in the image (i.e., the number of rows of the matrix R). N_r represents the number of runs (i.e., the number of columns of the R matrix).

8.2 Implementazione dei descrittori di tessitura

8.2.1 Regioni di interesse per l'analisi di tessitura

Per calcolare i parametri di tessitura relativi alle 56 immagini ecografiche che rappresentano il tendine in proiezione longitudinale di cui si è abbondantemente discusso nei capitoli 2 e 4, sono state utilizzate 4 roi (Region Of Interest) per ciascuna delle immagini.

La prima di queste roi è il tendine completo, contenente tutti i pixel che vengono considerati appartenenti al tendine una volta effettuata la segmentazione. Tale roi non avrà perciò forma rettangolare, bensì avrà contorni variabili, che seguono esattamente i profili superiore e inferiore del tendine, segmentati precedentemente in modo automatico. Utilizzare una roi di questo tipo nel codice stilato per la *texture analysis* implica fare in modo che, i pixel all'esterno di tale roi vengano totalmente ignorati. In Matlab® questo si ottiene impostando il valore *NaN* per il pixel considerato: nei calcoli è come se esso non esistesse. In figura 8.7 è rappresentata una di queste roi, i pixel neri esterni al tendine sono quelli ignorati.

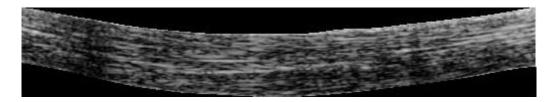


Fig 8.7

Le altre tre roi sono più piccole, rettangolari e totalmente contenute all'interno della maschera del tendine. Una viene piazzata nella zona sinistra (distale) dell'immagine, un'altra nella zona centrale e l'ultima viene posizionata nel lato destro (prossimale). Per ognuna delle 56 immagini tali roi hanno la stessa dimensione, calcolata e ottimizzata in combinazione con la sua posizione nella maschera del tendine, in modo che la sua area sia la più grande possibile, ma che sia identica sia per il tendine più sottile che per il più spesso. Nella tabella 5.1 sono riportate queste dimensioni.

TIPO DI ROI	NUMERO DI RIGHE	NUMERO DI COLONNE	DIMENSIONE
DISTALE	26	56	14.1 mm ²
MEDIALE	35	61	$20.7~\text{mm}^2$
PROSSIMALE	31	60	18.1 mm ²

TAB 8.1

La posizione delle roi, pur avendo di base una definizione relativa alla zona destra, sinistra o centro, è variabile tra un immagine e l'altra, al contrario dell'area, ed è indicata dalle coordinate del pixel, nell'immagine originale, in cui viene posizionato l'angolo in alto a sinistra della roi.

Per immagini in cui il tendine è più spesso di altre, la posizione della roi viene scelta in modo da posizionarla in modo più centrale possibile; se invece non è così, la scelta della posizione risulta essere sempre più limitata, fino ad avere, al minimo, una sola scelta (il numero di righe e di colonne deve essere mantenuto costante). Nella figura 5.7 sono rappresentate queste tre roi all'interno della roi primaria esterna di una delle immagini.

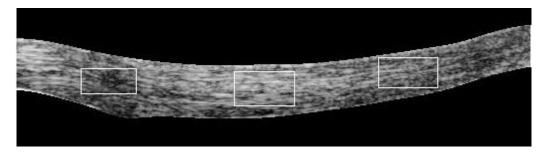


Fig 5.7

Bisogna poi considerare che la roi più grande conterrà un numero di pixel pari ad un ordine di grandezza in più (circa 2*10⁴ pixel) del numero di pixel contenuto nelle tre roi più piccole (2*10³ pixel in media). Questo fattore avrà sicuramente ripercussioni di tipo statistico durante il calcolo dei parametri di tessitura, così come il fatto che la roi più grande è da considerarsi di forma variabile non rettangolare.

8.2.2 Parametri matematici dell'analisi di tessitura

Il calcolo dei parametri di tessitura viene effettuato tramite un apposito codice Matlab®, chiamato *TextureAnalysis_LR*, che però principalmente si occupa della compilazione della matrice contenente i risultati: la parte di calcolo vera e propria viene effettuata da una funzione chiamata *extractTextureFeatures_LR*, che a sua volta richiama altre funzioni.

La roi in ingresso è una matrice i cui pixel hanno valori numerici interi che variano da 0 a 255 (quindi 2⁸ livelli, come se fosse un formato *uint8*), ma espressi in formato *double*, quindi facilmente elaborabili. Come già accennato precedentemente, i valori al di fuori della maschera binaria, per la roi estesa, hanno valore *NaN*.

I descrittori di tessitura del primo ordine che vengono calcolati sono 6 (mean, standard deviation, variance, skewness, kurtosis, entropy) e vengono calcolati dalla funzione *firstOrder*; al suo interno calcolo dei singoli parametri è affidato a funzioni preimpostate di Matlab®. La matrice in ingresso è in questo caso la stessa descritta sopra, e viene convertita in un vettore, in quanto per il calcolo dei parametri di tessitura del primo ordine le posizioni dei pixel all'interno della matrice non vengono prese in considerazione. I parametri del primo ordine sono calcolati su roi la cui dinamica è distribuita su 256 livelli di grigio.

I descrittori di tessitura del secondo ordine che vengono calcolati sono in tutto 30: essi sono solo sei (contrast, correlation, energy, homogeneity, entropy, symmetry), ma vengono ricavati utilizzando 5 diverse matrici delle co-occorrenze: le prime quattro sono calcolate per ognuna delle direzioni

principali (angoli di 0°, 45°, 90° e 135°) mentre l'ultima viene calcolata come media delle quattro precedenti. Al fine di calcolare la GLCM, la roi in ingresso viene modificata. Innanzitutto viene ottimizzata la sua dinamica, andando a stirare il diagramma delle luminosità tra il suo valore minimo e quello massimo, poi viene scalato il numero di livelli da 256 a 16, in modo da limitare le fluttuazioni casuali. La GLCM viene poi calcolata tramite una funzione preimpostata di Matlab® (*graycomatrix*). Essa viene calcolata in modo che risulti essere una matrice quadrata simmetrica.

I primi quattro parametri del secondo ordine vengono calcolati dalla matrice delle co-occorrenze tramite un'altra funzione preimpostata (*graycoprops*), mentre per il calcolo di entropia e simmetria è stata compilata una apposita funzione (*secOrderSimmetryEntropy*).

I descrittori di tessitura del terzo ordine che vengono calcolati sono in tutto 20: essi sono solo cinque (SRE, LRE, GLN, RLN, RP), ma vengono ricavati utilizzando quattro diverse matrici GLRLM, calcolate, come effettuato precedentemente per la matrice delle co-occorrenze, per ognuna delle direzioni principali (0°, 45°, 90° e 135°). A differenza delle features del secondo ordine, quelle del terzo non vengono calcolate per una GLRLM media. Le funzioni utilizzate sono state create appositamente: matr45 provvede alla rotazione della roi di 45° (per ottenere le rotazioni di 90° e 135° basta trasporre rispettivamente la matrice di partenza (0°) e quella ruotata di 45°); $compute_GLRLM$ provvede al calcolo della GLRLM, mentre extractGLRLMfeatures provvede al calcolo dei cinque parametri di tessitura. Anche in questo caso viene modificato il numero di livelli della roi in ingresso, che passa da 256 a 16 (2⁸ \rightarrow 2⁴), tramite l'apposita funzione im2nlev.

8.3 Risultati dell'analisi di tessitura

Per ogni immagine, sono state quindi considerate 4 roi diverse (una riferita al tendine globale, e quindi non rettangolare, e tre roi rettangolari più piccole, posizionate rispettivamente nella zona sinistra, centrale e destra del tendine, come riportato nella sezione precedente). Per ogni roi sono state estratti in tutto 56 parametri di tessitura: sei del primo ordine, 6 per il secondo ordine calcolati per ognuna delle 4 direzioni scelte e per la media di queste direzioni (in tutto 30), cinque per il terzio ordine calcolati per le 4 direzioni scelte (in tutto 20).

Per ogni tabella estratta, se la roi è interna al profilo del tendine, vengono riportate le dimensioni in pixel della roi e le coordinate, nell'immagine, dell'angolo alto e sinistro della roi, in modo da poter risalire esattamente al punto in cui la roi viene posizionata.

Le tabelle complete, con tutti i parametri di tessitura estratti, possono essere visualizzate nell'appendice C.

Per confrontare tra loro i parametri di tessitura sono state raggruppati i parametri (in forma di valor medio e di deviazione standard) calcolati sulle immagini simili (tendine teso e tendine rilassato, porzione mediale e porzione distale/inserzionale) relative ai tendini sani e le immagini simili relative ai tendini post chirurgici.

Il confronto dei parametri di tessitura non ha fornito i risultati inizialmente sperati: le differenze tra parametri calcolati su immagini relative ai tendini sani e su immagini relative ai tendini post chirurgici sono molto poco apprezzabili a livello statistico.

Inoltre occorre precisare che per effettuare un vero e proprio confronto statistico i tendini analizzati dovrebbero essere molti di più: i tendini patologici considerati sono solo 5, mentre quelli sani sono solamente 9. In ogni caso, per ogni parametro si è cercato di trovare dei valori indicativi dello stato fisiopatologico del tendine. L'analisi descrittiva dei risultati viene riportata in seguito.

8.3.1 Descrittori del primo ordine

Nei tendini rilassati, i **valori medi dei toni di grigio** hanno valori inferiori nelle immagini relative a tendini post chirurgici (affetti). Per quanto riguarda i tendini tesi, non vi è differenza apprezzabile tra quelli sani e quelli affetti, e i valori sono maggiori di quelli relativi ai tendini rilassati (sia affetti che sani). La situazione resta più o meno invariata per tutte e quattro le roi considerate.

La **deviazione standard** invece (così come la **varianza**, che ne è semplicemente il valore quadrato), sembra essere leggermente superiore nei tendini affetti rispetto a quelli sani e nei tendini rilassati rispetto a quelli tesi. Questa situazione, però, si osserva solo nella roi completa, mentre nelle tre roi interne non ci sono differenze apprezzabili.

Nella tabella 8.2 sono riportati i valori di questi due descrittori di tessitura del primo ordine (valor medio e deviazione standard dei toni di grigio), relativi alle sole roi globali (figura 5.6), divisi per tipologia di immagine (tendine sano o post chirugico, tendine rilassato o in tensione, porzione mediale o porzione inserzionale).

Caratteristiche del tendine	Valor Medio	Deviazione Standard
Sano, Rilassato, Distale	$105,1 \pm 30,6$	$125,4 \pm 40,0$
Sano, Rilassato, Mediale	$119,2 \pm 42,8$	$107,6 \pm 58,4$
Sano, Teso, Distale	$135,6 \pm 34,1$	$133,6 \pm 31,3$
Sano, Teso, Mediale	$150,1 \pm 36,5$	$151,6 \pm 48,5$
Affetto, Rilassato, Distale	$68,9 \pm 13,4$	$83,1 \pm 45,2$
Affetto, Rilassato, Mediale	$86,7 \pm 25,0$	$70,9 \pm 22,3$
Affetto, Teso, Distale	$133,0 \pm 42,2$	$91,0\pm46,8$
Affetto, Teso, Mediale	$148,2 \pm 38,0$	$155,4 \pm 34,9$

TAB 8.2 - DESCRITTORI SIGNIFICATIVI DEL PRIMO ORDINE (ROI GLOBALE)

Tra i descrittori statistici del primo ordine, non sono state osservate differenze correlabili allo stato fiopatologico del tendine per la **skewness**, la **kurtosis** e per l'**entropia**, i cui valori risultano molto simili per ciascun tipo di tendine, per tutte e quattro le roi utilizzate.

8.3.2 Descrittori del secondo ordine

Per la direzione orizzontale, il **contrasto** risulta essere maggiore, per tutte e quattro le roi, nei tendini post chirurgici rispetto ai tendini sani. In generale, inoltre, i valori sono maggiori per i tendini rilassati piuttosto che in quelli in cui agiscono tensioni più elevate. Per le altre tre direzioni (le due diagonali e la verticale) e per la media delle direzioni, non vi sono in realtà differenze significative, anche se è possibile osservare che, in quasi tutti i casi, i valori di contrasto risultano essere superiori nei tendini sani piuttosto che in quelli post chirurgici, definendo così una situazione praticamente opposta rispetto a quella osservata nella direzione orizzontale.

I valori di **omogeneità** sembrano, in direzione orizzontale, essere inferiori nei tendini post chirurgici rispetto che in quelli sani. Per la direzione verticale e quella diagonale decrescente (135°), si può osservare una lieve tendenza inversa a quella della direzione orizzontale (prevalentemente dai dati estratti tramite la roi globale e quella interna posizionata a destra). Nulla si può asserire invece per la direzione diagonale crescente (45°) e per la media delle direzioni.

Per quanto riguarda la **simmetria**, indirezione orizzontale si può notare che in generale (per tutte le roi) i valori riportati per i tendini post chirurgici siano inferiori rispetto a quelli valutati per i tendini sani. Per le altre tre direzioni, la tendenza sembra invece essere inversa (soprattutto nei dati calcolati tramite la roi completa e quella interna a destra), inoltre, i valori di simmetria sono quasi tutti negativi.

Nella tabella 8.3 sono riportati i valori di questi tre descrittori di tessitura del secondo ordine (contrasto, omogeneità e simmetria), calcolati lungo la direzione orizzontale e divisi per tipologia di immagine (tendine sano o post chirugico, tendine rilassato o in tensione, porzione mediale o porzione inserzionale). Le roi considerate sono quelle che contengono i risultati più significativi, a livello di differenza tra tendini sani e affetti.

Caratteristiche del tendine	Contrasto Roi Globale	Omogeneità Roi Interna Centrale	Simmetria Roi Interna Centrale
Sano, Rilassato, Distale	0,914 ± 0,084	0,732 ± 0,049	0,381 ± 0,117
Sano, Rilassato, Mediale	0,807 ± 0,179	0,724 ± 0,027	0,367 ± 0,078
Sano, Teso, Distale	0,755 ± 0,113	0,705 ± 0,032	0,316 ± 0,097
Sano, Teso, Mediale	0,659 ± 0,100	0,741 ± 0,034	0,416 ± 0,092
Affetto, Rilassato, Distale	1,025 ± 0,287	0,649 ± 0,061	0,091 ± 0,226
Affetto, Rilassato, Mediale	1,034 ± 0,176	0,613 ± 0,029	-0,009 ± 0,114
Affetto, Teso, Distale	0,930 ± 0,249	0,650 ± 0,043	0,146 ± 0,143
Affetto, Teso, Mediale	0,920 ± 0,279	0,662 ± 0,021	0,185 ± 0,068

TAB 8.3 - DESCRITTORI SIGNIFICATIVI DEL SECONDO ORDINE (DIREZIONE ORIORIZZONTALE)

Per quanto riguarda la **correlazione**, nella direzione orizzontale non ci sono differenze apprezzabili tra i valori di questo parametro, soprattutto per quanto riguarda la roi globale; considerando le tre roi interne, però, sembra che la correlazione abbia un valore maggiore nei tendini sani piuttosto che in quelli patologici. Il contrario avviene per i parametri calcolati nelle altre tre direzioni e per la media delle direzioni: il valore di correlazione è leggermente maggiore nei tendini patologici, anche se questo dato può essere osservato quasi esclusivamente nei valori calcolati tramite la roi globale e tramite le roi interne centrali e di destra (la roi interna di sinistra non mostra mai differenze uniformi, soprattutto per quanto riguarda il tendine teso).

Non sono state estratte informazioni rilevanti dall'analisi dei valori di energia ed entropia.

8.3.3 Descrittori del terzo ordine

Considerando il parametro SRE (**Short Run Emphasis**), calcolato lungo la direzione orizzontale, si nota un leggero aumento del valore del parametro per i tendini post chirurgici rispetto ai tendini sani, in tutte e quattro le roi. Per la direzione verticale il comportamento è opposto, anche se quasi impercettibile, a quello della direzione orizzontale, in tutte le roi. Per le due direzioni diagonali i valori richiamano quelli della direzione verticale, anche se in questi due casi la differenza è ancora meno marcata.

Dall'analisi del parametro GLN (**Gray Level Nonuniformity**) risulta che, per le roi globali, il valore è significativamente maggiore nei tendini patologici rispetto a quelli sani, in tutte le direzioni. Per le roi interne i valori sono molto più bassi, e la differenza riscontrata tra i tendini sani e quelli patologici nella roi globale è scarsamente marcata per la direzione orizzontale, mentre è del tutto persa per le altre direzioni.

Dallo studio della RLN (**Run Length Nonuniformity**) emerge una situazione analoga a quella della GLN (i valori della RLN sono più elevati rispetto a quelli dalla GLN, ma la proporzione tra sani e patologici resta più o meno simile).

La netta differenza riscontrata nelle roi globali potrebbe essere quindi legata al numero totale di pixel della roi, che è molto più grande in quelle patologiche, e quindi la GLN calcolata sulle roi globali potrebbe non essere indicativa. Questa considerazione è avvalorata dal fatto che, nelle roi interne, i valori della GLN sono molto più bassi (un ordine di grandezza) rispetto a quelli calcolati per la roi globale.

La **Run Percentage** e la **Long Run Emphasis** non sembrano essere parametri molto indicativi per marcare differenze tra tendini sani e tendini post chirurgici.

Nella tabella 8.4 sono riportati i valori di questi tre descrittori di tessitura del terzo ordine (SRE, GLN, RLN), calcolati lungo la direzione orizzontale e divisi per tipologia di immagine (tendine sano o post chirugico, tendine rilassato o in tensione, porzione mediale o porzione inserzionale). La roi considerata per la SRE è quella che contiene i risultati più significativi e gli intervalli più ristretti, la roi scelta per la GLN è quella globale, quella per la RLN è quella interna centrale, in modo da mostrare la differenza di cui si è trattato sopra.

Caratteristiche del tendine	SRE Roi Interna Centrale	GLN Roi Globale	RLN Roi Interna Centrale	
Sano, Rilassato, Distale	0,529 ± 0,070	1349,3 ± 233,5	252,8 ± 94,7	
Sano, Rilassato, Mediale	0,523 ± 0,070	1373,8 ± 108,7	254,1 ± 89,4	
Sano, Teso, Distale	0,559 ± 0,057	1307,8 ± 206,8	301,8 ± 71,6	
Sano, Teso, Mediale	0,485 ± 0,076	1324,0 ± 260,1	208,2 ± 73,3	
Affetto, Rilassato, Distale	0,597 ± 0,099	2243,6 ± 244,1	382,0 ± 187,0	
Affetto, Rilassato, Mediale	0,656 ± 0,070	2883,1 ± 583,2	494,9 ± 157,7	
Affetto, Teso, Distale	0,642 ± 0,080	2436,3 ± 288,6	477,5 ± 190,1	
Affetto, Teso, Mediale	0,615 ± 0,080	3046,6 ± 654,5	419,2 ± 131,1	

TAB 8.4 – DESCRITTORI SIGNIFICATIVI DEL TERZO ORDINE (DIREZIONE ORIZZONTALE)

9. ELASTOSONOGRAFIA QUANTITATIVA

9.1 La tecnica elastosonografica

L'elastosonografia è una tecnica innovativa e ancora piuttosto sconosciuta nell'ambito della diagnostica per immagini, ed in particolare in quello ultrasonografico. Essa permette la valutazione non invasiva e *in vivo* delle proprietà elastiche del tessuto insonato. I risultati migliori con questa tecnica si ottengono quando il tessuto esaminato presenta proprietà meccaniche isotrope, ovvero indipendenti dalla direzione considerata. La valutazione delle proprietà meccaniche viene eseguita analizzando la propagazione delle onde di taglio (*shear wave*) nel mezzo considerato. Per molti organi, il suo utilizzo ottimale è limitato dalla fisica della propagazione di queste shear waves in mezzi complessi, quali sono ad esempio i tendini: il tessuto tendineo presenta caratteristiche meccaniche isotropiche ma trasversali (diverse per la direzione radiale e per quella assiale), e lunghezza d'onda delle shear waves è più grande dello spessore del tendine¹⁴.

La SSI (Supersonic Shear Imaging) provvede ad una stima quantitativa della velocità di propagazione dell'onda di taglio. Questo avviene in tre passaggi: per prima cosa, il tessuto viene stimoltato meccanicamente, tramite insonazione, e viene generata la shear wave, poi viene acquisita la sequenza di immagini che riprendono gli spostamenti indotti dalla propagazione dell'onda e infine viene valutata localmente la sua velocità.

La frequenza utilizzata per ottenere l'onda di taglio è compresa nella banda che va da 300 a 800 Hz. Come già accennato, la lunghezza d'onda è maggiore dello spessore del tendine. La propagazione dell'onda all'interno del tendine è guidata lungo il tendine grazie alle successive riflessioni che essa subisce nell'impatto con i bordi del tendine. Comunque, le propagazione lungo e attraverso il tendine possono essere considerate indipendenti. Inoltre, l'onda di taglio indotta è significativamente poco intensa all'interno del tendine, per cui non vengono osservate le onde riflesse lungo i bordi.

La tecnica *SSI* prevede la generazione dell'onda di taglio grazie alla forza radiale impressa da un fascio ultrasonico focalizzato, emesso dalla sonda ecografica all'interno del tessuto. La propagazione della shear wave avviene, rispetto alla sonda, muovendosi da una delle sue estremità verso l'altra (fig 9.1¹⁴).

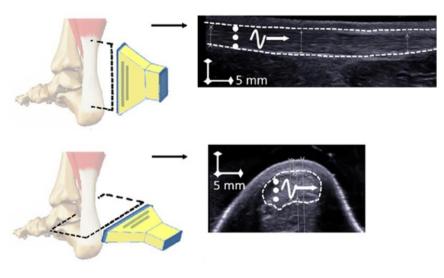


Fig 9.1

La sonda, una volta emesso l'impulso focalizzato, si pone in modalità B-mode, acquisendo una serie temporale di immagini relative ad una roi posizionata all'interno del tendine: il video degli spostamenti così ottenuto viene poi ridotto ad una singola immagine bidimensionale fissando la coordinata di profondità x_1 .

Alle immagini così ottenute viene poi applicata la trasformata di Fourier bidimensionale: le due immagini vengono visualizzate ed analizzate nel domino della frequenza (temporale per le ascisse e spaziale per le ordinate). Questo step è rappresentato in figura 9.2 dalle quattro immagini centrali. Per queste due immagini viene ricavato, per ciascuno dei valori della frequenza temporale, il valore di frequenza spaziale per cui la trasformata di Fourier è massima. Viene quindi estratta una prima curva, che riporta la frequenza spaziale in funzione di quella temporale. Per ogni valore della frequenza temporale risulta immediato il calcolo della lunghezza d'onda, che ne è il valore reciproco.

Finalmente, può essere ora estratta la velocità di fase dell'onda di taglio (v, espressa in m/s, per ogni valore della frequenza temporale, moltiplicando la lunghezza d'onda estratta per il valore di frequenza temporale stesso, e viene ricavata la curva.

Viene ripetuta questa operazione per ogni valore di profondità x_1 all'interno della roi: si ottiene quindi la curva di dispersione finale, che rappresenta il valor medio e la deviazione standard delle velocità di fase in funzione della frequenza temporale dell'onda di taglio (fig 9.1¹⁴, figure a destra).

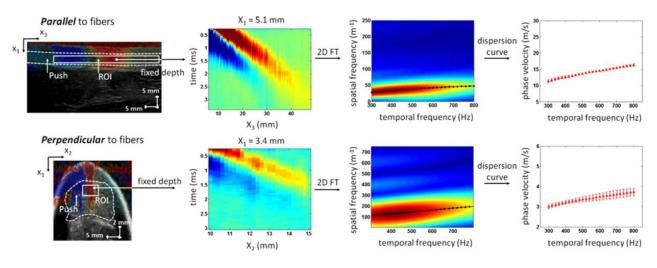


Fig 9.2

9.2 Acquisizione ed analisi dei dati elastosonografici

Come già detto nell'introduzione e nel primo capitolo, insieme all'acquisizione delle 112 immagini B-mode, presso Isokinetic, sono state anche state acquisite 112 immagini elastosonografiche. Per ognuna di queste immagini, sono stati ricavati da tre piccole roi circolari (posizionate all'interno del tendine rappresentato, una a sinistra, una in centro e una a destra), i parametri elastosonografici relativi a tali roi (fig 9.3). Tali parametri sono statistici: ognuno di essi (velocità di propagazione della shear wave e modulo elastico) viene calcolato in relazione ad un singolo pixel, poi mediato per il numero di pixel contenuto nella roi.

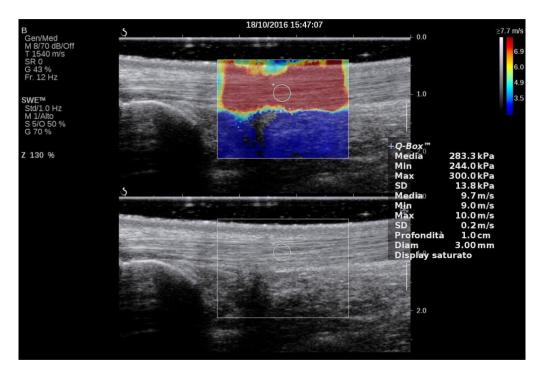


Fig 9.3

Si è voluto in parte ripetere un esperimento già effettuato da Aubry et al nel 2014². In questo, sono stati acquisiti i dati elastosonografici relativi al tendine d'Achille di 80 volontari sani (160 tendini sani) e di 25 pazienti sintomatici (di questi, 20 presentavano tendinopatia unilaterale, i restanti 5 tendinopatia bilaterale, per un totale di 30 tendini sintomatici; di questi, 6 tendini presentavano una parziale o totale lacerazione, che si rispecchia, nelle immagini elastosonografici, in una zona priva di segnale, e quindi non sono stati presi in considerazione. Solo 4 quattro dei 30 tendini sintomatici presentavano tendinopatia post chirurgica, come quella analizzata in questa tesi). I risultati mostrano una significativa diminuzione della velocità di propagazione delle shear waves assiali nei tendini patologici a riposo, e lo stesso si può dire sia per le priezioni assiali che sagittali nei tendini tesi².

