

Alma Mater Studiorum

Università di Bologna

---

Scuola di Scienze

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Corso di Laurea in Fisica

## Micro-tomografia applicata allo studio di reperti fossili e paleo-ambienti

Relatore:

Prof.ssa Maria Pia Morigi

Correlatori:

Prof. Federico Fanti

Dott. Matteo Bettuzzi

Presentata da:

Francesco Casadei

Anno Accademico 2018/2019



# Abstract

Il presente lavoro di tesi nasce da una collaborazione tra l'*X-Ray Imaging Group* del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Ateneo di Bologna e il Museo Geologico Giovanni Capellini di Bologna. Il materiale di studio è rappresentato da dodici reperti paleontologici (fossili di denti di dinosauro e coccodrillo) risalenti al periodo Cretaceo, preliminarmente suddivisi in tre gruppi su basi morfologiche, al fine di investigarne la struttura interna. Tale indagine si pone l'obiettivo di individuare nuovi parametri diagnostici che rendano più efficaci gli attuali metodi di classificazione, limitati dall'effettiva capacità di discriminare i caratteri morfologici nel momento in cui questi diventino equivocabili. In particolare, è stata utilizzata la tecnica della micro-tomografia computerizzata (micro-CT), procedura non invasiva, che permette di ricostruire virtualmente le sezioni e il volume dei campioni oggetto di studio, raggiungendo una risoluzione spaziale dell'ordine dei 10  $\mu\text{m}$ . L'apparato sperimentale utilizzato per l'acquisizione delle radiografie si compone di un tubo radiogeno *microfocus* (alimentato da una tensione di 130 kV e corrente di 170  $\mu\text{A}$ ), un rivelatore *Flat Panel* a conversione indiretta, un sistema di assi meccanici per permetterne la traslazione e una tavola rotativa su cui porre i campioni. L'analisi dei risultati ottenuti ha permesso di discriminare strutture interne ai denti legate all'alimentazione degli individui studiati, come bande di accrescimento e canali nutritivi. Le differenze tra queste strutture nei diversi campioni ha consentito una ulteriore e più precisa classificazione, ottenendo infine cinque diversi gruppi di denti. Le informazioni ottenute riguardo al regime alimentare di queste specie fossili ha reso possibile, inoltre, la formulazione di ipotesi sull'ecosistema presente all'epoca e sulla collocazione di questi al suo interno (alcune specie vissute nell'entroterra, altre in ambienti fluviali, costieri o lacustri).



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Caso studio</b> .....	<b>9</b>
1.1 I fossili della Tunisia meridionale.....	9
<b>2 Materiali e metodi</b> .....	<b>11</b>
2.1 Reperti paleontologici studiati .....	11
2.2 Tomografia Assiale Computerizzata (TAC).....	13
2.2.1 Principi radiografici .....	13
2.2.2 Componenti di un sistema tomografico .....	14
2.2.3 Ricostruzione tomografica .....	17
<b>3 Micro-CT</b> .....	<b>21</b>
3.1 Utilizzo della micro-CT in paleontologia .....	21
3.2 Set-up sperimentale.....	25
3.2.1 Sorgente di raggi X .....	25
3.2.2 Rivelatore .....	26
3.2.3 Sistema di movimentazione .....	26
3.2.4 Parametri di acquisizione .....	26
3.2.5 Procedimento di ricostruzione e software utilizzati.....	27
<b>4 Analisi dati</b> .....	<b>31</b>
4.1 Risultati.....	31
4.2 Discussione .....	48
<b>Conclusioni</b> .....	<b>52</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>53</b>
<b>Appendice</b> .....	<b>55</b>



# Introduzione

Il lavoro presentato in questa tesi nasce da una collaborazione tra l'*X-Ray Imaging Group* del Dipartimento di Fisica e Astronomia (DIFA) dell'Università di Bologna e il Museo Geologico Giovanni Capellini (MGGC) di Bologna con lo scopo di investigare, tramite micro-tomografia computerizzata (*micro-Computed Tomography*, micro-CT), la struttura interna di reperti fossili, in particolare denti di diverse specie di dinosauri e coccodrilli risalenti al periodo Cretaceo.

I fossili oggetto dello studio presentato in questa tesi sono dodici, sono stati datati al Cretaceo medio (100-110 milioni di anni) e sono stati rinvenuti in Tunisia, nel Governatorato di Tataouine. In fase preliminare, tali reperti sono stati suddivisi in tre gruppi secondo la loro morfologia (Fanti et al. (2014)): il gruppo A, cui appartengono quattro denti di dinosauri carnivori, Tetanuri di grande taglia, il gruppo B formato da quattro denti di coccodrillo e il gruppo C, cui appartengono i denti di dinosauri piscivori, come lo *Spinosaurus*. L'obiettivo primario di questo lavoro di tesi è verificare se l'utilizzo della micro-CT applicata allo studio di questi reperti possa permettere di identificare nuovi strumenti, parametri, variabili che rendano più efficaci gli attuali metodi di classificazione, basati sui soli caratteri morfologici esterni, limitati dall'effettiva capacità di discriminare una specie dall'altra nel momento in cui i caratteri morfologici diventino equivocabili. La micro-tomografia, infatti, permette di sezionare virtualmente i campioni sotto esame, senza effettivamente arrecarvi danno, e allo stesso tempo ottenere una risoluzione spaziale dell'ordine di 10  $\mu\text{m}$ .

Il lavoro di tesi qui presentato si articola complessivamente in quattro capitoli.

Il primo capitolo è dedicato alla descrizione del sito di provenienza dei fossili che si intende investigare internamente, con brevi cenni sui metodi di classificazione "tradizionali" utilizzati.

Nel secondo capitolo sono presentati i campioni oggetto dell'indagine. Si descrive poi la tecnica tomografica a partire dai principi che sono alla base della formazione di una radiografia. Vengono presentati i componenti di un generico sistema tomografico e infine si spiegano le tecniche di ricostruzione tomografiche.

Nel terzo capitolo si affronta, per prima cosa, il ruolo della tomografia applicata alla paleontologia e la sua importanza nella scoperta e osservazione di strutture invisibili ad occhio nudo, con la presentazione di articoli scientifici a riguardo. Si pone poi l'attenzione sul caso specifico di questo lavoro, presentando il set-up sperimentale e i parametri utilizzati per l'acquisizione delle radiografie. Da ultimo si descrive il procedimento di ricostruzione eseguito attraverso il software PARREC.

Nel quarto ed ultimo capitolo si presentano i risultati delle ricostruzioni, descrivendo, fossile per fossile, ciò che si osserva internamente. Si commenta e discute poi ciò che è stato osservato, operando una nuova classificazione dei denti oggetto dell'indagine, sulla base delle informazioni ricavate dalle ricostruzioni ottenute.



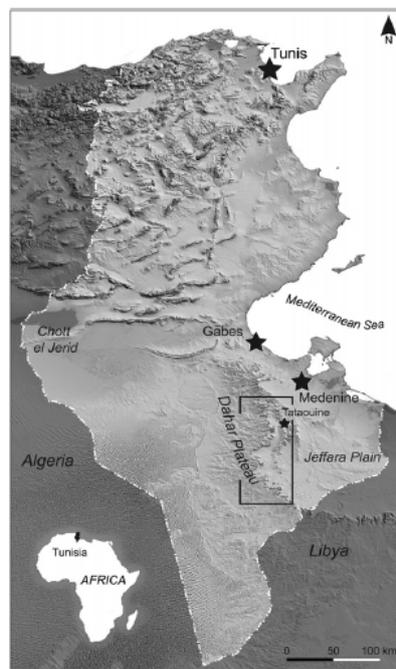
# Capitolo 1

## Caso studio

In questo capitolo è descritta l'origine dei fossili scelti come oggetto di studio, con brevi cenni agli ecosistemi interessati e ai processi di fossilizzazione coinvolti.

### 1.1 I fossili della Tunisia meridionale

I reperti paleontologici oggetto di studio in questa tesi sono stati rinvenuti e raccolti in diverse campagne sul terreno del governatorato di Tataouine, nella Tunisia meridionale (Fig. 1.1). La regione è nota per i reperti paleontologici da oltre un secolo ed è stata oggetto di interesse dal 2009 al 2015 da parte di un gruppo di ricerca dell'Università di Bologna, con l'obiettivo specifico di studiare le faune a vertebrati fossili risalenti al periodo Cretaceo (circa 100 milioni di anni fa). La ricerca ha portato al campionamento sistematico dei depositi fossiliferi.



**Figura 1.1:** Mappa della Tunisia in cui è riquadrata la regione del Governatorato di Tataouine, modificata da Fanti et al. (2014).

Le faune rinvenute sono dominate da vertebrati sia terrestri che marini. Nonostante l'abbondanza di materiale fossile, la maggior parte dei reperti utili al riconoscimento delle specie è rappresentata da denti, il cui potenziale di preservazione è superiore a quello delle ossa o altri elementi scheletrici. La fossilizzazione di questi elementi ha portato alla sostituzione dei materiali organici originari con altri di natura minerale. Si parla di processo di mineralizzazione, il quale mantiene però, in qualche modo, la densità del materiale organico originario. Gli elementi nodali organici (i.e. carbonio) della struttura interna vengono sostituiti da elementi inorganici (i.e. silicati, fosfati, etc.) presenti in soluzione mantenendo la compattezza e la struttura originaria.

Sulla base dei materiali studiati, la fauna risulta composta da coccodrilli, dinosauri carnivori,

rari dinosauri erbivori e pesci ossei. Con oltre quindici generi riconosciuti, la regione di Tataouine rappresenta una località chiave per lo studio del periodo Cretaceo.

Molto più complesso risulta invece lo studio degli ecosistemi preservati, un lavoro che si basa principalmente su dati di natura geologica. Lo studio dettagliato delle forme fossili aiuta a comprendere con maggior dettaglio l'ambiente del tempo e le relazioni tra i vari gruppi di organismi (i.e. preda-predatore, partizione ecologica, etc.). I dati geologici e paleontologici hanno permesso di ricostruire parte dell'ecosistema del tempo. In particolare, è emerso che i denti appartenenti alle diverse specie sono stati accumulati per trasporto fluviale alla foce di un vasto sistema fluviale (Fanti et al. (2014)). Pertanto, il loro ritrovamento negli stessi depositi non rispecchia solamente la relazione tra la specie e uno specifico ambiente, ma anche un trasporto che ha unito in un singolo deposito specie rappresentative di ambienti molto diversi tra loro.

In fase preliminare, è possibile formulare delle ipotesi utili a ricostruire l'ecosistema presente all'epoca. Per quanto riguarda i dinosauri carnivori, essi necessitano di prede da cacciare, in modo da potersi nutrire e sopravvivere. I dati disponibili (Fanti et al. (2014) e bibliografia), indicano che queste specie fossero più comuni nell'entroterra, un ambiente caratterizzato da forte stagionalità. Pertanto, è stato ipotizzato che queste specie non avessero accesso costante a risorse alimentari.

Diversamente, altre specie di dinosauri, come Spinosauri e Barionichini qui studiati, sono storicamente abbinati ad ambienti costieri e abitudini piscivore. In questo caso le risorse alimentari si possono considerare più facili da reperire durante l'anno. Lo stesso discorso si applica anche ai coccodrilli.

La classificazione attuale dei reperti fossili -e quindi l'assegnazione di una specie- si basa esclusivamente su caratteri morfologici. Tali caratteri infatti permettono di ottenere una lista di caratteri diagnostici semplici ed esaustiva e la possibilità di confrontare un numero elevato di reperti in tempi brevi. Il limite di fondamentale rilevanza in questo approccio è l'effettiva capacità di discriminare una specie dall'altra quando i caratteri morfologici diventano equivocabili (come nel caso dei dinosauri piscivori e coccodrilli descritti in questo studio). Di qui nasce l'interesse ad osservare a più alta risoluzione spaziale alcuni elementi propri dei denti, sia interni, come le strutture di crescita o di nutrimento, sia esterni, come la forma dei denticoli delle carene. Per fare ciò, si è deciso di utilizzare la tecnica della micro-tomografia computerizzata (micro-CT) a raggi X, che permette di raggiungere una risoluzione spaziale compatibile con quanto ci si propone di osservare, i cui principi fisici sono spiegati nel capitolo seguente.

## Capitolo 2

### Materiali e metodi

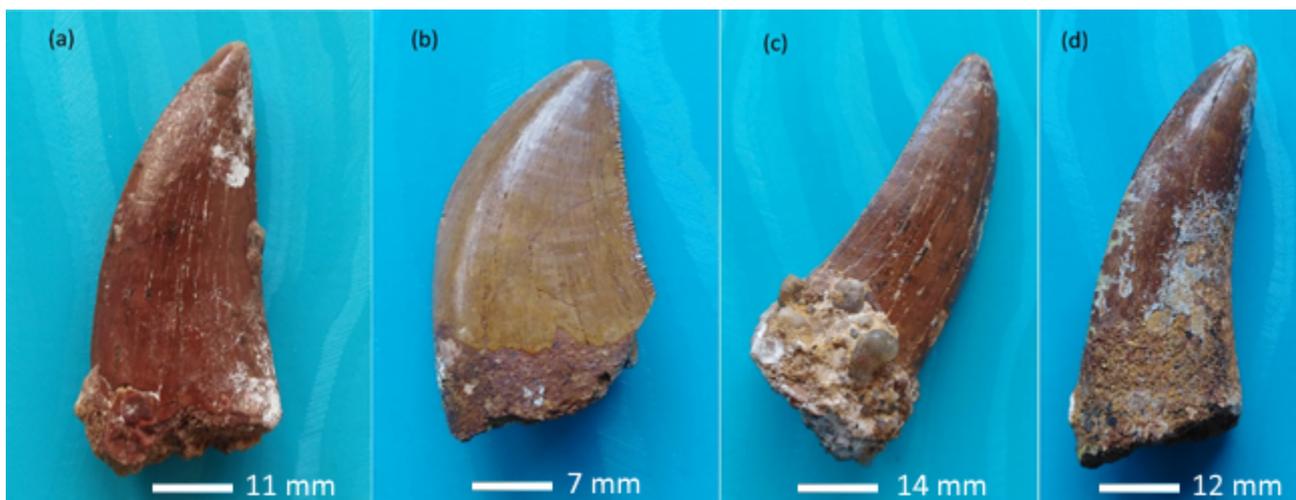
La prima parte di questo capitolo è dedicata alla presentazione dei reperti paleontologici oggetto dello studio. In particolare, se ne descrive la suddivisione su base morfologica, seguendo la classificazione preliminare presentata in Fanti et al. (2014). Nella seconda parte del capitolo viene presentata la tomografia a raggi X: principi radiografici, strumentazioni e ricostruzione delle immagini.

#### Abbreviazioni istituzionali e metriche

**Atenrad:** *attenuated radiography*; **CT** – *Computed Tomography*; **Cx:** coordinata x del centro di rotazione dell'oggetto (in pixel); **Cz:** Coordinata z del centro di rotazione dell'oggetto (in pixel); **FBP:** *Filtered Back Projection*; **FPD:** *Flat Panel Detector*; **MGGC:** Museo Geologico Giovanni Capellini; **odd:** *object-detector distance* (distanza oggetto-rivelatore, in mm); **sdd:** *source-detector distance* (distanza sorgente-rivelatore, in mm); **sod:** *source-object distance* (distanza sorgente-oggetto, in mm); **TUN:** Tunisia; **TXM:** *Synchrotron-based Transmission X-ray Microscopy*.

#### 2.1 Reperti paleontologici studiati

Lo studio effettuato si inquadra in una collaborazione tra il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna e il Museo di Geologia "Giovanni Capellini" di Bologna che ha fornito i dodici fossili oggetto dell'analisi presentata in questo lavoro di tesi. I reperti sono stati descritti da Fanti et al. (2014) e qui suddivisi in tre gruppi A, B e C e numerati progressivamente da 1 a 4. Per le informazioni di dettaglio sui reperti (misure, dati sulle sezioni, morfologie, etc.) si veda Fanti et al. (2014).



**Figura 2.1:** Fossili del gruppo A. Di seguito ne sono indicati il numero, la specie e la catalogazione del museo. (a) A1, *Tetanurae*, MGGC TUN 86; (b) A2, *Abelisauroidea*, MGGC TUN 47; (c) A3, *Theropoda*, MGGC TUN 112; (d) A4, *Tetanurae*, MGGC TUN 33.

La suddivisione in tre macro-gruppi tiene conto sia della specie di dinosauro che della morfologia esterna dei denti: fossili dalle caratteristiche morfologiche simili vengono posti nello stesso gruppo.

I denti del gruppo A (Fig. 2.1) appartengono a dinosauri carnivori (*Tetanurae* indet.). Essi

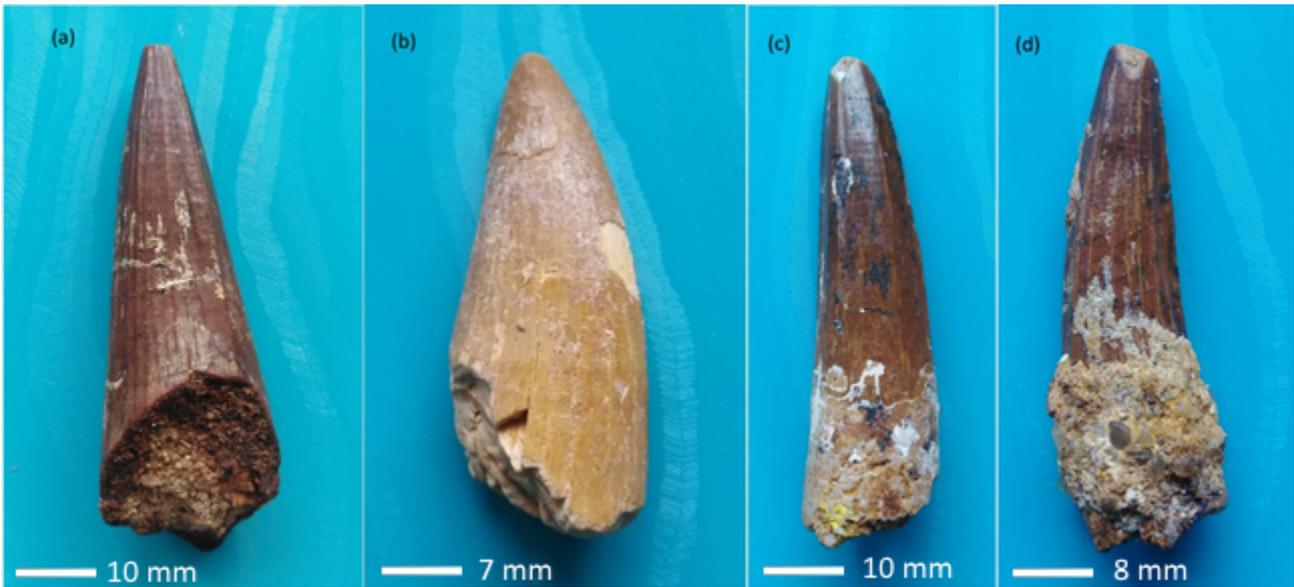
condividono la caratteristica forma a coltello, la sezione di base ‘a goccia’ ed inoltre si osserva la presenza di due carene, cioè una serie di denticoli, una anteriore e una posteriore. Le considerazioni relative alla forma dei denticoli di questi quattro campioni sono riportate in appendice, in quanto non sono state approfondite in questo studio. Lo smalto di tali denti risulta non uniforme e attraversato da creste, seppur di lieve entità. Nella base è presente una cavità poco profonda, dovuta al meccanismo di sostituzione dei denti (in genere, il ricambio dei denti nei dinosauri e nei cocodrilli avviene all’incirca ogni 2-3 anni, si veda Erickson, (1996)). I fossili A1 e A4 presentano sullo smalto delle ondulazioni assiali. Le dimensioni di questi denti vanno dai circa 7 cm del fossile A3, che è anche quello con altezza maggiore tra tutti e dodici i campioni, ai 3.4 cm circa di A2.

I denti del gruppo B (Fig. 2.2) appartengono a cocodrilli. Questi si contraddistinguono per la forma conica, la sezione circolare e l’assenza di denticoli. La superficie esterna risulta liscia al tatto ma lo smalto è in generale mal conservato. Nella base presentano una cavità profonda, dovuta al ricambio di denti tipico di questi animali. Tali fossili sono quelli di altezza minore rispetto agli altri due raggruppamenti (dai circa 4.3 cm di B1 ai 1.9 cm circa di B4). La forma a cono si è sviluppata in modo da permettere a questi predatori di affondare i denti nella carne dei pesci. Si osserva inoltre che questi fossili risultano essere più danneggiati rispetto al resto dei campioni sotto esame: B1 ha lo smalto mal conservato, B2 è attraversato da numerose crepe mentre B4 ha perso l’apice. B2 e B3 presentano delle creste sullo smalto esterno, documentando caratteri morfologici diversi all’interno del gruppo.

I denti del gruppo C (Fig. 2.3) appartengono a dinosauri considerati piscivori. La forma di questi fossili è anch’essa prevalentemente conica, con la differenza che, rispetto al gruppo precedente, si osserva la presenza di carene sprovviste di denticoli sullo smalto dei denti. La sezione di base mostra un’ampia cavità. Il gruppo C risulta essere quello con maggiori differenze morfologiche in termini di forma, dimensioni e smalto. I fossili C2 e C4 presentano una curvatura che è invece assente in C1 e C3. Per quanto riguarda le dimensioni, si va dai circa 6 cm di C1 ai 4.5 cm circa di C2. Lo smalto di C1 è ben conservato mentre quello degli altri tre risulta danneggiato in più punti.



**Figura 2.2:** Fossili del gruppo B. Di seguito ne sono indicati il numero, la specie e la catalogazione del museo. (a) B1, *Crocodylia* indet., MGGC TUN 89; (b) B2, *Crocodylia* indet., MGGC TUN 122; (c) B3, *Crocodylia* indet., MGGC TUN 88; (d) B4, *Crocodylia* indet., MGGC TUN 50.



**Figura 2.3:** Fossili del gruppo C. Di seguito ne sono indicati il numero, la specie e la catalogazione del museo. (a) C1, *Spinosaurinae*, MGGC TUN 153; (b) C2, *Barionichinae*, MGGC TUN 107; (c) C3, *Spinosaurinae*, MGGC TUN 43; (d) C4, *Barionichinae*, MGGC TUN 143.

## 2.2 Tomografia Assiale Computerizzata (TAC)

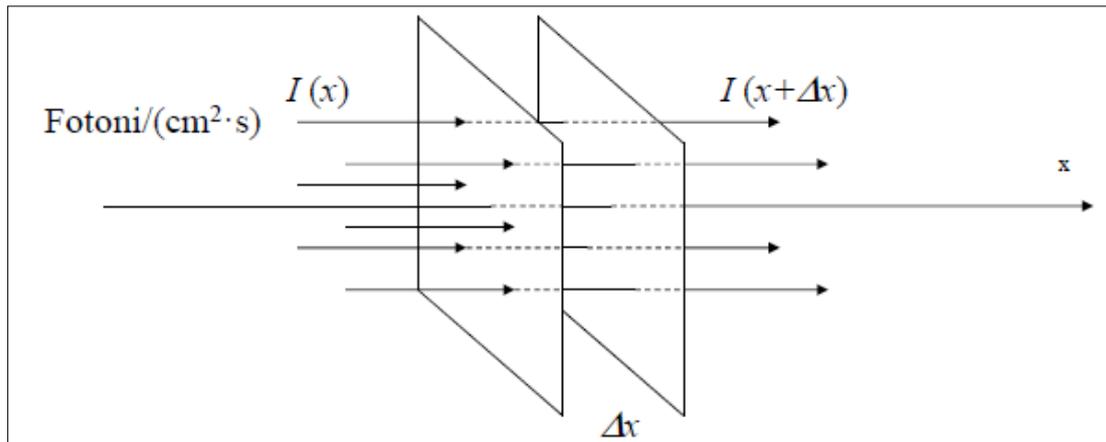
La tomografia assiale computerizzata è una tecnica non invasiva che permette di ottenere le sezioni interne (assiale, coronale e sagittale) di un oggetto o di un essere vivente a partire dalle sue radiografie, prese a diverse angolazioni e rielaborate attraverso opportuni algoritmi matematici. È inoltre possibile, utilizzando appositi software di *rendering* 3D, ricostruirne l'intero volume, in modo da poterlo sezionare virtualmente senza effettivamente danneggiare l'oggetto studiato. Di seguito vengono illustrati sinteticamente i principi alla base della radiografia, i componenti di un sistema tomografico e il metodo di ricostruzione delle sezioni.