Vi è un problema non trascurabile in queste immagini elastosonografiche, che affligge in modo drammatico l'intero esperimento. Tralasciando il fatto che in molti casi il display (la rappresentazione colorata dell'elastosonografia) risulta saturato, anche i parametri numerici stessi risultano in molti casi saturati. Si nota infatti come la massima velocità di propagazione delle shear waves media non supera mai, in nessun caso, i 10 m/s (più volte compare una velocità massima e media pari a 10 m/s, mentre il valore minimo a volte è inferiore a tale valore), mentre il valore di modulo elastico è affetto dallo stesso problema, ed il suo valore di saturazione corrisponde a 300 kPa. Tale situazione risulta essere in aperto contrasto con quanto osservato negli esperimenti pregressi: la velocità di propagazione media delle shear waves dovrebbe essere pari a circa 4-6 m/s per l'analisi in direzione trasversale e per l'analisi in direzione longitudinale con il tendine il posizione rilassata, mentre dovrebbe variare tra i 14 e i 16 m/s per i tendini in posizione tesa². Per quanto riguarda l'elasticità, essa dovrebbe variare tra i 400 e i 1300 kPa¹⁴.Con i dati raccolti presso Isokinetics, risulta, a causa della saturazione, impossibile raggiungere questi risultati.

Tale problema è doivuto al cattivo utilizzo dell'ecografo in fase di acquisizione dei risultati, essendo tutti gli operatori estranei alla macchina utilizzata ed essendo essi impossibilitati ad ottenere tutte le conoscenze adeguate per poterne garantire un utilizzo corretto.

In ogni caso, si è comunque voluto procedere ad una parziale analisi dei risultati, pur sapendo a priori che parte di essi fossero errati: essi sono raccolti nella tabella contenuta nella tabella 9.1, e raccolgono i dati relativi alla sola velocità di propagazione delle shear waves.

Il coefficiente di anisotropia riportato in tabella 9.1 è stato calcolato come segue:

$$Anisotropia = \frac{V_{Sagittale} - V_{Assiale}}{V_{Assiale}}$$

Si può notare che, in generale, la velocità di propagazione delle shear waves per il tendine teso è superiore a quella per il tandine rilassato. Qella relativa alle proiezioni longitudinali (sagittali) è maggiore di quella relativa alle proiezioni trasversali (assiali). Si noti in particolare la velocità massima relativa alle immagini che rappresentano il tendine teso in proiezione logitudinale, essa risulta essere per entrambe le porzioni del tendine pari a 10 m/s, ovvero pari al valore di saturazione.

		TENDINI SANI n = 27		TENDINI PATOLOGICI n = 15			
		V media	V min	V max	V media	V min	V max
RELAXED							
DISTAL	Sagittal	4,7481	3,2000	6,1000	4,4067	2,3000	7,4000
	Axial	3,8963	2,9000	4,9000	4,2800	3,1000	5,6000
	Anisotropia	0,2186	0,1034	0,2449	0,0296	-0,2581	0,3214
RELAXED							
MIDPORTION	Sagittal	5,9111	4,4000	8,9000	5,5400	1,8000	9,8000
	Axial	3,8370	2,7000	6,0000	4,4933	3,6000	5,6000
	Anisotropia	0,5406	0,6296	0,4833	0,2329	-0,5000	0,7500
STRETCHED							
DISTAL	Sagittal	7,5259	4,1000	10,0000	6,2000	3,5000	9,8000
	Axial	4,1259	3,3000	6,3000	5,2267	2,9000	9,1000
	Anisotropia	0,8240	0,2424	0,5873	0,1862	0,2069	0,0769
STRETCHED							
MIDPORTION	Sagittal	7,5519	5,3000	10,0000	6,4000	2,3000	9,9000
	Axial	4,0259	2,6000	9,0000	5,2867	3,4000	7,3000
	Anisotropia	0,8758	1,0385	0,1111	0,2106	-0,3235	0,3562

TAB 9.1

La porzione di tendine interessata non è invece molto rilevante, anche se risultano essere lievemente superiori quelle relative alla porzione mediale rispetto a quelle relative alla porzione distale. Nei tendini post operati, le velocità di propagazione valutate per le proiezioni longitudinali dei tendini sono lievemente inferiori rispetto a quelle estrapolate per i tendini sani (questa situazione risulta accentuata per i tendini tesi); mentre per le proiezioni trasversali la situazione è ribaltata. Questi risultati non sono in nessun caso paragonabili a quelli ottenuti negli esperimenti pregressi nel campo.

CONCLUSIONI

I due obiettivi, per così dire, secondari, di questa tesi, ovvero la correlazione dello stato fisiopatologico del tendine con i dati estratti dall'analisi di tessitura con quelli ottenuti tramite l'elastosonografia quantitativa non hanno purtroppo condotto ai risultati sperati.

Per quanto riguarda la *texture analysis*, la grande variabilità che affligge i descrittori di tessitura non consente, attualmente, di definire un ruolo preciso di questi parametri nella caratterizzazione del tendine. Alcuni sembrano avere rilevanza, ma occorrerebbe, prima di giungere ad una tale sintesi, effettuare l'analisi su un numero di immagini notevolmente più elevato, in modo da poter effettuare un'accurata indagine statistica che possa permette l'esclusione dell'ipotesi nulla. [balestra]

La stessa cosa, con risultati peggiori, si può dire per l'analisi dei valori delle *shear waves* calcolate tramite l'elastosonografia real time. Come già detto, la scarsa conoscenza della macchina ecografica e la scarsa conoscenza della tecnica *SWE*, completamente nuova anche per gli operatori esperti che hanno effettuato le acquisizioni, hanno influito negativamente sull'esito della prova (risulta spesso un errore non voluto legato alla presenza di un limite di saturazione). In ogni caso, anche se questo errore fosse ininfluente, i dati utilizzati sono comunque insufficenti per poter definire un effettiva validità statistica dei campioni estratti.

Per quanto riguarda invece l'obiettivo principale della tesi, ovvero la stesura del codice di segmentazione automatica 2D del tendine, i risultati ottenuti sono ottimali. I tendini, sia sani che affetti, risultano adeguatamente segmentati nella quasi totalità dei casi. Ci sono buone possibilità che, data in ingresso al codice un immagine ecografica qualsiasi, in cui è rappresentato il tendine d'Achille in proiezione longitudinale, la segmentazione risulti corretta.

I risultati migliorano ancora, in termini di riproducibilità, con il codice di segmentazione creato appositamente per i soli tendini sani. L'utilizzo di questo secondo codice in un sistema *CAD* sarebbe però limitato, in quanto esso dovrebbe prevedere ogni possibile situazione fisiopatologica, inclusa la condizione post chirurgica.

In ogni caso, l'ambito obiettivo della definizione di un metodo totalmente automatico per la diagnosi e il monitoraggio del processo di guarigione dei tendini è ancora molto lontano. La segmentazione automatica è stata implementata con discreto successo, ma senza la definizione di parametri il cui valore possa essere correlato con lo stato strutturale, meccanico o fisiopatologico del tendine, la sua utilità resta confinata in ambiti molto ristretti.

L'unico valore di questo tipo veramente rilevante, capace di discernere totalmente e senza errori tra tendine sano e tendine affetto, è lo spessore del tendine.

L'analisi delle immagini acquisite in proiezione trasversali invece, non è ancora stata effettuata, per questioni legate alla difficoltà di segmentazione di tali immagini, che già ad occhio nudo appaiono molto meno nitide di quelle longitudinali. La loro segmentazione automatica non è impossibile, ma le tecniche alla base del processo di elaborazione numerica dovrebbero essere differenti da quelle utilizzate in questa tesi.

FONTI

- 1. https://www.ondedurto.biz/patologie-trattabili/achillodinia/.
- 2. Aubry S, Nueffer J-P, Tanter M, Becce F, Vidal C, Michel F. Viscoelasticity in Achilles Tendonopathy: Quantitative Assessment by Using Real-time Shear-Wave Elastography. *Radiology*. 2015;274(3):821-829. doi:10.1148/radiol.14140434
- 3. http://doloreesport.it/?page_id=26, 08/03.
- 4. Frizziero A, Frizziero A. Tendinopatie: stato dell'arte e prospettive.
- 5. https://www.supersonicimagine.com/Aixplorer-R/.
- 6. http://www.corriere.it/salute/dizionario/tendine/index.shtml.
- 7. http://www.noene-italia.com/tendini/.
- 8. http://lnx.allergoline.net/wp-content/uploads/2016/07/Tendon-fibril-structure2.jpg.
- 9. Stanfield C, German W. Fisiologia. (Edises, ed.).; 2009.
- 10. http://www.ingbiomedica.unina.it/studenti/ing_bio/mat_did/BIOMAT/11-1 Tendini e Legamenti.pdf.
- 11. http://www.treccani.it/enciclopedia/tendine/.
- 12. http://www.my-personaltrainer.it/tendini.htm.
- 13. Maganaris C, Narici M. Mechanical Properties of Tendons. In: *Tendon Injuries Basic Science and Clinical Medicine*.; 2005. http://eknygos.lsmuni.lt/springer/442/14-21.pdf.
- 14. Brum J, Bernal M, Gennisson JL, Tanter M. In vivo evaluation of the elastic anisotropy of the human Achilles tendon using shear wave dispersion analysis. *Phys Med Biol*. 2014;59(3):505-523. doi:10.1088/0031-9155/59/3/505
- 15. http://www.fisioterapia-maniscalco.it/patologie/tendinopatie-tendiniti-tendinosi-tenosinoviti/.
- 16. http://www.fisioterapia-maniscalco.it/wp-content/uploads/2014/08/tendinopatia1.jpg.
- 17. Egger A, Berkowitz M. Achilles tendon injuries. 2017. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5344857/#.
- 18. data:image/jpeg;base64,/9j/4AAQSkZJRgABAQAAAQABAAD/2wCEAAkGBw8REhETEhIVEhUSFxsSFhU WFRIYFRgWFRcWFhYWFxYYHighGBolGxUVITEhJSkrLi4uFx8zODMtNyktLisBCgoKDg0OGhAQGysdHR0 wKy0tKy4tLS4tLS0tLS0tLS0tLS0tLTAtKy0rLTctLS0tLS0tKy0tLS0tLS0tLS03Lf/AABEIAMcA/QMBIgACEQE DEQH/.
- 19. https://ortopediaborgotaro.it/otb-news/otb-news-per-il-paziente-ortopedia-borgotaro/306-il-trattamento-della-rottura-del-tendine-d-achille.
- 20. https://www.farmacoecura.it/malattie/tendine-dachille-rottura-infiammazione-e-dolore/.
- 21. https://www.sprintesport.it/sp/blogger/la-rottura-del-tendine-dachille-che-cosa-dobbiamo-sapere/.
- 22. http://www.kinemovecenter.it/wp-content/uploads/l-processi-di-guarigione-del-tendine2-1.pdf.
- 23. Coppini G, Diciotti S, Valli G. *Bioimmagini*. 3rd ed. (Pàtron, ed.).; 2013.

- 24. Materiale Didattico, Corso di Elaborazione di Immagini Mediche, Prof. Filippo Molinari, AA 2015/2016.
- 25. https://www.mathworks.com/help/images/morph12.gif.
- 26. Materiale didattico, Corso di Bioimmagini, Prof. Filippo Molinari, AA 2013/2014.
- 27. Lindeberg T. Scale-Space for Discrete Signals. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 1990;12(3):234-254. doi:10.1109/34.49051
- 28. Meiburger KM. Quantitative Ultrasound and Photoacoustic Imaging for the Assessment of Vascular Parameters. 2017;(March). doi:10.1007/978-3-319-48998-8
- 29. Molinari F, Caresio C, Acharya UR, Mookiah MRK, Minetto MA. Advances in Quantitative Muscle Ultrasonography Using Texture Analysis of Ultrasound Images. *Ultrasound Med Biol*. 2015;41(9):2520-2532. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2015.04.021
- 30. http://www.ino.it/home/cosimo/EI/08Tessitura_parte2.ppt.
- 31. Haralick R, Shanmugan K, Dinstein I. Textural features for image classification. *IEEE Trans Syst Man Cybern*. 1973;3:610-621. doi:10.1109/TSMC.1973.4309314
- 32. Galloway MM. Texture analysis using gray level run lengths. *Comput Graph Image Process*. 1975;4(2):172-179. doi:10.1016/S0146-664X(75)80008-6

APPENDICI

APPENDICE A

In questa appendice vengono riportate le 56 immagini di cui si è parlato nel primo capitolo di questa tesi, e sulle base delle quali è stato implementato il codice di segmentazione automatica descritto nel capitolo 5. Per ogni figura è riportata a sinistra l'immagine originale estratta dal paziente, a destra il risultato della segmentazione automatica. Ogni pagina contiene le immagini relative ad un tendine diverso.

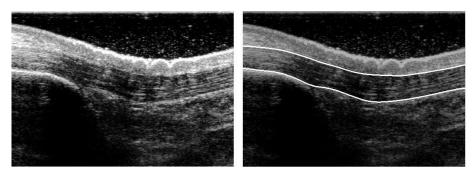


IMMAGINE C1L1

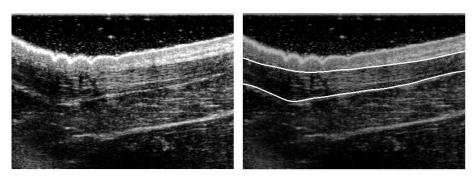


IMMAGINE C1L2

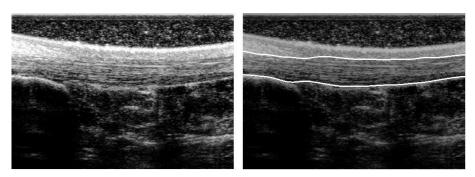


IMMAGINE C1L3

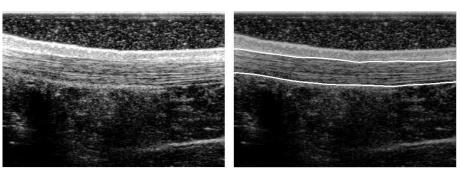


IMMAGINE C1L4

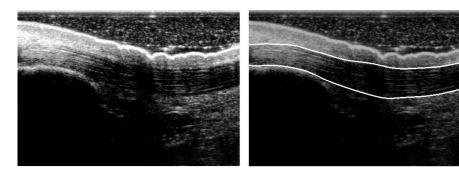


IMMAGINE C1L5

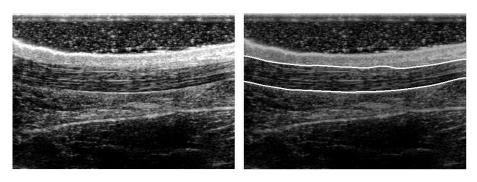


IMMAGINE C1L6

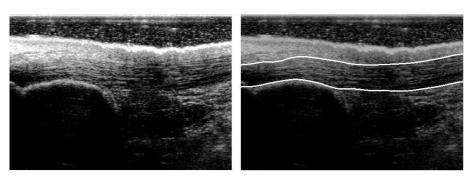


IMMAGINE C1L7

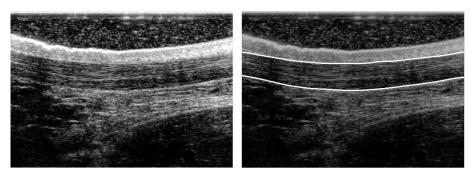


IMMAGINE C1L8

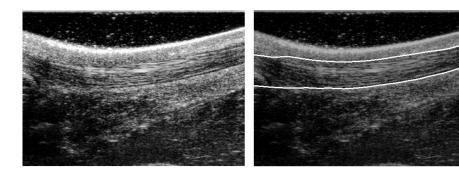


IMMAGINE C2L1

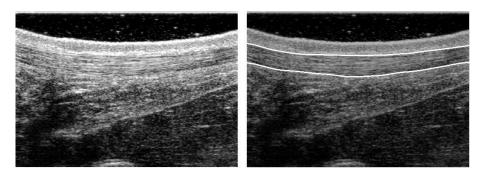


IMMAGINE C2L2

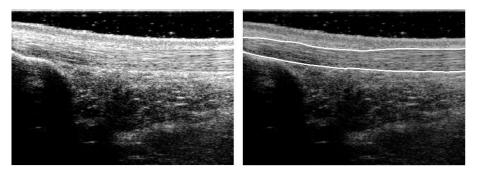


IMMAGINE C2L3

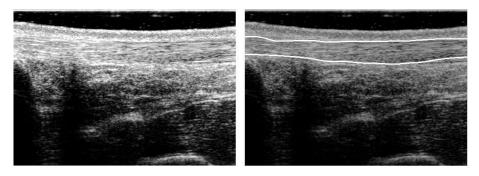
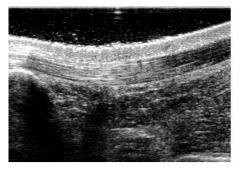


IMMAGINE C2L4



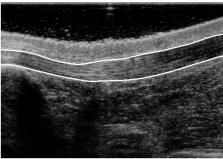


IMMAGINE C2L5



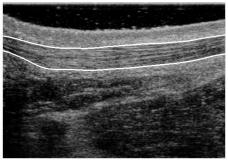


IMMAGINE C2L6



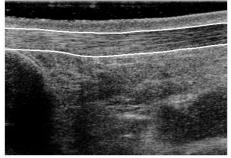
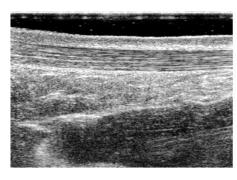


IMMAGINE C2L7



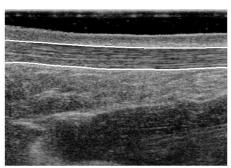


IMMAGINE C2L8



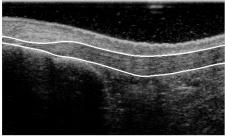


IMMAGINE P1L1



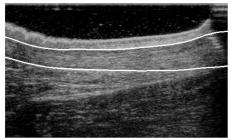
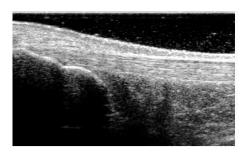


IMMAGINE P1L2



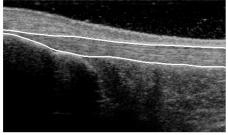
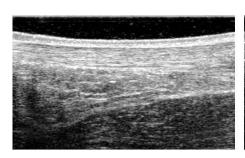


IMMAGINE P1L3



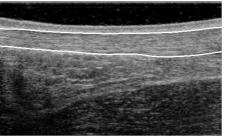


IMMAGINE P1L4



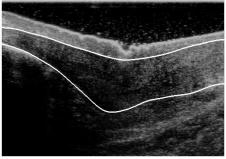
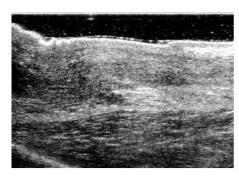


IMMAGINE P1L5



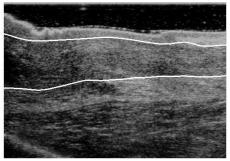
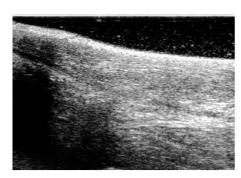


IMMAGINE P1L6



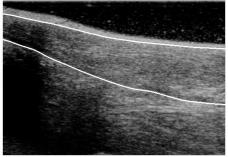


IMMAGINE P1L7



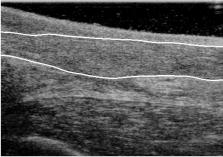


IMMAGINE P1L8

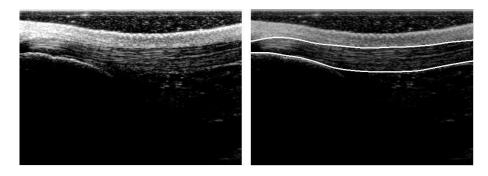


IMMAGINE P2L1

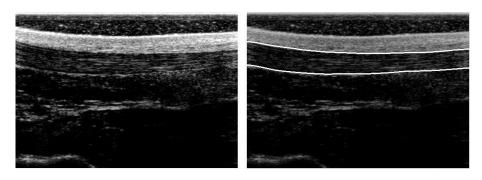


IMMAGINE P2L2

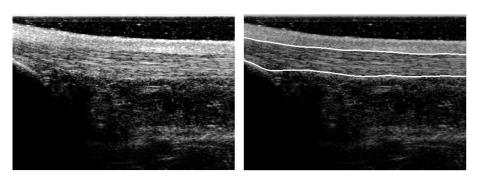


IMMAGINE P2L3

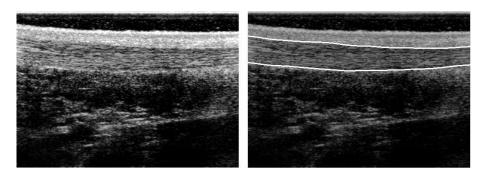


IMMAGINE P2L4

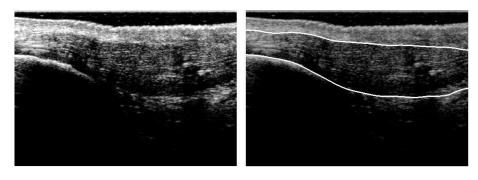


IMMAGINE P2L5

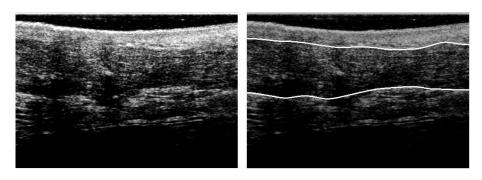


IMMAGINE P2L6

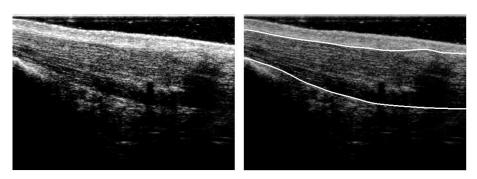


IMMAGINE P2L7

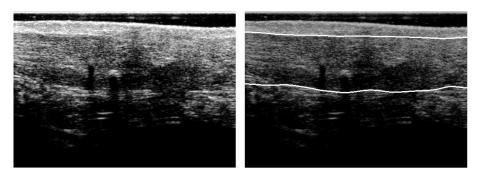
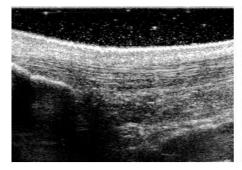


IMMAGINE P2L8



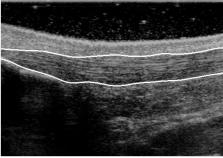
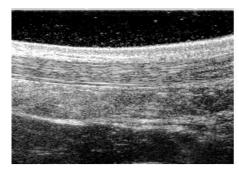


IMMAGINE P3L1



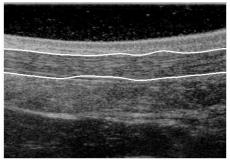


IMMAGINE P3L2



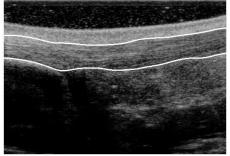
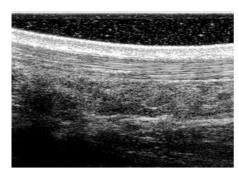


IMMAGINE P3L3



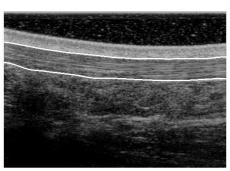


IMMAGINE P3L4



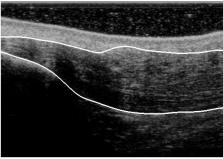


IMMAGINE P3L5



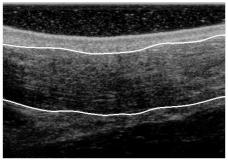


IMMAGINE P3L6





IMMAGINE P3L7





IMMAGINE P3L8



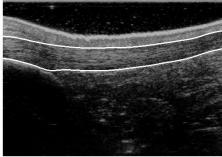


IMMAGINE P4L1



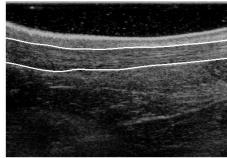


IMMAGINE P4L2



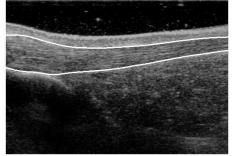
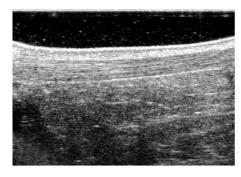


IMMAGINE P4L3



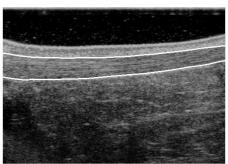


IMMAGINE P4L4

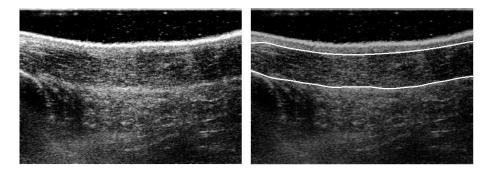


IMMAGINE P4L5

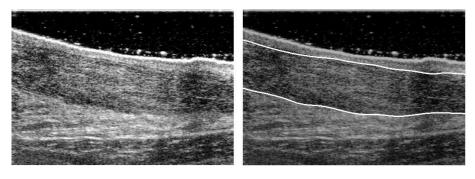


IMMAGINE P4L6

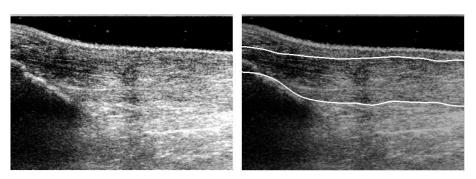


IMMAGINE P4L7

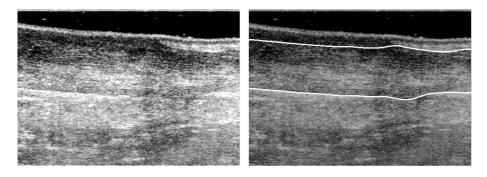


IMMAGINE P4L8

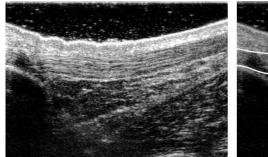
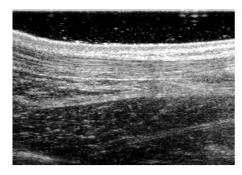




IMMAGINE P5L1



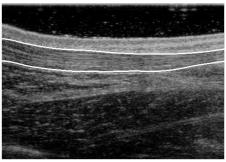


IMMAGINE P5L2



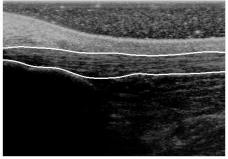
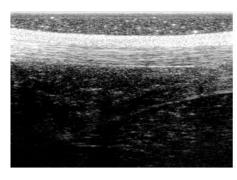


IMMAGINE P5L3



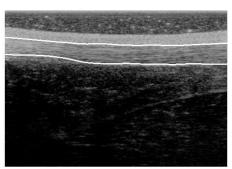
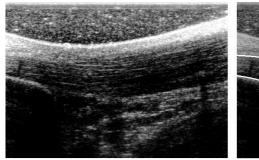


IMMAGINE P5L4



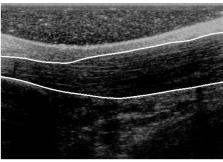
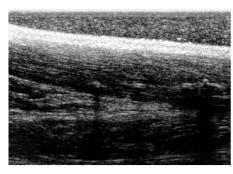


IMMAGINE P5L5



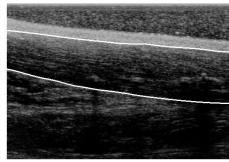


IMMAGINE P5L6



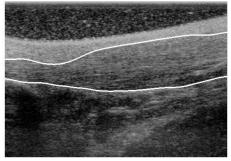
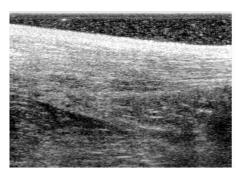


IMMAGINE P5L7



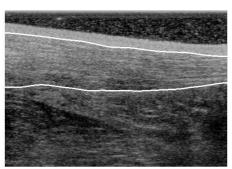


IMMAGINE P5L8

APPENDICE B

In questa appendice vengono riportati i risultati, sotto forma di tabelle, della validazione del codice di segmentazione automatica. Ogni tabella rappresenta un diverso operatore.

HDM PDM CDM HDM PDM C1L1 0,481 0,164 0,181 0,783 0,228 C1L2 0,613 0,298 0,342 0,701 0,247 C1L3 0,608 0,330 0,334 0,388 0,092 C1L4 0,510 0,176 0,219 0,760 0,131 C1L5 0,819 0,361 0,395 0,749 0,162 C1L6 0,989 0,361 0,401 0,430 0,159 C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278 C2L5 0,890	
C1L2 0,613 0,298 0,342 0,701 0,247 C1L3 0,608 0,330 0,334 0,388 0,092 C1L4 0,510 0,176 0,219 0,760 0,131 C1L5 0,819 0,361 0,395 0,749 0,162 C1L6 0,989 0,361 0,401 0,430 0,159 C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	CDM
C1L2 0,613 0,298 0,342 0,701 0,247 C1L3 0,608 0,330 0,334 0,388 0,092 C1L4 0,510 0,176 0,219 0,760 0,131 C1L5 0,819 0,361 0,395 0,749 0,162 C1L6 0,989 0,361 0,401 0,430 0,159 C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,242
C1L3 0,608 0,330 0,334 0,388 0,092 C1L4 0,510 0,176 0,219 0,760 0,131 C1L5 0,819 0,361 0,395 0,749 0,162 C1L6 0,989 0,361 0,401 0,430 0,159 C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,280
C1L5 0,819 0,361 0,395 0,749 0,162 C1L6 0,989 0,361 0,401 0,430 0,159 C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,098
C1L5 0,819 0,361 0,395 0,749 0,162 C1L6 0,989 0,361 0,401 0,430 0,159 C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,139
C1L6 0,989 0,361 0,401 0,430 0,159 C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,162
C1L7 1,673 0,790 0,795 0,989 0,352 C1L8 0,650 0,276 0,287 0,645 0,112 C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,178
C2L1 1,360 0,701 0,755 2,966 0,617 C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,358
C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,105
C2L2 0,680 0,236 0,257 0,608 0,167 C2L3 0,760 0,237 0,235 0,925 0,275 C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,593
C2L4 0,510 0,229 0,241 0,819 0,278	0,186
	0,295
C2L5 0,890 0,330 0,375 0,808 0,160	0,300
	0,178
C2L6 1,749 0,426 0,418 1,388 0,330	0,345
C2L7 0,776 0,371 0,399 0,837 0,292	0,316
C2L8 0,443 0,201 0,217 0,684 0,149	0,142
P1L1 0,594 0,168 0,193 0,760 0,245	0,256
P1L2 0,548 0,200 0,226 1,313 0,232	0,228
P1L3 0,388 0,094 0,102 0,760 0,152	0,164
P1L4 0,538 0,163 0,174 0,548 0,210	0,233
P1L5 0,794 0,238 0,260 1,494 0,548	0,565
P1L6 0,916 0,481 0,505 2,738 2,166	2,204
P1L7 1,915 0,965 0,989 0,916 0,245	0,264
P1L8 3,498 1,058 1,004 1,377 0,403	0,432
P2L1 0,760 0,282 0,318 0,538 0,172	0,198
P2L2 0,689 0,174 0,184 1,348 0,682	0,716
P2L3 0,487 0,250 0,271 1,447 0,806	0,847
P2L4 0,487 0,161 0,173 0,867 0,355	0,360
P2L5 2,207 0,609 0,621 2,565 0,471	0,464
P2L6 0,953 0,604 0,618 2,029 1,028	1,049
P2L7 1,775 0,455 0,454 3,603 0,817	0,809
P2L8 0,443 0,134 0,146 1,749 0,518	0,496
P3L1 1,259 0,523 0,561 0,860 0,203	0,189
P3L2 1,295 0,536 0,582 0,717 0,247	0,264
P3L3 1,226 0,472 0,496 1,515 0,428	0,433
P3L4 0,764 0,380 0,411 0,554 0,179	0,181
P3L5 2,069 0,599 0,645 0,721 0,167	0,172
P3L6 1,780 0,755 0,803 1,597 0,388	0,389
P3L7 0,717 0,205 0,211 1,023 0,516	0,551
P3L8 0,925 0,506 0,533 1,328 0,354	0,340
P4L1 2,281 0,720 0,731 0,989 0,340	0,365
P4L2 0,532 0,153 0,175 0,684 0,224	0,229
P4L3 1,611 0,552 0,575 0,760 0,295	0,326
P4L4 0,783 0,317 0,344 0,654 0,226	0,227
P4L5 1,075 0,363 0,389 0,684 0,185	0,199
P4L6 1,498 0,512 0,503 0,680 0,220	0,213
P4L7 2,327 1,011 1,019 2,700 1,095	1,076
P4L8 1,901 1,170 1,175 1,313 0,439	0,452
P5L1 0,680 0,306 0,329 1,163 0,444	0,485
P5L2 0,608 0,247 0,252 0,481 0,165	0,183
P5L3 0,721 0,157 0,155 0,890 0,416	0,463
P5L4 0,887 0,427 0,455 1,850 1,116	1,162
P5L5 1,688 0,802 0,843 0,760 0,189	0,196
P5L6 0,860 0,443 0,465 0,680 0,172	0,181
P5L7 2,915 0,973 1,009 0,867 0,359	0,391
P5L8 0,684 0,241 0,254 2,662 0,465	0,451

TAB B.1: OPERATORE N 1

Immagine	Pro	filo Superiore (ı	mm)	Profilo Inferiore (mm)			
agc	HDM	PDM	CDM	HDM	PDM	CDM	
	0,388	0,119	0,137	0,579	0,130	0,149	
C1L1	0,380	0,119	0,137	0,913	0,163	0,149	
C1L2	0,380	0,085	0,037	0,627	0,103	0,180	
C1L4	0,788	0,293	0,313	0,608	0,203	0,169	
C1L5	0,388	0,131	0,148	0,554	0,130	0,109	
C1L5	0,443	0,148	0,130	0,380	0,232	0,291	
C1L7	0,403	0,117	0,130	1,445	0,129	0,131	
C1L7	0,538	0,173	0,134	0,388	0,497	0,074	
C2L1	1,181	0,113	0,592	2,586	0,432	0,398	
C2L1	0,594	0,164	0,332	0,608	0,432	0,134	
C2L2	0,534	0,155	0,186	0,510	0,119	0,134	
C2L4	0,837	0,155	0,260	0,840	0,306	0,309	
C2L4	1,107	0,327	0,200	0,613	0,300	0,303	
C2L5	1,825	0,327	0,405	0,890	0,145	0,181	
C2L7	0,380	0,050	0,403	0,830	0,216	0,244	
C2L8	0,463	0,062	0,057	0,608	0,210	0,184	
P1L1	0,760	0,002	0,142	0,008	0,199	0,134	
P1L2	0,750	0,132	0,116	1,808	0,301	0,324	
P1L3	0,334	0,132	0,110	0,532	0,301	0,324	
P1L3 P1L4	0,608	0,110	0,120	0,613	0,089	0,102	
P1L4 P1L5	0,608	0,080	0,083	1,247	0,208	0,290	
P1L5 P1L6	1,217	0,132		2,818		2,274	
	1,453		0,262		2,213		
P1L7 P1L8	3,194	0,671	0,678 0,970	0,594 0,916	0,239 0,281	0,262 0,344	
P1L8 P2L1		0,998		i	0,251		
P2L1 P2L2	0,380 0,410	0,091 0,111	0,110 0,121	0,992 0,680	0,238	0,298 0,220	
P2L2 P2L3	0,410	0,111	0,121	1,915	0,450	0,220	
P2L3 P2L4							
P2L4 P2L5	0,410 2,894	0,089 0,635	0,116 0,613	0,380 2,048	0,094 0,532	0,100 0,534	
P2L5 P2L6	2,309	1,109	1,141	0,650	0,332	0,334	
P2L7	0,962			0,650			
P2L7	0,627	0,342 0,277	0,386 0,301	1,901	0,301 0,372	0,334 0,368	
P3L1	0,027	0,399	0,450	0,890	0,372	0,350	
P3L1	0,721	0,399	0,430	0,890	0,318	0,330	
P3L2	1,075	0,220	0,233	1,348	0,408	0,452	
P3L4	0,794	0,230	0,382	0,890	0,408	0,452	
P3L4 P3L5	1,295	0,533	0,542	0,890	0,400	0,401	
P3L5	0,749	0,333	0,344	0,721	0,230	0,270	
P3L7	0,776	0,275	0,309	1,398	0,312	0,292	
P3L8	1,020	0,273	0,309	0,753	0,291	0,232	
P4L1	1,977	0,438	0,361	0,613	0,261	0,280	
P4L2	0,890	0,453	0,498	0,013	0,108	0,230	
P4L3	0,830	0,310	0,438	0,443	0,152	0,127	
P4L4	0,340	0,089	0,095	0,410	0,132	0,131	
P4L5	0,749	0,250	0,253	1,089	0,645	0,690	
P4L5	0,749	0,230	0,255	0,627	0,043	0,090	
P4L0 P4L7	2,814	1,008	1,009	1,977	0,179	0,203	
P4L7 P4L8	1,597	1,115	1,178	0,554	0,443	0,482	
P5L1	1,089	0,308	0,318	0,840	0,163	0,183	
P5L1 P5L2	0,532	0,308	0,318	0,840	0,201	0,302	
P5L2 P5L3	0,332	0,176		1,238	0,313	0,327	
P5L3 P5L4		0,145	0,158			-	
P5L4 P5L5	0,867	0,431	0,470	0,749 0,538	0,331 0,179	0,358	
	1,974		0,977	· · ·		0,205	
P5L6 P5L7	0,627 2,590	0,341 0,876	0,362 0,868	0,794 0,749	0,244 0,276	0,265 0,310	
P5L7 P5L8							
POLO	1,238	0,810	0,874	0,760	0,387	0,424	

TAB B.2: OPERATORE N 2

Immagine	Profil	o Superiore (m	m)	Profilo Inferiore (mm)			
-	HDM	PDM	CDM	HDM PDM CDM			
C1L1	0,430	0,076	0,093	0,443	0,121	0,150	
C1L2	0,684	0,229	0,241	0,532	0,141	0,163	
C1L3	0,867	0,353	0,369	0,388	0,057	0,080	
C1L4	0,430	0,139	0,150	0,608	0,107	0,102	
C1L5	0,608	0,212	0,230	0,388	0,082	0,094	
C1L6	0,481	0,138	0,151	0,430	0,085	0,109	
C1L7	0,689	0,202	0,226	0,783	0,153	0,156	
C1L8	0,538	0,151	0,166	0,388	0,075	0,090	
C2L1	1,067	0,639	0,675	2,357	0,268	0,253	
C2L2	0,410	0,158	0,177	0,487	0,149	0,172	
C2L3	0,443	0,163	0,180	0,388	0,087	0,099	
C2L4	0,850	0,238	0,259	0,808	0,201	0,204	
C2L5	0,749	0,235	0,264	0,867	0,100	0,097	
C2L6	0,760	0,144	0,161	0,613	0,135	0,167	
C2L7	0,760	0,220	0,230	0,579	0,180	0,202	
C2L7	0,443	0,109	0,230	0,373	0,130	0,202	
P1L1	0,548	0,129	0,132	0,579	0,120	0,129	
P1L2	0,613	0,169	0,132	0,749	0,149	0,123	
P1L2 P1L3	0,456	0,109	0,183	0,749	0,149	0,141	
P1L3 P1L4	0,430	0,065	0,087	0,410	0,088	0,103	
P1L4 P1L5	0,548	0,003	0,075	1,302	0,179	0,196	
P1L5 P1L6	0,548	0,132		3,226	2,718	2,743	
P1L0 P1L7	0,941	0,400	0,482	0,701	0,107		
P1L7 P1L8	3,498	1,066	1,030	1,443	0,107	0,109 0,504	
		-					
P2L1 P2L2	0,594 0,532	0,128 0,106	0,139	0,388 0,487	0,092 0,112	0,108 0,124	
P2L2 P2L3	0,332	0,100	0,116	i	0,112	0,124	
P2L3 P2L4	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		0,122	1,067			
P2L4 P2L5	0,627	0,145 0,660	0,163	0,532	0,122 0,166	0,120 0,194	
P2L5 P2L6	2,990 0,887	0,000	0,664	0,749	0,100		
			0,240	1,377		0,404	
P2L7 P2L8	0,456 0,650	0,136	0,149	0,613 1,293	0,133 0,282	0,139	
· ·		0,192	0,210			0,266	
P3L1	1,254	0,600	0,626	0,532	0,173	0,181	
P3L2	0,925	0,289	0,305	0,850	0,337	0,357	
P3L3	0,916	0,289	0,307	0,837	0,208	0,225	
P3L4	0,689	0,176	0,184	0,680 1,034	0,186	0,202	
P3L5	1,065	0,390	0,388		0,198	0,220	
P3L6	1,528 0,654	0,726	0,733	0,764 1,299	0,241 0,289	0,265	
P3L7		0,255	0,287			0,287	
P3L8	0,721	0,208	0,228	0,645	0,196	0,209	
P4L1	0,594	0,207	0,229	0,689	0,153	0,165	
P4L2	0,608	0,215	0,230	0,548	0,134	0,139	
P4L3	1,903	0,484	0,481	0,608	0,106	0,119	
P4L4	0,380	0,083	0,085	0,717	0,154	0,161	
P4L5	1,202	0,736	0,767	0,764	0,202	0,218	
P4L6	1,143	0,380	0,400	0,554	0,193	0,204	
P4L7	2,879	1,586	1,578	2,205	0,380	0,368	
P4L8	1,901	0,822	0,835	0,689	0,128	0,142	
P5L1	0,650	0,211	0,224	0,443	0,138	0,153	
P5L2	0,701	0,238	0,246	0,548	0,207	0,227	
P5L3	0,749	0,358	0,391	1,238	0,384	0,434	
P5L4	0,388	0,097	0,106	0,992	0,274	0,280	
P5L5	1,015	0,407	0,425	0,645	0,107	0,118	
P5L6	0,608	0,137	0,142	0,919	0,263	0,283	
P5L7	1,453	0,498	0,511	0,554	0,174	0,193	
P5L8	0,819	0,250	0,267	0,721	0,274	0,278	

TAB B.3: OPERATORE N 3

APPENDICE C

In questa appendice vengono riportati i descrittori di tessitura, calcolati come descritto nel capitolo 8. ROI GLOBALE

Image	First Order Features										
	Mean	St Deviation	Variance	Skewness	Kurtosis	Entropy					
C1L1	85,673	52,350	2740,573	0,514	2,529	7,612					
C1L2	75,404	48,788	2380,311	0,378	2,449	7,461					
C1L3	126,449	45,982	2114,306	-0,158	2,737	7,517					
C1L4	133,718	41,498	1722,057	-0,109	3,032	7,381					
C1L5	56,961	62,013	3845,643	1,120	3,184	7,047					
C1L6	79,046	44,852	2011,669	0,496	2,784	7,413					
C1L7	72,573	50,596	2560,005	0,508	2,540	7,452					
C1L8	77,622	42,870	1837,836	0,516	2,995	7,360					
C2L1	105,095	48,846	2385,944	0,069	2,347	7,593					
C2L2	155,405	38,043	1447,283	-0,313	2,975	7,257					
C2L3	170,711	40,000	1599,999	-0,608	3,353	7,276					
C2L4	181,481	35,867	1286,437	-0,527	3,386	7,110					
C2L5	121,603	56,768	3222,604	-0,081	2,311	7,775					
C2L6	155,104	43,542	1895,921	-0,423	2,984	7,426					
C2L7	150,904	50,080	2507,982	-0,419	2,595	7,576					
C2L8	145,276	38,692	1497,039	0,004	2,842	7,276					
P1L1	139,741	36,624	1341,340	0,103	3,218	7,198					
P1L2	148,182	48,176	2320,944	-0,737	3,449	7,500					
P1L3	177,826	29,000	840,992	-0,134	3,124	6,869					
P1L4	191,636	27,490	755,706	-0,192	3,056	6,774					
P1L5	79,210	57,631	3321,375	0,517	2,251	7,598					
P1L6	117,943	55,499	3080,094	-0,310	2,317	7,702					
P1L7	148,092	53,418	2853,484	-0,688	3,274	7,627					
P1L8	162,552	32,716	1070,363	-0,247	3,255	7,043					
P2L1	60,770	46,517	2163,848	0,889	3,455	7,274					
P2L2	42,683	35,691	1273,843	1,327	5,739	6,811					
P2L3	125,021	42,564	1811,658	-0,149	2,607	7,403					
P2L4	117,542	38,438	1477,473	-0,080	2,780	7,273					
P2L5	62,956	58,554	3428,627	0,985	3,338	7,207					
P2L6	54,461	47,217	2229,489	0,863	3,251	7,021					
P2L7	68,705	56,071	3143,914	0,524	2,467	7,178					
P2L8	87,647	55,317	3059,948	0,141	2,090	7,572					
P3L1	130,663	43,378	1881,666	-0,142	2,631	7,452					
P3L2	145,892	36,724	1348,677	-0,186	3,251	7,205					
P3L3	148,933	44,450	1975,823	-0,013	2,814	7,463					
P3L4	156,251	31,238	975,818	-0,100	3,197	6,979					
P3L5	81,716	58,442	3415,516	0,544	2,497	7,633					
P3L6	89,101	55,851	3119,348	0,384	2,394	7,679					
P3L7	184,787	31,646	1001,470	-0,185	2,937	6,969					
P3L8	185,730	34,462	1187,615	-0,357	3,260	7,059					
P4L1	116,052	41,461	1719,036	0,045	2,512	7,376					
P4L2	118,362	41,923	1757,500	-0,126	2,758	7,382					
P4L3	150,729	36,879	1360,067	0,010	3,007	7,219					
P4L4	164,401	30,684	941,482	-0,075	3,257	6,961					
P4L5	71,818	44,920	2017,774	0,557	2,985	7,372					
P4L6	101,571	42,847	1835,870	0,093	2,596	7,419					
P4L7	125,682	57,391	3293,773	-0,246	2,291	7,762					
P4L8	137,184	58,046	3369,317	-0,289	2,317	7,775					
P5L1	129,566	42,757	1828,160	-0,254	2,977	7,431					
P5L2	152,339	35,449	1256,627	-0,449	3,405	7,130					
P5L3	96,931	46,334	2146,875	-0,160	2,350	7,446					
P5L4	183,060	34,269	1174,338	-0,280	2,950	7,078					
P5L5	48,824	48,764	2377,929	1,113	3,663	6,885					
P5L6	70,577	61,309	3758,816	0,740	2,600	7,418					
P5L7	137,875	43,294	1874,364	-0,291	2,708	7,429					
P5L8	167,830	40,534	1642,987	-0,294	2,836	7,334					

TAB C.1.1: ROI GLOBALE; DESCRITTORI DEL PRIMO ORDINE

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 0°										
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry					
C1L1	0,899	0,958	0,030	0,732	3,741	0,399					
C1L2	0,846	0,954	0,036	0,739	3,609	0,414					
C1L3	0,656	0,961	0,040	0,772	3,570	0,508					
C1L4	0,601	0,956	0,049	0,790	3,416	0,547					
C1L5	0,756	0,974	0,127	0,825	3,058	0,607					
C1L6	0,693	0,956	0,038	0,761	3,529	0,481					
C1L7	0,780	0,960	0,043	0,772	3,490	0,499					
C1L8	0,724	0,949	0,039	0,761	3,478	0,482					
C2L1	0,956	0,949	0,029	0,725	3,770	0,375					
C2L2	0,830	0,936	0,042	0,740	3,559	0,414					
C2L3	0,774	0,946	0,046	0,756	3,516	0,454					
C2L4	0,726	0,945	0,048	0,768	3,455	0,485					
C2L5	0,995	0,960	0,027	0,739	3,847	0,409					
C2L6	0,851	0,944	0,037	0,731	3,655	0,392					
C2L7	0,880	0,957	0,033	0,745	3,749	0,426					
C2L8	0,628	0,954	0,046	0,785	3,458	0,531					
P1L1	0,979	0,914	0,039	0,713	3,575	0,349					
P1L2	1,232	0,932	0,039	0,750	3,617	0,425					
P1L3	0,719	0,927	0,050	0,760	3,354	0,474					
P1L4	0,601	0,939	0,053	0,782	3,269	0,534					
P1L5	0,918	0,964	0,035	0,719	3,760	0,360					
P1L6	1,053	0,956	0,035	0,692	3,939	0,287					
P1L7	0,761	0,966	0,023	0,743	3,730	0,436					
P1L7 P1L8	1,088	0,884	0,034	0,692	3,532	0,430					
P2L1	0,840	0,949	0,042	0,791	3,308	0,538					
P2L1 P2L2	0,642	0,932	0,033	0,817	2,890	0,600					
P2L2 P2L3	0,937	0,935	0,035	0,725	3,662	0,800					
P2L3 P2L4	0,788	0,933	0,033	0,744	3,503						
P2L4 P2L5						0,433					
P2L5 P2L6	1,129 1,198	0,956 0,927	0,074 0,072	0,746 0,731	3,500 3,410	0,393 0,350					
P2L7											
P2L7 P2L8	1,153	0,950	0,070	0,747	3,507	0,398					
P2L8 P3L1	1,089	0,953	0,031	0,709	3,812	0,320					
	0,845	0,945	0,035	0,725	3,683	0,384					
P3L2	0,723	0,936	0,051	0,768	3,401	0,489					
P3L3	0,804	0,950	0,037	0,741	3,650	0,422					
P3L4	0,706	0,936	0,051	0,768	3,397	0,489					
P3L5	0,871	0,967	0,039	0,761	3,662	0,465					
P3L6	0,813	0,966	0,030	0,740	3,762	0,425					
P3L7	0,851	0,928	0,038	0,720	3,563	0,378					
P3L8	0,660	0,940	0,045	0,751	3,398	0,465					
P4L1	0,977	0,930	0,033	0,713	3,666	0,348					
P4L2	0,801	0,943	0,038	0,734	3,608	0,409					
P4L3	0,658	0,943	0,047	0,763	3,419	0,488					
P4L4	0,704	0,932	0,050	0,758	3,376	0,472					
P4L5	1,472	0,905	0,031	0,682	3,741	0,235					
P4L6	1,205	0,916	0,028	0,681	3,791	0,253					
P4L7	1,228	0,952	0,021	0,671	4,074	0,217					
P4L8	1,187	0,955	0,022	0,677	4,066	0,237					
P5L1	0,980	0,933	0,035	0,713	3,695	0,348					
P5L2	0,648	0,944	0,053	0,767	3,387	0,493					
P5L3	0,586	0,965	0,042	0,794	3,429	0,558					
P5L4	0,452	0,964	0,056	0,828	3,240	0,638					
P5L5	0,734	0,958	0,115	0,814	3,000	0,585					
P5L6	0,899	0,968	0,065	0,784	3,458	0,513					
P5L7	0,657	0,955	0,042	0,765	3,517	0,495					
P5L8	0,579	0,960	0,041	0,770	3,497	0,513					