### 2.2.1 Principi radiografici

Una radiografia è un'immagine bidimensionale ottenuta inviando un fascio di raggi X su un oggetto, posto tra la sorgente della radiazione e un rivelatore. Tale immagine è una misura dell'assorbimento subito dal fascio di raggi X nell'attraversare l'oggetto. L'oggetto investito assorbe infatti una quantità di radiazione che segue la legge di Lambert-Beer. Tale legge è di seguito riportata nel caso di un fascio monocromatico e oggetto omogeneo:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

dove  $\mu$  è il coefficiente di attenuazione lineare dell'oggetto,  $x$  lo spessore dell'oggetto attraversato,  $I_0$  l'intensità del fascio incidente e  $I(x)$  l'intensità del fascio trasmesso dall'oggetto (Fig. 2.4). Oltre che dall'energia del fascio di raggi X,  $\mu$  dipende fortemente dalla densità e dal numero atomico del materiale di cui è composto l'oggetto e dai processi di interazione materia-radiazione in gioco, di cui non verrà accennato in questa trattazione.



**Figura 2.4:** Schema dell'attenuazione dei raggi X da parte della materia.

Poiché, in genere, un oggetto non è mai perfettamente omogeneo, la forma più corretta per la legge di Lambert-Beer è la seguente

$$I(x) = I_0 e^{-\int_0^x \mu(E, x') dx'}$$

dove si esegue l'integrale di linea lungo la direzione  $x$  e il coefficiente di attenuazione lineare è funzione della posizione. Dalla legge di Lambert-Beer segue che un oggetto con densità maggiore assorbe una quantità maggiore di radiazione rispetto ad uno con densità minore.

La legge scritta sopra vale comunque per un fascio monocromatico, cioè il valore di  $E$  è fissato, perché in caso contrario sarebbe necessario integrare anche rispetto a  $E$  (si tralascia, per semplicità, quest'ultimo caso).

Una radiografia è un'immagine bidimensionale e, da sola, non ci permette di ottenere informazioni complete per quanto riguarda la struttura interna dell'oggetto investito dalla radiazione. Acquisendo però un elevato numero di radiografie a diverse angolazioni è possibile, attraverso algoritmi matematici, ricostruire le sezioni principali dell'oggetto in esame. Per ottenere questo risultato è necessario utilizzare un sistema tomografico, che permetta di traslare e ruotare l'oggetto (o la sorgente del fascio ed il rivelatore) ed elaborare digitalmente i dati acquisiti.

## 2.2.2 Componenti di un sistema tomografico

Un sistema tomografico è un insieme di strumenti che permette di ottenere radiografie a diverse angolazioni dell'oggetto interessato, e di ricostruirne sezioni e volume. I principali componenti di un sistema tomografico sono: una sorgente di raggi X, un rivelatore digitale, un dispositivo di movimentazione e un computer che permetta l'acquisizione dei dati e la loro successiva rielaborazione.

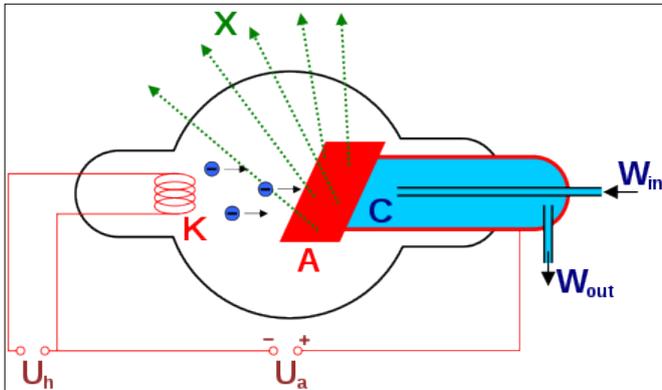


Figura 2.5: Schema elementare di un tubo a raggi X.

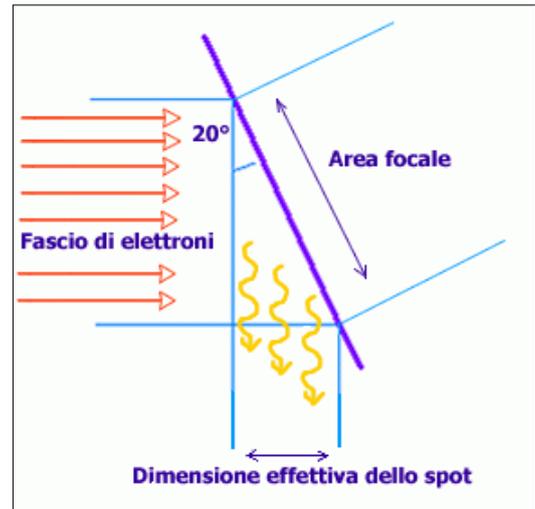


Figura 2.6: Spot focale di un tubo a raggi X.

Le sorgenti di raggi X si suddividono in tre tipologie principali, che si differenziano anche per il range energetico in cui lavorano. Queste sono:

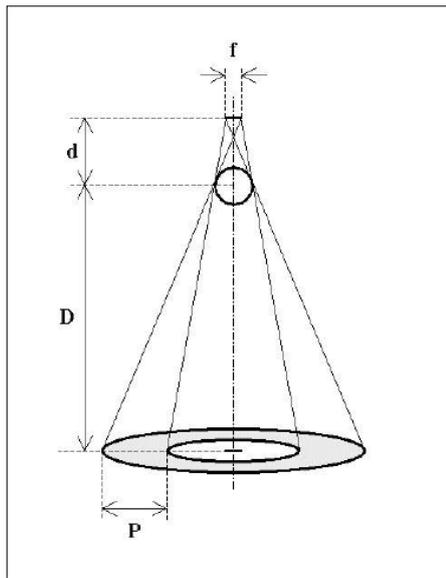
- Sincrotroni (5-100 keV)
- Tubi a raggi X (5-450 keV)
- Acceleratori lineari (2-25 MeV)

Gli acceleratori lineari sono utilizzati principalmente in ambito medico per la radioterapia. I sincrotroni risultano essere le migliori sorgenti di raggi X, poiché la radiazione prodotta è caratterizzata da monocromaticità, coerenza ed elevata brillantezza, caratteristiche che permettono di ottenere immagini tomografiche di elevata qualità. Tuttavia, essi non sono trasportabili e, di conseguenza, per molte applicazioni pratiche risulta più conveniente utilizzare dei tubi a raggi X (Fig. 2.5), come nel caso specifico di questa tesi. Vi sono due parametri fondamentali per la definizione di una sorgente e per la qualità delle immagini ottenibili: la grandezza della macchia focale e la magnificazione.

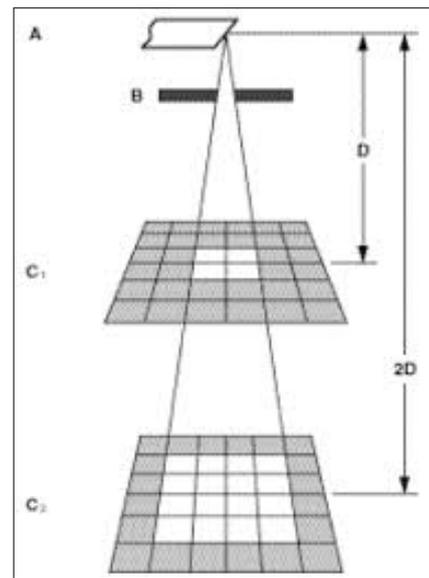
Le dimensioni della macchia focale (Fig. 2.6) incidono sulla qualità dell'immagine: maggiore è la grandezza della macchia focale e maggiore sarà l'effetto penombra ad essa collegato. Tale effetto è dovuto al fatto che la sorgente di raggi X non è in realtà puntiforme, ma ha dimensioni finite (Fig. 2.7) e viene quantificato dal parametro:

$$P = f \cdot \frac{odd}{sod}$$

dove  $f$  è la dimensione dello spot focale,  $odd$  è la distanza oggetto-rivelatore e  $sod$  è la distanza sorgente-oggetto.



**Figura 2.7:** Schema della formazione dell'effetto penombra.



**Figura 2.8:** Schema dell'effetto di magnificazione.

La magnificazione,  $M$ , è dovuta invece dalla divergenza del fascio (Fig. 2.8) e si calcola come:

$$M = \frac{sdd}{sod}$$

dove  $sdd$  è la distanza sorgente-rivelatore mentre  $sod$  è la distanza oggetto-sorgente. L'effetto penombra e la magnificazione sono legati dalla relazione:

$$P = f \cdot (M - 1)$$

Utilizzando i cosiddetti tubi *microfocus*, che hanno spot focale molto piccolo, si ottiene un buon compromesso tra effetto penombra e magnificazione. Questi tubi consentono però solamente correnti di pochi mA (bassa potenza dissipata) e, di conseguenza, possono essere utilizzati per scansionare oggetti relativamente piccoli (come nel caso in esame) o poco radiopachi.

In genere per l'acquisizione delle immagini si utilizzano rivelatori a semiconduttore, spesso accoppiati a scintillatori, i quali svolgono la funzione di convertire in fotoni luminosi la radiazione X trasmessa dall'oggetto. Tali fotoni interagiscono con il materiale semiconduttore, determinando la produzione di coppie elettrone-lacuna, che un elevato campo elettrico provvede a separare e a condurre verso gli elettrodi dello strato semiconduttore. Qui sono accumulate, scaricate dal circuito di lettura e inviate al dispositivo di elaborazione dell'immagine.

Affinché i rivelatori siano efficienti nel contribuire alla buona qualità dell'immagine, essi devono presentare almeno le seguenti quattro caratteristiche: efficienza, stabilità, basso tempo di risposta ed elevato range dinamico. Mentre l'efficienza si riferisce alla capacità di catturare, assorbire e convertire i fotoni (luminosi o X) in segnali elettrici, la stabilità si riferisce alla costanza della risposta del rivelatore. Se il sistema non fosse stabile, sarebbero necessarie frequenti calibrazioni. Il tempo di risposta corrisponde alla velocità con cui il rivelatore può rivelare un evento (raggio X o luce) ed essere poi pronto a rivelare un altro evento. Il range dinamico di un rivelatore è il rapporto tra i valori massimo e minimo apprezzabili. È importante infine che i rivelatori abbiano valori bassi di *afterglow*, cioè di persistenza dell'immagine anche dopo che la sorgente radiogena viene spenta.

Un tipo di rivelatore che unisce queste caratteristiche alla tecnologia al semiconduttore è il *Flat Panel Detector* (FPD). Esso si compone di un rivelatore di raggi X accoppiato ad un convertitore analogico-digitale (ADC), assemblati in modo che l'oggetto abbia spessore ridotto. Tale sistema può essere classificato secondo il metodo di rivelazione utilizzato, che può essere diretto o indiretto. Nel primo caso, i raggi X, che incidono sul rivelatore, producono immediatamente un segnale elettrico proporzionale al numero di fotoni incidenti. Nel secondo caso, invece, i raggi X incidenti vengono convertiti, mediante uno strato scintillatore, in luce visibile, che successivamente raggiunge lo strato di materiale semiconduttore, producendo un segnale elettrico che, questa volta, è proporzionale al numero di fotoni visibili generati dallo scintillatore. Nel presente caso, è stato utilizzato un FPD a rivelazione indiretta.

Il dispositivo di movimentazione si compone di due assi meccanici per traslare verticalmente e orizzontalmente il rivelatore e di un asse meccanico per muovere verticalmente il tubo radiogeno. Questi due elementi sono necessari nel caso in cui l'oggetto investito dal fascio abbia dimensioni maggiori del rivelatore, contrariamente a quanto avviene in questo caso. È fondamentale l'utilizzo di una tavola rotativa su cui viene posto il campione: solo così è possibile infatti acquisire più radiografie a diverse angolazioni.

### 2.2.3 Ricostruzione tomografica

La tomografia è un problema inverso: note le proiezioni radiografiche a diversi angoli di un oggetto, bisogna ricostruire il volume che le ha generate.

Per prima cosa si ottengono le radiografie: si fa ruotare l'oggetto di 360°, con step angolari equi-spaziati, in modo che l'acquisizione sia omogenea, con sorgente radiogena accesa. Fatto questo, è indispensabile acquisire due proiezioni senza oggetto, la prima con sorgente di radiazione accesa e la seconda con sorgente spenta. Queste sono dette rispettivamente  $I_0$  e *dark* e sono necessarie nelle successive operazioni di normalizzazione.

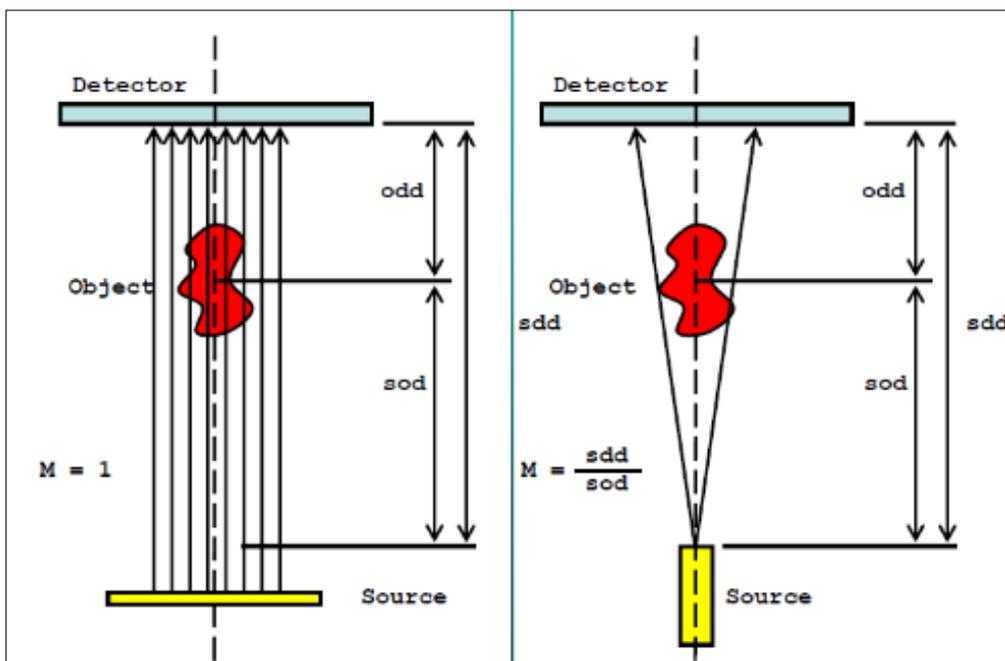
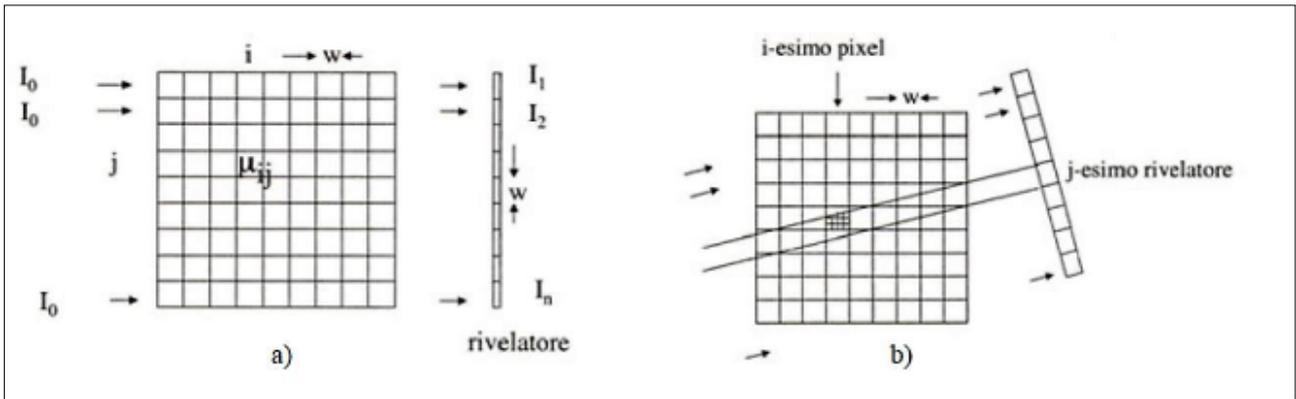


Figura 2.9: Geometria *parallel-beam* e *fan-beam*.



**Figura 2.10:** Matrice di pixel in cui viene suddivisa idealmente una sezione dell'oggetto. (a) Fascio e griglia perpendicolari. (b) Fascio e griglia non perpendicolari.

La seconda fase è quella di ricostruzione. Questa consiste nell'ottenere dalle proiezioni acquisite le sezioni, o *slices*, cioè le immagini bidimensionali che nel complesso costituiscono il volume dell'oggetto.

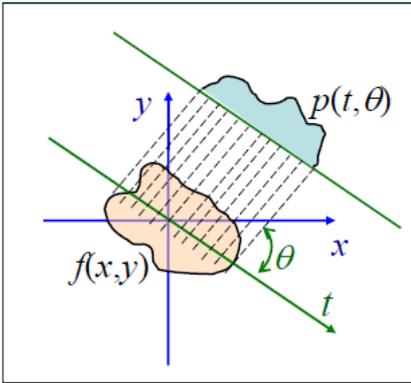
Per semplificare la trattazione, consideriamo il caso ideale in cui i fotoni del fascio attraversano un unico piano dell'oggetto e arrivano su un rivelatore formato da  $n$  elementi (geometria *parallel-beam*, Fig. 2.9). Suddividiamo idealmente ogni sezione dell'oggetto in questione in una griglia di  $n \times n$  pixel, ciascuno caratterizzato da un coefficiente di attenuazione lineare  $\mu_{ij}$  proprio del materiale e dimensioni  $w \times w$  corrispondenti alla grandezza del singolo elemento del rivelatore. Ogni elemento  $j$ -esimo del rivelatore,  $j = 1, \dots, n$ , misurerà quindi un'intensità

$$I_j = I_0 e^{-|\mu_{1j} + \mu_{2j} + \dots + \mu_{nj}|w}$$

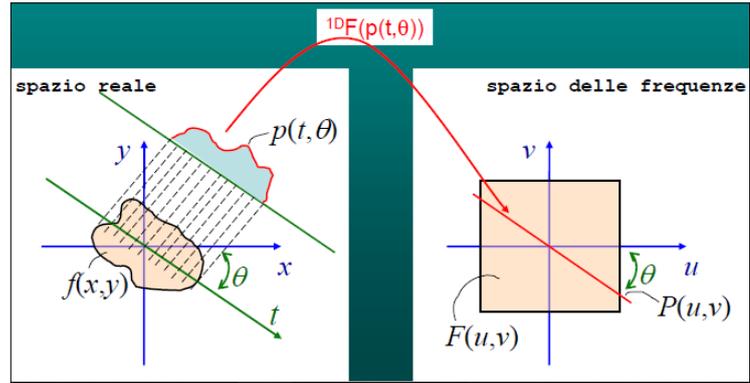
Da questa formula si ottiene la proiezione, cioè l'informazione di base necessaria alla ricostruzione dell'immagine. Tale proiezione viene chiamata  $p_j$  e vale

$$p_j = \ln \left( \frac{I_0}{I_j} \right) = \sum_{i=1}^n \mu_{ij} w$$

Si osserva come i  $\mu_{ij}$  risultino degeneri rispetto alle colonne  $i$ . È necessario quindi acquisire ulteriori proiezioni, ruotando il campione. Agendo in questo modo, si ha una notevole complicazione del calcolo dei  $\mu_{ij}$ , in quanto il fascio e la griglia di suddivisione non risultano più perpendicolari tra loro, come mostrato in Fig. 2.10. Infatti, in questo caso, gli spessori  $w_{ij}$ , attraversati dai fotoni trasmessi, variano da elemento a elemento della griglia e dipendono dalla proiezione considerata.



**Figura 2.11:** Proiezione dell'oggetto di angolo  $\theta$ . Modificata da Brancaccio et al. (2013).



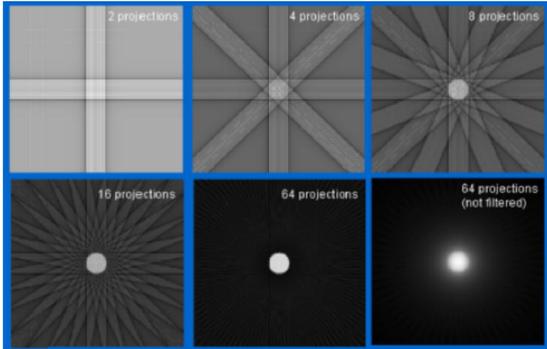
**Figura 2.12:** Schema esplicativo del teorema della *slice* di Fourier. Modificata da Brancaccio et al. (2013).

La soluzione a questo problema, nel caso ideale (continuo, numero infinito di angoli), è data dalla trasformata di Radon. Sia  $f(x, y)$  la distribuzione del coefficiente di attenuazione lineare in una sezione dell'oggetto da ricostruire. Se trasformiamo in coordinate polari la proiezione  $p$  abbiamo che:

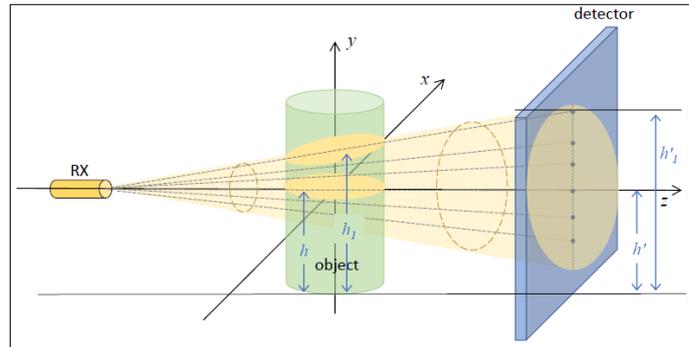
$$p(t, \theta) = \int_{t, \theta} f(x, y) ds$$

dove  $t$  è la distanza del raggio di proiezione dal centro di rotazione e  $\theta$  è l'angolo a cui è presa la proiezione. La  $p(t, \theta)$  è detta trasformata di Radon della funzione  $f(x, y)$ , che indichiamo con  $R(f(x, y))$ , mentre  $S = \{p(t, \theta), 0 < \theta < 2\pi\}$ , insieme delle proiezioni lineari per tutti gli angoli, è detto sinogramma. Allora  $R(f(x, y)) = S$  e di conseguenza  $f(x, y) = R^{-1}(S)$ . La formula sopra vale solo per valori continui: le radiografie reali sono discrete (pixel) e il numero di angoli non può essere infinito. Per ovviare al problema, si utilizza il teorema della *slice* di Fourier. Siano  $p(t, \theta)$  le proiezioni all'angolo  $\theta$  e a distanza  $t$  dal centro di rotazione, sia  $f(x, y)$  l'oggetto da ricostruire (Fig. 2.11). “La trasformata di Fourier della proiezione di  $f(x, y)$  ottenuta all'angolo  $\theta$  ha valori coincidenti con quelli della trasformata di Fourier bidimensionale di  $f(x, y)$ , calcolata lungo la retta di direzione  $\theta$  passante per l'origine dello spazio delle frequenze” (Fig. 2.12).