TAB C.1.2: ROI GLOBALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (0°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 45°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	3,101	0,852	0,016	0,553	4,366	-0,316				
C1L2	2,991	0,834	0,021	0,569	4,198	-0,274				
C1L3	3,440	0,793	0,016	0,529	4,406	-0,424				
C1L4	3,855	0,713	0,018	0,516	4,340	-0,510				
C1L5	2,160	0,924	0,097	0,673	3,578	0,081				
C1L6	3,588	0,764	0,017	0,525	4,313	-0,450				
C1L7	2,830	0,854	0,024	0,580	4,153	-0,217				
C1L8	3,543	0,746	0,017	0,529	4,265	-0,433				
C2L1	3,889	0,791	0,013	0,515	4,498	-0,511				
C2L2	4,084	0,683	0,018	0,510	4,348	-0,554				
C2L3	4,474	0,686	0,017	0,495	4,402	-0,640				
C2L4	5,003	0,619	0,017	0,485	4,393	-0,731				
C2L5	3,042	0,879	0,014	0,556	4,507	-0,289				
C2L6	4,119	0,728	0,016	0,501	4,435	-0,583				
C2L7	4,860	0,762	0,013	0,490	4,628	-0,694				
C2L8	5,271	0,600	0,015	0,473	4,477	-0,800				
P1L1	3,326	0,702	0,021	0,529	4,179	-0,403				
P1L2	3,153	0,824	0,020	0,560	4,268	-0,268				
P1L3	3,956	0,591	0,021	0,509	4,177	-0,541				
P1L4	3,853	0,603	0,021	0,511	4,160	-0,523				
P1L5	2,461	0,903	0,023	0,594	4,214	-0,143				
P1L6	3,170	0,866	0,015	0,545	4,474	-0,351				
P1L7	2,773	0,875	0,018	0,561	4,373	-0,255				
P1L8	3,812	0,589	0,023	0,516	4,122	-0,503				
P2L1	3,413	0,784	0,027	0,560	4,071	-0,333				
P2L2	3,106	0,648	0,045	0,573	3,620	-0,273				
P2L3	5,522	0,615	0,014	0,469	4,518	-0,838				
P2L4	4,918	0,577	0,016	0,483	4,354	-0,731				
P2L5	3,678	0,854	0,055	0,597	4,040	-0,299				
P2L6	3,700	0,772	0,050	0,585	3,917	-0,330				
P2L7	3,745	0,836	0,054	0,598	4,057	-0,308				
P2L8	4,060	0,826	0,018	0,536	4,440	-0,492				
P3L1	3,671	0,757	0,016	0,519	4,392	-0,479				
P3L2	3,520	0,684	0,022	0,531	4,198	-0,428				
P3L3	3,010	0,811	0,018	0,548	4,326	-0,319				
P3L4	4,186	0,614	0,020	0,502	4,265	-0,584				
P3L5	2,252	0,912	0,026	0,618	4,169	-0,047				
P3L6	2,309	0,904	0,018	0,589	4,289	-0,125				
P3L7	2,914	0,754	0,020	0,548	4,158	-0,307				
P3L8	2,394	0,781	0,024	0,570	4,003	-0,183				
P4L1	3,618	0,738	0,017	0,522	4,328	-0,462				
P4L2	3,566	0,745	0,017	0,519	4,329	-0,465				
P4L3	2,950	0,742	0,022	0,547	4,153	-0,313				
P4L4	3,560	0,646	0,022	0,521	4,160	-0,459				
P4L5	4,149	0,729	0,018	0,525	4,279	-0,505				
P4L6	4,227	0,703	0,015	0,501	4,413	-0,589				
P4L7	4,233	0,835	0,013	0,506	4,678	-0,584				
P4L8	4,778	0,817	0,011	0,491	4,744	-0,692				
P5L1	3,554	0,754	0,017	0,525	4,345	-0,442				
P5L2	3,241	0,718	0,017	0,538	4,165	-0,442				
P5L3	3,198	0,805	0,023	0,545	4,278	-0,378				
P5L4	2,599	0,790	0,017	0,562	4,278	-0,333				
P5L4 P5L5	2,033	0,790	0,022	0,675	3,495	0,099				
P5L6	2,644	0,905	0,087	0,621	4,035	-0,093				
P5L0 P5L7	2,844	0,839	0,044	0,621	4,035	-0,093				
P5L7 P5L8	2,507	0,839	0,021	0,563	4,103	-0,154				

TAB C.1.3: ROI GLOBALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (45°)

131

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 90°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	2,646	0,875	0,017	0,570	4,308	-0,221				
C1L2	2,759	0,848	0,022	0,581	4,167	-0,218				
C1L3	3,105	0,814	0,017	0,538	4,365	-0,359				
C1L4	3,528	0,739	0,019	0,527	4,306	-0,444				
C1L5	1,610	0,944	0,100	0,688	3,524	0,168				
C1L6	3,339	0,783	0,017	0,533	4,289	-0,403				
C1L7	2,465	0,874	0,024	0,588	4,120	-0,160				
C1L8	3,207	0,773	0,018	0,538	4,234	-0,373				
C2L1	3,570	0,810	0,014	0,525	4,471	-0,453				
C2L2	3,799	0,706	0,018	0,518	4,321	-0,502				
C2L3	3,990	0,721	0,018	0,510	4,358	-0,545				
C2L4	4,792	0,636	0,017	0,491	4,373	-0,690				
C2L5	2,670	0,894	0,014	0,560	4,481	-0,242				
C2L6	3,882	0,745	0,016	0,510	4,411	-0,533				
C2L7	4,700	0,771	0,013	0,493	4,616	-0,674				
C2L8	4,921	0,629	0,015	0,478	4,451	-0,744				
P1L1	2,887	0,744	0,022	0,548	4,130	-0,306				
P1L2	2,405	0,866	0,020	0,569	4,233	-0,186				
P1L3	3,436	0,647	0,022	0,528	4,128	-0,428				
P1L4	3,580	0,632	0,021	0,518	4,134	-0,472				
P1L5	1,976	0,923	0,025	0,620	4,124	-0,017				
P1L6	2,686	0,887	0,016	0,568	4,403	-0,232				
P1L7	2,262	0,898	0,019	0,586	4,284	-0,129				
P1L8	3,161	0,662	0,025	0,538	4,053	-0,365				
P2L1	2,870	0,821	0,028	0,569	4,037	-0,263				
P2L2	2,722	0,702	0,047	0,581	3,593	-0,215				
P2L3	4,833	0,665	0,014	0,485	4,469	-0,715				
P2L4	4,507	0,617	0,017	0,493	4,322	-0,655				
P2L5	3,017	0,882	0,057	0,612	3,985	-0,198				
P2L6	2,931	0,822	0,053	0,605	3,852	-0,197				
P2L7	2,799	0,879	0,056	0,618	3,977	-0,157				
P2L8	3,446	0,853	0,019	0,555	4,381	-0,374				
P3L1	3,263	0,785	0,017	0,532	4,344	-0,392				
P3L2	3,180	0,716	0,022	0,541	4,161	-0,364				
P3L3	2,758	0,828	0,019	0,560	4,287	-0,259				
P3L4	3,731	0,659	0,021	0,516	4,225	-0,494				
P3L5	1,719	0,934	0,027	0,640	4,090	0,064				
P3L6	1,949	0,919	0,019	0,606	4,228	-0,038				
P3L7	2,476	0,791	0,022	0,567	4,090	-0,200				
P3L8	2,091	0,809	0,026	0,589	3,944	-0,096				
P4L1	3,202	0,770	0,017	0,533	4,287	-0,383				
P4L2	3,250	0,770	0,018	0,532	4,299	-0,392				
P4L3	2,735	0,763	0,022	0,554	4,125	-0,268				
P4L4	3,463	0,658	0,022	0,520	4,152	-0,448				
P4L5	3,249	0,791	0,019	0,546	4,215	-0,363				
P4L6	3,506	0,756	0,016	0,522	4,346	-0,451				
P4L7	3,609	0,860	0,012	0,527	4,609	-0,453				
P4L8	4,123	0,843	0,012	0,509	4,681	-0,568				
P5L1	3,205	0,779	0,018	0,535	4,310	-0,378				
P5L2	2,881	0,750	0,023	0,548	4,124	-0,304				
P5L3	2,884	0,826	0,017	0,557	4,241	-0,285				
P5L4	2,433	0,804	0,022	0,569	4,076	-0,190				
P5L5	1,718	0,901	0,087	0,679	3,478	0,135				
P5L6	1,920	0,932	0,047	0,646	3,952	0,039				
P5L7	2,205	0,849	0,021	0,583	4,142	-0,125				
P5L8	2,266	0,844	0,020	0,578	4,158	-0,146				

TAB C.1.4: ROI GLOBALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (90°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 135°										
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry					
C1L1	3,056	0,854	0,017	0,559	4,349	-0,294					
C1L2	3,270	0,818	0,021	0,562	4,226	-0,327					
C1L3	3,291	0,802	0,017	0,531	4,383	-0,398					
C1L4	3,662	0,728	0,019	0,524	4,315	-0,466					
C1L5	2,002	0,930	0,098	0,681	3,551	0,121					
C1L6	3,667	0,759	0,016	0,522	4,323	-0,469					
C1L7	2,923	0,849	0,023	0,576	4,167	-0,240					
C1L8	3,520	0,747	0,018	0,529	4,263	-0,431					
C2L1	4,144	0,778	0,013	0,513	4,523	-0,550					
C2L2	4,135	0,679	0,018	0,507	4,354	-0,569					
C2L3	4,080	0,714	0,018	0,506	4,365	-0,559					
C2L4	5,081	0,613	0,017	0,488	4,391	-0,732					
C2L5	3,398	0,865	0,017	0,541	4,561	-0,370					
C2L6	4,293	0,716	0,015	0,499	4,451	-0,610					
C2L7	5,296	0,741	0,013	0,482	4,659	-0,768					
C2L7	5,012	0,620	0,015	0,477	4,458	-0,757					
P1L1	3,316	0,704	0,021	0,533	4,178	-0,393					
P1L2	3,241	0,819	0,019	0,553	4,284	-0,296					
P1L3	3,492	0,640	0,022	0,529	4,129	-0,431					
P1L4	3,757	0,612	0,021	0,512	4,151	-0,507					
P1L5	2,349	0,907	0,024	0,599	4,192	-0,115					
P1L6	3,150	0,867	0,015	0,547	4,468	-0,345					
P1L7	2,354	0,894	0,019	0,582	4,296	-0,147					
P1L8	3,432	0,630	0,024	0,529	4,079	-0,419					
P2L1	3,343	0,789	0,027	0,559	4,063	-0,324					
P2L2	3,026	0,658	0,047	0,577	3,610	-0,251					
P2L3	4,901	0,659	0,015	0,485	4,471	-0,720					
P2L4	4,694	0,597	0,017	0,491	4,331	-0,682					
P2L5	3,686	0,854	0,055	0,597	4,040	-0,304					
P2L6	3,540	0,782	0,051	0,590	3,901	-0,297					
P2L7	3,202	0,860	0,055	0,613	3,996	-0,199					
P2L8	3,844	0,835	0,018	0,543	4,418	-0,448					
P3L1	3,579	0,763	0,016	0,522	4,383	-0,458					
P3L2	3,446	0,691	0,022	0,532	4,183	-0,418					
P3L3	3,159	0,802	0,018	0,545	4,338	-0,348					
P3L4	3,826	0,648	0,021	0,515	4,232	-0,506					
P3L5	2,192	0,915	0,026	0,623	4,151	-0,028					
P3L6	2,378	0,901	0,018	0,585	4,302	-0,143					
P3L7	2,777	0,765	0,021	0,553	4,137	-0,274					
P3L8	2,284	0,791	0,025	0,577	3,984	-0,150					
P4L1	3,623	0,738	0,016	0,519	4,327	-0,468					
P4L2	3,528	0,748	0,017	0,524	4,333	-0,450					
P4L3	2,992	0,740	0,022	0,545	4,157	-0,322					
P4L4	3,876	0,615	0,021	0,508	4,191	-0,532					
P4L5	4,052	0,736	0,018	0,528	4,269	-0,485					
P4L6	3,931	0,724	0,015	0,510	4,380	-0,530					
P4L7	4,057	0,842	0,012	0,511	4,659	-0,551					
P4L8	4,465	0,829	0,011	0,498	4,715	-0,632					
P5L1	3,721	0,742	0,011	0,518	4,361	-0,482					
P5L2	2,990	0,740	0,017	0,543	4,301	-0,482					
P5L2 P5L3	3,076	0,740	0,023	0,552	4,140	-0,332					
P5L4	2,575	0,792	0,017	0,565	4,239	-0,321					
P5L4 P5L5	2,575	0,792	0,022	0,565	3,541	0,030					
P5L6	2,290	0,918	0,047	0,641	3,968	0,002					
P5L7 P5L8	2,593 2,408	0,822 0,835	0,020 0,020	0,564 0,570	4,206 4,185	-0,221 -0,184					

TAB C.1.5: ROI GLOBALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (135°)

133

Image			d Order Feat					d Order Featu RLM Degrees:		
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP
C1L1	0,625	6,631	1450,9	5558,2	0,513	0,813	2,404	1967,5	13444,6	0,748
C1L2	0,626	8,458	1471,1	5301,4	0,497	0,806	3,184	2007,3	12556,2	0,722
C1L3	0,557	8,992	1250,4	3977,4	0,441	0,825	2,036	2204,8	14589,3	0,777
C1L4	0,529	10,944	1250,0	3262,9	0,407	0,831	1,968	2422,5	14552,3	0,786
C1L5	0,545	38,780	1050,0	3136,7	0,340	0,753	9,546	1743,3	9435,5	0,567
C1L6	0,574	7,853	1397,8	4241,6	0,464	0,828	2,005	2246,4	14165,2	0,781
C1L7	0,575	11,576	1348,5	4301,7	0,442	0,796	3,152	2059,2	12704,7	0,710
C1L8	0,574	7,836	1647,4	4590,4	0,464	0,825	2,062	2543,5	15201,7	0,775
C2L1	0,639	6,176	1654,0	6445,5	0,522	0,836	1,947	2286,6	16549,0	0,790
C2L2	0,599	7,928	1272,7	3720,3	0,474	0,829	2,007	2072,5	11467,4	0,781
C2L3	0,575	9,480	1222,2	3488,0	0,447	0,838	1,892	2237,7	12698,3	0,796
C2L4	0,536	11,915	1172,3	2695,9	0,403	0,837	1,947	2372,1	12186,0	0,790
C2L5	0,613	6,845	996,5	4215,0	0,501	0,806	2,250	1403,3	10670,3	0,751
C2L6	0,627	6,609	1354,2	4782,4	0,508	0,846	1,857	2091,9	13616,6	0,803
C2L7	0,600	7,530	1169,6	4401,7	0,481	0,850	1,837	1935,7	14471,9	0,807
C2L8	0,515	11,512	1198,2	2801,6	0,399	0,857	1,791	2375,8	14624,9	0,815
P1L1	0,632	5,470	1236,4	3691,9	0,532	0,824	2,038	1726,6	9005,6	0,776
P1L2	0,590	7,184	1400,5	4571,8	0,482	0,806	2,283	2154,7	12758,6	0,749
P1L3	0,492	10,739	1129,1	1895,5	0,398	0,813	2,215	2103,7	8631,3	0,756
P1L4	0,430	14,884	1423,8	1887,7	0,345	0,798	2,273	3008,7	11294,8	0,744
P1L5	0,653	7,050	2187,4	10084,8	0,531	0,784	3,293	2798,1	18787,6	0,694
P1L6	0,682	5,424	2427,6	12030,9	0,574	0,821	2,602	3086,0	22907,4	0,754
P1L7	0,597	6,867	2386,2	8817,7	0,494	0,801	2,331	3605,6	23051,6	0,743
P1L8	0,662	4,871	3062,2	9182,9	0,562	0,827	2,017	4196,2	19752,5	0,779
P2L1	0,539	12,292	1227,3	2986,3	0,407	0,810	2,691	2040,7	11360,2	0,731
P2L2	0,499	17,688	1402,4	2314,2	0,359	0,791	2,736	2708,9	10486,3	0,712
P2L3	0,641	6,397	1637,5	5818,2	0,518	0,867	1,713	2470,9	16999,5	0,828
P2L4	0,601	7,073	1615,9	4789,2	0,486	0,855	1,784	2626,8	15919,6	0,815
P2L5	0,672	19,917	2290,7	9856,7	0,471	0,813	6,538	3015,1	20023,3	0,653
P2L6	0,682	19,541	3131,4	12248,3	0,496	0,819	6,243	4184,8	24031,2	0,674
P2L7	0,675	37,143	2542,9	11413,9	0,470	0,826	10,785	3299,2	23608,4	0,648
P2L8	0,677	8,267	3074,3	14595,1	0,541	0,835	3,110	4008,1	30775,8	0,748
P3L1	0,629	6,132	1572,3	5731,5	0,519	0,832	1,984	2327,2	14960,0	0,785
P3L2	0,559	9,168	1534,4	3877,2	0,440	0,817	2,129	2674,7	13714,8	0,765
P3L3	0,601	7,211	1535,5	5153,1	0,486	0,807	2,191	2317,4	13969,1	0,754
P3L4	0,513	12,761	1399,6	2694,1	0,389	0,819	2,084	2791,7	12534,5	0,769
P3L5	0,598	14,545	2265,7	9071,5	0,460	0,776	5,138	3198,5	21239,7	0,663
P3L6	0,614	7,793	3170,3	13206,1	0,500	0,784	3,000	4352,9	29813,2	0,709
P3L7	0,558	7,634	2818,2	6105,5	0,462	0,770	2,535	4261,8	16764,8	0,712
P3L8	0,557	7,952	4076,1	9286,3	0,458	0,777	2,535	6275,5	26511,5	0,716
P4L1	0,637	5,508	1543,3	5348,9	0,535	0,829	1,972	2120,6	13055,9	0,784
P4L2	0,612	6,442	1372,7	4528,8	0,504	0,830	1,952	2096,4	12736,0	0,786
P4L3	0,549	8,159	1471,6	3706,7	0,448	0,805	2,218	2475,7	12512,2	0,751
P4L4	0,514	9,845	1417,0	2687,8	0,416	0,810	2,184	2550,7	10924,4	0,756
P4L5	0,692	4,783	2577,8	10543,2	0,588	0,833	2,235	3226,0	20049,8	0,771
P4L6	0,687	4,185	3552,2	14558,0	0,594	0,847	1,844	4558,4	30057,9	0,805
P4L7	0,703	4,152	2413,9	13447,3	0,605	0,841	1,937	3037,2	25384,3	0,794
P4L8	0,698	4,366	2706,3	15331,8	0,595	0,850	1,839	3553,8	31080,2	0,807
P5L1	0,641	5,525	1413,0	5097,4	0,539	0,828	1,995	2006,2	12151,6	0,781
P5L2	0,540	10,135	1158,0	2707,2	0,421		2,199	2164,0	10234,7	0,756
P5L3	0,525	11,571	1005,5	2711,9	0,402	0,818	2,235	1814,0	11537,2	0,759
P5L4	0,386	22,725	792,1	1186,9	0,294	0,769	2,600	1996,6	8523,9	0,708
P5L5	0,558	37,135	1896,1	5076,6	0,361	0,746	9,894	2983,0	13537,1	0,566
P5L6	0,586	26,279	2133,8	8016,5	0,417	0,780	5,855	3229,4	21143,8	0,643
P5L7 P5L8	0,559	7,864	2020,4	6372,0	0,457	0,783	2,404	3308,4	18771,9	0,727
POLO	0,521	9,152	2313,9	6022,6	0,426	0,783	2,441	3982,7	20981,9	0,725

TAB C.1.6: ROI GLOBALE; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (0°, 45°)

Image			d Order Feat			Third Order Features GLRLM Degrees: 135°					
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	
C1L1	0,800	2,733	1932,7	12740,6	0,731	0,810	2,532	1956,4	13262,8	0,742	
C1L2	0,797	3,639	1958,2	11980,5	0,706	0,813	3,089	2008,1	12888,8	0,728	
C1L3	0,822	2,192	2195,3	14320,0	0,770	0,825	2,025	2210,1	14580,6	0,777	
C1L4	0,826	2,164	2396,3	14122,5	0,774	0,826	2,042	2406,3	14190,7	0,776	
C1L5	0,739	12,969	1690,8	8817,4	0,549	0,743	11,164	1718,1	9057,4	0,558	
C1L6	0,824	2,147	2232,2	13860,3	0,772	0,830	1,992	2246,3	14290,5	0,783	
C1L7	0,790	3,513	2051,3	12362,4	0,702	0,797	3,114	2068,1	12795,1	0,714	
C1L8	0,820	2,263	2526,4	14838,3	0,766	0,826	2,041	2546,1	15262,8	0,777	
C2L1	0,829	2,127	2264,8	16023,9	0,779	0,835	1,958	2285,1	16504,8	0,789	
C2L2	0,822	2,161	2046,5	11144,1	0,771	0,832	2,000	2063,0	11599,2	0,783	
C2L3	0,833	2,107	2225,1	12343,5	0,785	0,831	1,959	2219,3	12307,2	0,786	
C2L4	0,830	2,106	2351,3	11828,1	0,780	0,832	1,981	2355,9	11951,5	0,784	
C2L5	0,804	2,392	1397,0	10563,2	0,748	0,817	2,117	1417,7	11181,6	0,766	
C2L6	0,837	2,014	2070,4	13107,7	0,791	0,845	1,852	2096,4	13598,9	0,803	
C2L7	0,848	1,974	1936,7	14320,0	0,803	0,856	1,802	1956,9	14834,9	0,813	
C2L8	0,849	1,935	2360,5	14156,9	0,805	0,850	1,823	2363,9	14230,8	0,808	
P1L1	0,808	2,317	1684,5	8406,4	0,754	0,821	2,061	1716,3	8912,1	0,772	
P1L2	0,802	2,725	2164,2	12492,0	0,741	0,811	2,218	2179,5	13059,8	0,756	
P1L3	0,798	2,494	2056,4	8093,5	0,736	0,793	2,359	2040,0	7987,3	0,735	
P1L4	0,788	2,521	2973,7	10820,6	0,732	0,794	2,293	2982,9	11127,4	0,740	
P1L5	0,762	4,235	2692,3	16909,4	0,663	0,780	3,763	2764,2	18382,8	0,686	
P1L6	0,802	3,517	3003,2	21069,2	0,729	0,821	2,726	3084,5	22856,3	0,753	
P1L7	0,779	3,040	3508,2	20952,8	0,715	0,783	2,579	3512,8	21338,2	0,720	
P1L8	0,808	2,358	4094,0	18300,4	0,757	0,817	2,097	4136,6	19024,2	0,768	
P2L1	0,804	2,944	2023,7	11046,4	0,722	0,807	2,631	2056,3	11323,7	0,733	
P2L2	0,791	3,009	2693,9	10420,8	0,706	0,795	2,884	2688,8	10551,6	0,709	
P2L3	0,856	1,889	2450,1	16249,6	0,814	0,857	1,784	2445,0	16345,4	0,816	
P2L4	0,851	1,901	2616,2	15578,2	0,807	0,849	1,833	2608,1	15492,2	0,806	
P2L5	0,805	7,831	2954,0	19121,8	0,637	0,814	7,024	3003,7	20005,4	0,651	
P2L6	0,802	7,372	4083,6	22246,4	0,652	0,812	6,098	4147,6	23437,4	0,668	
P2L7	0,812	13,503	3235,8	22089,3	0,629	0,818	11,921	3244,9	22615,6	0,635	
P2L8	0,819	4,167	3919,9	28638,7	0,727	0,827	3,192	3962,8	29782,1	0,740	
P3L1	0,823	2,215	2298,8	14398,8	0,772	0,831	1,995	2328,7	14895,3	0,783	
P3L2	0,810	2,350	2647,7	13255,9	0,754	0,815	2,131	2659,9	13584,3	0,763	
P3L3	0,798	2,471	2284,8	13397,2	0,740	0,809	2,226	2327,4	14034,9	0,753	
P3L4	0,803	2,356	2726,9	11688,6	0,749	0,803	2,209	2735,4	11741,0	0,751	
P3L5	0,753	7,125	3097,8	19145,1	0,634	0,770	6,816	3180,9	20708,5	0,655	
P3L6	0,769	3,847	4245,6	27748,0	0,687	0,786	3,117	4358,1	30037,3	0,711	
P3L7	0,754	2,986	4150,3	15563,3	0,689	0,767	2,597	4249,7	16514,7	0,707	
P3L8	0,760	3,207	6105,4	24604,9	0,694	0,767	2,637	6170,7	25479,9	0,706	
P4L1	0,824	2,117	2113,3	12755,2	0,775	0,835	1,947	2142,2	13344,3	0,789	
P4L2	0,823	2,136	2072,4	12293,4	0,774	0,828	2,006	2073,9	12575,1	0,781	
P4L3	0,796	2,340	2454,9	12088,4	0,741	0,806	2,197	2508,9	12616,9	0,754	
P4L4	0,808	2,243	2557,0	10880,6	0,756	0,818	2,069	2594,8	11365,9	0,770	
P4L5	0,818	2,673	3161,1	18743,2	0,749	0,831	2,207	3225,1	19888,1	0,769	
P4L6	0,830	2,168	4467,1	28035,9	0,783	0,840	1,903	4525,1	29142,5	0,796	
P4L7	0,826	2,368	2973,2	23793,1	0,773	0,838	1,963	3018,6	25102,1	0,790	
P4L8	0,839	2,171	3496,3	29574,8	0,790	0,847	1,881	3534,3	30574,0	0,801	
P5L1	0,824	2,152	1998,4	11915,2	0,773	0,832	1,953	2027,3	12374,8	0,787	
P5L2	0,802	2,299	2154,5	9943,3	0,747	0,803	2,222	2164,8	10025,0	0,751	
P5L3	0,808	2,495	1798,6	11032,7	0,745	0,810	2,336	1802,7	11186,1	0,750	
P5L4	0,763	2,846	1987,5	8286,2	0,698	0,764	2,656	1993,0	8354,7	0,702	
P5L5	0,742	10,038	2980,4	13227,3	0,560	0,761	8,043	3090,8	14527,4	0,584	
P5L6	0,758	7,353	3095,8	19021,7	0,613	0,764	6,701	3098,5	19525,2	0,619	
P5L7	0,782	2,771	3311,0	18567,7	0,723	0,798	2,290	3372,6	19939,1	0,743	
P5L8	0,770	2,677	3911,3	19899,1	0,710	0,780	2,441	3992,0	20769,0	0,723	

TAB C.1.7: ROI GLOBALE; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (90°, 135°)

ROI INTERNA AL TENDINE POSIZIONATA A SINISTRA

Image	nage ROI Position First Order Features							
	X	Υ	Mean	St Deviation	Variance	Skewness	Kurtosis	Entropy
C1L1	105	51	135,716	35,682	1273,234	-0,231	2,690	7,073
C1L2	146	67	24,000	24,243	587,703	1,449	5,149	5,951
C1L3	113	63	131,213	31,242	976,045	-0,560	3,323	6,835
C1L4	112	59	133,646	32,359	1047,125	-0,130	2,827	6,950
C1L5	94	50	155,794	32,018	1025,134	-0,358	3,535	6,898
C1L6	130	62	54,738	34,471	1188,217	0,576	2,727	6,896
C1L7	119	61	88,678	44,706	1998,665	0,281	2,450	7,337
C1L8	124	62	53,563	36,202	1310,582	0,515	2,259	6,922
C2L1	132	56	55,662	30,727	944,154	0,547	3,075	6,812
C2L2	102	68	158,398	28,471	810,586	-0,293	3,217	6,761
C2L3	82	64	146,633	45,226	2045,400	-0,218	2,418	7,371
C2L4	76	63	194,147	28,574	816,495	0,036	2,936	6,642
C2L5	118	8	171,490	47,162	2224,245	-0,068	2,204	7,310
C2L6	114	90	163,716	33,869	1147,138	-0,399	2,959	6,994
C2L7	82	56	166,753	33,672	1133,797	-0,381	3,076	6,940
C2L8	89	58	155,108	41,330	1708,135	-0,261	2,699	7,241
P1L1	98	115	169,946	27,976	782,680	-0,661	3,111	6,686
P1L2	112	75	154,931	28,332	802,705	-0,051	2,902	6,774
P1L3	91	111	162,526	25,377	643,987	-0,356	3,034	6,601
P1L4	77	60	186,045	22,932	525,887	-0,243	2,846	6,475
P1L5	101	78	81,073	34,205	1169,988	0,253	2,426	6,986
P1L6	129	56	84,893	33,818	1143,642	-0,132	2,305	6,984
P1L7	74	64	53,809	39,226	1538,700	0,788	2,741	6,956
P1L8	97	65	146,895	30,415	925,087	-0,394	2,977	6,852
P2L1	76	59	95,957	56,064	3143,161	-0,044	1,773	7,482
P2L2	95	60	24,085	20,218	408,754	0,856	3,079	5,950
P2L3	85	61	103,124	36,694	1346,445	0,105	2,394	7,088
P2L4	83	59	110,330	38,776	1503,585	0,020	2,577	7,186
P2L5	70	62	133,269	49,193	2419,916	-0,457	2,507	7,446
P2L6	117	58	32,725	31,512	993,019	1,310	4,705	6,320
P2L7	76	64	99,863	36,155	1307,193	0,079	2,256	7,077
P2L8	99	58	108,190	39,103	1529,059	-0,116	2,418	7,181
P3L1	132	79	121,905	33,084	1094,563	-0,445	2,714	6,946
P3L2	130	59	149,797	33,906	1149,589	-0,288	2,662	6,995
P3L3	111	62	164,801	27,366	748,906	-0,568	3,221	6,702
P3L4	98	63	147,447	26,222	687,579	-0,121	3,356	6,643
P3L5	105	69	123,961	39,372	1550,132	-0,236	2,819	7,185
P3L6 P3L7	161	60 64	83,777	29,153	849,894	0,141	2,511	6,803
P3L7 P3L8	115 126	59	144,424	22,441	503,587	-0,246	3,465	6,429
P3L8 P4L1	114	65	198,824	21,941	481,388	-0,010	3,224	6,377
P4L1 P4L2	115	60	83,357 102,959	30,450 31,164	927,202 971,181	0,157 -0,161	2,369 2,439	6,847 6,877
P4L2 P4L3	123	54	145,568	33,029	1090,890	-0,193	3,185	6,950
P4L4	127	58	171,277	27,896	778,203	-0,198	2,847	6,741
P4L5	116	60	40,348	30,378	922,829	1,053	3,777	6,618
P4L6	136	59	83,980	35,800	1281,654	0,356	2,592	7,063
P4L7	109	67	32,992	26,442	699,168	1,000	3,682	6,346
P4L7 P4L8	120	58	144,331	44,951	2020,595	-0,610	2,595	7,244
P5L1	131	72	138,352	45,159	2039,321	-0,442	2,475	7,244
P5L2	110	62	135,521	32,332	1045,366	-0,185	2,704	6,936
P5L3	119	69	92,919	47,516	2257,732	-0,183	1,945	7,342
P5L4	74	49	213,105	23,244	540,291	-0,581	3,287	6,404
P5L5	148	67	36,834	25,944	673,075	0,645	2,741	6,468
P5L6	108	60	69,161	34,034	1158,305	0,338	2,540	6,964
P5L7	152	61	123,745	27,207	740,223	-0,398	2,964	6,685
P5L8	105	56	178,842	23,338	544,662	0,116	3,098	6,499

TAB C.2.1: ROI INTERNA SINISTRA; DESCRITTORI DEL PRIMO ORDINE E POSIZIONE ROI

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 0°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	1,071	0,932	0,030	0,685	3,787	0,268				
C1L2	1,092	0,918	0,117	0,733	3,114	0,339				
C1L3	0,782	0,935	0,044	0,721	3,490	0,387				
C1L4	0,990	0,935	0,032	0,698	3,744	0,307				
C1L5	0,735	0,943	0,046	0,749	3,483	0,445				
C1L6	1,027	0,956	0,025	0,681	3,877	0,271				
C1L7	1,037	0,961	0,022	0,690	3,997	0,282				
C1L8	1,264	0,957	0,023	0,661	4,039	0,187				
C2L1	1,529	0,912	0,024	0,627	3,982	0,076				
C2L2	1,470	0,879	0,031	0,648	3,813	0,124				
C2L3	0,924	0,951	0,029	0,701	3,808	0,325				
C2L4	1,115	0,939	0,029	0,692	3,828	0,270				
C2L5	0,729	0,970	0,033	0,751	3,727	0,445				
C2L6	1,148	0,928	0,030	0,677	3,838	0,236				
C2L7	0,967	0,942	0,035	0,712	3,731	0,335				
C2L8	0,848	0,957	0,033	0,730	3,771	0,389				
P1L1	1,195	0,925	0,034	0,686	3,758	0,247				
P1L2	1,263	0,914	0,031	0,672	3,834	0,204				
P1L3	1,116	0,921	0,032	0,681	3,772	0,252				
P1L4	0,913	0,934	0,034	0,709	3,689	0,340				
P1L5	2,096	0,897	0,017	0,579	4,270	-0,117				
P1L6	3,007	0,881	0,013	0,535	4,519	-0,355				
P1L7	1,319	0,950	0,028	0,658	3,961	0,171				
P1L8	1,858	0,869	0,026	0,604	3,983	-0,026				
P2L1	0,776	0,979	0,025	0,736	3,898	0,413				
P2L2	1,603	0,928	0,047	0,670	3,805	0,145				
P2L3	1,472	0,931	0,020	0,638	4,115	0,106				
P2L4	1,131	0,948	0,024	0,685	3,984	0,252				
P2L5	1,396	0,938	0,024	0,657	4,040	0,157				
P2L6	1,324	0,921	0,087	0,698	3,392	0,237				
P2L7	1,920	0,904	0,018	0,594	4,207	-0,054				
P2L8	1,796	0,916	0,018	0,609	4,220	-0,006				
P3L1	1,633	0,913	0,022	0,617	4,077	0,041				
P3L2	0,941	0,950	0,032	0,715	3,775	0,345				
P3L3	1,074	0,925	0,035	0,683	3,731	0,264				
P3L4	1,083	0,902	0,035	0,676	3,661	0,247				
P3L5	0,936	0,943	0,031	0,688	3,785	0,301				
P3L6	2,290	0,892	0,016	0,574	4,333	-0,155				
P3L7	1,515	0,847	0,034	0,634	3,751	0,092				
P3L8	1,592	0,867	0,028	0,621	3,854	0,054				
P4L1	2,278	0,887	0,017	0,576	4,298	-0,152				
P4L2	1,764	0,902	0,021	0,613	4,104	0,013				
P4L3	0,887	0,950	0,034	0,705	3,769	0,339				
P4L4	0,865	0,945	0,035	0,722	3,664	0,373				
P4L5	2,280	0,887	0,028	0,600	4,029	-0,104				
P4L6	1,950	0,880	0,020	0,604	4,106	-0,045				
P4L7	2,162	0,865	0,045	0,616	3,785	-0,059				
P4L8	1,529	0,930	0,024	0,635	4,040	0,091				
P5L1	0,915	0,959	0,029	0,710	3,834	0,341				
P5L2	1,120	0,928	0,031	0,688	3,793	0,266				
P5L3	0,722	0,977	0,026	0,751	3,869	0,450				
P5L4	0,517	0,965	0,053	0,806	3,332	0,581				
P5L5	1,749	0,930	0,026	0,642	4,073	0,068				
P5L6	1,850	0,918	0,018	0,600	4,238	-0,029				
P5L7	1,110	0,926	0,035	0,695	3,745	0,276				
P5L8	1,229	0,908	0,029	0,661	3,820	0,192				

TAB C.2.2: ROI INTERNA SINISTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (0°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 45°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	5,519	0,638	0,014	0,468	4,531	-0,842				
C1L2	4,122	0,695	0,082	0,592	3,561	-0,379				
C1L3	4,434	0,616	0,020	0,493	4,232	-0,649				
C1L4	7,493	0,503	0,013	0,435	4,630	-1,140				
C1L5	3,955	0,670	0,021	0,512	4,234	-0,530				
C1L6	9,427	0,592	0,010	0,412	4,803	-1,435				
C1L7	4,825	0,815	0,011	0,477	4,690	-0,731				
C1L8	9,374	0,685	0,010	0,423	4,876	-1,357				
C2L1	7,118	0,577	0,013	0,452	4,601	-1,056				
C2L2	6,010	0,512	0,016	0,462	4,430	-0,907				
C2L3	4,226	0,772	0,014	0,494	4,528	-0,618				
C2L4	9,732	0,454	0,012	0,415	4,737	-1,441				
C2L5	3,376	0,862	0,016	0,534	4,434	-0,411				
C2L6	5,977	0,634	0,013	0,455	4,583	-0,935				
C2L7	9,335	0,438	0,012	0,411	4,690	-1,405				
C2L8	7,794	0,607	0,011	0,447	4,767	-1,161				
P1L1	6,518	0,569	0,014	0,442	4,500	-1,038				
P1L2	6,757	0,533	0,014	0,440	4,554	-1,062				
P1L3	6,681	0,522	0,014	0,456	4,512	-1,020				
P1L4	7,558	0,452	0,013	0,419	4,572	-1,204				
P1L5	5,618	0,723	0,011	0,461	4,695	-0,877				
P1L6	9,586	0,615	0,008	0,401	4,991	-1,469				
P1L7	4,644	0,823	0,017	0,504	4,487	-0,630				
P1L8	7,812	0,446	0,014	0,430	4,580	-1,199				
P2L1	4,683	0,867	0,011	0,487	4,724	-0,700				
P2L2	10,871	0,512	0,023	0,461	4,526	-1,404				
P2L3	10,875	0,498	0,008	0,388	4,976	-1,628				
P2L4	9,187	0,581	0,009	0,412	4,933	-1,399				
P2L5	6,357	0,709	0,011	0,451	4,711	-0,977				
P2L6	6,635	0,604	0,053	0,524	3,935	-0,822				
P2L7	9,052	0,540	0,009	0,400	4,844	-1,417				
P2L8	11,308	0,465	0,008	0,386	4,968	-1,698				
P3L1	8,483	0,549	0,011	0,417	4,765	-1,314				
P3L2	8,119	0,571	0,011	0,415	4,778	-1,274				
P3L3	5,713	0,590	0,016	0,475	4,459	-0,850				
P3L4	5,966	0,458	0,018	0,457	4,355	-0,918				
P3L5	2,657	0,840	0,019	0,553	4,268	-0,262				
P3L6	8,800	0,587	0,009	0,413	4,898	-1,365				
P3L7	4,631	0,531	0,021	0,495	4,209	-0,662				
P3L8	6,175	0,484	0,017	0,457	4,402	-0,956				
P4L1	8,731	0,566	0,009	0,408	4,854	-1,361				
P4L2	9,136	0,499	0,010	0,399	4,808	-1,420				
P4L3	6,809	0,611	0,014	0,439	4,633	-1,061				
P4L4	6,017	0,598	0,014	0,474	4,532	-0,893				
P4L5	8,948	0,556	0,016	0,436	4,546	-1,266				
P4L6	6,884	0,574	0,012	0,436	4,632	-1,095				
P4L7	6,930	0,547	0,026	0,477	4,215	-0,973				
P4L8	6,394	0,696	0,013	0,452	4,646	-0,983				
P5L1	5,135	0,767	0,012	0,483	4,649	-0,750				
P5L2	5,495	0,642	0,014	0,470	4,509	-0,831				
P5L3	5,634	0,824	0,010	0,476	4,805	-0,836				
P5L4	5,184	0,635	0,018	0,495	4,320	-0,732				
P5L5	10,223	0,590	0,013	0,422	4,782	-1,475				
P5L6	7,553	0,660	0,010	0,437	4,826	-1,141				
P5L7	5,077	0,661	0,016	0,482	4,435	-0,748				
P5L8	5,708	0,561	0,016	0,458	4,461	-0,887				

TAB C.2.3: ROI INTERNA SINISTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (45°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 90°										
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry					
C1L1	4,544	0,702	0,015	0,497	4,454	-0,651					
C1L2	3,195	0,769	0,089	0,617	3,477	-0,208					
C1L3	3,811	0,671	0,022	0,512	4,173	-0,516					
C1L4	6,294	0,581	0,014	0,453	4,560	-0,966					
C1L5	3,504	0,711	0,021	0,524	4,198	-0,441					
C1L6	8,149	0,648	0,011	0,426	4,756	-1,258					
C1L7	4,966	0,810	0,011	0,474	4,708	-0,766					
C1L8	7,509	0,748	0,011	0,454	4,785	-1,085					
C2L1	5,584	0,670	0,014	0,474	4,519	-0,824					
C2L2	4,967	0,597	0,017	0,471	4,358	-0,749					
C2L3	3,516	0,812	0,015	0,509	4,452	-0,484					
C2L4	8,835	0,503	0,012	0,429	4,704	-1,312					
C2L5	2,814	0,885	0,017	0,560	4,348	-0,273					
C2L6	5,441	0,668	0,014	0,471	4,550	-0,821					
C2L7	8,599	0,484	0,013	0,419	4,666	-1,305					
C2L8	6,710	0,661	0,012	0,456	4,713	-1,009					
P1L1	5,708	0,621	0,015	0,446	4,452	-0,912					
P1L2	5,686	0,611	0,015	0,464	4,505	-0,868					
P1L3	5,679	0,597	0,015	0,471	4,470	-0,854					
P1L4	6,812	0,510	0,014	0,439	4,528	-1,072					
P1L5	4,347	0,783	0,013	0,499	4,586	-0,621					
P1L6	8,562	0,660	0,008	0,427	4,957	-1,281					
P1L7	3,616	0,864	0,019	0,537	4,391	-0,426					
P1L8	6,825	0,514	0,015	0,446	4,520	-1,046					
P2L1	4,017	0,887	0,011	0,510	4,660	-0,559					
P2L2	9,381	0,581	0,025	0,469	4,472	-1,236					
P2L3	9,189	0,575	0,009	0,407	4,906	-1,416					
P2L4 P2L5	7,991	0,637	0,010	0,435	4,881	-1,213					
P2L5 P2L6	5,454 5,653	0,751 0,662	0,012 0,056	0,466 0,539	4,654 3,884	-0,833 -0,686					
P2L0 P2L7	7,621	0,662	0,036	0,539	4,782	-1,196					
P2L7 P2L8	9,940	0,529	0,010	0,402	4,782	-1,510					
P3L1	6,497	0,659	0,009	0,448	4,666	-1,011					
P3L2	6,993	0,630	0,012	0,442	4,722	-1,011					
P3L3	4,884	0,653	0,012	0,500	4,722	-0,684					
P3L4	4,903	0,554	0,019	0,486	4,292	-0,717					
P3L5	2,271	0,865	0,010	0,567	4,199	-0,166					
P3L6	7,726	0,636	0,020	0,426	4,861	-1,197					
P3L7	3,554	0,641	0,023	0,523	4,098	-0,452					
P3L8	5,154	0,568	0,018	0,480	4,341	-0,766					
P4L1	6,934	0,657	0,010	0,445	4,772	-1,069					
P4L2	7,718	0,577	0,011	0,430	4,756	-1,191					
P4L3	5,755	0,669	0,015	0,463	4,570	-0,884					
P4L4	5,439	0,635	0,015	0,476	4,497	-0,812					
P4L5	6,924	0,657	0,017	0,471	4,462	-0,977					
P4L6	5,914	0,640	0,012	0,448	4,582	-0,946					
P4L7	5,555	0,642	0,028	0,493	4,144	-0,789					
P4L8	5,811	0,723	0,013	0,458	4,627	-0,903					
P5L1	4,637	0,788	0,013	0,503	4,601	-0,650					
P5L2	4,463	0,709	0,015	0,487	4,423	-0,660					
P5L3	4,711	0,853	0,011	0,501	4,733	-0,661					
P5L4	4,730	0,667	0,018	0,505	4,288	-0,654					
P5L5	8,246	0,671	0,014	0,454	4,709	-1,184					
P5L6	6,181	0,724	0,011	0,460	4,748	-0,930					
P5L7	5,079	0,661	0,016	0,478	4,431	-0,765					
P5L8	5,118	0,609	0,016	0,476	4,428	-0,772					

TAB C.2.4: ROI INTERNA SINISTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (90°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 135°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	4,338	0,716	0,015	0,495	4,419	-0,627				
C1L2	3,214	0,762	0,089	0,620	3,484	-0,201				
C1L3	3,707	0,678	0,023	0,521	4,150	-0,483				
C1L4	5,714	0,621	0,014	0,466	4,530	-0,880				
C1L5	3,528	0,704	0,021	0,525	4,193	-0,444				
C1L6	7,648	0,669	0,011	0,435	4,720	-1,179				
C1L7	5,920	0,773	0,010	0,449	4,772	-0,955				
C1L8	6,742	0,774	0,012	0,472	4,745	-0,964				
C2L1	5,449	0,675	0,014	0,477	4,507	-0,801				
C2L2	5,219	0,576	0,017	0,474	4,375	-0,785				
C2L3	3,368	0,819	0,015	0,523	4,423	-0,432				
C2L4	8,531	0,521	0,012	0,431	4,685	-1,275				
C2L5	2,785	0,886	0,017	0,562	4,341	-0,265				
C2L6	5,835	0,643	0,014	0,472	4,568	-0,863				
C2L7	8,456	0,491	0,013	0,421	4,663	-1,286				
C2L8	6,112	0,691	0,012	0,467	4,679	-0,914				
P1L1	5,705	0,623	0,015	0,458	4,460	-0,886				
P1L2	5,525	0,618	0,015	0,467	4,485	-0,841				
P1L3	5,329	0,618	0,015	0,472	4,445	-0,810				
P1L4	6,510	0,528	0,014	0,450	4,514	-1,007				
P1L5	5,030	0,752	0,012	0,469	4,647	-0,766				
P1L6	10,355	0,584	0,008	0,399	5,025	-1,534				
P1L7	3,740	0,858	0,019	0,544	4,404	-0,435				
P1L8	7,289	0,482	0,015	0,446	4,536	-1,096				
P2L1	3,903	0,889	0,011	0,513	4,648	-0,531				
P2L2	9,127	0,590	0,026	0,476	4,454	-1,184				
P2L3	8,525	0,606	0,009	0,405	4,882	-1,343				
P2L4	7,490	0,659	0,010	0,446	4,852	-1,132				
P2L5	5,819	0,733	0,012	0,464	4,682	-0,887				
P2L6	6,012	0,641	0,053	0,534	3,910	-0,745				
P2L7	7,765	0,605	0,010	0,432	4,772	-1,196				
P2L8	10,020	0,526	0,009	0,393	4,934	-1,543				
P3L1	5,778	0,693	0,012	0,466	4,628	-0,880				
P3L2	6,546	0,654	0,012	0,449	4,688	-1,007				
P3L3	4,780	0,657	0,018	0,500	4,385	-0,673				
P3L4	4,655	0,578	0,020	0,497	4,269	-0,663				
P3L5	2,633	0,841	0,019	0,548	4,261	-0,265				
P3L6	8,676	0,593	0,009	0,415	4,894	-1,337				
P3L7	3,801	0,615	0,023	0,528	4,124	-0,472				
P3L8	5,537	0,537	0,017	0,476	4,377	-0,829				
P4L1	6,944	0,655	0,010	0,450	4,767	-1,057				
P4L2	7,511	0,587	0,011	0,426	4,744	-1,173				
P4L3	5,338	0,696	0,015	0,472	4,553	-0,808				
P4L4	5,460	0,635	0,015	0,469	4,501	-0,825				
P4L5	7,017	0,652	0,017	0,462	4,457	-1,022				
P4L6	6,701	0,586	0,012	0,435	4,626	-1,074				
P4L7	6,181	0,593	0,027	0,488	4,181	-0,871				
P4L8	6,164	0,707	0,013	0,451	4,642	-0,971				
P5L1	4,831	0,780	0,012	0,478	4,617	-0,729				
P5L2	4,305	0,720	0,016	0,498	4,399	-0,613				
P5L3	4,334	0,864	0,011	0,517	4,694	-0,577				
P5L4	4,556	0,680	0,019	0,506	4,275	-0,623				
P5L5	7,761	0,689	0,014	0,463	4,698	-1,100				
P5L6	6,523	0,706	0,010	0,449	4,766	-1,001				
P5L7	5,764	0,615	0,015	0,465	4,467	-0,883				
P5L8	5,372	0,588	0,016	0,467	4,444	-0,832				

TAB C.2.5: ROI INTERNA SINISTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (135°)

	Third Order Features GLRLM Degrees: 0°					Third Order Features GLRLM Degrees: 45°					
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	
C1L1	0,628	5,574	99,559	285,363	0,525	0,829	1,986	139,172	729,069	0,782	
C1L2	0,548	25,946	106,992	151,572	0,353	0,714	8,010	164,951	366,574	0,532	
C1L3	0,569	7,705	98,773	217,050	0,466	0,827	2,041	166,010	721,958	0,777	
C1L4	0,580	7,060	99,808	230,739	0,479	0,854	1,777	160,953	811,371	0,815	
C1L5	0,524	10,245	78,905	159,707	0,404	0,804	2,216	149,766	656,603	0,750	
C1L6	0,550	8,911	96,606	192,734	0,439	0,851	1,864	157,491	797,910	0,806	
C1L7	0,613	6,467	82,003	263,328	0,503	0,823	1,923	112,474	724,049	0,786	
C1L8	0,551	8,524	93,442	201,900	0,453	0,827	2,205	144,430	709,892	0,764	
C2L1	0,612	5,378	115,416	271,714	0,521	0,820	2,173	161,884	694,695	0,762	
C2L2	0,643	5,272	122,213	304,114	0,538	0,834	1,960	177,684	746,290	0,788	
C2L3	0,634	5,179	75,347	302,919	0,542	0,849	1,878	110,289	787,650	0,802	
C2L4	0,543	10,305	101,471	182,977	0,423	0,833	2,018	179,567	735,176	0,780	
C2L5	0,538	9,428	65,654	189,258	0,437	0,797	2,428	104,188	632,548	0,736	
C2L6	0,599	7,073	93,273	240,531	0,483	0,849	1,826	153,917	792,598	0,807	
C2L7	0,559	8,485	86,367	199,318	0,445	0,873	1,692	162,001	871,576	0,834	
C2L8	0,571	8,347	70,254	210,205	0,455	0,854	1,782	127,959	811,047	0,814	
P1L1	0,548	8,748	99,557	188,591	0,437	0,826	2,087	179,709	717,412	0,773	
P1L2	0,577	7,358	108,254	224,283	0,473	0,834	1,967	172,290	744,391	0,787	
P1L3	0,509	8,756	105,407	171,917	0,429	0,809	2,185	188,593	669,662	0,755	
P1L4	0,474	13,818	98,138	129,022	0,370	0,815	2,020	206,601	695,301	0,772	
P1L5	0,700	3,632	118,465	420,014	0,627	0,819	2,052	142,993	704,284	0,773	
P1L6	0,732	3,450	124,510	464,822	0,642	0,833	1,963	144,223	742,518	0,786	
P1L7	0,602	7,031	88,775	247,927	0,489	0,780	2,559	129,355	588,862	0,715	
P1L8	0,692	4,195	129,535	390,238	0,598	0,840	1,862	168,649	767,280	0,799	
P2L1	0,553	9,039	56,765	192,524	0,439	0,821	2,014	93,789	710,326	0,776	
P2L2	0,428	24,174	103,174	84,624	0,293	0,705	4,643	205,132	398,603	0,592	
P2L3	0,675	4,932	104,213	347,144	0,562	0,873	1,695	138,748	871,712	0,833	
P2L4	0,606	6,049	87,495	260,713	0,508	0,864	1,711	131,188	843,960	0,827	
P2L5	0,693	3,968	83,696	393,573	0,604	0,876	1,664	114,834	883,459	0,838	
P2L6 P2L7	0,628	13,158 3,819	108,674 107,172	239,075 381,873	0,442 0,606	0,791 0,869	4,203 1,672	164,163	556,825 862,702	0,658 0,833	
P2L7 P2L8	0,704	4,077	107,172	408,325	0,609	0,889	1,521	141,945 136,864	936,670	0,853	
P3L1	0,704	4,897	111,719	316,261	0,554	0,889	1,824	154,722	785,459	0,801	
P3L1	0,532	9,121	80,073	179,684	0,430	0,840	1,755	152,096	828,174	0,800	
P3L2 P3L3	0,532	8,163	101,853	195,414	0,430	0,800	2,293	169,887	650,058	0,819	
P3L4	0,586	6,222	126,695	242,598	0,448	0,802	1,921	192,803	730,197	0,743	
P3L5	0,631	5,326	88,495	295,695	0,536	0,792	2,267	123,338	628,312	0,740	
P3L6	0,656	4,467	129,104	337,140	0,570	0,841	1,914	171,622	764,853	0,795	
P3L7	0,609	5,309	144,382	278,556	0,529	0,794	2,333	205,050	631,898	0,739	
P3L8	0,599	6,168	154,421	255,924	0,505	0,803	2,306	217,081	650,982	0,745	
P4L1	0,657	4,195	121,565	350,235	0,584	0,849	1,808	164,445	795,577	0,809	
P4L2	0,659	4,919	116,338	329,802	0,556	0,849	1,810	161,572	794,998	0,809	
P4L3	0,553	8,449	90,762	194,362	0,444	0,844	1,887	159,194	778,587	0,802	
P4L4	0,473	11,220	88,170	139,206	0,387	0,804	2,191	172,530	661,173	0,753	
P4L5	0,641	5,488	132,095	301,154	0,534	0,810	2,217	183,971	670,863	0,754	
P4L6	0,722	3,393	117,646	453,813	0,642	0,858	1,679	146,837	831,733	0,827	
P4L7	0,659	7,728	134,798	301,790	0,511	0,786	3,225	184,841	570,857	0,684	
P4L8	0,715	4,084	92,609	418,192	0,607	0,864	1,743	123,421	841,017	0,823	
P5L1	0,614	6,578	73,640	264,760	0,504	0,826	1,935	115,918	729,089	0,786	
P5L2	0,598	6,247	99,874	251,220	0,500	0,830	1,936	156,676	739,733	0,789	
P5L3	0,537	10,427	61,597	170,570	0,412	0,808	2,072	106,302	675,658	0,764	
P5L4	0,332	33,078	66,183	56,606	0,247	0,723	3,186	182,122	462,371	0,651	
P5L5	0,542	11,455	111,592	169,995	0,406	0,785	2,764	185,762	588,386	0,707	
P5L6	0,646	5,051	107,668	318,148	0,553	0,831	1,974	148,037	736,954	0,784	
P5L7	0,557	9,631	99,658	190,835	0,432	0,782	2,407	168,479	599,934	0,725	
P5L8	0,517	7,547	122,531	184,838	0,448	0,781	2,342	192,912	604,447	0,731	