Se per ogni proiezione acquisita facciamo la trasformata di Fourier, otteniamo una serie di linee nello spazio 2D di Fourier. Se acquisiamo un numero sufficiente di linee da 0 a  $\pi$  possiamo riempire l'intero spazio dell'oggetto da ricostruire. Per ricostruire una singola sezione, servono  $m$  differenti acquisizioni ad ogni angolo  $\theta$ , ciascuna delle quali consiste in  $n$  proiezioni, con  $m > n$ . La matrice  $n \times m$  ottenuta dai pixel delle diverse proiezioni è il sinogramma. Possiamo ottenere l'oggetto effettuando l'anti-trasformata di Fourier 2D.



**Figura 2.13:** Esempio di artefatto a stella. Modificata da Brancaccio et al. (2013).



**Figura 2.14:** Geometria *cone-beam*.

L'algoritmo più comunemente utilizzato per la ricostruzione è la retroproiezione (*backprojection*). Questo consiste nel prendere la funzione ottenuta su ogni riga del sinogramma e retroproiettarla sul piano della sezione per produrre l'immagine. Per ogni pixel si ha

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{j=1}^m p_j \Delta\theta$$

dove  $\hat{f}(x, y)$  è la distribuzione del coefficiente di attenuazione lineare ottenuta con questo algoritmo e  $\Delta\theta$  lo step angolare. Se consideriamo la retroproiezione di un oggetto circolare, ogni profilo proietta sul piano una striscia estesa come l'oggetto. Questa sovrapposizione origina un artefatto a stella (*star artifact*, Fig. 2.13). Aumentando il numero di proiezioni, questo artefatto genera un alone attorno all'oggetto che va scemando di intensità con l'aumentare della distanza dal centro. Per rimuovere questo effetto si applica un cosiddetto filtro a rampa sulle proiezioni. Si parla quindi di algoritmo di *Filtered Back Projection* (FBP) che, operativamente equivale a: applicare la trasformata di Fourier alle proiezioni (riga del sinogramma); moltiplicare la proiezione trasformata per il filtro nello spazio di Fourier; anti-trasformare e retroproiettare. La retroproiezione dipende fortemente dalla geometria del fascio. Nel nostro caso, in cui viene usata la geometria *cone-beam* (Fig. 2.14) è necessario utilizzare l'algoritmo di Feldkamp (Feldkamp et al. (1984)).

## Capitolo 3

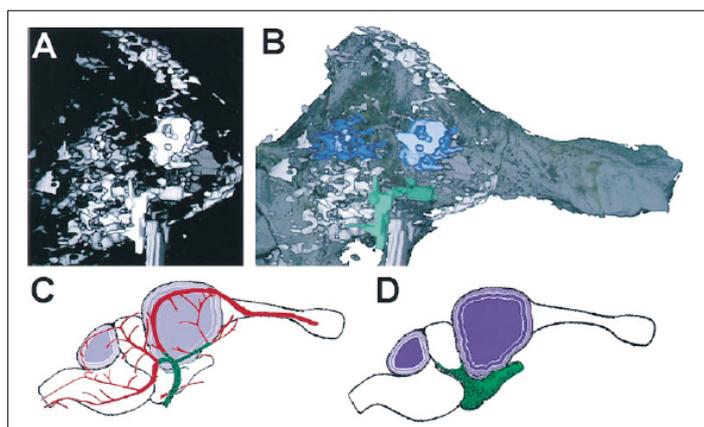
### Micro-CT

La prima parte di questo capitolo è dedicata al ruolo della micro-tomografia applicata al campo della paleontologia, con brevi cenni sull'introduzione di questo metodo e alcune ricerche effettuate negli ultimi anni. Segue poi la presentazione, componente per componente, dell'apparato sperimentale utilizzato in laboratorio per l'acquisizione dei dati. Infine, viene descritto il procedimento di ricostruzione delle sezioni e i software utilizzati.

#### 3.1 Utilizzo della micro-CT in paleontologia

In questo paragrafo vengono riportati alcuni studi effettuati su reperti paleontologici (principalmente denti di dinosauro), dove l'utilizzo della tecnica micro-tomografica ha permesso di ricostruire tridimensionalmente strutture fondamentali interne ai denti o di mostrare elementi e dettagli relativi al reperto non visibili ad occhio nudo.

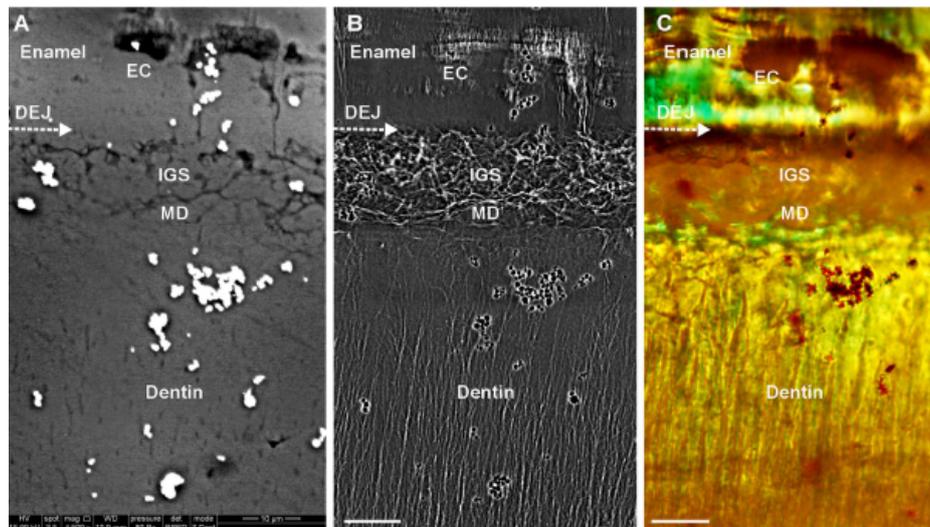
Una ricerca di Rogers (1998) utilizza tomografia computerizzata a spirale per esaminare una volta cranica ben conservata di *Allosaurus fragilis*, un dinosauro carnivoro vissuto nel periodo Giurassico. Sono state rivelate così strutture interne altrimenti invisibili ad occhio nudo o in assenza di interventi invasivi (Fig. 3.1). È stato così possibile raccogliere prove importanti che permettono di paragonare la neurobiologia di questo organismo a quella delle moderne specie di coccodrilli e che dovrebbero essere prese in considerazione quando si parla di evoluzione, comportamento ed estinzione dell'*Allosaurus*.



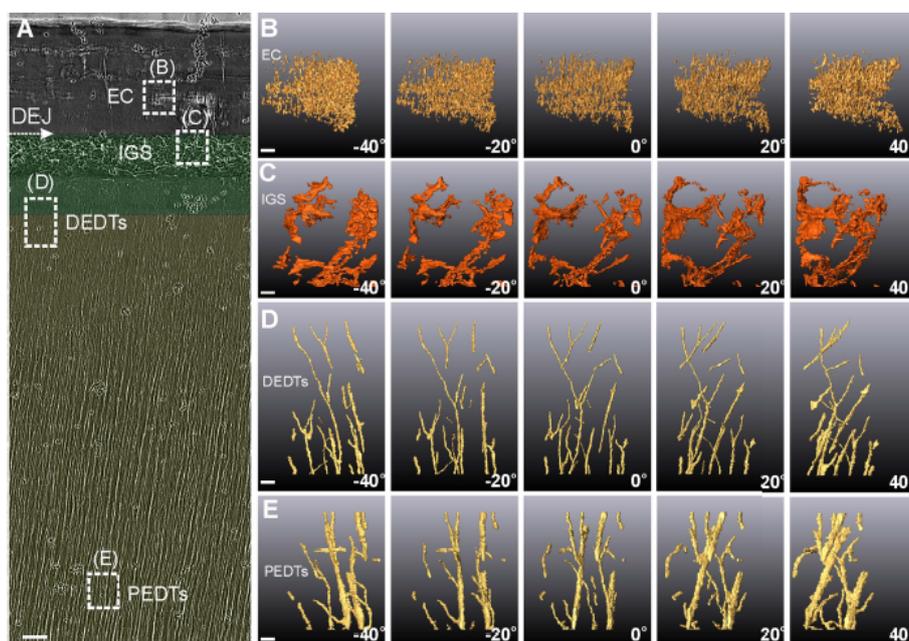
**Figura 3.1:** (A-B) Immagini dell'endocranio dell'*Allosaurus* ottenute con tomografia a spirale. In verde e in blu sono evidenziate strutture interne, come il cervello putativo, invisibili ad occhio nudo. (C-D) Strutture cerebrali dell'alligatore. Modificate da Rogers (1998).

In uno studio pubblicato da Wang et al. (2015) si utilizza la tecnica della microscopia a raggi X con luce di sincrotrone (*Synchrotron-based Transmission X-ray Microscopy*, TXM) allo scopo di investigare microstrutture interne significative (tubuli dentinali e difetti nella giunzione dentina-smalto) di denti di dinosauro (*Saurolophus* e *Tarbosaurus*) cercando di isolare dei framework filogenetici. Ad esempio, l'organizzazione 3D dei tubuli dentinali, studiata a fondo nell'uomo, influenza il metabolismo, la trasduzione del segnale e le caratteristiche meccaniche del dente. Si è utilizzata la radiazione di sincrotrone perché permette di rivelare strutture interne a scale inferiori al

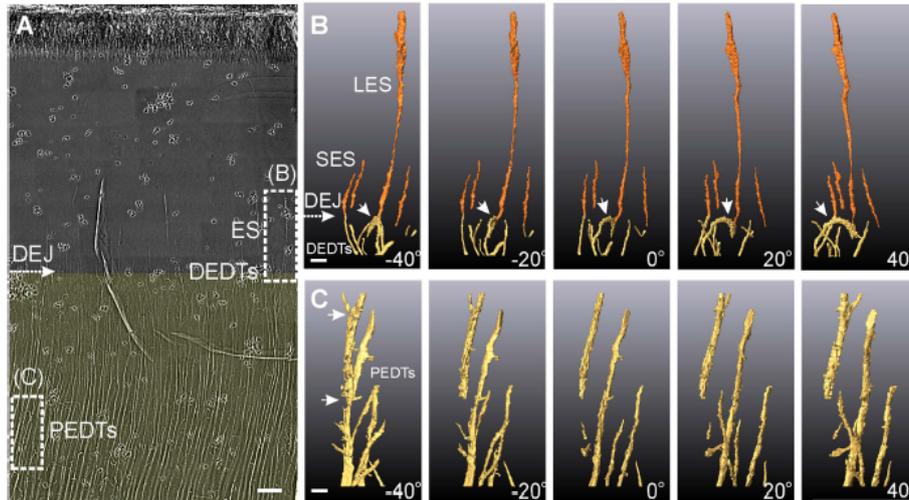
$\mu\text{m}$  (risoluzione spaziale fino a 30 nm), cosa che la micro-CT tradizionale non è in grado di fare (Fig. 3.2). Tale metodo permette di ricostruire in 3D le strutture tubulari interne (Fig. 3.3 e Fig. 3.4). La dieta spesso evolve di pari passo con le modificazioni dentali. Quello che si osserva è che le abitudini alimentari non hanno influenzato significativamente le microstrutture interne e le loro configurazioni, ma principalmente la morfologia del dente in entrambe le specie. Le strutture interne presentano infatti lo stesso pattern di composizione in tre tessuti in entrambe le specie, mentre in una stessa specie le morfologie dei denti sono diverse. Questo implica che le proprietà meccaniche del dente di dinosauro possono cambiare attraverso modifiche morfologiche per adattarsi alla dieta, ma la strategia di formazione fondamentale del dente non cambia significativamente.



**Figura 3.2:** Immagine dell'interno di un dente di *Tarbosaurus* (Scala: 10  $\mu\text{m}$ ) ottenuta con (A) SEM (Scanning Electron Microscope), (B) TXM e (C) luce polarizzata. Modificata da Wang et al. (2015).

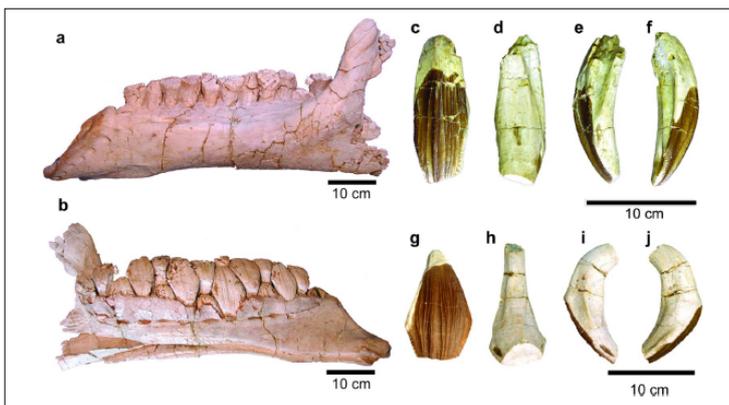


**Figura 3.3:** Microstrutture interne ad elevata risoluzione spaziale di un dente di *Tarbosaurus*, ottenute attraverso TXM (Scala: 1  $\mu\text{m}$ ). Modificata da Wang et al. (2015).

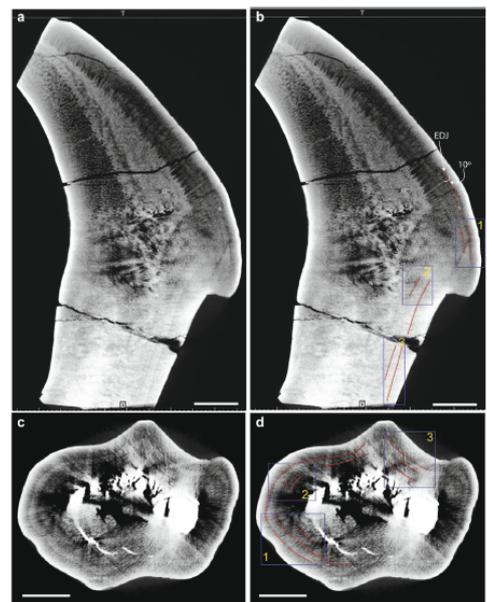


**Figura 3.4:** Microstrutture interne ad elevata risoluzione spaziale di un dente di *Saurolophus*, ottenute attraverso *TXM* (Scala: 1  $\mu$ m). Modificata da Wang et al. (2015).

Una ricerca di Suarez et al. (2017) si pone l'obiettivo di investigare l'importanza del *Lanzhousaurus magnidens*, un dinosauro erbivoro del Cretaceo Inferiore appartenente al gruppo degli Iguanodonti, noto per essere il dinosauro erbivoro dai denti piú grandi (altezza di circa 10 cm, Fig. 3.5), utilizzando una tecnica che combina l'analisi di isotopi stabili e l'*imaging* mediante tomografia computerizzata. La risoluzione spaziale delle immagini ottenute (Fig. 3.6) ha rivelato la presenza di tre tipi di tessuti interni, consistenti con il collocamento filogenetico del *Lanzhousaurus*, e ha permesso di misurare il tasso di allungamento dello smalto dentale (amelogenesi), stimato in 0.24 mm al giorno. Questo valore elevato suggerisce un ruolo cruciale nel passaggio al meccanismo di alimentazione dell'adrosauride.

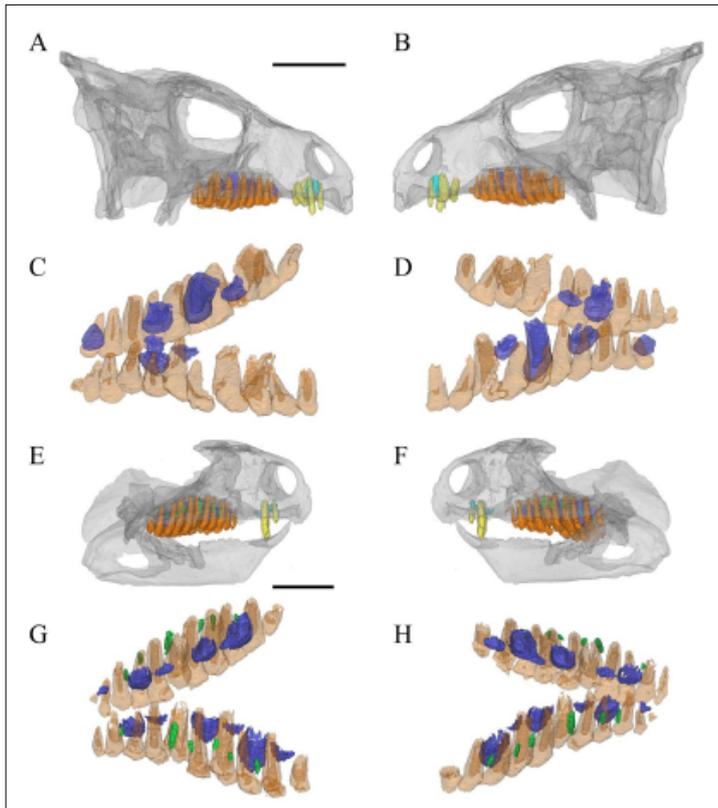


**Figura 3.5:** Mascella e denti del *Lanzhousaurus magnidens* (Scala: 10 cm). Modificata da Suarez et al. (2017).

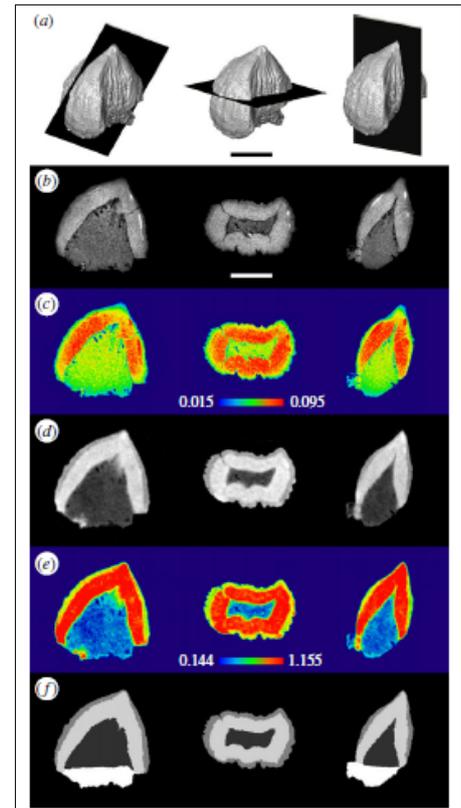


**Figura 3.6:** Sezioni coronale e assiale di denti del *Lanzhousaurus* ottenuti con micro-CT. Si notano le linee di accrescimento nelle tre regioni (Scala: 1 cm). Modificata da Suarez et al. (2017).

Un altro studio condotto da He et al. (2018), basato sull'utilizzo di micro-tomografia computerizzata ad alta risoluzione, descrive la morfologia dentale e il meccanismo di sostituzione dei denti del *Liaoceratops yanzigouensis*. La tecnica non invasiva ha permesso di analizzare l'intero campione con risoluzione dell'ordine di 1 mm, rivelando elementi non visibili ad occhio nudo (denti in più nella pre-mascella), dettagli di piccole dimensioni (scanalature mesiali) e simmetrie nei meccanismi di crescita e sostituzione, non visibili in assenza di interventi invasivi. La ricostruzione dei denti del campione è mostrata in Fig. 3.7.



**Figura 3.7:** Ricostruzione dei denti della mascella del *Liaoceratops yanzigouensis* (Scala: 20 mm). Modificata da He et al. (2018).



**Figura 3.8:** Sezioni di denti dell'*Eilenodon* ottenute usando micro-CT a raggi X (c, e) e a neutroni (d, f). (Scala: 2 mm). Modificata da Jones et al. (2018).

Uno studio di Jones et al. (2018) mette a confronto la tecnica della micro-CT con i raggi X e la tomografia computerizzata a neutroni, con l'obiettivo di misurare lo spessore e la distribuzione dello smalto dentale dell'*Eilenodon*, un rettile giurassico erbivoro (Fig. 3.8). Il tubo a raggi X utilizzato è alimentato da una tensione di 100 kV, corrente di 80  $\mu$ A e con 0.5 mm di macchia focale (pixel size di 0.065 mm). Si giunge qui alla conclusione che la tomografia a neutroni, oltre a dare più informazioni per fossili di denti dove i differenti tessuti dentali hanno mineralizzato con densità simili, come già appurato in Zanoli et al. (2017) e in Urciuoli et al. (2018), risulta più adatta nel misurare lo spessore e la distribuzione dello smalto dentale, riscontrandone la variabilità a seconda della regione del dente considerata.

## 3.2 Setup sperimentale

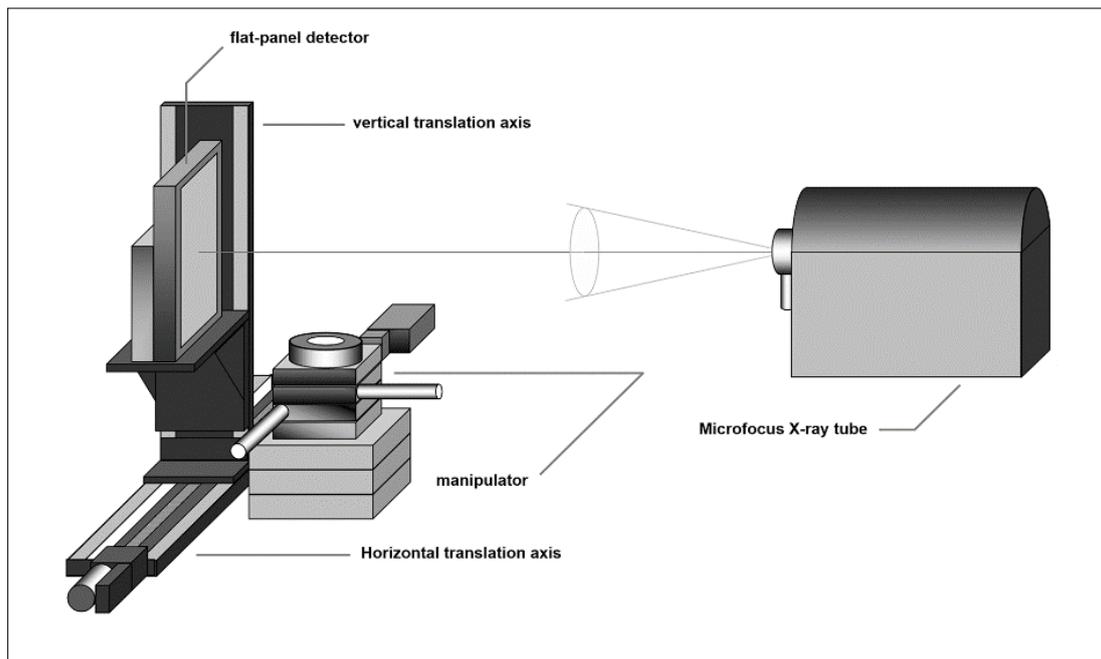


Figura 3.9: Schema dell'apparato sperimentale utilizzato.

L'apparato sperimentale utilizzato (Fig. 3.9) si compone di un tubo radiogeno *microfocus*, un rivelatore *Flat Panel*, assi meccanici che permettono la movimentazione e un computer per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati. Di seguito vengono indicate le caratteristiche specifiche degli strumenti utilizzati e i parametri di acquisizione.



Figura 3.10: Il tubo radiogeno KEVEX PXS10.

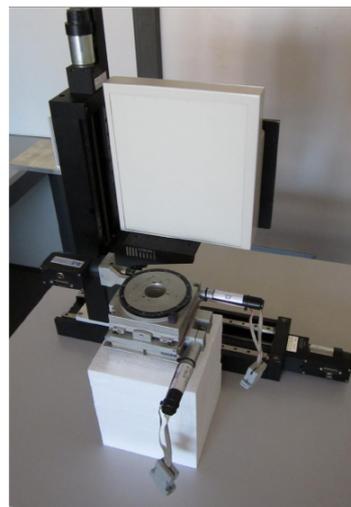


Figura 3.11: Il flat panel PS2520D della Varian.