TAB C.2.6: ROI INTERNA SINISTRA; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (0°, 45°)

Image	Third Order Features GLRLM Degrees: 90°					Third Order Features GLRLM Degrees: 135°					
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	
C1L1	0,807	2,097	137,901	673,964	0,762	0,821	2,002	140,802	711,848	0,777	
C1L2	0,703	10,171	149,653	333,039	0,499	0,686	8,546	153,375	316,087	0,498	
C1L3	0,824	2,156	163,296	705,029	0,765	0,805	2,208	159,047	660,717	0,752	
C1L4	0,848	1,855	160,015	789,529	0,804	0,835	1,956	156,925	748,880	0,788	
C1L5	0,810	2,250	151,693	670,064	0,753	0,812	2,187	151,456	676,370	0,757	
C1L6	0,844	1,957	154,931	768,079	0,792	0,817	2,120	149,844	696,546	0,769	
C1L7	0,824	1,920	110,491	724,552	0,786	0,839	1,902	110,140	761,693	0,795	
C1L8	0,812	2,537	138,230	655,464	0,734	0,794	2,597	135,797	617,061	0,723	
C2L1	0,786	2,355	155,422	613,341	0,732	0,791	2,309	155,223	624,916	0,738	
C2L2	0,835	1,996	176,230	742,709	0,783	0,819	2,090	173,192	697,485	0,767	
C2L3	0,835	1,922	109,316	748,885	0,791	0,826	2,012	106,167	722,762	0,780	
C2L4	0,821	2,200	176,446	697,846	0,762	0,822	2,151	179,146	701,627	0,764	
C2L5	0,778	2,728	100,076	578,339	0,706	0,768	2,731	98,714	560,183	0,701	
C2L6	0,828	1,961	148,492	730,267	0,784	0,832	1,889	150,552	747,656	0,793	
C2L7	0,865	1,776	159,866	841,333	0,820	0,861	1,702	162,151	836,055	0,826	
C2L8	0,843	1,849	126,789	776,932	0,802	0,839	1,898	126,238	762,200	0,795	
P1L1	0,815	2,209	174,187	682,566	0,757	0,802	2,194	174,824	655,146	0,751	
P1L2	0,809	2,202	163,384	669,220	0,755	0,793	2,267	162,646	631,443	0,742	
P1L3	0,782	2,492	181,676	593,228	0,718	0,797	2,376	186,210	631,026	0,734	
P1L4	0,800	2,170	199,808	653,599	0,753	0,786	2,341	194,297	615,642	0,734	
P1L5	0,794	2,277	135,776	631,264	0,740	0,822	2,051	143,653	710,920	0,774	
P1L6	0,818	2,129	141,314	695,364	0,766	0,852	1,823	147,981	802,674	0,809	
P1L7	0,749	3,102	123,113	508,383	0,670	0,757	2,890	126,202	529,129	0,683	
P1L8	0,837	1,962	165,778	751,840	0,788	0,859	1,775	175,304	823,987	0,817	
P2L1	0,807	2,121	91,970	669,262	0,759	0,809	2,074	92,589	680,369	0,766	
P2L2	0,707	6,075	195,231	382,786	0,566	0,703	5,938	195,762	386,084	0,571	
P2L3	0,853	1,808	135,547	804,437	0,810	0,859	1,737	141,010	827,863	0,821	
P2L4	0,859	1,780	131,315	823,118	0,817	0,848	1,870	129,036	787,835	0,803	
P2L5	0,861	1,777	112,810	828,837	0,818	0,861	1,701	111,663	838,553	0,826	
P2L6	0,783	4,535	159,367	534,778	0,644	0,794	3,965	170,263	567,433	0,663	
P2L7	0,855	1,753	140,210	815,699	0,817	0,848	1,848	138,283	788,857	0,804	
P2L8	0,879	1,604	134,362	899,073	0,846	0,880	1,587	136,331	902,414	0,848	
P3L1	0,828	1,968	153,825	731,412	0,784	0,807	2,185	149,664	667,767	0,755	
P3L2	0,842	1,962	146,799	767,113	0,793	0,835	1,941	147,497	748,275	0,788	
P3L3	0,784	2,654	163,993	592,026	0,712	0,766	2,770	158,069	555,179	0,699	
P3L4	0,798	2,217	182,356	645,796	0,749	0,798	2,157	184,561	652,481	0,755	
P3L5	0,769	2,548	121,348	567,256	0,709	0,796	2,329	124,023	635,381	0,740	
P3L6	0,816	2,204	161,624	686,268	0,760	0,821	1,942	167,623	717,926	0,783	
P3L7	0,751	2,685	189,370	530,364	0,694	0,755	2,800	187,226	536,421	0,692	
P3L8	0,761	2,598	204,329	554,294	0,705	0,750	2,638	203,783	534,358 671,086	0,698	
P4L1	0,815	2,119	155,845	688,382	0,764	0,811	2,221	153,973	-	0,753	
P4L2 P4L3	0,835	1,910	158,879	751,706	0,792	0,841	1,908	159,185	766,494	0,795	
P4L3 P4L4	0,815 0,794	2,151 2,299	151,515 165,949	686,465 631,826	0,762 0,740	0,815 0,796	2,227	153,129 168,662	683,499 646,859	0,758	
P4L4 P4L5							2,174			0,751	
	0,777	2,629	171,597	577,565	0,708	0,802	2,494	177,828	634,491 834,753	0,729	
P4L6 P4L7	0,856	1,829	143,395	810,411	0,810	0,862	1,749	146,172	834,753 553,422	0,821	
P4L7 P4L8	0,751 0,867	3,335	183,182 124,328	505,286	0,663 0,830	0,772 0,863	3,037	190,043 121,987		0,686 0,820	
P4L8 P5L1	0,867	1,687 2,085	124,328	854,580 705,326	0,830	0,863	1,759 1,868	121,987	836,151 778,207	0,820	
P5L1 P5L2	0,820	2,085	153,726	681,970	0,771	0,844	2,193	152,851	668,554	0,802	
P5L2 P5L3			105,758		0,766	0,808	2,193	104,255		0,733	
P5L3 P5L4	0,801 0,713	2,237 3,382	176,734	651,697 437,558	0,749	0,783	3,436	176,287	612,368 444,026	0,732	
P5L4 P5L5	0,713	3,382	176,734	437,558		0,718	3,436	176,287	492,038	0,636	
P5L5 P5L6	0,746	2,264	142,467	644,102	0,659 0,745	0,748	2,009	148,590	710,731	0,651	
P5L7	0,798	2,264	169,611	604,621	0,745	0,820	2,009	171,570	646,790	0,777	
P5L7 P5L8	0,783	2,373	183,230	531,060	0,729	0,801	2,299	190,349	598,635	0,743	
FJLO	0,733	2,733	103,230	331,000	0,032	0,701	2,402	130,343	330,033	0,723	

TAB C.2.7: ROI INTERNA SINISTRA; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (90°, 135°)

ROI INTERNA AL TENDINE POSIZIONATA NELLA ZONA CENTRALE

Image	ROI Po	sition			First Orde	r Features		
	x	Y	Mean	St Deviation	Variance	Skewness	Kurtosis	Entropy
C1L1	153	246	34,815	29,742	884,594	1,157	4,028	6,500
C1L2	138	223	124,384	30,327	919,742	-0,399	2,842	6,862
C1L3	119	227	118,930	38,414	1475,604	-0,414	2,940	7,194
C1L4	124	227	117,564	32,916	1083,462	-0,400	2,708	6,961
C1L5	137	235	10,026	15,153	229,612	2,579	11,242	4,528
C1L6	135	226	86,481	40,796	1664,352	0,188	2,394	7,260
C1L7	125	232	66,591	35,727	1276,447	-0,017	2,076	7,030
C1L8	132	226	72,154	37,118	1377,768	0,275	2,258	7,121
C2L1	129	222	136,068	44,076	1942,709	-0,012	2,688	7,377
C2L2	107	226	169,812	30,096	905,753	-0,323	3,069	6,867
C2L3	98	235	175,788	29,282	857,411	-0,713	3,547	6,775
C2L4	80	232	182,119	32,748	1072,437	-0,693	3,357	6,921
C2L5	140	237	145,062	32,296	1043,045	-0,237	2,922	6,969
C2L6	110	226	162,114	36,474	1330,380	-0,310	2,909	7,126
C2L7	85	222	162,267	37,144	1379,671	-0,450	2,997	7,119
C2L8	95	228	136,616	35,869	1286,558	-0,165	2,686	7,088
P1L1	129	280	139,028	29,801	888,084	-0,300	2,825	6,858
P1L2	114	230	181,578	27,747	769,904	-0,281	3,458	6,737
P1L3	101	187	168,055	24,351	592,982	-0,108	3,368	6,572
P1L4	81	231	195,235	24,818	615,937	-0,235	2,718	6,585
P1L5	168	230	26,554	19,302	372,586	0,982	3,888	6,042
P1L6	114	223	134,449	29,933	896,007	-0,473	3,322	6,857
P1L7	122	231	157,112	30,207	912,471	-0,169	3,351	6,873
P1L8	115	227	154,818	28,170	793,573	-0,379	3,101	6,758
P2L1	98	234	64,175	32,936	1084,790	0,157	2,359	6,955
P2L2	100	223	37,507	26,047	678,457	0,614	2,807	6,491
P2L3	94	230	127,311	39,787	1583,042	-0,352	2,506	7,214
P2L4	91	224	111,459	34,722	1205,630	-0,398	2,435	7,023
P2L5	111	231	43,762	32,208	1037,354	0,772	3,070	6,728
P2L6	114	223	69,731	41,154	1693,613	0,535	2,683	7,217
P2L7	115	229	80,708	36,481	1330,843	0,306	2,671	7,217
P2L7 P2L8	103	226	57,179	44,315	1963,791	0,936	3,720	7,117
P3L1	143	228	130,822	40,322	1625,842	-0,224	2,564	7,109
P3L2	129	231	156,890	30,139	908,374	-0,224	2,942	6,847
P3L3		227	·		-			· ·
	117		143,327	36,117	1304,430	-0,300	2,649	7,113
P3L4 P3L5	113	227	163,021	34,006	1156,385	-0,251	2,938	7,020
	158	231	57,606	42,110	1773,274	0,895	3,259	7,100
P3L6	169	226	46,624	26,726	714,267	0,685	3,000	6,614
P3L7	133	229 228	186,215	26,599	707,483	-0,089	2,822	6,705
P3L8	139		185,404	24,513	600,864	0,102	2,668	6,583
P4L1	117	218	144,533	34,129	1164,756	-0,702	3,312	6,977
P4L2	115	219	117,609	31,342	982,327	-0,348	3,000	6,904
P4L3	120	211	156,210	26,194	686,146	-0,286	3,012	6,682
P4L4	118	216	171,906	27,990	783,447	-0,434	2,987	6,757
P4L5	127	227	90,019	35,889	1288,053	0,148	2,500	7,111
P4L6	163	227	133,554	33,684	1134,637	-0,255	2,598	7,011
P4L7	135	227	132,333	50,754	2575,949	-0,146	2,208	7,538
P4L8	126	227	178,716	38,237	1462,092	-0,203	2,783	7,113
P5L1	136	210	136,908	34,664	1201,564	-0,537	3,118	7,058
P5L2	118	219	154,545	24,158	583,599	-0,017	3,787	6,538
P5L3	132	217	83,543	39,871	1589,693	-0,005	2,104	7,167
P5L4	83	228	178,790	25,675	659,224	-0,160	2,585	6,617
P5L5	151	231	28,280	26,901	723,655	1,259	4,266	6,162
P5L6	130	228	41,190	29,205	852,950	0,658	2,717	6,635
P5L7	140	232	129,600	28,871	833,556	-0,674	3,655	6,766
P5L8	118	225	155,051	25,033	626,630	-0,186	3,045	6,619

TAB C.3.1: ROI INTERNA CENTRALE; DESCRITTORI DEL PRIMO ORDINE E POSIZIONE ROI

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 0°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	1,066	0,939	0,055	0,703	3,519	0,298				
C1L2	0,981	0,931	0,038	0,717	3,658	0,340				
C1L3	0,681	0,961	0,038	0,752	3,625	0,459				
C1L4	0,917	0,945	0,037	0,728	3,705	0,372				
C1L5	0,648	0,930	0,314	0,836	2,187	0,603				
C1L6	0,960	0,960	0,025	0,716	3,920	0,342				
C1L7	1,405	0,946	0,020	0,651	4,129	0,144				
C1L8	0,988	0,962	0,023	0,698	3,981	0,307				
C2L1	0,583	0,970	0,043	0,786	3,548	0,534				
C2L2	0,689	0,954	0,045	0,766	3,527	0,483				
C2L3	1,179	0,921	0,035	0,683	3,763	0,244				
C2L4	0,811	0,942	0,045	0,740	3,521	0,413				
C2L5	1,027	0,934	0,033	0,704	3,763	0,310				
C2L6	0,972	0,935	0,035	0,710	3,714	0,328				
C2L7	0,875	0,944	0,037	0,726	3,704	0,376				
C2L8	0,722	0,960	0,036	0,760	3,651	0,464				
P1L1	1,104	0,923	0,031	0,681	3,767	0,256				
P1L2	0,897	0,926	0,039	0,709	3,606	0,345				
P1L3	0,961	0,920	0,039	0,703	3,635	0,321				
P1L4	0,703	0,953	0,038	0,745	3,588	0,444				
P1L5	2,310	0,861	0,030	0,610	3,960	-0,087				
P1L6	1,712	0,841	0,030	0,624	3,817	0,038				
P1L7	1,025	0,911	0,040	0,693	3,642	0,291				
P1L8	1,388	0,860	0,034	0,643	3,692	0,130				
P2L1	0,929	0,962	0,024	0,714	3,945	0,346				
P2L2	0,994	0,954	0,033	0,713	3,777	0,331				
P2L3	1,029	0,950	0,029	0,708	3,869	0,313				
P2L4	1,076	0,950	0,028	0,695	3,895	0,286				
P2L5	1,908	0,899	0,030	0,618	3,954	-0,011				
P2L6	2,356	0,903	0,017	0,576	4,331	-0,164				
P2L7	1,890	0,896	0,019	0,596	4,168	-0,046				
P2L8	1,079	0,943	0,042	0,692	3,651	0,276				
P3L1	1,042	0,948	0,028	0,702	3,887	0,304				
P3L2	0,748	0,954	0,042	0,758	3,584	0,455				
P3L3	1,161	0,932	0,028	0,672	3,881	0,229				
P3L4	0,580	0,965	0,048	0,788	3,504	0,538				
P3L5	0,928	0,956	0,036	0,704	3,700	0,330				
P3L6	2,068	0,899	0,020	0,589	4,190	-0,090				
P3L7	1,357	0,908	0,026	0,640	3,920	0,134				
P3L8	1,280	0,911	0,026	0,654	3,871	0,171				
P4L1	0,803	0,948	0,042	0,737	3,594	0,410				
P4L2	1,193	0,920	0,031	0,681	3,832	0,237				
P4L3	0,914	0,931	0,037	0,715	3,633	0,351				
P4L4	0,865	0,944	0,037	0,723	3,676	0,373				
P4L5	2,213	0,879	0,018	0,588	4,241	-0,118				
P4L6	1,500	0,912	0,025	0,643	3,979	0,111				
P4L7	1,554	0,932	0,020	0,626	4,145	0,069				
P4L8	1,498	0,918	0,024	0,645	4,011	0,116				
P5L1	0,884	0,938	0,038	0,725	3,637	0,372				
P5L2	0,698	0,928	0,052	0,745	3,351	0,446				
P5L3	0,814	0,967	0,028	0,737	3,836	0,405				
P5L4	0,570	0,970	0,040	0,790	3,569	0,545				
P5L5	1,030	0,953	0,075	0,724	3,459	0,339				
P5L6	1,698	0,928	0,028	0,635	4,022	0,062				
P5L7	1,079	0,923	0,028	0,693	3,700	0,281				
P5L8	1,142	0,914	0,031	0,674	3,788	0,233				

TAB C.3.2: ROI INTERNA CENTRALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (0°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 45°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	4,933	0,721	0,037	0,552	4,069	-0,543				
C1L2	6,743	0,529	0,015	0,451	4,539	-1,022				
C1L3	5,721	0,661	0,014	0,467	4,563	-0,873				
C1L4	7,770	0,542	0,012	0,430	4,677	-1,195				
C1L5	3,799	0,601	0,259	0,720	2,592	-0,030				
C1L6	7,018	0,704	0,010	0,446	4,827	-1,050				
C1L7	8,891	0,661	0,009	0,431	4,914	-1,326				
C1L8	8,128	0,686	0,009	0,443	4,931	-1,189				
C2L1	6,394	0,678	0,013	0,451	4,639	-0,993				
C2L2	6,767	0,556	0,014	0,453	4,584	-1,029				
C2L3	7,032	0,530	0,015	0,444	4,548	-1,075				
C2L4	5,736	0,591	0,016	0,472	4,421	-0,854				
C2L5	5,179	0,664	0,015	0,475	4,510	-0,776				
C2L6	5,674	0,626	0,014	0,461	4,523	-0,869				
C2L7	6,147	0,610	0,014	0,458	4,561	-0,932				
C2L8	7,629	0,572	0,011	0,415	4,701	-1,238				
P1L1	5,811	0,592	0,014	0,457	4,509	-0,905				
P1L2	5,366	0,528	0,017	0,462	4,356	-0,846				
P1L3	5,673	0,530	0,017	0,463	4,415	-0,877				
P1L4	6,724	0,546	0,013	0,451	4,596	-1,026				
P1L5	6,204	0,631	0,020	0,482	4,339	-0,873				
P1L6	5,352	0,500	0,019	0,470	4,295	-0,809				
P1L7	4,934	0,574	0,019	0,484	4,331	-0,734				
P1L8	5,291	0,463	0,019	0,474	4,250	-0,800				
P2L1	10,809	0,565	0,008	0,386	5,033	-1,634				
P2L2	11,209	0,482	0,011	0,387	4,758	-1,673				
P2L3	8,498	0,588	0,010	0,417	4,835	-1,310				
P2L4	10,051	0,529	0,010	0,403	4,880	-1,503				
P2L5	8,035	0,579	0,016	0,450	4,525	-1,157				
P2L6	8,938	0,637	0,009	0,419	4,890	-1,346				
P2L7	7,868	0,566	0,010	0,414	4,774	-1,257				
P2L8	4,766	0,739	0,026	0,533	4,222	-0,589				
P3L1	6,098	0,693	0,012	0,468	4,698	-0,905				
P3L2	6,182	0,625	0,015	0,482	4,566	-0,865				
P3L3	5,359	0,682	0,013	0,466	4,563	-0,828				
P3L4	5,254	0,670	0,015	0,470	4,537	-0,805				
P3L5	3,346	0,837	0,013	0,553	4,230	-0,356				
P3L6	6,943	0,658	0,012	0,453	4,697	-1,036				
P3L7	5,401	0,630	0,012	0,466	4,534	-0,830				
P3L8	5,314	0,631	0,014	0,466	4,497	-0,830				
P4L1	5,270	0,656	0,014	0,481	4,425	-0,830				
P4L1 P4L2	6,797	0,533	0,017	0,481	4,425	-1,061				
P4L2 P4L3	5,562	0,580	0,014	0,482	4,370	-0,798				
P4L3 P4L4	5,668	0,635	0,015	0,463	4,440	-0,798				
P4L4 P4L5	8,163	0,558	0,015	0,415	4,521	-1,280				
P4L5 P4L6	6,873	0,603	0,010	0,413	4,795	-1,280				
P4L0 P4L7	5,435	0,762	0,012	0,463	4,720	-0,841				
P4L7 P4L8	6,427	0,653	0,011	0,461	4,720	-0,959				
P4L8 P5L1										
P5L1 P5L2	5,630	0,602	0,016	0,476	4,477	-0,825				
	5,463	0,424	0,021	0,470	4,206	-0,820				
P5L3	6,880	0,713	0,010	0,447	4,800	-1,060				
P5L4	6,981	0,636	0,011	0,424	4,710	-1,128				
P5L5	6,147	0,722	0,043	0,532	4,132	-0,760				
P5L6	8,647	0,635	0,013	0,440	4,705	-1,274				
P5L7	4,776	0,659	0,018	0,486	4,357	-0,700				
P5L8	5,893	0,548	0,015	0,464	4,491	-0,893				

TAB C.3.3: ROI INTERNA CENTRALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (45°)

145

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 90°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	4,167	0,764	0,039	0,566	4,004	-0,411				
C1L2	6,550	0,542	0,015	0,456	4,523	-0,986				
C1L3	5,306	0,688	0,014	0,470	4,535	-0,811				
C1L4	7,258	0,573	0,013	0,437	4,654	-1,122				
C1L5	3,092	0,671	0,273	0,735	2,528	0,079				
C1L6	6,743	0,715	0,010	0,455	4,815	-1,003				
C1L7	7,647	0,708	0,009	0,446	4,863	-1,139				
C1L8	8,050	0,689	0,009	0,439	4,925	-1,187				
C2L1	6,399	0,679	0,012	0,453	4,646	-0,988				
C2L2	6,813	0,555	0,014	0,446	4,585	-1,054				
C2L3	6,566	0,558	0,015	0,457	4,523	-0,985				
C2L4	5,683	0,594	0,017	0,480	4,413	-0,829				
C2L5	5,159	0,668	0,015	0,478	4,514	-0,766				
C2L6	5,545	0,635	0,015	0,462	4,517	-0,848				
C2L7	6,085	0,615	0,014	0,465	4,554	-0,913				
C2L8	7,286	0,591	0,011	0,422	4,697	-1,179				
P1L1	5,489	0,619	0,015	0,465	4,493	-0,846				
P1L2	5,190	0,543	0,017	0,467	4,344	-0,812				
P1L3	4,800	0,602	0,018	0,485	4,350	-0,713				
P1L4	6,384	0,569	0,013	0,447	4,574	-0,991				
P1L5	4,818	0,712	0,022	0,513	4,245	-0,642				
P1L6	4,554	0,574	0,020	0,495	4,239	-0,650				
P1L7	4,410	0,620	0,019	0,490	4,287	-0,647				
P1L8	4,589	0,535	0,020	0,498	4,198	-0,661				
P2L1	10,113	0,598	0,008	0,404	5,010	-1,525				
P2L2	10,965	0,494	0,011	0,385	4,746	-1,655				
P2L3	7,693	0,626	0,010	0,429	4,801	-1,190				
P2L4	9,635	0,547	0,010	0,403	4,861	-1,461				
P2L5	6,758	0,650	0,018	0,476	4,470	-0,949				
P2L6	6,997	0,715	0,010	0,455	4,795	-1,045				
P2L7	6,252	0,656	0,011	0,438	4,683	-1,017				
P2L8	4,022	0,780	0,028	0,554	4,153	-0,445				
P3L1	5,479	0,724	0,013	0,479	4,638	-0,807				
P3L2	5,991	0,635	0,015	0,486	4,552	-0,836				
P3L3	5,115	0,696	0,014	0,477	4,545	-0,763				
P3L4	4,776	0,699	0,015	0,481	4,498	-0,722				
P3L5	2,598	0,873	0,025	0,586	4,118	-0,177				
P3L6	6,077	0,700	0,013	0,461	4,651	-0,921				
P3L7	4,533	0,690	0,015	0,482	4,457	-0,680				
P3L8	4,600	0,683	0,015	0,481	4,445	-0,694				
P4L1	5,117	0,665	0,017	0,479	4,443	-0,054				
P4L1 P4L2	6,519	0,552	0,017	0,479	4,407	-0,757				
P4L2 P4L3	5,463	0,590	0,014	0,448	4,553	-0,770				
P4L3 P4L4	5,790	0,625	0,018	0,458	4,444	-0,770				
P4L4 P4L5	7,157	0,614	0,014	0,436	4,531	-1,108				
P4L5 P4L6	6,164	0,644	0,011	0,460	4,747	-0,928				
P4L6 P4L7	4,465	0,804	0,013	0,494	4,649	-0,928				
P4L7 P4L8		0,804								
	5,439	·	0,013	0,480	4,587	-0,798				
P5L1	5,462	0,612	0,016	0,475	4,462	-0,808				
P5L2	5,113	0,464	0,021	0,485	4,194	-0,746				
P5L3	6,468	0,730	0,010	0,449	4,772	-1,006				
P5L4	6,768	0,648	0,011	0,427	4,694	-1,099				
P5L5	6,455	0,707	0,042	0,512	4,147	-0,838				
P5L6	7,015	0,706	0,015	0,460	4,636	-1,040				
P5L7	4,519	0,676	0,018	0,499	4,345	-0,642				
P5L8	5,064	0,612	0,016	0,484	4,433	-0,742				