### 3.2.1 Sorgente di raggi X

Come sorgente di raggi X è stato utilizzato un tubo *microfocus* della *Thermo Electron Corporation*, modello KEVEX PXS10 (Fig. 3.10). Il target interno è in tungsteno e ha una finestra in berillio di spessore 0.25 mm circa. La potenza massima di questo tubo è di circa 65 W e il voltaggio

può variare da 45 kV a 130 kV, raggiungendo una corrente massima di circa 0.500 mA. A seconda della potenza utilizzata, lo spot focale varia da 7  $\mu\text{m}$  fino a 100  $\mu\text{m}$ . Tale sorgente è dotata inoltre di un ventilatore interno che funge da sistema di auto-raffreddamento ad aria.

### 3.2.2 Rivelatore

Il rivelatore utilizzato è un *Flat Panel*, modello PS2520D della *Varian* (Fig. 3.11). Questo utilizza un metodo di rivelazione a conversione indiretta, dove lo strato scintillatore è ioduro di cesio drogato al tallio (CsI:Tl). L'area sensibile del rivelatore è di 1536x1920 pixel, cioè 19.5x24.4 cm<sup>2</sup>. Esso dispone inoltre, grazie ai suoi 14 bit, di 16384 livelli di grigio. Il frame rate massimo è di 10 fps. La risoluzione spaziale è elevata, disponendo di un pixel di 127  $\mu\text{m}^2$ .



**Figura 3.12:** Componenti del sistema di movimentazione. Da sinistra verso destra: uno dei due assi lineari M-413.3.PD, l'asse lineare M-521 e l'asse rotativo M-038.PD1.

### 3.2.3 Sistema di movimentazione

Il sistema di movimentazione utilizzato è composto di assi micrometrici, costruiti dalla *Physik Instrumente* (PI), e comprende i seguenti modelli: due assi lineari M-413.3.PD, un asse lineare M-521, un asse rotativo M-038.PD1 (Fig. 3.12). I due assi lineari vengono montati perpendicolarmente tra loro in modo da permettere al rivelatore di scansionare un'area fino a 49.5x54.4 cm<sup>2</sup>. L'asse lineare su cui è montato il tubo *microfocus* permette una scansione in verticale, aumentando il campo di vista. L'asse rotativo, necessario ad ottenere le proiezioni, è posto tra sorgente e rivelatore. Questo è capace di sostenere e ruotare un peso fino a 40 kg. Per manovrare gli assi si utilizza un software sviluppato dal gruppo di *imaging* a raggi X del DIFA.

### 3.2.4 Parametri di acquisizione

Una volta che l'apparato tomografico è stato assemblato e allineato, si misurano la distanza sorgente-rivelatore (*source-detector distance, sdd*) e sorgente-oggetto (*source-object distance, sod*), da cui si calcola la restante distanza oggetto-rivelatore (*object-detector distance, odd*). Queste misure sono necessarie per la ricostruzione tomografica e devono essere eseguite il più accuratamente possibile (in genere mediante un laser). Sono stati utilizzati gli stessi parametri di acquisizione per ciascun reperto fossile e questi sono riportati in Tab. 3.1.

Parametri	Valore
Tensione	130 kV
Corrente	170 $\mu$ A
Filtrazione	0.4 mm (Cu)
Frame rate	2 fps
Frame AVG	4
Proiezioni	900
Angolo	-360°
$Pixel_{size}$	127 $\mu$ m
$sdd$	847 mm
$sod$	267.5 mm
$odd$	579.5 mm

**Tabella 3.1:** Parametri di acquisizione utilizzati per scansionare i dodici reperti fossili.

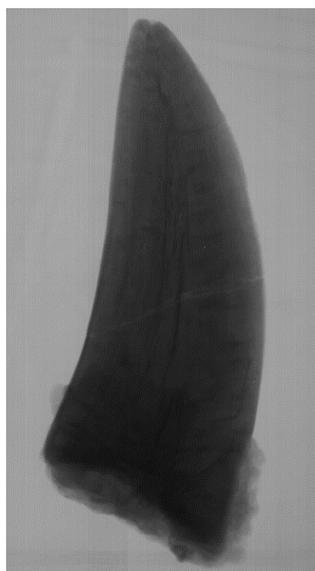
Da questi valori, è possibile ricavare due grandezze fondamentali per la risoluzione delle immagini che verranno ottenute. Queste sono la magnificazione  $M$ , che riguarda l'ingrandimento ottico dell'oggetto proiettato, e le dimensioni del voxel, che indicheremo con  $voxel_{size}$ . Queste si calcolano come

$$M = \frac{sdd}{sod} \qquad voxel_{size} = \frac{pixel_{size}}{M}$$

Nel caso in questione, si ottengono  $M = (3.166 \pm 0.008)$  e  $voxel_{size} = 40.11 \mu\text{m}$ .

### 3.2.5 Procedimento di ricostruzione e software utilizzati

Il software utilizzato per la ricostruzione tomografica si chiama PARREC ed è stato sviluppato dalla dott.ssa Rosa Brancaccio del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna. In questo paragrafo verranno illustrate brevemente le operazioni svolte per ricostruire le *slices* dalle radiografie acquisite in laboratorio.



**Figura 3.13:** Esempio di radiografia del fossile A3.



**Figura 3.14:** Esempio di *atenrad* del fossile A3.

Per prima cosa, una volta aperta la sequenza di radiografie sul programma (Fig. 3.13) si utilizza l'opzione *crop* per ritagliarle e risparmiare così memoria, velocizzando l'intero processo. Bisogna prestare attenzione nel modificare, in seguito, le coordinate del centro di rotazione dell'oggetto ( $C_x$  e  $C_z$ , misurate in pixel). La coordinata  $C_z$  è data dall'allineamento del set-up sperimentale. Di seguito si esegue l'opzione *make atenrads* sulla sequenza delle radiografie ritagliate. È necessario, per tale operazione, indicare la dark ( $D$ ) e la  $I_0$  projection. La *dark projection* viene sottratta da ogni radiografia, mentre la  $I_0$  serve per operare la correzione di *flat field*: questa è una operazione di normalizzazione che consiste nel rapportare ciascun pixel con sé stesso in modo da risolvere tutte le differenze sistematiche di risposta tra pixel e pixel. Si calcola poi il logaritmo naturale, cambiato di segno, di ogni radiografia così normalizzata, ottenendo:

$$Atrd_{ij} = -\ln\left(\frac{I_{ij} - D}{I_0 - D}\right)$$

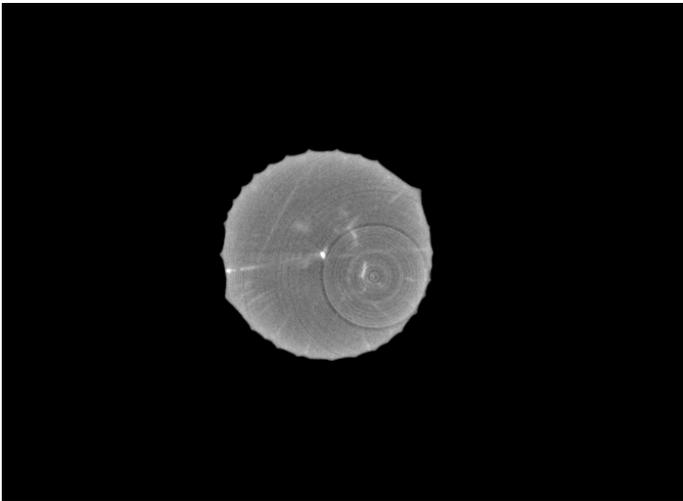


Figura 3.15: Esempio di *ring artifact* del fossile B3 ricostruito.

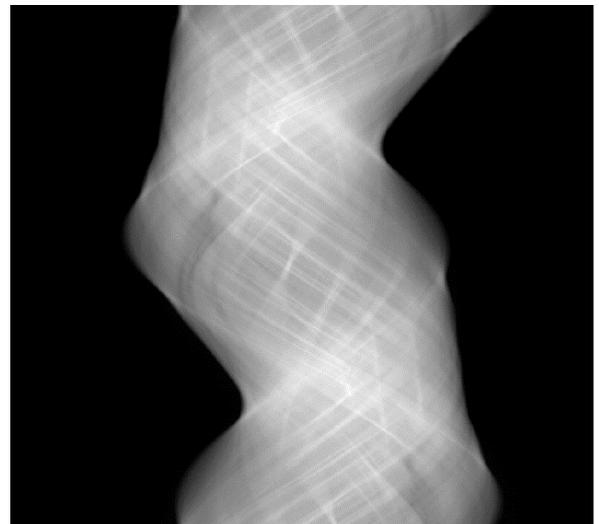
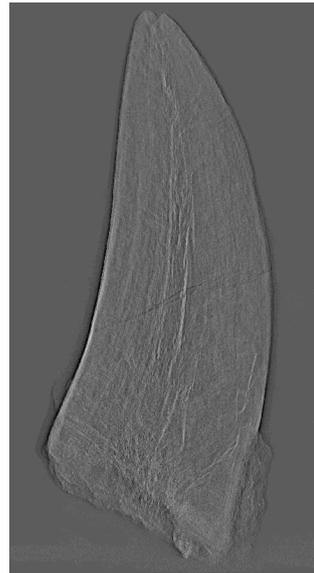


Figura 3.16: Esempio di sinogramma del fossile A3.

Fatta questa operazione (Fig. 3.14), sulle *atenrad* (*attenuated radiography*) è possibile notare dei puntini neri o bianchi: questi sono dati da pixel che non rispondono correttamente alla radiazione incidente (indipendentemente dal segnale che ricevono) ed è necessario eliminarli attraverso dei filtri in modo che non portino alla generazione di artefatti, i più comuni dei quali sono i *ring artifacts* (artefatti ad anello). Questi appaiono come anelli concentrici nelle *slices* ricostruite (Fig. 3.15). Spesso può succedere che non sia possibile rimuovere tutti i *ring artifacts* e, talvolta, gli stessi filtri applicati possono portare alla generazione di artefatti.



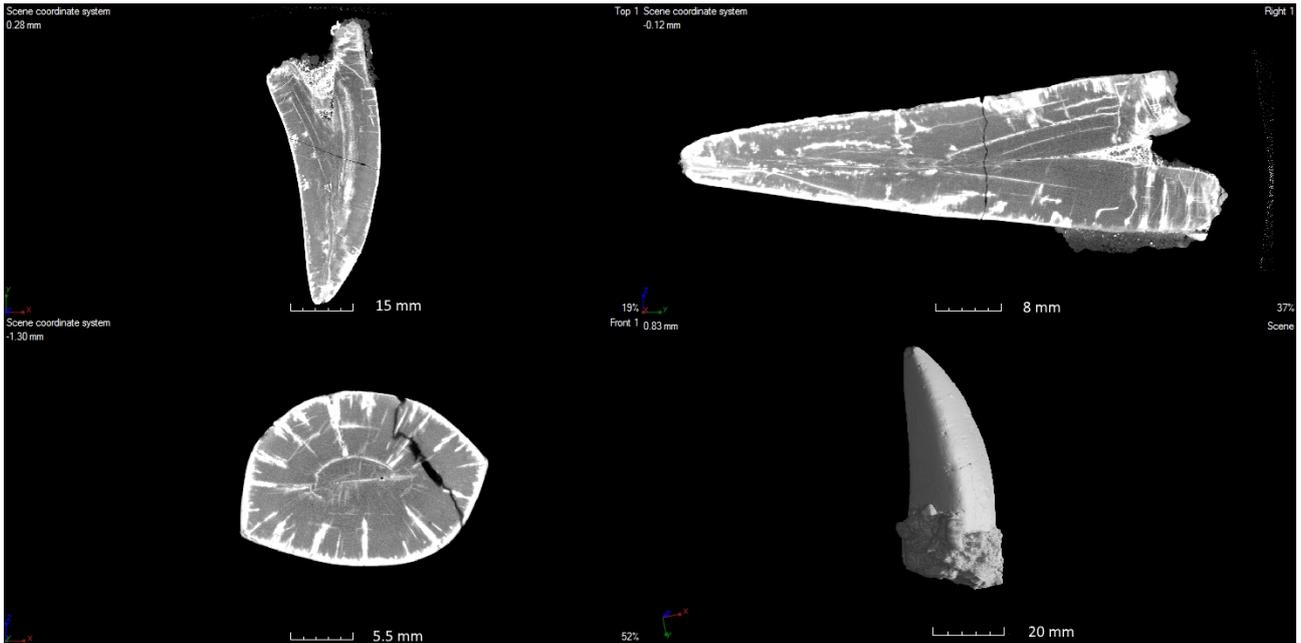
**Figura 3.17:** Esempio di *atenrad reverted* del fossile A3.



**Figura 3.18:** Esempio di *atenrad* filtrata del fossile A3.

Non vanno filtrate direttamente le *atenrad*, ma i sinogrammi, poiché in questo modo i pixel che non rispondono correttamente danno luogo ad una linea verticale, ben distinguibile ad occhio nudo. Si esegue quindi l'opzione *make sinograms* che costruisce i sinogrammi dalle *atenrad*: viene presa una riga di pixel (la stessa) da ogni immagine e ciascuna viene riportata in una nuova immagine, che sarà un sinogramma (Fig. 3.16). Si applica poi il filtro ai sinogrammi. Si rigenerano poi le *atenrad* dai sinogrammi (Fig. 3.17) con l'opzione *revert to atenrad*. Dopo questa operazione, si passa alla ricostruzione vera e propria, che viene fatta inizialmente su un piano singolo, come previsto dall'algoritmo di Feldkamp.

Si ricostruisce la *slice* centrale: si apre il sinogramma corrispondente alla coordinata  $Cz$  del centro di rotazione dell'oggetto e si esegue l'opzione *reconstruction*. Il software richiede di inserire i parametri geometrici, cioè *sdd*, *sod*, *odd*, dimensione pixel, angolo di acquisizione e coordinata  $x$  del centro di rotazione. Quest'ultima si calcola nel seguente modo: si prende un sinogramma e si calcola il punto medio tra le due estremità, destra e sinistra, della sinusoidale. Ci si può porre il problema se la coordinata  $x$  del centro di rotazione sia corretta o vada leggermente modificata: si utilizza l'opzione *try rec different centre* che opera una serie di ricostruzioni con centri di rotazione diversi, ma che differiscono di poco (in genere 0.5 pixel) nella  $Cx$ . Come nuovo  $Cx$  si utilizza quello per cui si ottiene una ricostruzione migliore (cioè la meno sfocata). Si aprono poi le *atenrad reverted* e si applica il filtro a rampa, eseguendo l'opzione *FFT filter* (Fig. 3.18). Si esegue infine l'opzione *reconstruction*, impostando l'algoritmo di Feldkamp, geometria *cone beam*, e inserendo il valore di  $Cz$ . Si ottiene in questo modo la ricostruzione completa delle *slices*.



**Figura 3.19:** Esempio di sezioni ricostruite e *rendering* del fossile A3, visualizzate col software VGStudioMAX.

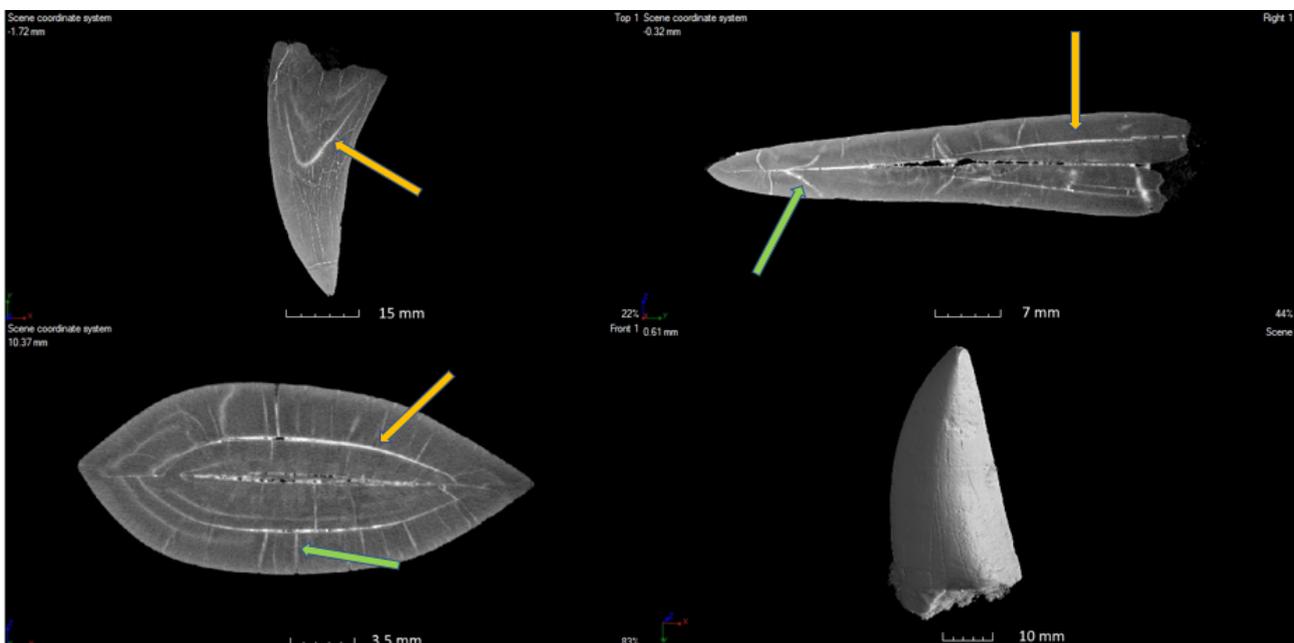
Per visualizzare il reperto ricostruito è stato utilizzato il software VGStudioMAX 2.1, il quale, oltre a permettere la visualizzazione delle sezioni ricostruite, consente di visualizzare il *rendering* 3D dell'oggetto, come mostrato in Fig. 3.19.

# Capitolo 4

## Analisi dati

In questo capitolo vengono presentati i risultati delle ricostruzioni ottenute dei dodici fossili in esame, con particolare attenzione alle informazioni che è stato possibile ottenere sezionando virtualmente i reperti. Si propone quindi, come già annunciato nel par. 2.1, una ulteriore e più precisa suddivisione dei fossili. Si tenta infine di interpretare quanto osservato internamente ai denti.

### 4.1 Risultati

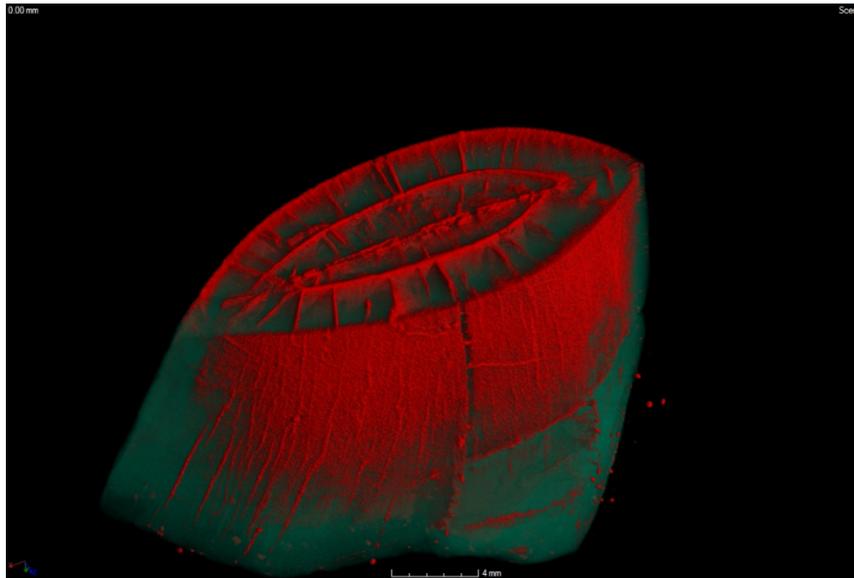


**Figura 4.1:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile A1, ottenuti con VGStudioMAX. Dal *rendering*, in senso orario, si hanno la sezione assiale, coronale e sagittale. Le frecce arancioni indicano le bande accrescitive, mentre quelle verdi le strutture radiali.

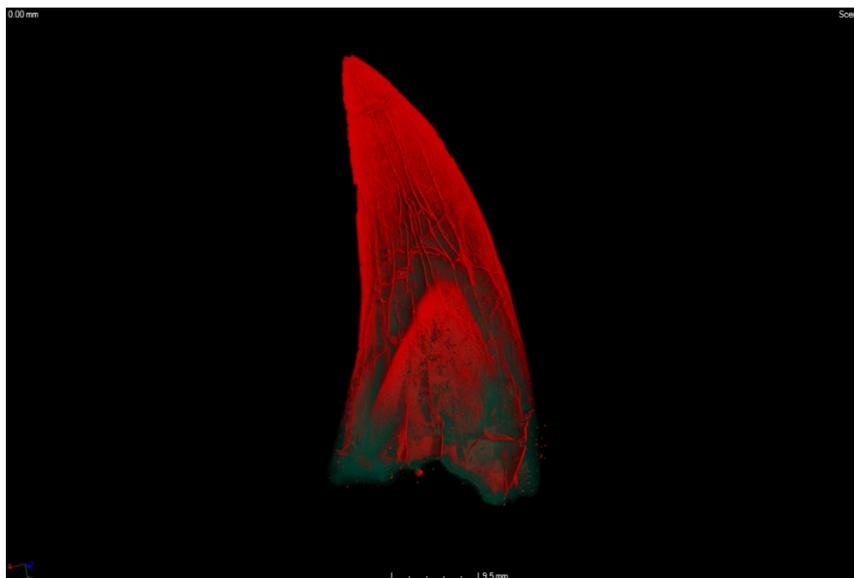
### Gruppo A

Si descrive per primo il gruppo A. Considerando le sezioni sagittale e coronale del fossile A1, internamente si osserva la presenza di strutture di accrescimento. Queste consistono in bande separate tra loro da componenti più dense (Fig. 4.1). Le bande, o fasce, sono le strutture accrescitive di densità inferiore rispetto alle righe bianche, più dense in quanto formate, in origine, da dentina (ora sostituita con materiali inorganici, vedi par. 1.1). Le sezioni assiale e sagittale mostrano ulteriori strutture a elevata densità, che si diramano radialmente dall'interno del dente verso l'esterno, evidenziate in Fig. 4.1. Attraverso il software di *rendering*, è possibile regolare la scala dei grigi, assegnando colori diversi a parti con densità differenti, allo scopo di isolare e mettere in risalto le caratteristiche sopra descritte. Il procedimento seguito in questa fase, e ripetuto in generale anche per gli altri fossili, consiste nell'assegnare il colore verde alle parti di densità minore e il colore rosso a quelle a densità maggiore. Si può anche regolare l'intensità del segnale di questi materiali, rendendone trasparente uno piuttosto che un altro. Sezionando il volume con un piano parallelo alla corona di base (Fig. 4.2) si osservano le bande di accrescimento sopra descritte e almeno una ventina di componenti radiali.

Viene inoltre messo in evidenza il fatto che il dente abbia un rivestimento a densità relativamente maggiore, colorato anch'esso in rosso così come le strutture interne. La sezione coronale (Fig. 4.3) mostra, oltre alle fasce accrescitive, delle strutture che si diramano da queste verso l'apice del dente, che corrispondono alle componenti radiali osservate nella sezione assiale. Dalla ricostruzione 3D si può notare come queste abbiano la forma di piccoli tubi. Inoltre, sono costituite di materiale più denso. Questo ci induce a pensare che si possa trattare di tubuli dentinali, cioè canali con funzione nutritiva che attraversano il dente dall'interno verso l'esterno. Tali canali, in origine, erano formati da dentina. Il processo di fossilizzazione ha sostituito la dentina con materiale di densità simile.