TAB C.3.4: ROI INTERNA CENTRALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (90°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 135°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	4,413	0,750	0,037	0,556	4,035	-0,475				
C1L2	6,982	0,512	0,014	0,447	4,546	-1,052				
C1L3	5,285	0,687	0,014	0,464	4,519	-0,823				
C1L4	7,303	0,569	0,013	0,440	4,650	-1,121				
C1L5	3,028	0,681	0,272	0,735	2,533	0,092				
C1L6	7,375	0,689	0,009	0,436	4,856	-1,126				
C1L7	7,738	0,705	0,009	0,444	4,873	-1,148				
C1L8	8,774	0,661	0,008	0,425	4,951	-1,309				
C2L1	6,751	0,660	0,012	0,454	4,660	-1,032				
C2L2	7,201	0,527	0,014	0,440	4,605	-1,109				
C2L3	6,879	0,540	0,015	0,443	4,528	-1,048				
C2L4	6,081	0,566	0,016	0,475	4,435	-0,886				
C2L5	6,000	0,611	0,014	0,459	4,567	-0,915				
C2L6	6,050	0,602	0,014	0,448	4,548	-0,948				
C2L7	6,531	0,585	0,014	0,449	4,588	-1,000				
C2L8	7,413	0,583	0,011	0,427	4,713	-1,174				
P1L1	5,860	0,589	0,014	0,462	4,509	-0,899				
P1L2	5,615	0,506	0,017	0,459	4,372	-0,885				
P1L3	4,614	0,617	0,018	0,493	4,336	-0,667				
P1L4	6,460	0,563	0,013	0,446	4,581	-1,007				
P1L5	5,851	0,652	0,020	0,494	4,321	-0,815				
P1L6	5,095	0,524	0,019	0,474	4,275	-0,770				
P1L7	4,506	0,611	0,020	0,494	4,287	-0,647				
P1L8	4,878	0,504	0,020	0,482	4,223	-0,726				
P2L1	9,940	0,600	0,008	0,406	4,998	-1,500				
P2L2	11,565	0,466	0,011	0,376	4,764	-1,734				
P2L3	7,579	0,632	0,010	0,428	4,794	-1,176				
P2L4	9,909	0,535	0,010	0,406	4,869	-1,482				
P2L5	7,687	0,597	0,017	0,462	4,515	-1,095				
P2L6	7,752	0,685	0,010	0,439	4,828	-1,172				
P2L7	6,377	0,648	0,011	0,446	4,696	-1,007				
P2L8	4,296	0,764	0,026	0,540	4,190	-0,512				
P3L1	5,749	0,711	0,012	0,473	4,670	-0,858				
P3L2	6,221	0,622	0,015	0,481	4,564	-0,880				
P3L3	5,744	0,659	0,013	0,477	4,586	-0,840				
P3L4	4,673	0,707	0,015	0,486	4,498	-0,700				
P3L5	2,783	0,864	0,024	0,578	4,163	-0,220				
P3L6	7,145	0,647	0,012	0,444	4,700	-1,092				
P3L7	4,801	0,671	0,015	0,479	4,472	-0,725				
P3L8	4,871	0,663	0,014	0,482	4,471	-0,731				
P4L1	5,474	0,643	0,017	0,479	4,435	-0,799				
P4L2	6,940	0,523	0,014	0,445	4,578	-1,059				
P4L3	5,962	0,550	0,015	0,472	4,480	-0,875				
P4L4	6,456	0,584	0,014	0,451	4,574	-0,992				
P4L5	8,198	0,556	0,010	0,416	4,794	-1,280				
P4L6	6,576	0,620	0,012	0,446	4,671	-1,016				
P4L7	4,924	0,785	0,011	0,485	4,678	-0,730				
P4L8	5,679	0,694	0,013	0,468	4,594	-0,853				
P5L1	5,790	0,590	0,016	0,463	4,476	-0,877				
P5L2	5,228	0,449	0,021	0,481	4,201	-0,774				
P5L3	6,681	0,722	0,010	0,443	4,788	-1,050				
P5L4	6,885	0,642	0,011	0,426	4,699	-1,116				
P5L5	7,669	0,654	0,038	0,491	4,211	-1,027				
P5L6	6,886	0,710	0,015	0,469	4,615	-0,989				
P5L7	5,083	0,637	0,018	0,491	4,390	-0,729				
P5L8	5,192	0,601	0,016	0,468	4,442	-0,796				

TAB C.3.5: ROI INTERNA CENTRALE; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (135°)

147

Image			d Order Feati RLM Degrees:					d Order Featu RLM Degrees:		
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP
C1L1	0,553	16,640	146,939	256,229	0,397	0,755	5,569	219,886	683,006	0,605
C1L2	0,571	9,550	138,527	296,273	0,438	0,828	1,974	241,978	1071,564	0,784
C1L3	0,500	10,657	103,269	222,080	0,400	0,842	1,831	201,141	1137,168	0,803
C1L4	0,504	9,424	115,500	233,280	0,412	0,848	1,851	226,507	1157,375	0,804
C1L5	0,390	151,330	87,906	52,119	0,149	0,602	35,340	203,980	216,526	0,300
C1L6	0,568	9,602	115,382	295,454	0,439	0,833	1,973	179,765	1086,373	0,785
C1L7	0,612	7,837	136,939	362,398	0,479	0,830	2,155	209,064	1059,121	0,771
C1L8	0,539	9,003	121,659	263,214	0,428	0,820	1,995	194,784	1039,301	0,777
C2L1	0,512	12,983	92,512	213,825	0,382	0,864	1,766	177,353	1230,730	0,820
C2L2	0,456	16,589	101,724	159,747	0,336	0,812	2,067	237,108	1005,809	0,767
C2L3	0,587	8,009	150,338	334,216	0,468	0,819	2,050	257,012	1028,922	0,771
C2L4	0,549	9,760	122,249	266,673	0,424	0,826	2,049	230,148	1053,198	0,775
C2L5	0,576	8,274	138,223	313,957	0,457	0,807	2,170	217,804	979,941	0,757
C2L6	0,619	6,960	133,672	391,216	0,503	0,848	1,825	209,970	1161,267	0,807
C2L7	0,595	7,573	113,487	342,709	0,473	0,855	1,771	211,910	1194,589	0,816
C2L8	0,515	12,406	108,735	223,205	0,389	0,872	1,706	213,758	1272,774	0,831
P1L1	0,576	7,490	152,178	323,242	0,469	0,821	2,043	241,075	1041,156	0,775
P1L2	0,530	8,662	148,861	271,032	0,438	0,838	1,940	266,691	1109,058	0,791
P1L3	0,494	9,893	154,903	225,753	0,407	0,811	2,218	289,587	987,922	0,755
P1L4	0,372	17,619	112,390	119,768	0,309	0,806	2,213	281,478	967,749	0,751
P1L5	0,540	10,204	224,503	264,810	0,424	0,707	4,774	301,607	586,921	0,591
P1L6	0,698	3,740	199,581	601,070	0,618	0,834	1,847	252,008	1109,042	0,798
P1L7	0,591	6,614	149,619	358,490	0,494	0,828	2,001	245,333	1066,792	0,780
P1L8	0,677	4,410	197,165	539,203	0,586	0,836	1,979	257,515	1095,050	0,786
P2L1	0,454	11,979	113,804	183,242	0,372	0,850	1,898	227,580	1160,110	0,802
P2L2	0,410	19,579	134,128	133,940	0,315	0,804	2,177	293,965	970,599	0,755
P2L3	0,608	9,372	116,708	344,422	0,462	0,870	1,678	195,452	1268,182	0,833
P2L4	0,573	8,135	123,358	310,106	0,456	0,851	1,794	219,699	1174,497	0,811
P2L5	0,667	5,660	187,312	484,323	0,547	0,807	2,252	242,836	970,186	0,749
P2L6	0,732	3,454	163,645	683,959	0,644	0,867	1,716	197,893	1248,905	0,828
P2L7	0,712	3,469	168,679	639,944	0,634	0,868	1,699	211,694	1254,263	0,829
P2L8	0,668	6,970	136,654	476,597	0,536	0,820	2,732	180,378	981,015	0,733
P3L1	0,610	7,417	116,955	362,235	0,482	0,832	1,998	183,780	1078,375	0,782
P3L2	0,485	14,014	112,691	186,184	0,361	0,790	2,522	221,620	895,095	0,722
P3L3	0,627	5,808	133,025	410,234	0,519	0,832	1,958	204,994	1084,811	0,787
P3L4	0,471	19,533	81,057	159,843	0,328	0,826	2,059	211,339	1049,434	0,773
P3L5 P3L6	0,603	7,264	130,528	366,674	0,492	0,782	3,028	178,195	844,373	0,695
P3L7	0,623	5,649	194,619	412,998	0,524 0,499	0,776	2,527	254,601	857,839	0,717
P3L7 P3L8	0,594 0,527	6,159 7,377	177,618 177,158	362,964 286,126	0,499	0,791 0,782	2,387 2,260	249,203 275,057	906,376 897,727	0,731 0,737
P3L8 P4L1	0,527	9,239	118,788	251,541	0,438	0,782	2,260	215,590	1029,211	0,737
P4L1 P4L2	0,517	6,594	152,887	355,554	0,424	0,820	1,884	241,899	1124,753	0,703
P4L3	0,489	10,190	140,212	222,380	0,490	0,782	2,436	253,025	880,783	0,737
P4L4	0,492	12,282	120,831	212,589	0,402	0,802	2,430	248,315	958,842	0,723
P4L5	0,711	3,456	171,579	636,794	0,633	0,863	1,681	211,904	1237,316	0,731
P4L6	0,678	5,991	158,692	495,715	0,545	0,836	1,953	218,309	1100,723	0,823
P4L7	0,743	3,141	124,812	723,232	0,661	0,857	1,755	150,497	1204,161	0,789
P4L7 P4L8	0,674	4,440	145,230	524,134	0,578	0,837	1,733	197,121	1087,959	0,819
P5L1	0,576	7,981	126,578	318,779	0,461	0,832	1,924	216,762	1105,985	0,783
P5L2	0,475	12,226	150,973	197,742	0,379	0,820	2,108	298,737	1027,439	0,751
P5L3	0,521	9,806	107,329	251,764	0,418	0,830	1,918	183,164	1082,985	0,789
P5L4	0,356	30,057	89,627	85,288	0,254	0,805	2,133	263,219	977,916	0,759
P5L5	0,464	24,396	142,991	157,322	0,320	0,700	4,899	244,667	562,806	0,579
P5L6	0,552	10,051	153,177	280,950	0,435	0,797	2,543	249,329	913,102	0,724
P5L7	0,569	8,434	147,338	302,929	0,450	0,791	2,263	246,846	922,184	0,741
P5L8	0,529		165,692	269,714	0,438	0,807		270,470	962,881	0,745
P5L8	0,529	8,599	165,692	269,714	0,438	0,807	2,324	270,470	962,881	0,745

TAB C.3.6: ROI INTERNA CENTRALE; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (0°, 45°)

Image			d Order Feat RLM Degrees:			Third Order Features GLRLM Degrees: 135°					
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	
C1L1	0,734	6,662	211,796	622,598	0,582	0,752	6,285	217,268	669,165	0,597	
C1L2	0,816	2,060	237,957	1020,550	0,770	0,832	1,940	246,342	1086,873	0,787	
C1L3	0,839	1,863	199,426	1123,333	0,799	0,844	1,910	196,661	1135,183	0,798	
C1L4	0,846	1,920	224,552	1137,492	0,795	0,844	1,890	224,677	1136,435	0,798	
C1L5	0,607	53,504	176,942	199,985	0,273	0,580	40,015	191,527	189,127	0,281	
C1L6	0,822	2,091	174,710	1035,274	0,770	0,848	1,877	182,538	1152,108	0,801	
C1L7	0,810	2,304	202,940	979,321	0,750	0,819	2,261	204,366	1010,584	0,757	
C1L8	0,817	2,080	194,035	1020,853	0,769	0,837	1,905	202,266	1110,937	0,794	
C2L1	0,867	1,754	177,964	1245,250	0,823	0,860	1,753	176,533	1217,346	0,820	
C2L2	0,824	1,984	241,054	1056,891	0,781	0,832	1,928	243,380	1089,388	0,789	
C2L3	0,816	2,173	251,334	1008,587	0,761	0,817	1,990	256,812	1032,189	0,776	
C2L4	0,814	2,142	224,378	1005,845	0,763	0,816	2,070	224,502	1016,019	0,768	
C2L5	0,811	2,121	221,015	997,687	0,763	0,823	1,961	226,216	1054,631	0,782	
C2L6	0,840	1,853	205,210	1127,085	0,800	0,850	1,764	209,348	1177,838	0,814	
C2L7	0,849	1,915	208,271	1154,745	0,801	0,855	1,749	211,845	1198,283	0,818	
C2L8	0,863	1,730	211,916	1233,426	0,824	0,854	1,780	208,758	1187,258	0,814	
P1L1	0,812	2,078	237,589 265,564	1005,132	0,766	0,831	2,039	242,442	1072,725	0,779	
P1L2 P1L3	0,833	1,981	-	1086,263	0,785	0,827	1,941	263,621	1073,642	0,786	
P1L3 P1L4	0,782 0,797	2,523 2,308	274,611 277,550	872,844 934,657	0,719 0,741	0,764 0,797	2,641 2,208	266,053 277,588	814,931 947,513	0,703 0,749	
P1L4 P1L5	0,797	6,134	277,330	456,998	0,741	0,797	4,485	306,324	572,758	0,749	
P1L5 P1L6	0,821	2,032	243,522	1040,721	0,550	0,838	1,922	249,806	1113,785	0,393	
P1L7	0,821	2,032	236,044	995,158	0,773	0,808	2,094	236,104	990,165	0,794	
P1L7 P1L8	0,809	2,094	250,586	999,184	0,764	0,808	2,094	254,070	1045,404	0,763	
P2L1	0,813	2,170	221,127	1068,434	0,700	0,824	1,995	223,226	1045,404	0,772	
P2L2	0,803	2,245	289,354	963,673	0,777	0,815	2,079	295,257	1017,527	0,769	
P2L3	0,862	1,752	192,723	1222,917	0,821	0,864	1,720	193,536	1236,128	0,825	
P2L4	0,852	1,825	216,429	1175,813	0,809	0,854	1,834	217,238	1179,652	0,808	
P2L5	0,783	2,648	230,792	865,188	0,712	0,794	2,380	236,859	921,284	0,735	
P2L6	0,838	1,971	189,545	1104,634	0,788	0,851	1,937	190,031	1162,038	0,800	
P2L7	0,851	1,784	207,499	1177,640	0,813	0,846	1,867	204,112	1146,527	0,802	
P2L8	0,802	3,098	179,526	906,728	0,710	0,812	2,766	181,663	953,952	0,727	
P3L1	0,816	2,114	179,080	1014,224	0,765	0,830	1,940	186,430	1080,294	0,787	
P3L2	0,777	2,580	215,731	850,878	0,711	0,784	2,399	221,682	886,268	0,727	
P3L3	0,827	2,026	202,576	1058,679	0,777	0,823	2,089	201,750	1040,400	0,771	
P3L4	0,800	2,126	209,217	962,333	0,756	0,802	2,105	211,865	972,666	0,759	
P3L5	0,767	3,628	167,888	771,688	0,663	0,764	3,078	178,395	787,321	0,680	
P3L6	0,746	2,708	246,068	768,381	0,692	0,795	2,389	261,386	920,898	0,735	
P3L7	0,781	2,388	250,939	880,642	0,727	0,793	2,305	252,407	924,387	0,739	
P3L8	0,756	2,493	265,330	811,185	0,710	0,749	2,677	257,435	776,799	0,694	
P4L1	0,825	2,083	217,017	1047,452	0,773	0,831	2,041	220,011	1074,345	0,780	
P4L2	0,832	1,954	238,570	1087,482	0,788	0,826	1,960	233,825	1065,997	0,784	
P4L3	0,767	2,552	247,561	833,894	0,711	0,788	2,275	260,740	913,137	0,740	
P4L4	0,803	2,130	251,424	971,594	0,757	0,809	2,115	251,771	994,720	0,763	
P4L5	0,845	1,845	204,933	1145,279	0,803	0,876	1,650	214,044	1296,222	0,839	
P4L6	0,821	2,054	213,195	1037,602	0,773	0,832	1,886	220,289	1095,241	0,793	
P4L7	0,845	1,864	147,030	1145,257	0,802	0,840	1,869	146,718	1126,743	0,800	
P4L8	0,813	2,035	192,313	1014,109	0,770	0,833	1,953	195,721	1091,699	0,788	
P5L1	0,837	1,921	217,924	1106,199	0,792	0,846	1,881	218,767	1145,676	0,800	
P5L2	0,810	2,157	295,470	992,298	0,760	0,818	2,122	296,955	1018,149	0,765	
P5L3	0,831	1,913	183,630	1089,603	0,791	0,844	1,836	185,448	1142,922	0,804	
P5L4	0,798	2,186	260,072	952,840	0,752	0,803	2,203	259,255	968,395	0,754	
P5L5	0,728	4,663	253,833	625,756	0,598	0,752	4,136	270,273	706,018	0,630	
P5L6	0,768	2,799	240,487	814,432	0,696	0,770	2,957	240,303	806,621	0,687	
P5L7	0,773	2,469	241,641	856,745	0,719	0,791	2,320	248,377	919,159	0,739	
P5L8	0,784	2,591	257,713	872,578	0,715	0,795	2,270	271,121	933,188	0,743	

TAB C.3.7: ROI INTERNA CENTRALE; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (90°, 135°)

ROI INTERNA AL TENDINE POSIZIONATA A DESTRA

Image	ROI Po	sition			First Orde	r Features				
	x	Υ	Mean	St Deviation	Variance	Skewness	Kurtosis	Entropy		
C1L1	152	393	85,531	38,558	1486,754	0,248	2,340	7,183		
C1L2	117	375	85,940	32,925	1084,046	-0,080	2,271	6,975		
C1L3	115	393	129,823	32,507	1056,704	-0,368	3,555	6,945		
C1L4	126	395	140,874	34,216	1170,743	-0,355	2,778	7,022		
C1L5	147	392	21,415	20,148	405,957	1,116	3,758	5,807		
C1L6	129	381	77,056	34,059	1160,019	0,040	2,299	7,022		
C1L7	123	396	52,033	32,798	1075,740	0,413	2,514	6,871		
C1L8	119	396	85,546	35,785	1280,591	0,054	2,386	7,093		
C2L1	105	389	106,112	42,874	1838,222	-0,029	2,413	7,346		
C2L2	98	374	154,884	32,832	1077,952	-0,364	2,883	6,968		
C2L3	102	399	178,058	33,268	1106,759	-0,585	3,489	6,938		
C2L4	78	394	176,190	28,882	834,196	-0,693	3,059	6,701		
C2L5	111	385	59,683	34,386	1182,373	0,838	3,355	6,920		
C2L6	97	385	143,538	41,570	1728,050	-0,253	2,446	7,286		
C2L7	73	397	99,643	36,932	1363,946	0,061	2,478	7,128		
C2L8	97	396	141,160	30,639	938,725	-0,397	3,115	6,848		
P1L1	130	364	133,714	30,097	905,823	-0,413	2,806	6,842		
P1L2	105	403	148,998	33,682	1134,461	-0,264	2,690	7,016		
P1L3	119	401	185,095	23,909	571,640	-0,395	2,893	6,524		
P1L4	83	397	194,299	21,802	475,330	-0,323	2,911	6,414		
P1L5	147	398	105,542	37,114	1377,459	-0,045	2,660	7,161		
P1L6	119	397	154,878	31,609	999,157	-0,413	2,920	6,932		
P1L7	154	401	151,509	27,470	754,618	-0,320	3,058	6,732		
P1L8	124	397	152,476	34,344	1179,515	-0,438	3,167	7,007		
P2L1	92	392	42,067	32,326	1045,003	0,856	3,116	6,691		
P2L2	97	395	45,736	27,354	748,261	0,400	2,453	6,642		
P2L3	102	398	143,867	33,601	1129,049	-0,449	2,848	6,974		
P2L4	91	391	114,411	37,057	1373,199	-0,255	2,429	7,133		
P2L5	125	395	58,047	57,539	3310,737	0,891	2,761	6,932		
P2L6	112	402	58,653	37,340	1394,304	0,480	2,433	7,002		
P2L7	135	398	14,558	20,138	405,539	1,789	5,681	5,026		
P2L8	104	397	98,785	42,277	1787,337	0,000	2,504	7,296		
P3L1	136	393	132,317	37,448	1402,383	-0,272	2,343	7,128		
P3L2	126	394	120,883	33,199	1102,153	-0,416	2,919	6,966		
P3L3	96	398	128,157	30,374	922,581	-0,212	2,754	6,861		
P3L4	118	396	154,232	25,457	648,045	-0,468	3,029	6,590		
P3L5	171	398	67,576	28,957	838,511	0,384	2,630	6,768		
P3L6	147	397	105,705	33,265	1106,551	-0,063	2,506	6,996		
P3L7	125	393	207,811	27,286	744,500	-0,396	2,918	6,578		
P3L8	144	400	205,596	23,412	548,135	0,115	2,495	6,433		
P4L1	103	362	105,898	31,391	985,402	-0,087	2,348	6,928		
P4L2	104	396	139,095	28,665	821,682	-0,368	3,061	6,786		
P4L3	106	343	149,773	31,408	986,492	0,096	2,938	6,935		
P4L4	106	371	155,589	24,112	581,387	-0,270	3,011	6,542		
P4L5	116	397	39,469	31,907	1018,047	0,939	3,415	6,631		
P4L6	178	398	58,989	33,001	1089,054	0,656	3,085	6,908		
P4L7	139	398	158,393	35,159	1236,162	-0,425	3,052	7,035		
P4L8	129	397	152,274	44,196	1953,243	-0,376	2,627	7,341		
P5L1	112	353	128,977	31,097	967,031	-0,003	2,364	6,917		
P5L2	118	352	171,551	26,994	728,699	-0,104	3,396	6,690		
P5L3	131	400	108,228	35,921	1290,304	-0,247	2,189	7,057		
P5L4	86	400	169,967	26,349	694,254	-0,308	2,988	6,656		
P5L5	127	398	21,025	22,847	521,967	1,013	3,036	5,516		
P5L6	150	398	55,839	38,867	1510,633	0,748	3,021	7,029		
P5L7	119	397	150,692	25,355	642,899	-0,309	3,026	6,619		
P5L8	122	393	166,774	25,478	649,153	-0,062	2,984	6,624		

TAB C.4.1: ROI INTERNA DESTRA; DESCRITTORI DEL PRIMO ORDINE E POSIZIONE ROI

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 0°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	1,501	0,931	0,020	0,635	4,128	0,098				
C1L2	1,887	0,906	0,018	0,600	4,204	-0,038				
C1L3	0,707	0,946	0,047	0,759	3,487	0,465				
C1L4	0,609	0,962	0,046	0,785	3,480	0,528				
C1L5	1,417	0,934	0,076	0,684	3,552	0,195				
C1L6	1,580	0,935	0,018	0,625	4,227	0,062				
C1L7	1,210	0,951	0,024	0,676	3,989	0,221				
C1L8	1,243	0,943	0,021	0,662	4,050	0,193				
C2L1	1,040	0,949	0,025	0,682	3,924	0,268				
C2L2	1,054	0,927	0,037	0,701	3,705	0,297				
C2L3	0,622	0,961	0,046	0,774	3,459	0,508				
C2L4	0,618	0,961	0,048	0,778	3,440	0,516				
C2L5	1,615	0,920	0,023	0,620	4,052	0,047				
C2L6	1,165	0,940	0,026	0,678	3,915	0,236				
C2L7	1,092	0,942	0,024	0,675	3,933	0,246				
C2L8	0,638	0,950	0,046	0,767	3,429	0,494				
P1L1	1,604	0,902	0,026	0,640	3,992	0,091				
P1L2	1,201	0,919	0,027	0,657	3,867	0,195				
P1L3	1,013	0,923	0,036	0,706	3,657	0,315				
P1L4	1,126	0,916	0,031	0,678	3,774	0,244				
P1L5	1,705	0,890	0,022	0,615	4,046	0,022				
P1L6	1,526	0,894	0,027	0,633	3,919	0,086				
P1L7	1,116	0,908	0,035	0,678	3,698	0,247				
P1L8	1,467	0,885	0,032	0,644	3,843	0,120				
P2L1	1,033	0,953	0,039	0,708	3,724	0,314				
P2L2	1,563	0,933	0,021	0,643	4,124	0,102				
P2L3	0,946	0,944	0,037	0,725	3,699	0,360				
P2L4	1,119	0,949	0,025	0,683	3,964	0,256				
P2L5	1,108	0,966	0,088	0,720	3,542	0,318				
P2L6	1,790	0,918	0,021	0,623	4,113	0,021				
P2L7	0,983	0,948	0,271	0,795	2,607	0,470				
P2L8	2,011	0,909	0,016	0,586	4,291	-0,089				
P3L1	1,017	0,946	0,033	0,714	3,778	0,326				
P3L2	1,207	0,912	0,032	0,676	3,783	0,224				
P3L3	1,518	0,897	0,026	0,630	3,936	0,086				
P3L4	0,611	0,956	0,048	0,783	3,438	0,524				
P3L5	1,744	0,906	0,020	0,604	4,122	-0,003				
P3L6	1,523	0,910	0,023	0,631	4,024	0,083				
P3L7	1,381	0,922	0,025	0,649	3,939	0,141				
P3L8	1,818	0,912	0,020	0,605	4,157	-0,021				
P4L1	2,125	0,887	0,018	0,591	4,218	-0,098				
P4L2	1,363	0,917	0,029	0,666	3,918	0,179				
P4L3	0,910	0,940	0,034	0,704	3,714	0,333				
P4L4	1,142	0,908	0,034	0,671	3,722	0,232				
P4L5	1,972	0,900	0,040	0,629	3,886	0,001				
P4L6	1,778	0,909	0,020	0,607	4,120	-0,004				
P4L7	1,577	0,881	0,028	0,631	3,895	0,075				
P4L8	1,350	0,927	0,026	0,652	3,968	0,159				
P5L1	1,967	0,898	0,018	0,597	4,223	-0,055				
P5L2	0,581	0,950	0,018	0,775	3,364	0,519				
P5L3	0,939	0,958	0,032	0,773	3,824	0,319				
P5L4	0,587	0,957	0,032	0,768	3,462	0,506				
P5L4 P5L5	1,666	0,936	0,043	0,712	3,462	0,306				
P5L6			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		·					
P5L6 P5L7	1,166	0,944	0,030	0,677	3,843	0,233				
P5L7 P5L8	1,107 0,768	0,905 0,947	0,034 0,040	0,676 0,740	3,684 3,583	0,243 0,424				

TAB C.4.2: ROI INTERNA DESTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (0°)

Image				der Features egrees: 45°		
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry
C1L1	6,479	0,704	0,010	0,447	4,776	-1,021
C1L2	6,764	0,665	0,010	0,447	4,748	-1,034
C1L3	5,098	0,596	0,017	0,465	4,367	-0,805
C1L4	7,720	0,510	0,013	0,419	4,619	-1,222
C1L5	8,182	0,624	0,040	0,486	4,199	-1,094
C1L6	7,250	0,704	0,009	0,434	4,890	-1,129
C1L7	7,749	0,686	0,011	0,429	4,783	-1,214
C1L8	8,655	0,604	0,009	0,404	4,901	-1,367
C2L1	4,568	0,775	0,012	0,481	4,614	-0,694
C2L2	4,696	0,670	0,018	0,500	4,401	-0,660
C2L3	6,399	0,586	0,016	0,453	4,476	-0,971
C2L4	7,342	0,530	0,014	0,442	4,545	-1,102
C2L5	4,597	0,772	0,015	0,501	4,494	-0,645
C2L6	5,511	0,708	0,012	0,477	4,629	-0,828
C2L7	7,812	0,592	0,010	0,418	4,790	-1,240
C2L8	6,215	0,496	0,016	0,449	4,415	-0,979
P1L1	7,560	0,537	0,013	0,432	4,652	-1,172
P1L2	3,244	0,781	0,018	0,528	4,306	-0,398
P1L3	6,611	0,493	0,014	0,435	4,479	-1,055
P1L4	5,533	0,587	0,015	0,463	4,466	-0,855
P1L5	4,675	0,687	0,014	0,480	4,465	-0,712
P1L6	5,180	0,638	0,016	0,482	4,455	-0,767
P1L7	4,900	0,596	0,017	0,483	4,354	-0,731
P1L8	4,723	0,622	0,019	0,483	4,340	-0,702
P2L1	6,230	0,717	0,019	0,486	4,468	-0,867
P2L2	12,163	0,485	0,008	0,377	4,969	-1,795
P2L3	8,773	0,481	0,013	0,427	4,705	-1,282
P2L4	9,295	0,580	0,009	0,419	4,879	-1,390
P2L5	4,319	0,867	0,071	0,591	4,029	-0,405
P2L6	8,049	0,630	0,011	0,434	4,732	-1,215
P2L7	4,125	0,780	0,218	0,681	2,999	-0,176
P2L8	7,503	0,659	0,009	0,426	4,871	-1,184
P3L1	5,458	0,710	0,013	0,475	4,587	-0,807
P3L2	5,099	0,633	0,016	0,479	4,417	-0,763
P3L3	5,503	0,629	0,014	0,472	4,514	-0,838
P3L4	8,228	0,405	0,014	0,420	4,570	-1,273
P3L5	5,422	0,703	0,012	0,467	4,617	-0,825
P3L6	5,027	0,710	0,013	0,468	4,571	-0,781
P3L7	5,194	0,703	0,014	0,491	4,505	-0,748
P3L8	7,345	0,648	0,011	0,446	4,764	-1,108
P4L1	7,444	0,602	0,010	0,416	4,760	-1,194
P4L2	7,158	0,568	0,013	0,442	4,649	-1,088
P4L3	5,342	0,653	0,014	0,481	4,550	-0,790
P4L4	5,952	0,519	0,016	0,450	4,431	-0,941
P4L5	6,498	0,670	0,025	0,485	4,344	-0,910
P4L6	7,631	0,610	0,011	0,431	4,722	-1,171
P4L7	5,347	0,597	0,016	0,469	4,436	-0,816
P4L8	5,375	0,708	0,013	0,480	4,607	-0,792
P5L1	7,198	0,627	0,010	0,435	4,774	-1,125
P5L2	4,532	0,597	0,020	0,495	4,265	-0,656
P5L3	6,276	0,720	0,012	0,456	4,708	-0,949
P5L4	4,002	0,708	0,017	0,507	4,329	-0,556
P5L5	5,737	0,781	0,121	0,616	3,733	-0,515
P5L6	4,844	0,770	0,017	0,493	4,444	-0,693
P5L7	4,320	0,628	0,018	0,493	4,286	-0,629
P5L8	6,867	0,530	0,014	0,442	4,592	-1,054

TAB C.4.3: ROI INTERNA DESTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (45°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 90°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	6,427	0,706	0,010	0,449	4,768	-1,008				
C1L2	6,775	0,666	0,010	0,447	4,752	-1,033				
C1L3	4,982	0,605	0,017	0,462	4,363	-0,790				
C1L4	7,941	0,495	0,012	0,420	4,626	-1,254				
C1L5	8,636	0,601	0,042	0,490	4,203	-1,127				
C1L6	7,647	0,686	0,009	0,423	4,910	-1,203				
C1L7	8,184	0,667	0,011	0,431	4,813	-1,248				
C1L8	9,400	0,574	0,009	0,399	4,937	-1,456				
C2L1	5,149	0,748	0,011	0,462	4,664	-0,809				
C2L2	4,927	0,652	0,017	0,496	4,418	-0,706				
C2L3	6,263	0,596	0,016	0,460	4,469	-0,942				
C2L4	7,481	0,526	0,014	0,435	4,566	-1,134				
C2L5	5,121	0,745	0,015	0,485	4,523	-0,741				
C2L6	5,990	0,683	0,012	0,452	4,657	-0,949				
C2L7	8,756	0,543	0,009	0,406	4,837	-1,379				
C2L8	6,291	0,493	0,015	0,446	4,417	-0,999				
P1L1	7,286	0,552	0,013	0,436	4,649	-1,136				
P1L2	3,149	0,790	0,017	0,527	4,302	-0,389				
P1L3	6,043	0,537	0,015	0,442	4,450	-0,963				
P1L4	5,573	0,585	0,015	0,463	4,472	-0,854				
P1L5	4,164	0,725	0,015	0,490	4,422	-0,617				
P1L6	4,457	0,690	0,017	0,502	4,393	-0,626				
P1L7	4,172	0,656	0,019	0,504	4,280	-0,584				
P1L8	3,863	0,690	0,021	0,511	4,257	-0,525				
P2L1	6,760	0,692	0,018	0,475	4,496	-0,959				
P2L2	12,007	0,492	0,008	0,364	4,960	-1,817				
P2L3	8,718	0,486	0,013	0,426	4,708	-1,282				
P2L4	9,510	0,568	0,009	0,409	4,891	-1,422				
P2L5	4,066	0,875	0,073	0,603	4,012	-0,357				
P2L6	7,711	0,645	0,012	0,445	4,713	-1,146				
P2L7	3,762	0,798	0,221	0,687	2,972	-0,123				
P2L8	6,320	0,712	0,010	0,458	4,800	-0,969				
P3L1	5,686	0,699	0,013	0,480	4,614	-0,823				
P3L2	5,051	0,638	0,016	0,486	4,407	-0,752				
P3L3	5,390	0,638	0,015	0,480	4,513	-0,802				
P3L4	8,717	0,373	0,013	0,411	4,585	-1,352				
P3L5	5,061	0,723	0,013	0,469	4,579	-0,781				
P3L6	4,648	0,730	0,013	0,477	4,541	-0,717				
P3L7	4,725	0,729	0,015	0,498	4,465	-0,668				
P3L8	6,588	0,686	0,011	0,468	4,720	-0,968				
P4L1	7,367	0,607	0,010	0,434	4,762	-1,141				
P4L2	7,512	0,547	0,013	0,432	4,669	-1,160				
P4L3	5,908	0,614	0,014	0,461	4,580	-0,907				
P4L4	6,389	0,483	0,015	0,442	4,458	-1,021				
P4L5	5,762	0,713	0,027	0,505	4,305	-0,776				
P4L6	6,561	0,664	0,012	0,452	4,662	-1,002				
P4L7	4,929	0,633	0,016	0,479	4,407	-0,742				
P4L8	4,781	0,741	0,014	0,498	4,560	-0,683				
P5L1	7,779	0,597	0,010	0,425	4,807	-1,223				
P5L2	4,695	0,580	0,019	0,484	4,277	-0,703				
P5L3	6,375	0,715	0,011	0,457	4,720	-0,963				
P5L4	4,016	0,706	0,017	0,507	4,323	-0,563				
P5L5	5,533	0,788	0,114	0,604	3,752	-0,517				
P5L6	4,073	0,807	0,018	0,527	4,368	-0,518				
P5L7	4,427	0,619	0,018	0,497	4,295	-0,639				
P5L8	6,455	0,558	0,018	0,452	4,576	-0,984				

TAB C.4.4: ROI INTERNA DESTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (90°)

Image	Second Order Features GLCM Degrees: 135°									
	Contrast	Correlation	Energy	Homogeneity	Entropy	Symmetry				
C1L1	7,869	0,640	0,009	0,424	4,848	-1,234				
C1L2	8,356	0,588	0,009	0,422	4,836	-1,274				
C1L3	5,250	0,584	0,017	0,457	4,383	-0,834				
C1L4	8,569	0,456	0,012	0,405	4,658	-1,364				
C1L5	10,510	0,517	0,038	0,470	4,268	-1,349				
C1L6	9,559	0,609	0,008	0,404	5,006	-1,464				
C1L7	9,673	0,608	0,010	0,419	4,886	-1,423				
C1L8	11,179	0,488	0,008	0,379	4,996	-1,695				
C2L1	6,316	0,689	0,011	0,450	4,745	-0,990				
C2L2	5,843	0,589	0,016	0,465	4,474	-0,889				
C2L3	6,387	0,588	0,016	0,455	4,470	-0,966				
C2L4	7,812	0,502	0,014	0,434	4,573	-1,177				
C2L5	7,115	0,648	0,013	0,452	4,653	-1,060				
C2L6	7,306	0,613	0,011	0,427	4,723	-1,168				
C2L7	10,368	0,459	0,009	0,384	4,892	-1,610				
C2L8	6,710	0,456	0,015	0,433	4,439	-1,075				
P1L1	8,228	0,496	0,012	0,413	4,695	-1,288				
P1L2	3,994	0,730	0,016	0,495	4,404	-0,582				
P1L3	6,191	0,525	0,015	0,448	4,450	-0,980				
P1L4	6,366	0,525	0,014	0,451	4,520	-0,986				
P1L5	5,165	0,654	0,014	0,469	4,509	-0,803				
P1L6	4,981	0,652	0,016	0,474	4,441	-0,755				
P1L7	4,198	0,654	0,019	0,498	4,279	-0,593				
P1L8	4,251	0,660	0,020	0,498	4,299	-0,603				
P2L1	8,190	0,629	0,017	0,452	4,557	-1,169				
P2L2	13,027	0,449	0,008	0,360	4,995	-1,919				
P2L3	9,175	0,457	0,012	0,416	4,713	-1,360				
P2L4	10,557	0,523	0,009	0,396	4,933	-1,562				
P2L5	5,006	0,846	0,070	0,582	4,079	-0,513				
P2L6	9,262	0,574	0,011	0,429	4,779	-1,356				
P2L7	4,175	0,777	0,011	0,684	2,990	-0,178				
P2L8	6,899	0,686	0,010	0,441	4,824	-1,075				
P3L1	6,818	0,638	0,010	0,465	4,686	-0,988				
P3L2	5,997	0,569	0,012	0,453	4,471	-0,950				
P3L3	6,551	0,559	0,013	0,460	4,587	-0,984				
P3L4	9,259	0,330	0,014	0,399	4,591	-1,436				
P3L5	6,453	0,647	0,013	0,439	4,674	-1,430				
P3L6	5,644	0,674	0,012	0,452	4,623	-0,906				
P3L7	5,482	0,687	0,012	0,472	4,525	-0,825				
P3L8	7,420	0,644	0,014	0,444	4,772	-1,134				
P4L1	9,048	0,517	0,011	0,416	4,772	-1,134				
P4L2	8,797	0,470	0,010	0,417	4,728	-1,345				
P4L3	7,126	0,537	0,012	0,417	4,728	-1,118				
P4L4	7,559	0,390	0,015	0,423	4,506	-1,118				
P4L5	6,973	0,646	0,025	0,490	4,363	-0,945				
P4L5 P4L6		0,630	0,023	0,440	4,709					
P4L0 P4L7	7,245 5,733	0,568	0,011	0,458	4,709	-1,113 -0,900				
P4L7 P4L8	5,733	0,568	0,016	0,480	4,455	-0,900				
P5L1	9,927	0,486	0,014	0,387	4,392	-0,779				
P5L1 P5L2										
	5,203	0,538	0,018	0,471	4,306	-0,802 -1,106				
P5L3 P5L4	7,184	0,679	0,011	0,439	4,769	-				
	4,388	0,680	0,017 0,107	0,489	4,360	-0,650				
P5L5	7,058	0,730	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	0,583	3,838	-0,734				
P5L6	4,519	0,785	0,018	0,511	4,414	-0,610				
P5L7 P5L8	5,324 6,625	0,542 0,546	0,017 0,014	0,470 0,444	4,364 4,580	-0,810 -1,026				

TAB C.4.5: ROI INTERNA DESTRA; DESCRITTORI DEL SECONDO ORDINE (135°)

Image			d Order Feati RLM Degrees:					d Order Featu RLM Degrees:		
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP
C1L1	0,658	4,597	128,012	433,432	0,569	0,840	1,924	167,291	974,153	0,794
C1L2	0,669	3,896	149,148	470,752	0,597	0,841	1,986	189,911	969,980	0,789
C1L3	0,534	9,732	112,709	219,160	0,417	0,852	1,871	208,007	1021,149	0,806
C1L4	0,460	16,225	82,737	144,624	0,344	0,866	1,739	195,839	1086,251	0,827
C1L5	0,420	30,667	127,360	100,996	0,277	0,659	5,564	249,410	411,434	0,542
C1L6	0,617	5,651	129,842	349,498	0,518	0,818	1,965	181,174	904,896	0,779
C1L7	0,569	10,723	125,082	251,812	0,433	0,816	2,318	199,423	871,877	0,755
C1L8	0,620	6,004	124,260	348,438	0,513	0,869	1,638	190,589	1104,216	0,837
C2L1	0,634	5,554	109,296	375,329	0,530	0,841	1,902	149,000	982,113	0,797
C2L2	0,609	7,092	121,544	322,592	0,490	0,822	2,081	189,457	902,499	0,770
C2L3	0,496	18,338	86,617	166,015	0,359	0,835	1,952	197,896	956,167	0,790
C2L4	0,414	19,334	82,875	111,282	0,309	0,829	1,981	228,946	934,462	0,783
C2L5	0,657	4,583	148,745	428,050	0,566	0,788	2,463	185,976	776,653	0,724
C2L6	0,639	5,608	104,027	379,372	0,530	0,837	1,899	151,118	969,495	0,795
C2L7	0,609	6,066	115,267	337,345	0,508	0,866	1,749	181,325	1081,926	0,824
C2L8	0,467	14,104	99,581	160,176	0,363	0,845	1,821	214,276	1004,704	0,807
P1L1	0,630	5,581	148,931	371,697	0,531	0,833	1,925	215,425	952,118	0,790
P1L2	0,636	5,212	131,948	387,607	0,542	0,767	2,567	165,519	718,804	0,707
P1L3	0,500	11,412	134,616	194,097	0,395	0,814	2,118	252,605	879,616	0,765
P1L4	0,492	10,348	147,019	192,245	0,402	0,780	2,509	257,677	757,515	0,720
P1L5	0,716	3,303	149,662	568,973	0,641	0,846	1,780	175,247	1009,354	0,810
P1L6	0,684	4,578	148,978	468,831	0,579	0,821	2,098	195,717	899,134	0,769
P1L7	0,581	6,921	141,630	293,606	0,481	0,806	2,174	220,979	849,781	0,755
P1L8	0,687	3,726	150,805	504,316	0,612	0,845	1,878	193,896	993,256	0,799
P2L1	0,532	12,820	112,711	208,234	0,395	0,760	2,854	196,082	684,437	0,686
P2L2	0,536	8,740	143,963	236,563	0,438	0,838	1,988	241,637	961,932	0,788
P2L3	0,548	9,817	104,596	231,987	0,424	0,836	1,871	193,196	968,776	0,797
P2L4	0,604	7,494	111,647	316,286	0,485	0,845	1,900	175,580	995,369	0,799
P2L5	0,665	13,103	82,331	361,710	0,471	0,786	6,226	103,873	655,694	0,613
P2L6	0,684	4,788	136,476	465,821	0,575	0,849	1,973	181,483	1000,405	0,795
P2L7	0,441	155,869	74,679	71,560	0,181	0,620	30,627	139,403	210,325	0,317
P2L8	0,738	3,190	133,381	622,725	0,661	0,871	1,681	159,648	1108,751	0,833
P3L1	0,597	9,521	105,052	292,988	0,458	0,844	2,026	171,551	976,421	0,786
P3L2	0,652	5,546	140,394	395,761	0,535	0,825	2,062	193,832	916,258	0,775
P3L3	0,646	4,866	154,823	414,839	0,560	0,803	2,200	202,532	838,983	0,752
P3L4	0,399	19,646	91,998	103,361	0,301	0,810	2,008	247,219	881,804	0,773
P3L5	0,639	5,091	161,498	390,595	0,544	0,800	2,240	209,073	826,775	0,747
P3L6	0,671	4,732	145,055	445,254	0,568	0,837	2,027	190,413	953,063	0,783
P3L7	0,575	7,497	150,846	280,587	0,468	0,751	2,799	214,203	671,230	0,688
P3L8	0,557	8,186	161,572	257,436	0,451	0,742	2,794	236,221	651,861	0,682
P4L1	0,671	4,180	157,362	460,278	0,585	0,843	1,871	203,961	988,632	0,800
P4L2	0,581	6,995	141,146	289,905	0,477	0,828	2,040	221,272	925,869	0,777
P4L3	0,537	7,777	120,234	242,604	0,448	0,811	2,149	199,212	866,139	0,760
P4L4	0,523	7,390	153,614	241,897	0,453	0,805	2,200	249,188	845,615	0,753
P4L5	0,647	7,814	149,866	369,341	0,504	0,782	3,209	201,658	726,870	0,688
P4L6	0,656	4,527	154,157	428,511	0,568	0,827	1,982	200,890	931,192	0,783
P4L7	0,694	3,926	143,344	506,392	0,606	0,858	1,808	192,047	1044,721	0,813
P4L8	0,699	3,952	114,056	519,329	0,611	0,852	1,816	149,053	1026,179	0,810
P5L1	0,672	4,322	151,903	461,631	0,584	0,819	2,073	197,116	892,730	0,769
P5L2	0,433	16,714	100,711	135,849	0,334	0,805	2,308	225,168	834,230	0,744
P5L3	0,549	12,186	94,316	220,609	0,404	0,831	2,008	179,914	936,195	0,780
P5L4 P5L5	0,385	17,497	101,596	117,784	0,321	0,760	2,715	215,709	695,951	0,696
	0,546	52,765	110,064	146,324	0,277	0,660	16,969	167,118	318,020	0,420
P5L6 P5L7	0,634	6,564	125,292	355,858	0,508	0,820	2,278	177,917	881,915	0,755
P5L7 P5L8	0,558 0,418	7,643 13,919	148,535 107,131	261,432 133,391	0,458 0,344	0,784	2,359	232,489	779,488	0,732
FJLO	0,410	13,313	107,131	133,331	0,344	0,811	2,218	226,868	860,396	0,755

TAB C.4.6: ROI INTERNA DESTRA; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (0°, 45°)

Image			d Order Feat RLM Degrees:					d Order Featu LM Degrees:		
	SRE	LRE	GLN	RLN	RP	SRE	LRE	GLN	RLN	RP
C1L1	0,837	1,921	166,761	963,923	0,792	0,866	1,722	173,552	1084,217	0,826
C1L2	0,822	2,112	184,097	898,403	0,767	0,843	1,884	192,037	988,007	0,798
C1L3	0,849	1,850	208,100	1010,810	0,805	0,852	1,844	204,860	1022,533	0,808
C1L4	0,857	1,790	193,910	1043,492	0,815	0,867	1,679	197,489	1093,853	0,832
C1L5	0,676	6,818	247,158	428,045	0,539	0,689	5,181	265,398	469,215	0,570
C1L6	0,833	1,932	184,750	953,363	0,791	0,845	1,802	188,067	1007,587	0,809
C1L7	0,816	2,257	198,795	873,284	0,756	0,827	2,203	199,508	905,617	0,763
C1L8	0,863	1,705	184,728	1074,783	0,826	0,884	1,578	188,042	1169,812	0,852
C2L1	0,849	1,733	153,057	1026,325	0,817	0,860	1,724	153,912	1063,327	0,823
C2L2	0,810	2,151	186,785	864,130	0,760	0,839	1,903	197,961	971,131	0,794
C2L3	0,831	1,901	200,556	949,296	0,791	0,841	1,893	203,320	979,460	0,797
C2L4	0,834	2,025	229,605	944,960	0,782	0,837	1,960	230,243	960,446	0,788
C2L5	0,807	2,194	192,073	849,237	0,754	0,825	2,021	196,004	918,035	0,777
C2L6	0,858	1,765	156,617	1051,284	0,818	0,888	1,609	164,585	1180,713	0,850
C2L7	0,866	1,709	179,138	1084,450	0,827	0,881	1,637	181,423	1150,182	0,844
C2L8	0,835	1,833	209,823	970,089	0,800	0,852	1,764	214,922	1036,076	0,817
P1L1	0,828	1,979	212,028	934,098	0,783	0,857	1,795	219,541	1044,683	0,815
P1L2	0,789	2,389	173,538	787,911	0,732	0,814	2,101	181,882	877,198	0,765
P1L3	0,809	2,173	253,104	857,771	0,757	0,805	2,146	250,665	852,339	0,758
P1L4	0,767	2,545	255,661	722,029	0,710	0,787	2,352	265,550	787,155	0,733
P1L5	0,835	1,948	172,981	956,066	0,789	0,855	1,827	176,129	1034,520	0,810
P1L6	0,791	2,265	188,508	806,994	0,743	0,829	1,883	203,567	947,004	0,792
P1L7	0,776	2,434	211,377	752,094	0,722	0,792	2,330	215,253	797,833	0,735
P1L8	0,812	2,107	187,669	872,904	0,763	0,824	2,028	190,874	916,409	0,777
P2L1	0,771	2,775	199,368	717,208	0,698	0,791	2,459	205,773	784,249	0,726
P2L2	0,855	1,866	245,227	1026,465	0,805	0,856	1,876	243,108	1030,650	0,805
P2L3	0,842	1,837	196,806	993,491	0,804	0,854	1,701	202,054	1047,974	0,824
P2L4	0,861	1,765	180,182	1062,649	0,820	0,864	1,710	181,548	1078,300	0,826
P2L5	0,795	6,278	105,702	674,836	0,616	0,816	5,091	111,873	750,129	0,647
P2L6	0,833	2,108	178,687	934,570	0,775	0,848	1,914	184,254	1000,184	0,799
P2L7	0,616	34,148	129,413	201,988	0,305	0,640	28,947	136,581	230,723	0,326
P2L8	0,842	1,892	153,750	982,073	0,797	0,854	1,781	158,748	1034,286	0,813
P3L1	0,829	2,102	168,897	922,737	0,773	0,839	1,936	172,274	969,010	0,792
P3L2	0,812	2,091	191,956	872,419	0,764	0,831	1,894	198,051	951,084	0,792
P3L3	0,792	2,341	199,757	801,411	0,738	0,816	2,039	208,384	891,804	0,772
P3L4	0,823	1,968	251,281	919,083	0,781	0,839	1,929	254,417	970,934	0,792
P3L5	0,786	2,394	203,820	778,786	0,729	0,812	2,131	211,751	869,144	0,761
P3L6	0,819	2,152	183,922	886,191	0,763	0,838	1,932	191,922	969,052	0,793
P3L7	0,743	2,911	213,375	643,093	0,674	0,773	2,558	226,448	731,017	0,709
P3L8	0,702	3,274	221,835	549,734	0,639	0,741	2,817	238,147	649,213	0,682
P4L1	0,828	2,030	199,939	928,877	0,780	0,848	1,845	204,633	1010,129	0,806
P4L2	0,825	1,986	222,966	923,139	0,781	0,834	1,952	221,954	950,743	0,788
P4L3	0,831	2,022	205,150	934,547	0,780	0,858	1,811	216,906	1047,270	0,815
P4L4	0,804	2,115	250,590	851,702	0,760	0,825	1,984	257,646	926,181	0,783
P4L5	0,769	3,514	196,092	678,848	0,666	0,772	3,221	196,986	695,275	0,676
P4L6	0,811	2,170	195,950	866,092	0,759	0,830	2,021	199,993	932,137	0,780
P4L7	0,831	1,948	188,117	943,249	0,787	0,847	1,814	192,442	1010,756	0,808
P4L8	0,836	1,917	143,934	962,686	0,792	0,863	1,750	151,584	1072,435	0,823
P5L1	0,825	1,934	201,171	929,912	0,786	0,859	1,717	207,908	1061,551	0,823
P5L2	0,810	2,251	224,194	850,892	0,750	0,814	2,214	226,644	870,737	0,758
P5L3	0,816	2,131	176,206	884,147	0,765	0,841	1,969	182,178	976,829	0,792
P5L4 P5L5	0,754	2,706	214,679	682,032	0,693	0,772	2,528	221,606	735,190	0,713
	0,665	17,393	166,588	318,804	0,418	0,680	12,309	184,404	363,730	0,456
P5L6 P5L7	0,785	2,897	164,551	743,911	0,700	0,801	2,567	170,225	803,888	0,724
P5L7 P5L8	0,762 0,801	2,525	224,465 226,374	717,791 829,816	0,711 0,747	0,796 0,829	2,367	231,312 239,125	808,805	0,738
FJLO	0,801	2,233	220,374	023,010	0,747	0,829	2,003	239,123	931,100	0,781

TAB C.4.7: ROI INTERNA DESTRA; DESCRITTORI DEL TERZO ORDINE (90°, 135°)