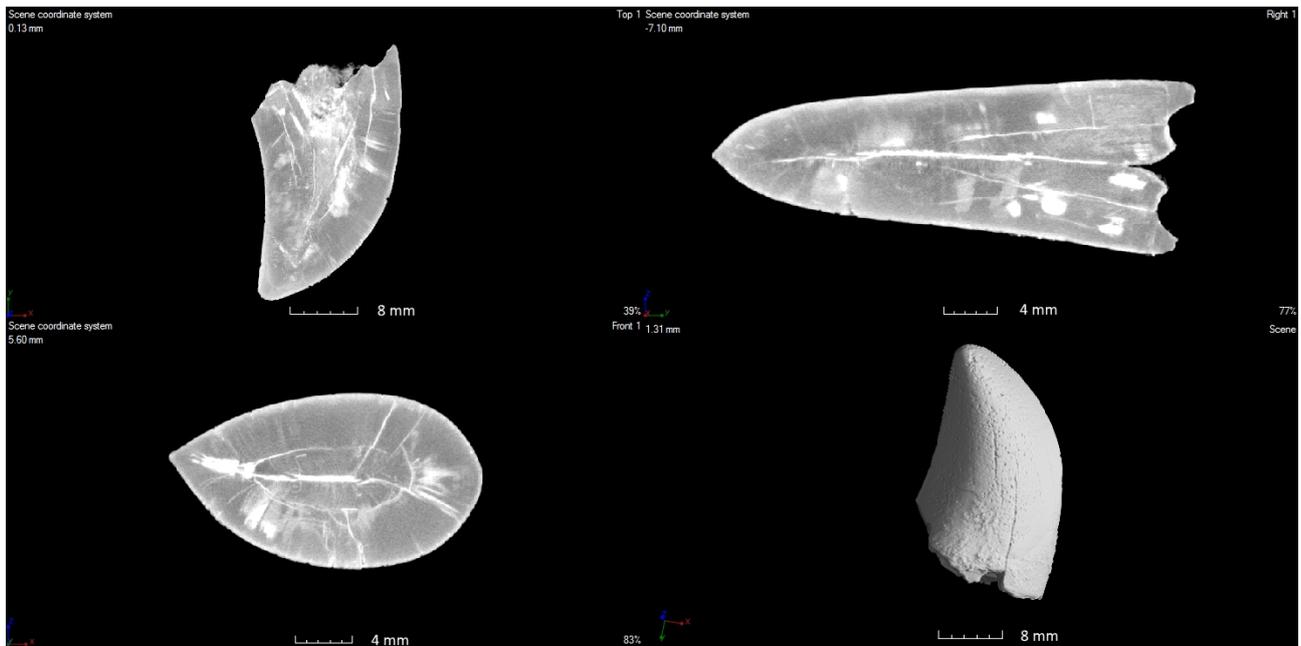


**Figura 4.2:** Sezione assiale di A1 dove sono visibili strutture accrescitive e radiali. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 4 mm).



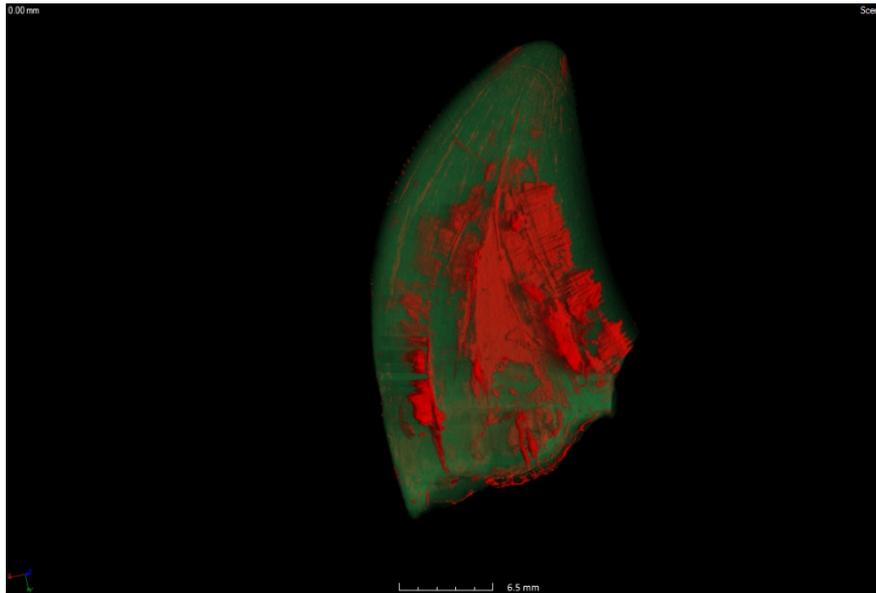
**Figura 4.3:** Sezione coronale di A1 dove sono visibili strutture accrescitive e radiali. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 9.5 mm).

Dalle sezioni principali di A2 (Fig. 4.4) si osserva la presenza di bande di accrescimento e componenti bianche disposte radialmente all'interno del dente. La sezione coronale mostra una struttura ad elevata densità in corrispondenza della corona di base, una sorta di macchia più chiara rispetto al materiale circostante. La sezione sagittale presenta una serie di macchie bianche, situate anch'esse vicino alla base del dente, e una struttura lineare a elevata densità che attraversa l'intero campione perpendicolarmente alla base.

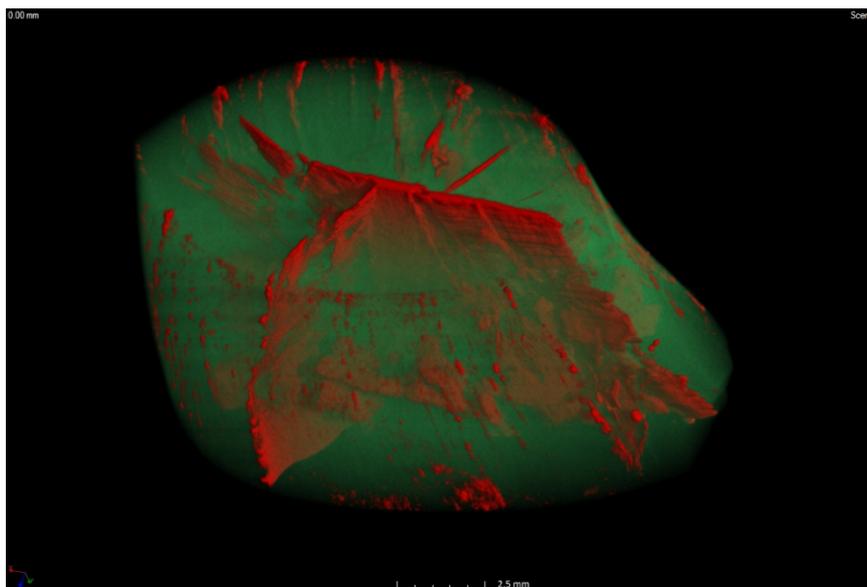


**Figura 4.4:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile A2, ottenuti con VGStudioMAX.

Regolando la scala di grigi e agendo come descritto per il fossile precedente, è possibile analizzare il dente in modo più dettagliato, come mostrato in Fig. 4.5. Trova così conferma l'idea di una struttura più densa interna al dente, che interessa la parte basale di quest'ultimo. Inoltre, seguendo il ragionamento già adottato per A1, si è portati a ritenere che le componenti bianche radiali siano i tubuli dentinali, per via della densità e della forma messa in evidenza dalla ricostruzione del volume. Sezionando il campione secondo un piano assiale (Fig. 4.6) si può osservare più precisamente in cosa consista questa struttura, che risulta essere una sorta di piano lungo una delle direzioni principali di stress del dente.

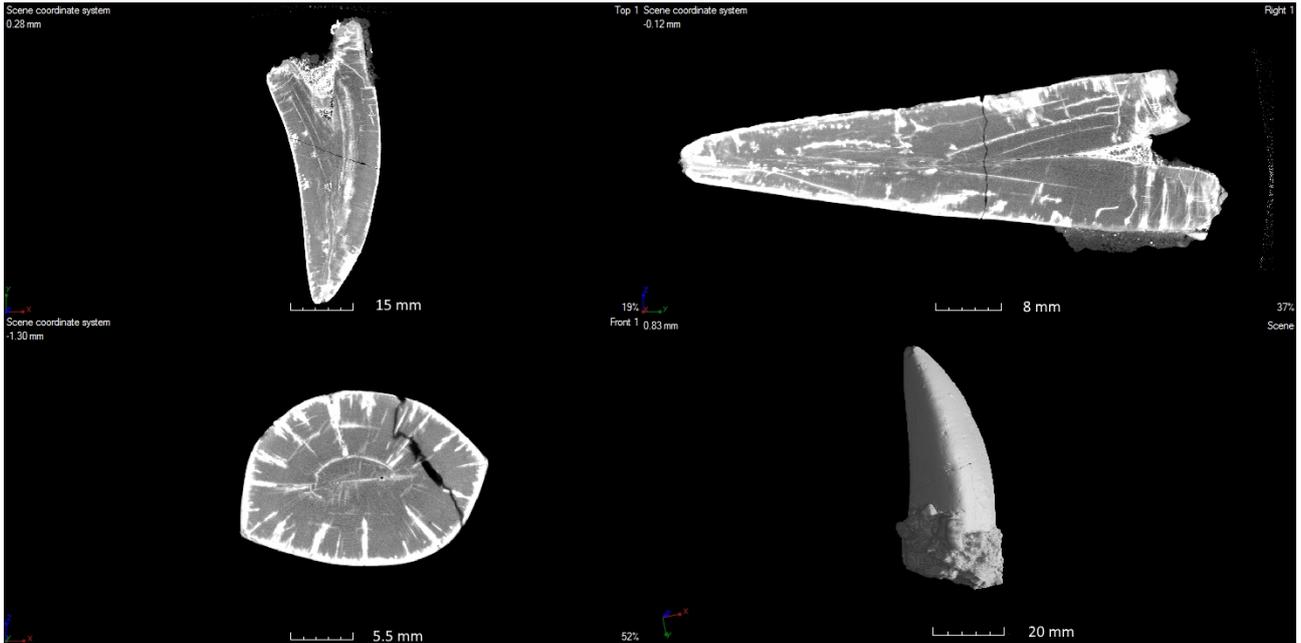


**Figura 4.5:** Ricostruzione di A2 dove è visibile la struttura più densa in corrispondenza della base. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 6.5 mm).



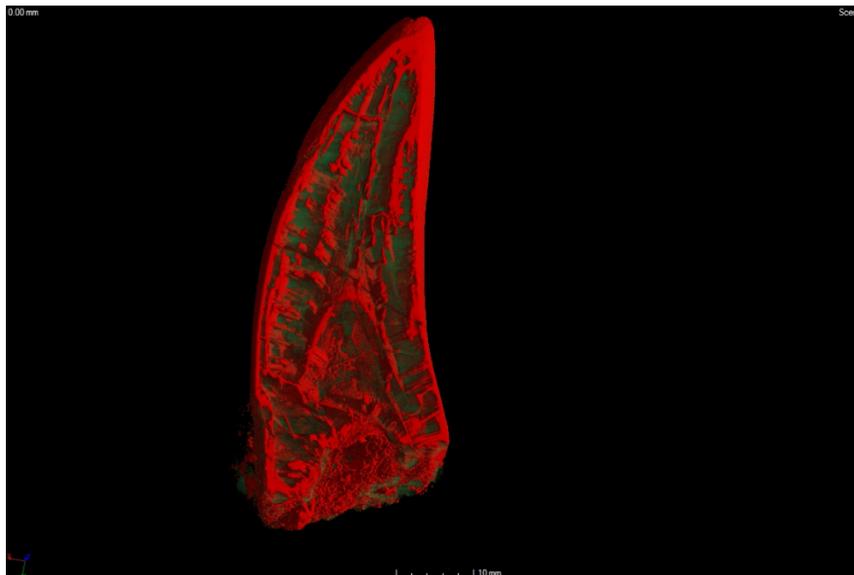
**Figura 4.6:** Sezione assiale di A2 in cui è ben visibile la struttura interna a piano vicino alla base. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 2.5 mm).

Le sezioni coronale e sagittale del fossile A3 (Fig. 4.7) presentano bande accrescitive strutturate come quelle già descritte per i reperti precedenti. Osservando la sezione assiale si notano decine di componenti radiali, più spesse di quelle riscontrate negli altri fossili. Inoltre, anche il rivestimento esterno, caratterizzato da densità relativamente alta, ha uno spessore consistente. Il fossile risulta attraversato da più fratture.

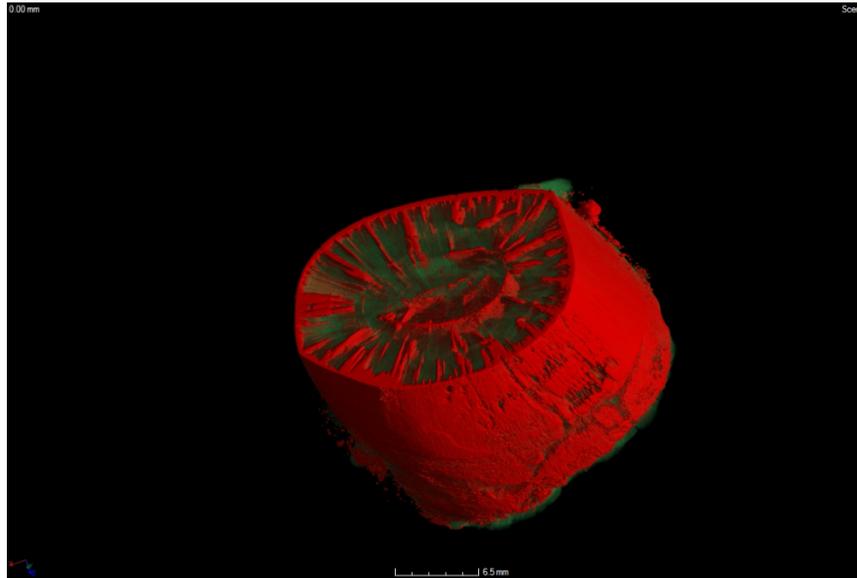


**Figura 4.7:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile A3, ottenuti col software VGStudioMAX.

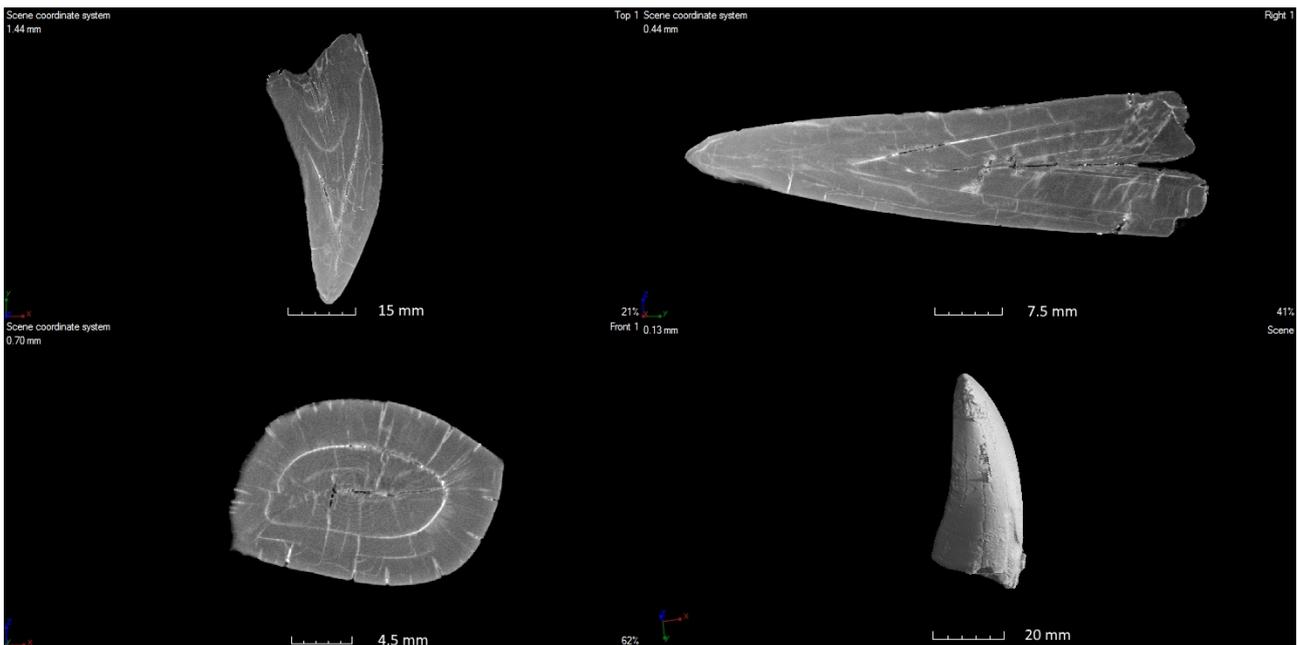
Regolando la scala dei grigi e operando le colorazioni già descritte, si può sezionare il volume ricostruito secondo un piano coronale (Fig. 4.8) e un piano assiale (Fig. 4.9), ritrovando le strutture sopra descritte. Si ha conferma dell'elevato spessore delle componenti radiali e del rivestimento esterno del dente. Analoghe considerazioni a quelle fatte per i fossili precedenti ci inducono a pensare che le componenti radiali siano canali nutritivi, formati in origine da dentina.



**Figura 4.8:** Sezione coronale di A3 dove sono visibili strutture accrescitive e radiali. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 10 mm).

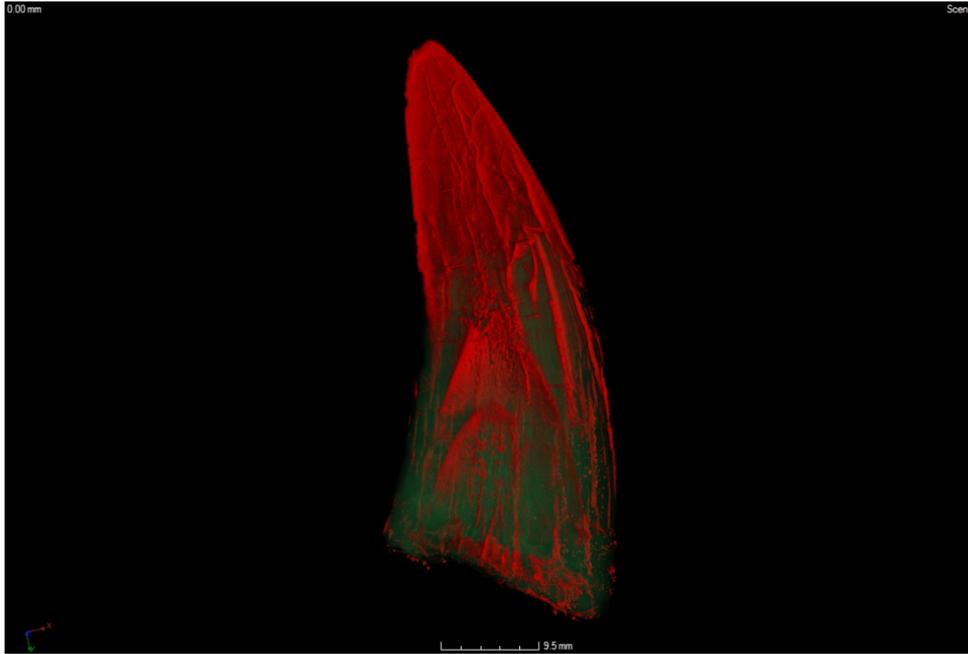


**Figura 4.9:** Sezione assiale di A3 dove sono visibili strutture accrescitive e radiali. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 6.5 mm).



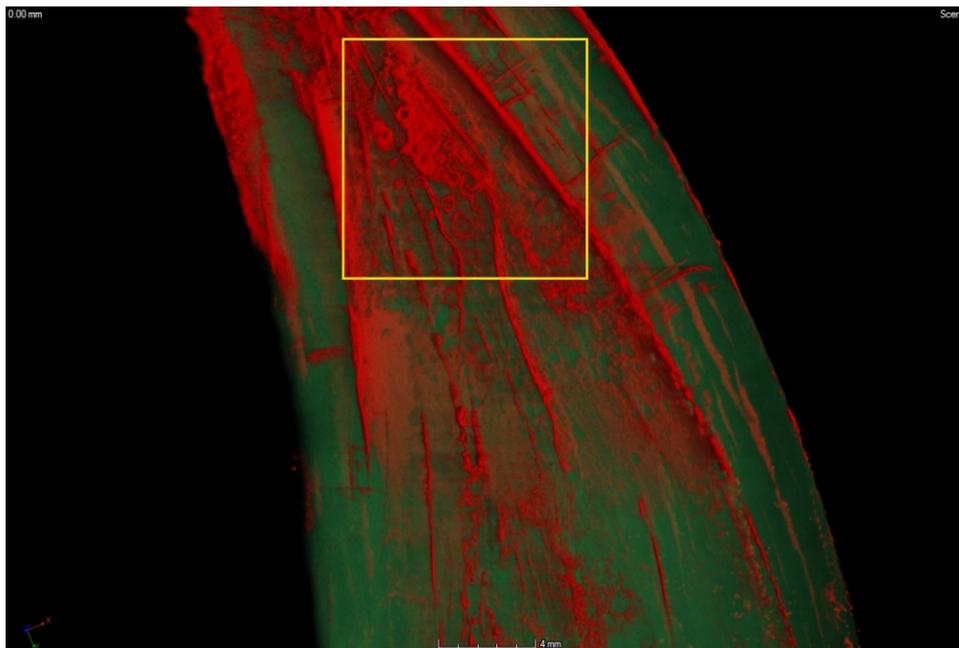
**Figura 4.10:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile A4, ottenuti col software VGStudioMAX.

Considerando le sezioni principali del fossile A4 (Fig. 4.10) si osserva nuovamente la presenza di bande accrescitive, separate da componenti bianche più dense (dalla sezione coronale se ne distinguono nettamente almeno quattro). La sezione assiale mostra strutture a elevata densità disposte radialmente all'interno del dente.



**Figura 4.11:** Sezione coronale di A4 in cui si notano chiaramente le fasce di accrescimento e le strutture radiali. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 9.5 mm).

Si può, anche in questo caso, agire sulla scala dei grigi e colorare in verde le parti meno dense e in rosso quelle più dense. Sezionando il volume con un piano coronale (Fig. 4.11) si distinguono nettamente le separazioni tra le fasce di accrescimento. Facendo uno zoom su tale sezione, si scopre la presenza di piccole strutture circolari in corrispondenza delle separazioni tra le bande (Fig. 4.12). Anche in questo caso, si ritiene che le strutture radiali siano tubuli dentinali con funzione nutritiva.



**Figura 4.12:** Particolare di A4 dove si notano piccole strutture circolari in prossimità dei canali nutritivi. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 4 mm).

## Gruppo B

Si descrive ora il gruppo B, che include denti di coccodrillo. Le sezioni coronale e sagittale del fossile B1 (Fig. 4.13) mostrano la presenza di bande di accrescimento. In questo caso, però, non sono nettamente separate le une dalle altre da strutture di materiale più denso, come nel caso dei denti del gruppo A, ma la struttura risulta più omogenea. Dalla sezione assiale si evince l'assenza delle componenti radiali riscontrate nel gruppo A. Inoltre, si nota la frammentazione dello smalto esterno. Tutte le sezioni registrano la presenza di una frattura che attraversa il dente a metà altezza circa.

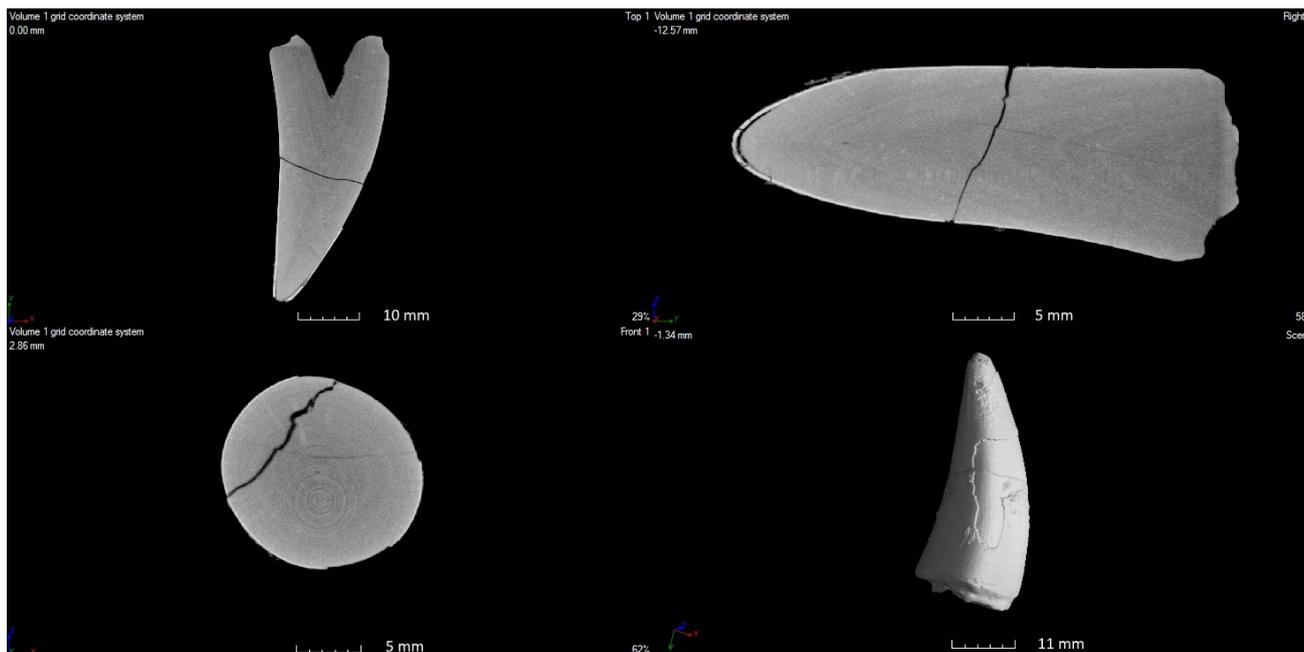
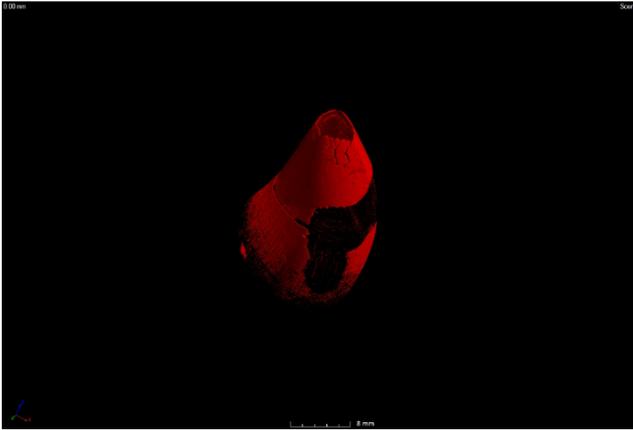
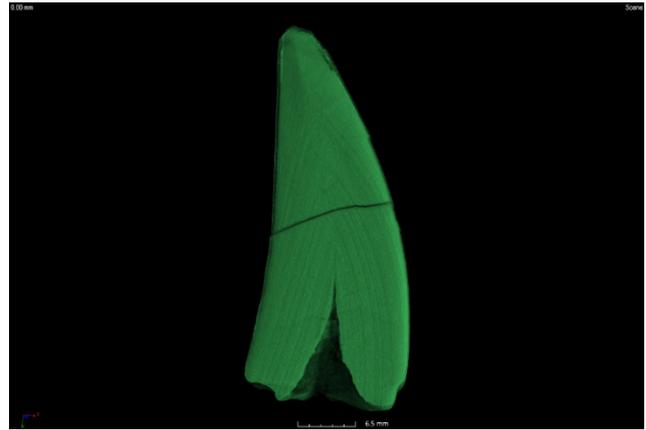


Figura 4.13: Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile B1, ottenuti col software VGStudioMAX.

Si può regolare la scala di grigi, allo stesso modo in cui è stato fatto per i campioni del gruppo A, per confermare quanto osservato. L'indagine condotta sulla possibilità di analizzare separatamente gli elementi costitutivi del dente, ha portato a isolare completamente lo smalto (Fig. 4.14). Questi dati sono essenziali per lo studio dello sviluppo dei singoli denti e pertanto evidenziare regolarità o anomalie nelle fasi di accrescimento. Si può inoltre migliorare la risoluzione delle fasce accrescitive, come mostrato dalla Fig. 4.15.

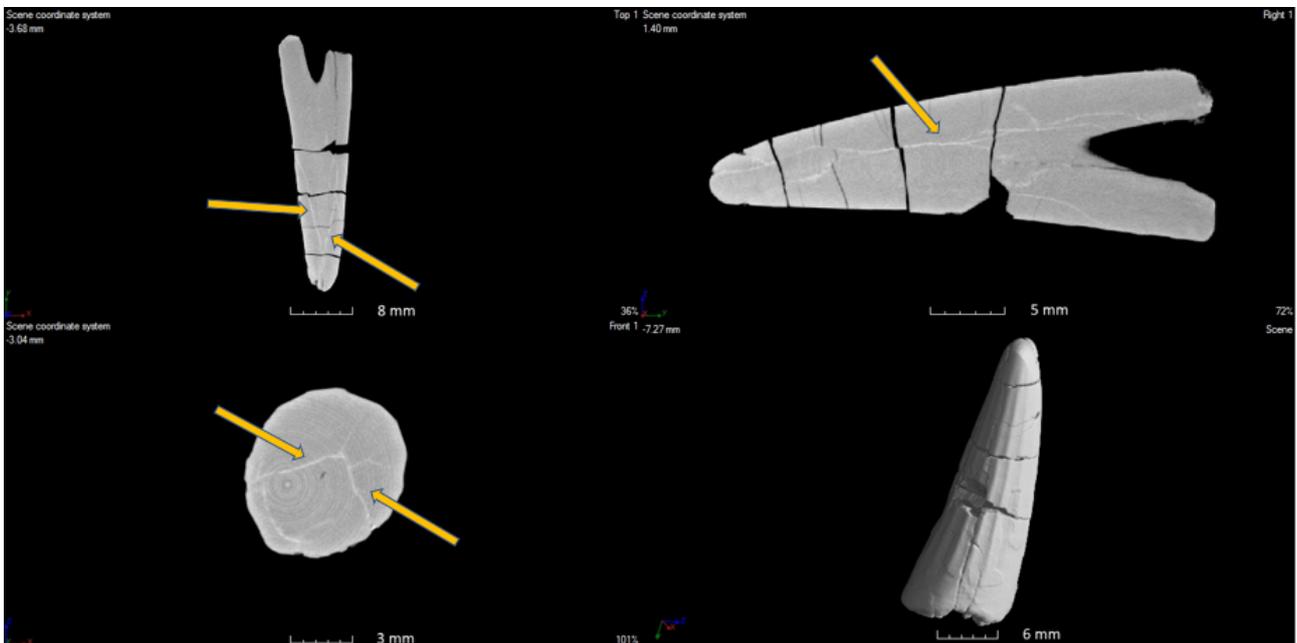


**Figura 4.14:** Ricostruzione dello smalto esterno di B1. (Scala: 8 mm).



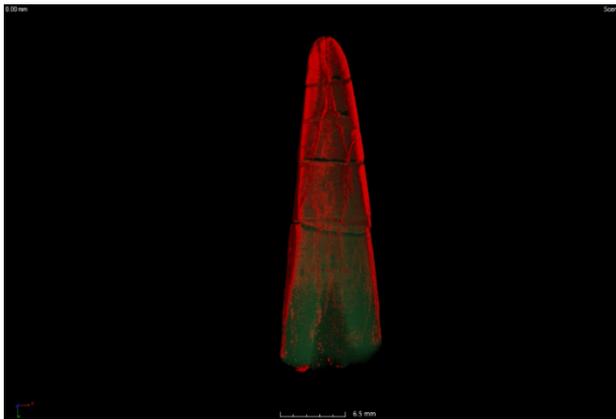
**Figura 4.15:** Sezione coronale di B1. Sono visibili le fasce di accrescimento. Il materiale meno denso è colorato in verde. (Scala: 6.5 mm).

Dalle sezioni coronale e sagittale del fossile B2 (Fig. 4.16) si nota immediatamente come questo risulti frammentato in più parti, come già chiaramente visibile osservando il campione stesso. La sezione sagittale mostra le bande di accrescimento, in questo caso molto sottili e molto omogenee e per questo difficilmente distinguibili. Tutte e tre le sezioni registrano la presenza di strutture lineari, più dense rispetto al materiale interno al dente, che attraversano il fossile, come indicato dalle frecce in Fig. 4.16.

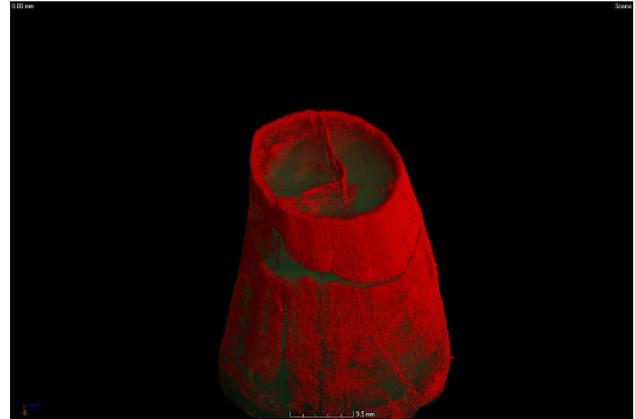


**Figura 4.16:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile B2, ottenuti col software VGStudioMAX. Le frecce indicano le strutture lineari.

Regolando i livelli di intensità come fatto per gli altri fossili, e concentrandosi sulle sezioni coronale e assiale (Fig. 4.17 e Fig. 4.18 rispettivamente), è possibile mettere in evidenza le strutture lineari di cui sopra, la cui forma a tubo e la loro densità ci porta a ipotizzare che si tratti di canali nutritivi.

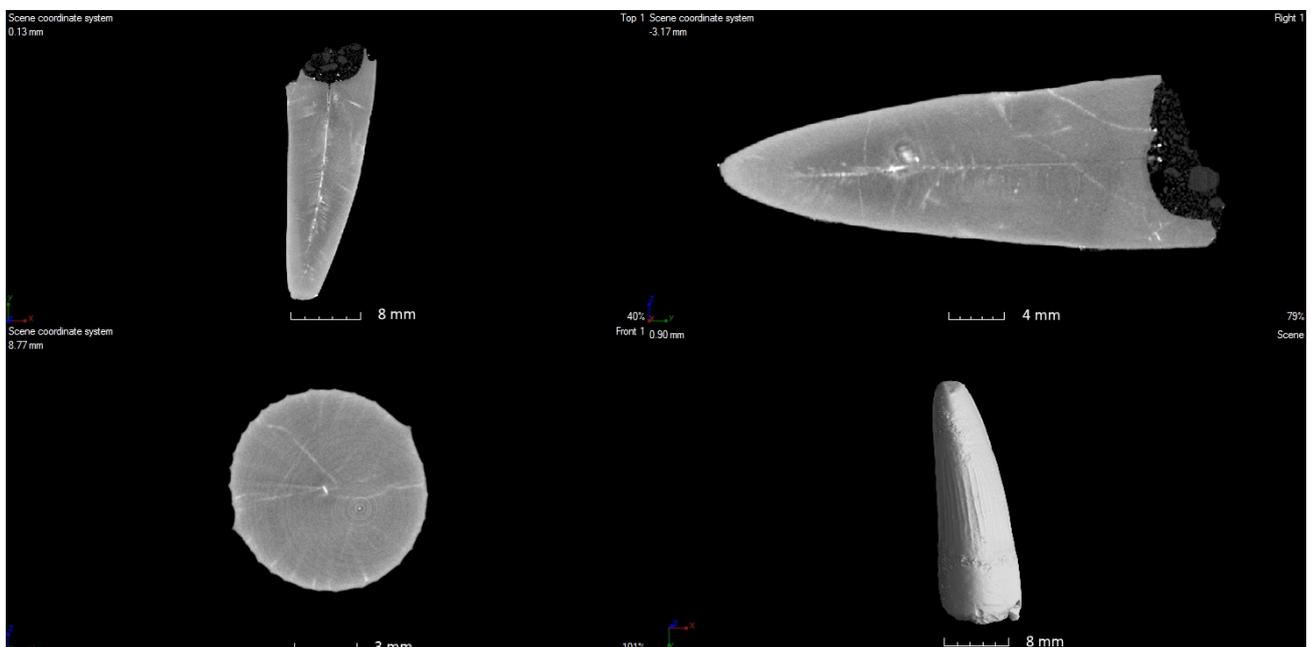


**Figura 4.17:** Sezione coronale di B2. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. Si notano le strutture lineari. (Scala: 6.5 mm).



**Figura 4.18:** Sezione assiale di B2. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. Si notano le strutture lineari. (Scala: 3 mm).

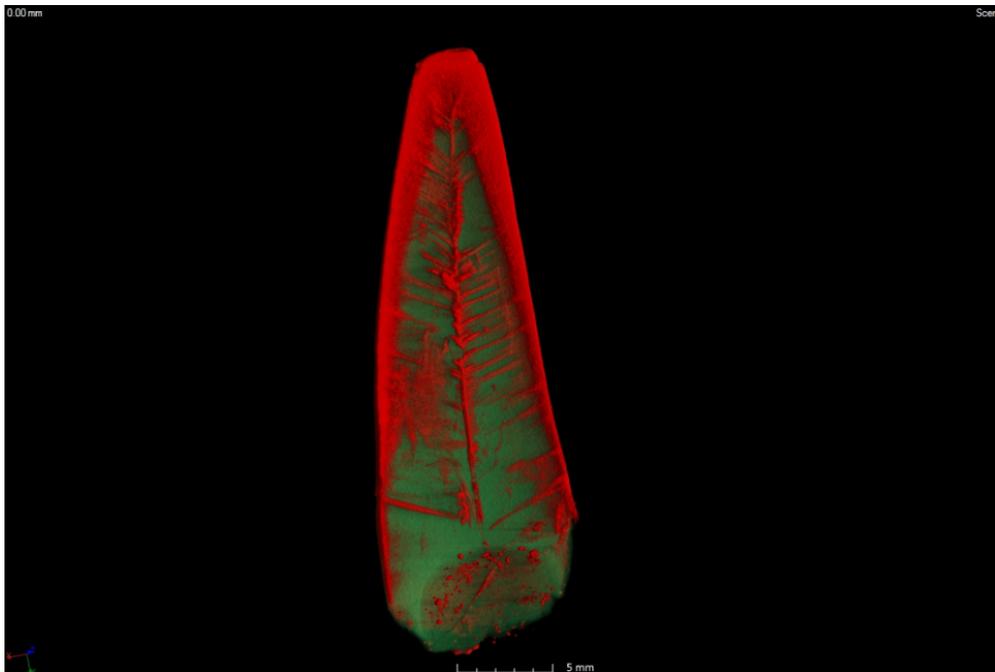
La sezione sagittale del fossile B3 (Fig. 4.19) mostra la presenza di bande di accrescimento, anche in questo caso più sottili e omogenee rispetto a B1. Dalle sezioni coronale e sagittale si nota una struttura lineare, formata da materiale più denso, che attraversa il dente per tutta la sua altezza, e da cui si diramano verso l'esterno altre strutture più sottili, costituite sempre di materia più densa.



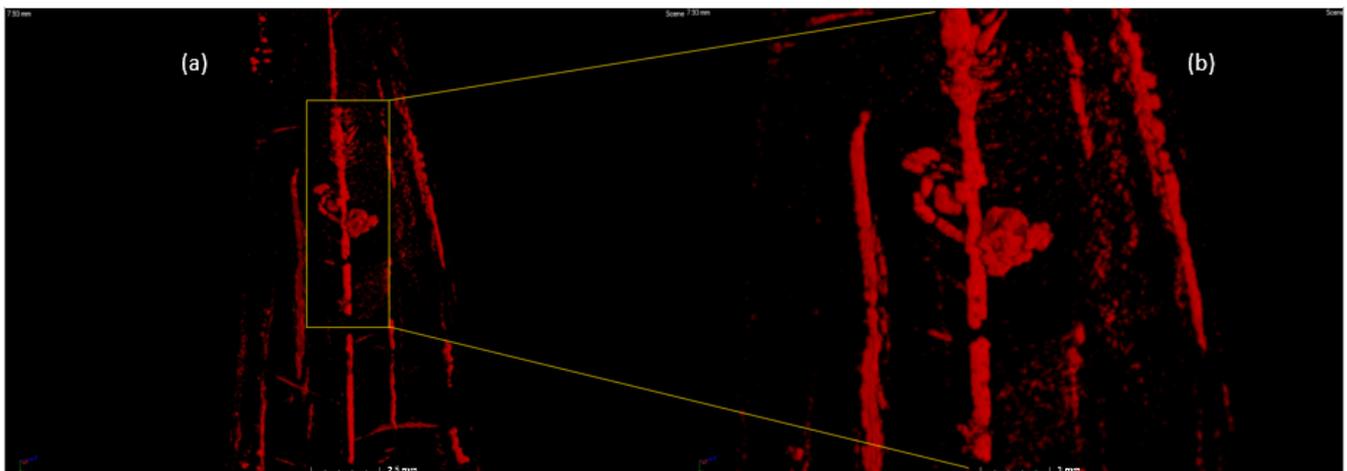
**Figura 4.19:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile B3, ottenuti col software VGStudioMAX.

Regolando i livelli di grigio, colorando in verde le parti meno dense e in rosso quelle più dense, si possono mettere in evidenza queste strutture radiali (Fig. 4.20) mentre, rendendo trasparente il segnale del materiale meno denso, è possibile isolare la struttura lineare centrale, come mostrato in Fig. 4.21. Questa sembra avere una forma a tubo il che, unito al fatto che sia costituita di materiale

più denso, ci induce a pensare che si possa trattare di una sorta di canale nutritivo centrale, da cui si diramano tubuli secondari verso l'esterno del dente.



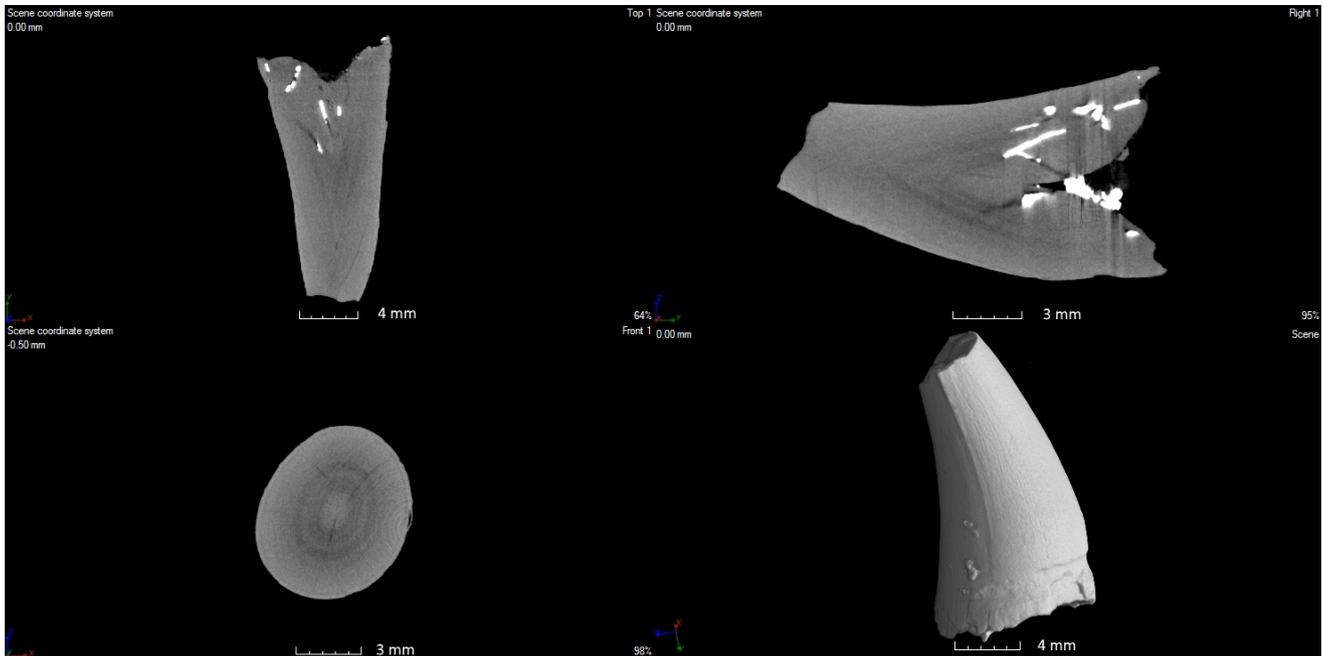
**Figura 4.20:** Sezione coronale del fossile B3. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. Si nota la struttura centrale e quelle radiali secondarie. (Scala: 5 mm).



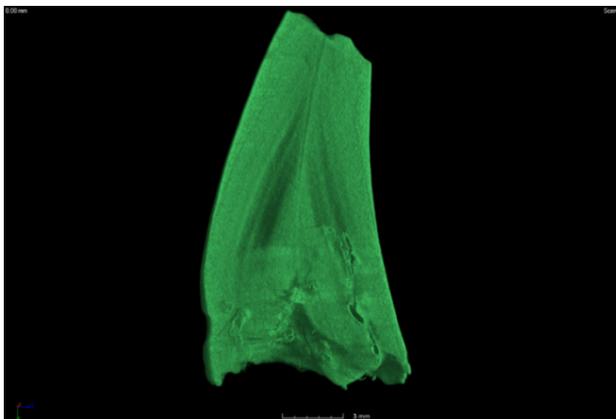
**Figura 4.21:** Particolare della struttura centrale di B3. Il segnale del materiale meno denso è stato azzerato. (a): Scala: 2.5 mm. (b): Scala: 1 mm.

Le sezioni principali del fossile B4 (Fig. 4.22) mostrano la presenza di bande di accrescimento, anche in questo caso, come già sottolineato per B1, non intervallate da componenti di materiale più denso. Non si notano strutture o componenti bianche radiali. Dalle sezioni coronale e sagittale si osservano materiali molto più densi rispetto al resto del fossile, incastonati in prossimità della corona di base. Lavorando sulla sezione sagittale, si possono mettere in evidenza le fasce accrescitive

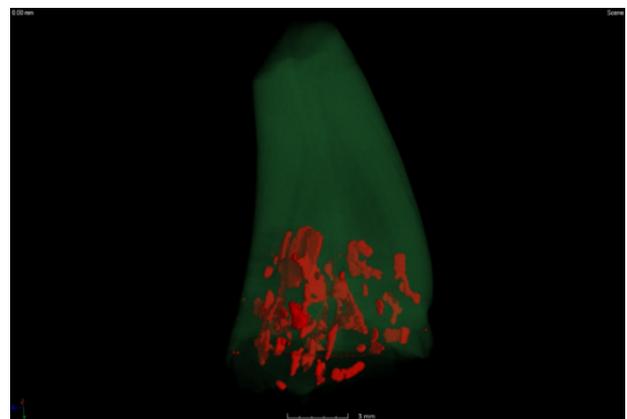
regolando l'intensità del verde, come mostrato in Fig. 4.23. Rendendo quasi trasparente il segnale del materiale meno denso (Fig. 4.24) si possono isolare i frammenti incastonati nella base e visualizzarne la disposizione tridimensionale.



**Figura 4.22:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile B4, ottenuti col software VGStudioMAX.



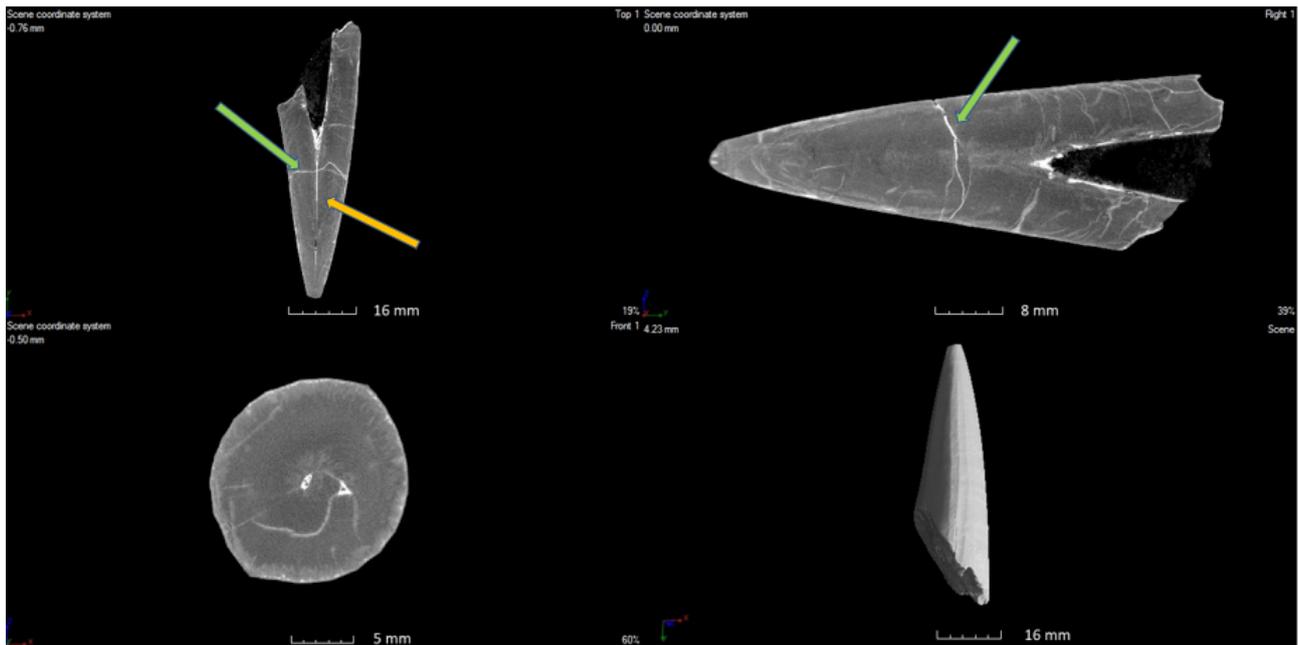
**Figura 4.23:** Sezione sagittale di B4. Sono visibili le fasce di accrescimento. (Scala: 3 mm).



**Figura 4.24:** Ricostruzione di B4. Il materiale più denso è colorato in rosso, quello meno denso in verde. Si nota distintamente il materiale più denso incastonato nel fossile. (Scala: 3 mm).

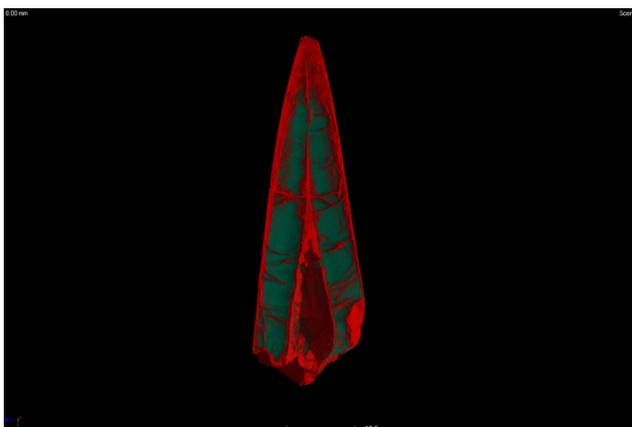
## Gruppo C

Si prende in esame, infine, il gruppo C. La sezione coronale di C1 (Fig. 4.25) mostra la presenza di una struttura lineare che attraversa il dente per tutta la sua altezza, dalla cavità formata dal “dente di ricambio” all’apice. Dalle sezioni coronale e sagittale si nota una componente bianca, perpendicolare alla struttura appena descritta. Inoltre, in prossimità della corona basale, vi sono altre strutture di questo tipo. Si osserva che, in generale, l’interno del dente risulta omogeneo.

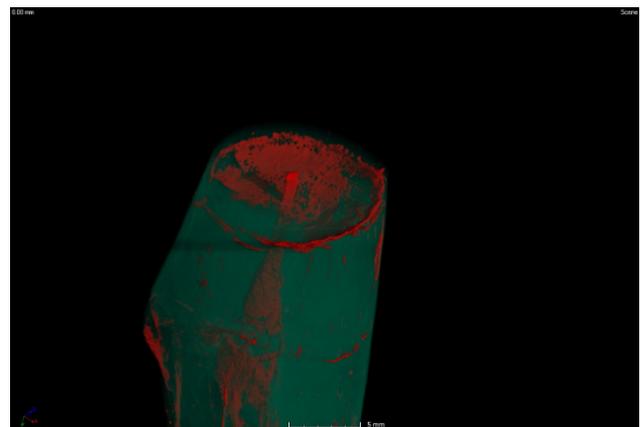


**Figura 4.25:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile C1 ottenuti con il software VGStudioMAX. Sono in evidenza struttura centrale (freccia arancione) e componente ad essa perpendicolare (freccie verdi).

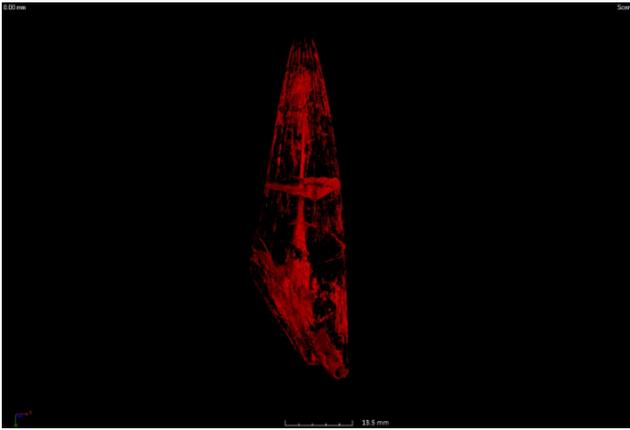
Si può regolare la scala di grigi colorando in verde il materiale meno denso e in rosso quello più denso. Sezionando il fossile secondo un piano coronale (Fig. 4.26), si possono mettere in evidenza le strutture che attraversano il dente secondo le due direzioni. Sezionando secondo un piano assiale (Fig. 4.27), si nota come la struttura trasversale risulti essere in realtà un piano, il che ci induce a pensare che si tratti di una frattura, mentre la struttura centrale sia piatta. Si può rendere trasparente il segnale del materiale meno denso in modo da visualizzare la disposizione spaziale delle strutture descritte, come mostrato in Fig. 4.28. È possibile in questo caso fare uno zoom per osservare più da vicino le dimensioni della struttura centrale (Fig. 4.29).



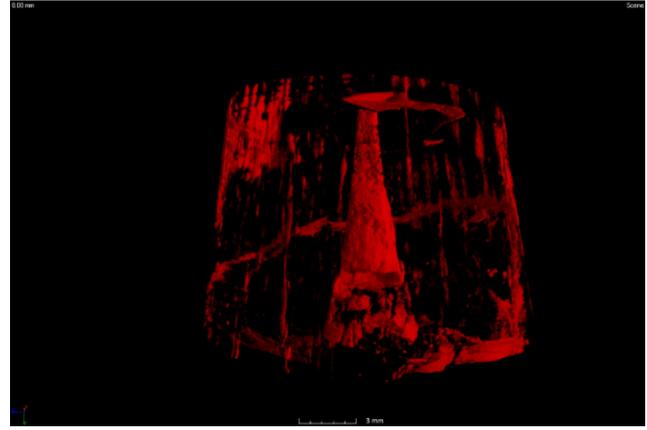
**Figura 4.26:** Sezione coronale del fossile C1, dove il materiale più denso è colorato in rosso e quello meno denso in verde. (Scala: 13.5 mm).



**Figura 4.27:** Sezione assiale del dente che mostra il piano della frattura. Il materiale più denso è in rosso, quello meno denso in verde. (Scala: 5 mm).

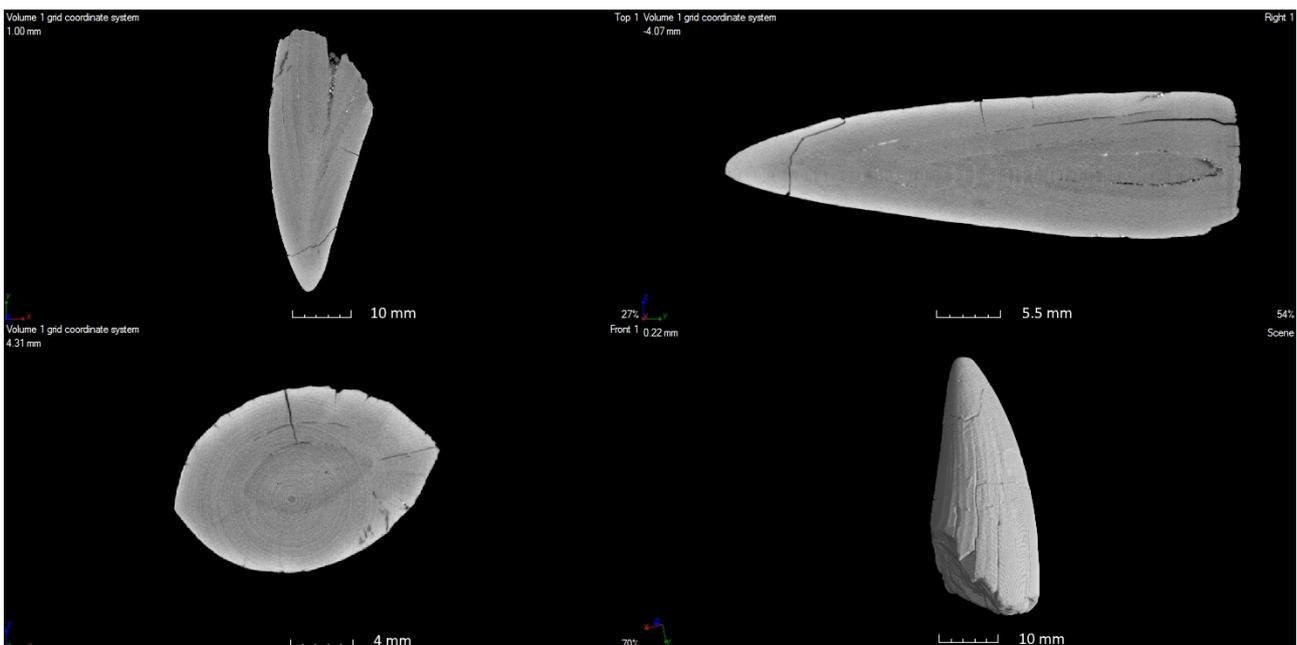


**Figura 4.28:** Ricostruzione di C1 in cui si è reso trasparente il segnale del materiale meno denso. Si osservano distintamente fratture e struttura centrale. (Scala: 13.5 mm).

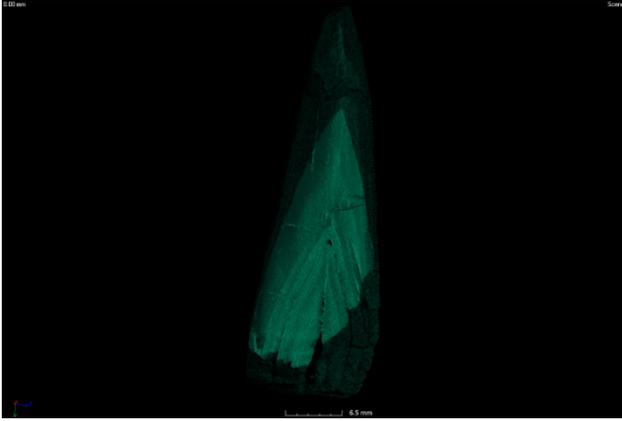


**Figura 4.29:** Particolare della struttura centrale del fossile C1. (Scala: 3 mm).

Le sezioni principali del fossile C2 (Fig. 4.30) mostrano chiaramente la presenza, all'interno del dente, di strutture di accrescimento organizzate in bande. In particolare, dalla sezione sagittale, si nota come queste bande non siano separate le une dalle altre da componenti di materiale più denso ma, allo stesso tempo, la struttura interna risulti meno omogenea rispetto a quella riscontrata nel gruppo B. Dalle sezioni coronale e sagittale si osserva inoltre la presenza di una frattura in prossimità dell'apice dentale. Non si notano strutture lineari trasversali o radiali all'interno di C2. Si può agire sulla scala di grigi e colorare in verde il materiale meno denso e in nero quello più denso, sezionando il dente secondo un piano coronale (Fig. 4.31), allo scopo di mettere in evidenza la stratificazione interna. Colorando in rosso il campione e sezionando lungo un piano sagittale (Fig. 4.32), si notano più distintamente le strutture di accrescimento.



**Figura 4.30:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile C2 ottenuti col software VGStudioMAX.



**Figura 4.31:** Sezione coronale di C2. Si nota la stratificazione interna. (Scala: 6.5 mm).



**Figura 4.32:** Sezione sagittale di C2. La mappa delle densità mostra chiaramente una parte interna meno densa e più strutturata che si contrappone ad un rivestimento molto denso e omogeneo nelle parti più esterne. (Scala: 6.5 mm).

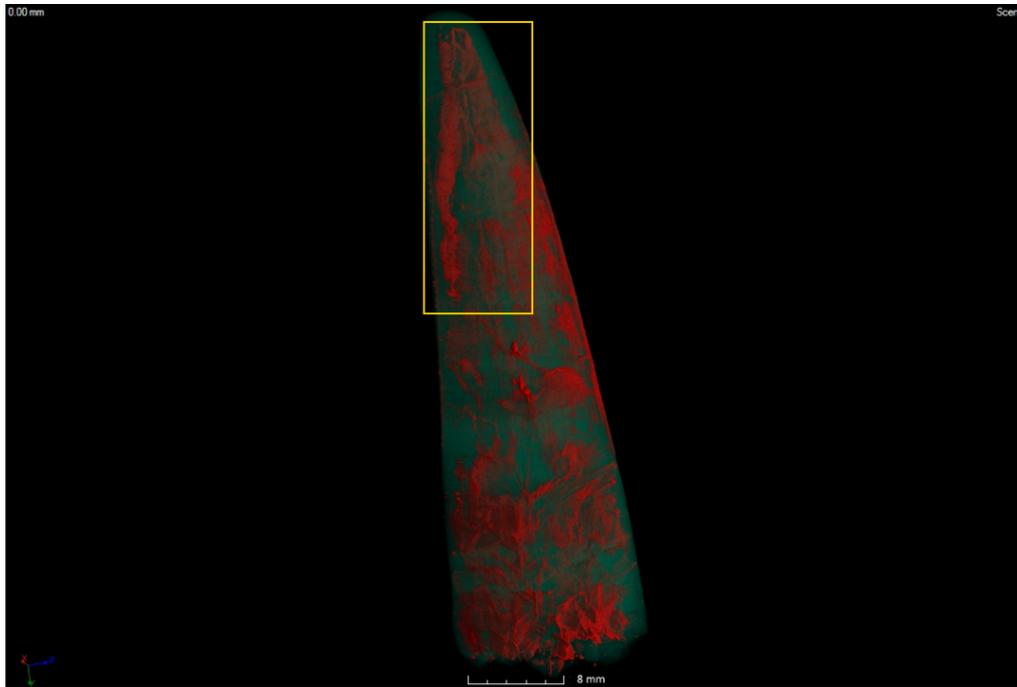
Le sezioni coronale e sagittale di C3 (Fig. 4.33) mostrano la presenza di una struttura lineare che attraversa il dente lungo la sua altezza, formata da materiale più denso. Si notano decine di strutture lineari bianche in prossimità della corona di base. Anche dalla sezione assiale si osservano decine di strutture lineari bianche, disposte radialmente all'interno del fossile.



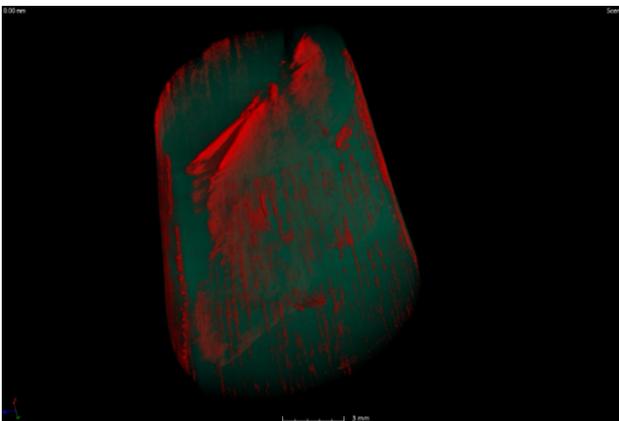
**Figura 4.33:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile C3, ottenuti col software VGStudioMAX.

Si regola la scala di grigi come già fatto per gli altri campioni. In Fig. 4.34 si nota come la struttura centrale messa prima in evidenza abbia una forma planare e si separi in due diverse strutture. Sezionando lungo un piano assiale (Fig. 4.35), si osserva la disposizione di questa struttura nello spazio e se ne mette in evidenza la forma piana. Si può poi azzerare il segnale del materiale meno

denso e concentrarsi sulla base del dente (Fig. 4.36), dove si vede come tutte quelle strutture lineari prima descritte siano anch'esse tanti piani che attraversano il fossile, per cui si può ipotizzare che si tratti di fratture.



**Figura 4.34:** *Rendering* 3D di C3 dove sono colorati in verde e rosso rispettivamente la parte meno densa e più densa. È evidenziata nel rettangolo giallo la struttura centrale. (Scala: 8 mm).

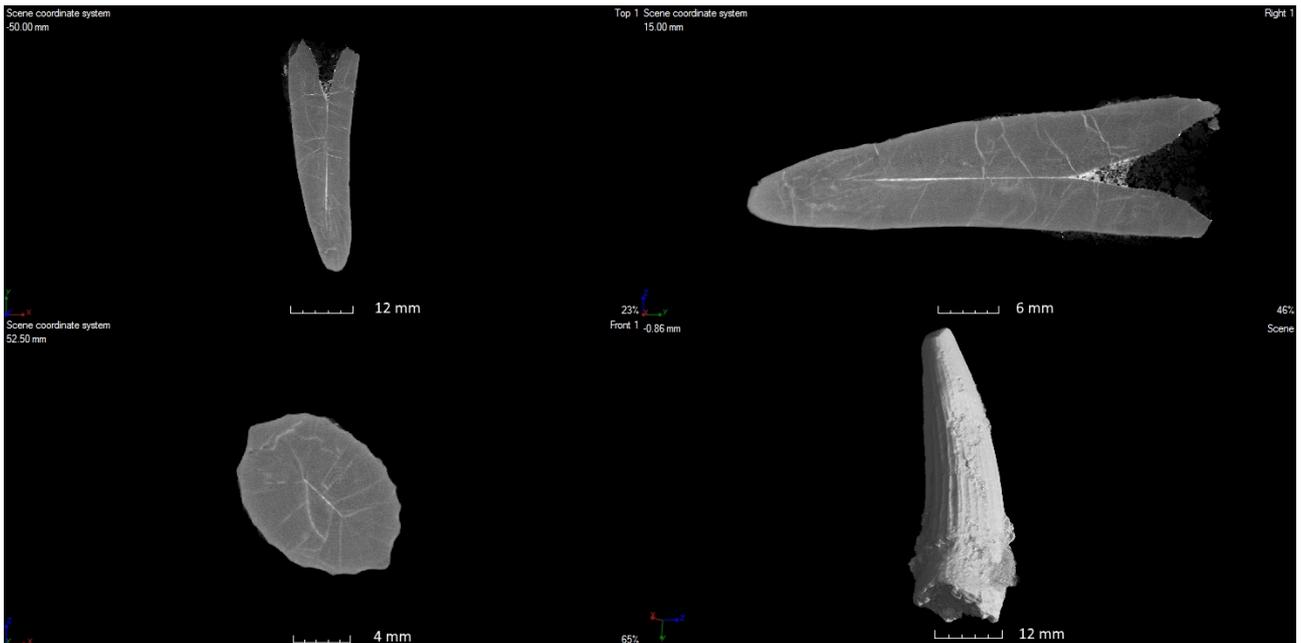


**Figura 4.35:** Sezione assiale di C3. Si osserva la struttura a piano. (Scala: 3 mm).



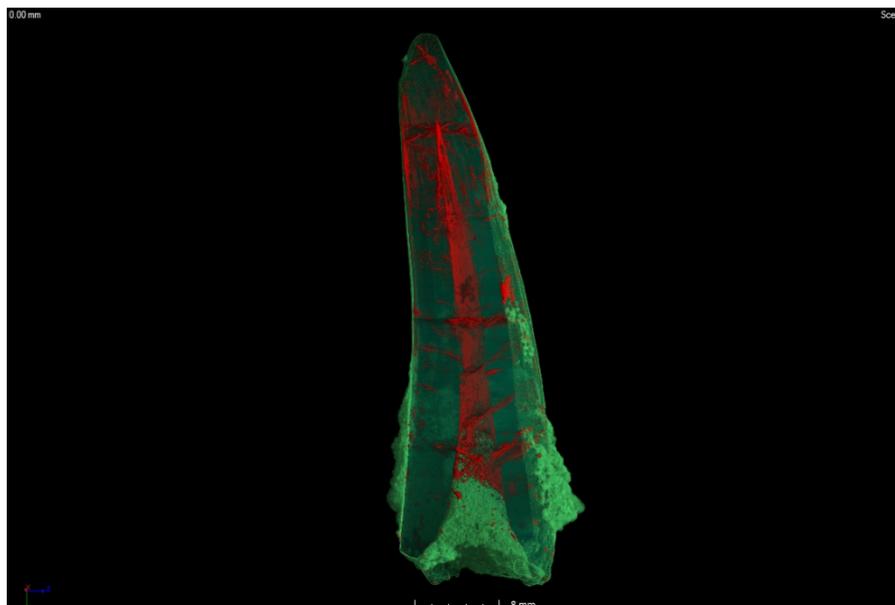
**Figura 4.36:** Interno del dente C3 in prossimità della base. Il segnale del materiale meno denso è azzerato. Sono ben visibili le numerose fratture che attraversano il dente (Scala: 4 mm).

Il fossile C4 presenta internamente una struttura centrale, formata da materiale più denso, che lo attraversa lungo la sua altezza, come mostrato dalle sezioni coronale e sagittale (Fig. 4.37). Si notano inoltre componenti bianche che da questa struttura centrale si diramano verso l'esterno, caratteristica riscontrata anche nella sezione assiale, dove appaiono componenti bianche radiali.

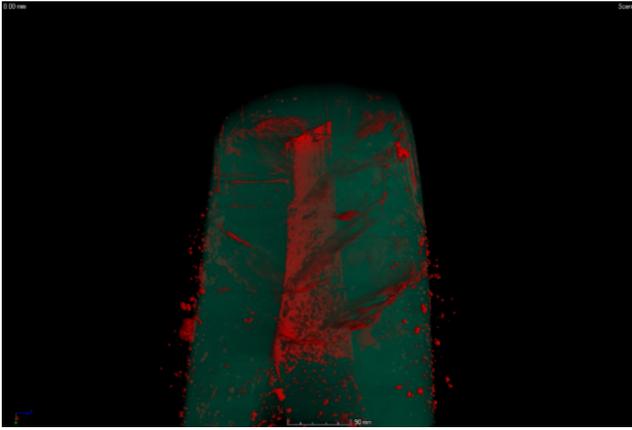


**Figura 4.37:** Sezioni principali e *rendering* 3D del fossile C4, ottenuti col software VGStudioMAX.

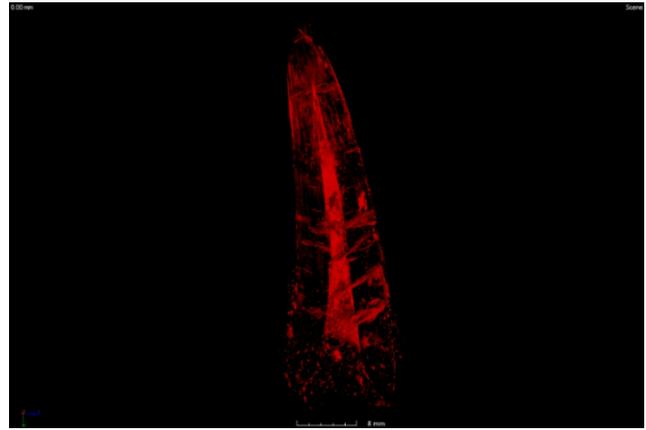
Sezionando il volume lungo un piano coronale e regolando la scala di grigi in modo da colorare in verde il materiale meno denso e in rosso quello più denso (Fig. 4.38), si osserva la disposizione spaziale delle strutture prima descritte. Se si taglia il volume lungo un piano assiale (Fig. 4.39), si nota la forma piatta della struttura centrale. Azzerando il segnale del materiale meno denso (Fig. 4.40), si vede che anche le strutture radiali hanno forma pressoché piatta, il che induce a ritenerle delle fratture.



**Figura 4.38:** Sezione coronale del fossile C4 dove sono stati utilizzati tre colori per tre intervalli di densità, dal verde chiaro al rosso in ordine crescente. (Scala: 8 mm).



**Figura 4.39:** Particolare della struttura centrale di C4. La parte più densa è colorata in rosso, quella meno densa in verde. (Scala: 3.5 mm).

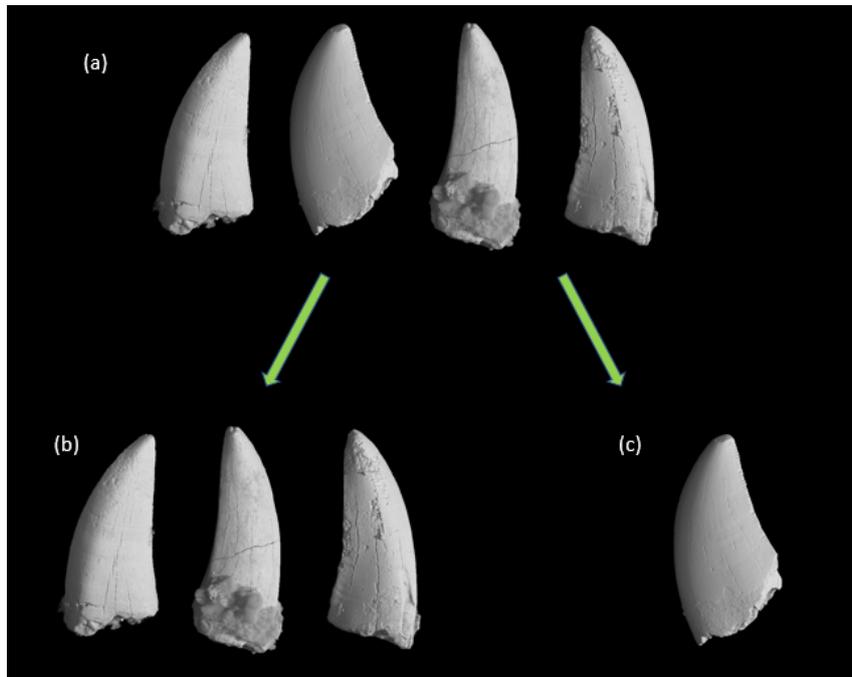


**Figura 4.40:** Fossile C4 in cui è stato azzerato il segnale del materiale meno denso. Si notano distintamente struttura centrale e strutture secondarie radiali (Scala: 8 mm).

## 4.2 Discussione

Sulla base di quanto osservato nel precedente paragrafo, ci si propone ora di valutare la possibilità di definire parametri diagnostici che possano implementare la classificazione dei reperti sulla base dei caratteri interni e strutture di accrescimento messe in luce dalla micro-CT.

Si prende in considerazione per prima cosa il gruppo A, formato dai denti di dinosauri carnivori, caratterizzati dalla sezione a goccia, dalla forma a coltello ricurvo, atta a lacerare la carne, e dalla presenza di una carena anteriore e una posteriore, entrambe provviste di denticoli, come già specificato al par. 2.1. Osservando le sezioni principali di questi denti, è possibile notare la presenza ricorrente di fasce di accrescimento nei campioni in questione. Tuttavia, se nei fossili A1, A3 e A4, queste risultano numerose (ce ne sono almeno quattro in ciascuno dei campioni) e ben in evidenza (si notano delle vere e proprie discontinuità all'interno del dente, con bande separate tra loro da strutture a densità maggiore), nel fossile A2 se ne distinguono soltanto due, più omogenee rispetto alle precedenti. Altro elemento comune per quanto riguarda i tre fossili di cui sopra sono i canali nutritivi, a decine, che si diramano dal centro del dente verso l'esterno. Il fossile A2 presenta a sua volta tali canali, ma in numero assai ridotto rispetto ai precedenti. È possibile inoltre notare, all'interno di A2, in prossimità della base, una struttura più complessa e più densa del resto del dente. Sezionando virtualmente il volume e colorando in modo diverso materiali di differenti densità (Fig. 4.6) si osserva che questa struttura risulta essere un piano che attraversa trasversalmente il dente, lungo una delle direzioni principali di stress. Le differenze sopra descritte, unite alla notevole disparità di altezza del fossile A2 rispetto ai restanti tre, ci porta a ritenere necessaria una nuova suddivisione di tali denti. In particolare, si avrà un primo gruppo A(I), composto da A1, A3 e A4, e un secondo gruppo A(II), composto dal solo A2 (Fig. 4.41).



**Figura 4.41:** (a) Gruppo A. (b) Nuovo gruppo A(I). (c) Nuovo gruppo A(II). Le immagini non sono in scala.

Si potrebbero quindi, in base a quanto osservato, formulare delle ipotesi sui comportamenti biologici delle diverse specie e sulla relazione specie-ambiente. In particolare, i denti del gruppo A(I), presentano fasce accrescitive nettamente separate le une dalle altre. Questo suggerisce l'ipotesi che gli individui in questione non abbiano avuto la possibilità di accrescere il dente in modo regolare. Questo fatto potrebbe essere dovuto a una difficoltà nel procurarsi cibo regolarmente durante l'anno. Le ondulazioni assiali presenti sullo smalto dei campioni A1 e A4 (Fig. 4.42 e Fig. 4.43) sono una conferma a questa ipotesi: esse si riscontrano infatti nei casi di problemi di alimentazione. Tali creature potrebbero essere quindi vissute nell'entroterra, dove la stagionalità potrebbe essere stata un fattore fondamentale dell'ecosistema. Il dente del gruppo A(II) presenta solamente due bande accrescitive e per il resto l'interno risulta omogeneo, eccezion fatta per la struttura basale a forma di piano. A differenza del gruppo precedente, questo dente mostra un accrescimento più regolare. A parità di ecosistema, risulta quindi evidente che la specie in oggetto abbia avuto un'alimentazione più regolare, dovuta probabilmente alla maggior frequenza con cui questa aveva accesso alle risorse. È possibile perciò che la specie in questione avesse un comportamento tipico degli animali cosiddetti spazzini.



**Figura 4.42:** Ondulazioni assiali presenti sullo smalto del fossile A1 (indicate dalle frecce).



**Figura 4.43:** Ondulazioni assiali presenti sullo smalto del fossile A4 (indicate dalle frecce).

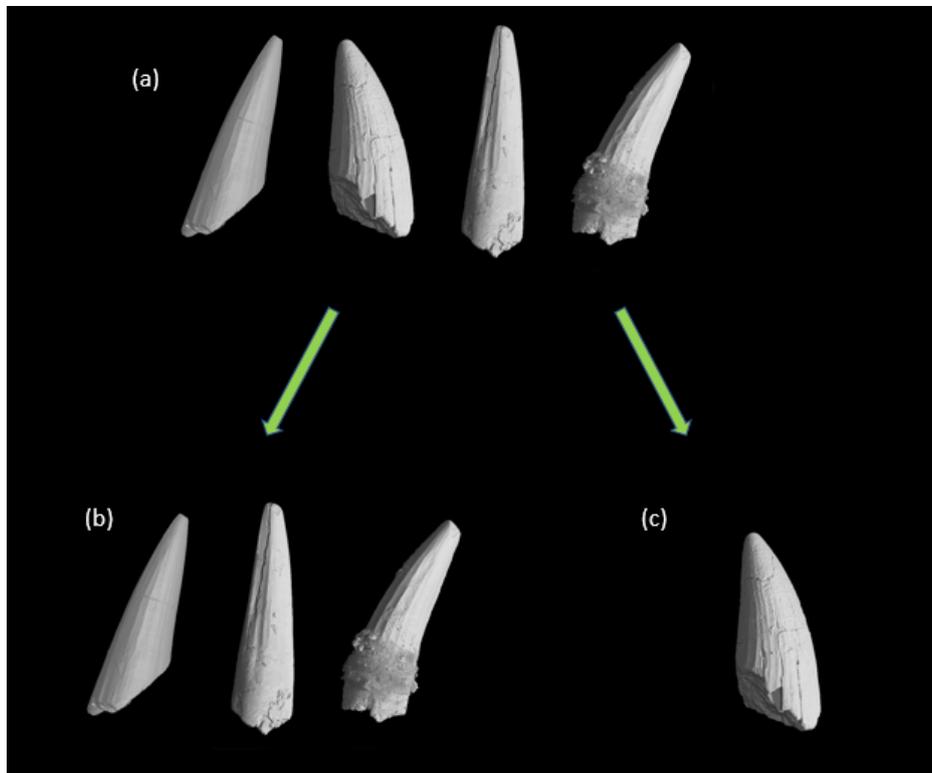
Si prendono ora in considerazione i fossili del gruppo B. Questi appartengono a coccodrilli e sono caratterizzati dalla forma conica e sezione circolare. Esternamente presentano lo smalto liscio, eccezion fatta per B2 e B3. Analizzando le sezioni di questi denti, si è riscontrata una generale omogeneità del materiale che li compone internamente. Sono presenti le bande di accrescimento, ma queste sono molto più omogenee rispetto a quelle nei fossili del gruppo A. I canali nutritivi sono in numero ridotto (uno o due, nel caso di B3 e B2) o assenti. In base a quanto detto sopra, si ritiene non sia necessario operare una suddivisione di questo gruppo. Pertanto, il gruppo B resta composto come in origine dai quattro denti di coccodrillo. Le differenze osservate (dimensioni, smalto, etc.) sono probabilmente imputabili a differenze ontogenetiche (età dell'individuo), di variazione lungo la serie dentale (la variabilità è molto alta anche in un singolo individuo) o l'appartenenza a specie diverse.

Si ipotizza che i coccodrilli in questione vivessero lungo il corso dei fiumi, in modo da poter aver sempre a disposizione risorse con cui nutrirsi. L'omogeneità delle fasce accrescitive potrebbe infatti essere indice di un regime alimentare regolare, come ipotizzato invece nel caso del gruppo A(I).

Si considera per ultimo il gruppo C. Questi sono denti di dinosauri piscivori e hanno caratteristiche morfologiche comuni così come differenze visibili già in fase preliminare, come si è già accennato al par. 2.1. I fossili C1 e C3 hanno la caratteristica forma a cono atta a mangiare i pesci; C2 ha forma più simile ai denti del gruppo A mentre C4 una forma conica curva. Tutti e quattro i fossili hanno lo smalto attraversato da creste. C2 presenta internamente delle bande accrescitive, simili a quelle dei denti del gruppo A, anche se non separate da strutture più dense. C1, C3 e C4 non hanno una struttura accrescitiva di questo tipo, ma nel loro caso l'accrescimento risulta continuo, senza zonazioni. Sono però attraversati lungo l'altezza da una struttura lineare più densa. Questi ultimi risultano attraversati da una serie di crepature in corrispondenza della base. Sia C2 che C4 presentano una curvatura. Sulla base di quanto osservato, si ritiene opportuno suddividere il gruppo C in due sottogruppi, uno formato dai fossili C1, C3 e C4, chiamato C(I), e l'altro formato dal fossile

C2, chiamato C(II), come mostrato in Fig. 4.44.

È possibile formulare ipotesi sui paleo-ambienti in cui sono vissute tali creature. La forma a cono dei fossili C1, C3 e C4 indica che si tratta di dinosauri piscivori. Inoltre, il fatto che l'interno del dente risulti omogeneo potrebbe significare che essi avessero un'alimentazione regolare, simile a quanto osservato per i coccodrilli. Si pensa quindi che tali creature vivessero in ambiente costiero oppure nella foce di un fiume, dove si ha una probabilità più alta di alimentarsi in modo continuo. Al contrario, la presenza di chiare stratificazioni interne osservate nel gruppo C(II), può indurre a ritenere che la specie in oggetto non avesse un regime alimentare regolare. Si ipotizza che fosse appartenuto ad un dinosauro piscivoro vissuto nell'entroterra, in prossimità di laghi, dove non sempre è possibile accedere alle risorse con continuità. Questa suddivisione fornirebbe uno strumento innovativo per distinguere, sulla base di denti isolati, *Spinosaurinae* e *Barionichinae*, anche se sarebbe opportuno testare questa ipotesi sulla base di un numero maggiore di campioni.



**Figura 4.44:** (a) Gruppo C. (b) Nuovo gruppo C(I). (c) Nuovo gruppo C(II). Le figure non sono in scala.

## Conclusioni

La ricostruzione mediante tomografia computerizzata ha permesso di poter sezionare i reperti paleontologici in modo non invasivo e di poter lavorare sulle diverse densità dei materiali che compongono i fossili, regolando la scala dei grigi, mettendo in evidenza alcune parti e rendendone trasparenti altre.

L'analisi di questi fossili ha portato come risultato una ulteriore suddivisione di questi in gruppi. In particolare, nel gruppo A sono state riscontrate differenze nelle modalità di crescita tra i reperti A1, A3 e A4, dove sono ben visibili le fasce di accrescimento, indice di "alimentazione non regolare", e il fossile A2, dove queste sono meno marcate ed è invece ben visibile una struttura in prossimità della base assente negli altri tre. I due nuovi gruppi sono stati chiamati A(I) e A(II) rispettivamente. Per quanto riguarda il gruppo B, non si è ritenuto necessario procedere ad una riclassificazione, in base al fatto che tutti e quattro i fossili presentano omogeneità interne e non vi sono elementi di differenziazione tra questi. Da ultimo, si è operata una suddivisione del gruppo C, che già si era prefigurato come il più "variegato". Si sono raggruppati da una parte i fossili C1, C3 e C4 e, dall'altra, C2. I primi, gruppo C(I), hanno forma conica e internamente risultano omogenei, il secondo, gruppo C(II), presenta una curvatura e ha strutture di accrescimento chiaramente visibili.

In seguito a tale riclassificazione, sono state avanzate ipotesi riguardo ai paleo-ambienti in cui sono vissute le specie classificate. Gli individui del gruppo A(I) vengono collocati nell'entroterra, così come quelli del gruppo A(II), i dinosauri cosiddetti spazzini. Gli individui del gruppo B sono collocati in prossimità di ambienti fluviali. Per quanto riguarda il macro-gruppo C, gli individui del gruppo C(I) si suppone abitassero in ambiente estuarino o costiero, mentre il gruppo C(II) in prossimità di laghi nell'entroterra. Quest'ultima suddivisione, se testata con successo su un numero maggiore di campioni, potrebbe fornire un utile strumento innovativo per la distinzione di *Spinosaurinae* e *Barionichinae* sulla base di denti isolati.

# Bibliografia

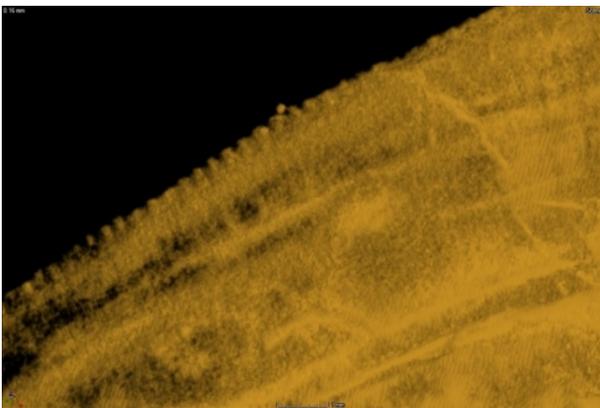
- [1] Brancaccio, R., Morigi, M.P., Bettuzzi, M., Casali, F. (2013). Il software di ricostruzione ed elaborazione per la TAC 3D. Seminario di formazione INFN “Prospettive nel campo dell’archeometria e della diagnostica sui beni culturali”, 6-8 Novembre 2013, Venaria Reale, Torino.
- [2] Erickson, G.M. (1996). Incremental lines of von Ebner in dinosaurs and the assessment of tooth replacement rates using growth line counts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93, pp. 14623-14627.
- [3] Fanti, F., Cau, A., Martinelli, A., Contessi, M. (2014). Integrating palaeoecology and morphology in theropod diversity estimation: a case from the Aptian-Albian of Tunisia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 410, pp. 39 – 57.
- [4] Feldkamp, L.A., Davis, L. C., Kress, J. W. (1984). Practical cone-beam algorithm. *Journal of the Optical society of America A*, Vol. 1, No.6, pp. 612-619.
- [5] Gerke, O., Wings, O. (2016) Multivariate and Cladistic Analyses of Isolated Teeth Reveal Sympatry of Theropod Dinosaurs in the Late Jurassic of Northern Germany. *PLoS ONE* 11(7): e0158334, pp. 52. DOI: 10.1371/journal.pone.0158334.
- [6] He, Y., Makovicky, P.J., Xu, X., You, H. (2018). High-resolution computed tomographic analysis of tooth replacement pattern of the basal neoceratopsian *Liaoceratops yanzigouensis* informs ceratopsian dental evolution. *Scientific Reports*, 8, 5870, pp. 15. DOI: 10.1038/s41598-018-24283-5.
- [7] Jones, M.E.H., Lucas, P.W., Tucker, A.S., Watson, A.P., Sertich, J.J., Foster, J.R., Williams, R., Garbe, U., Bevitt, J.J., Salvemini, F. (2018). Neutron scanning reveals unexpected complexity in the enamel thickness of herbivorous Jurassic reptile. *J. R. Soc. Interface*, 15, 20180039, pp. 11. DOI: 10.1098/rsif.2018.0039.
- [8] Physik Instrumente. *M-038, M-521 and M-413.3 Datasheet*. Available online. 2009. URL: [https://www.pi-usa.us/fileadmin/user\\_upload/pi\\_us/files/catalogs/2009\\_PI\\_Precision\\_Micro\\_Positioning\\_Stage\\_Catalog.pdf](https://www.pi-usa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/catalogs/2009_PI_Precision_Micro_Positioning_Stage_Catalog.pdf)
- [9] Rogers, S.W. (1998). Exploring dinosaur neuropaleobiology: viewpoint computed tomography scanning and analysis of an *Allosaurus fragilis* endocast. *Neuron*, 21, pp. 673-679.
- [10] Seeram E. *CT at a glance*, John Wiley & Sons, Ltd, 2018, pp. 26-29.
- [11] Suarez, C.A., You, H.L., Suarez, M.B., Li, D.Q., Trieschmann, J.B. (2017). Stable isotopes reveal rapid enamel elongation (amelogenesis) rates for the Early Cretaceous Iguanodontian Dinosaur *Lanzhousaurus magnidens*. *Scientific reports*, 7, 15319, pp. 8. DOI: 10.1038/s41598-017-15653-6.
- [12] Thermo Scientific. *PXS10 High-Resolution MicroFocus X-Ray Source 130 kV Datasheet*. 2011.
- [13] Urciuoli, A., Zanolli, C., Fortuny, J., Almécija, S., Schillinger, B., Moyà-Solà, S., Alba, D.M. (2018). Neutron-based computed tomography: *Pliobates cataloniae* and *Barberapithecus huerzeleri* as a test-case study. *Am. J. Phys. Anthropol.* 2018, pp. 1-7. DOI: 10.1002/ajpa.23467.
- [14] Varian Medical Systems. *PS2520D Datasheet*.

- [15] Wang, C.C., Song, Y.F., Song, S.R., Ji, Q., Chiang, C.C., Meng, Q., Li, H., Hsiao, K., Lu, Y.C., Shew, B.Y., Huang, T., Reisz, R.R. (2015). Evolution and function of dinosaur teeth at ultramicrostructural level revealed using synchrotron transmission X-ray microscopy. *Scientific Reports*, 5, 15202, pp. 11. DOI: 10.1038/srep15202.
- [16] Webster J.G. *Strumentazione biomedica: progetto ed applicazioni*, EdiSES, 2010, pp. 553-557.
- [17] Zanolli, C., Schillinger, B., Beaudet, A., Kullmer, O., Macchiarelli, O., Mancini, L., Schrenk, F., Tuniz, C., Vodopivec, V. (2017). Exploring hominin and nonhominin primate dental fossil remains with neutron microtomography. *Phys. Procedia* 88, pp. 109-115. DOI: 10.1016/j.phpro.2017.06.014.

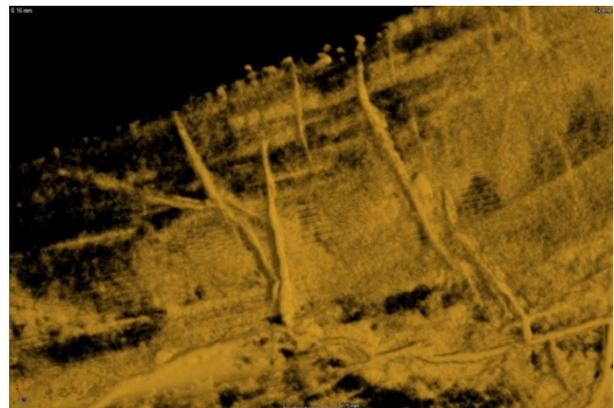
# Appendice

A questo lavoro di tesi è stata aggiunta la seguente appendice, dove vengono presentati i risultati della micro-CT relativi alle carene dei denti del gruppo A. Attraverso la regolazione della scala dei grigi e opportuni sezionamenti virtuali, resi possibili grazie all'utilizzo della tomografia computerizzata, si è cercato di risolvere la forma dei denticoli di cui sono provviste le carene, spingendosi fino alla massima risoluzione possibile permessa dal set-up sperimentale utilizzato. Si è deciso di inserire queste immagini nell'appendice principalmente per due motivi: in primo luogo perché questo lavoro di tesi ha come obiettivo l'identificazione di nuovi parametri diagnostici non di tipo morfologico. D'altra parte, tali risultati mostrano fino a che punto si possa sfruttare la risoluzione spaziale disponibile con la micro-tomografia, migliorabile se si utilizzano, ad esempio, tubi radiogeni con macchia focale di minor dimensione oppure sincrotroni. I risultati ottenuti sono riportati di seguito. Per ulteriori informazioni sulle carene di questi reperti, si vedano le immagini ottenute con Microscopio a Scansione Elettronica (*SEM*) in Fanti et al. (2014).

## A1

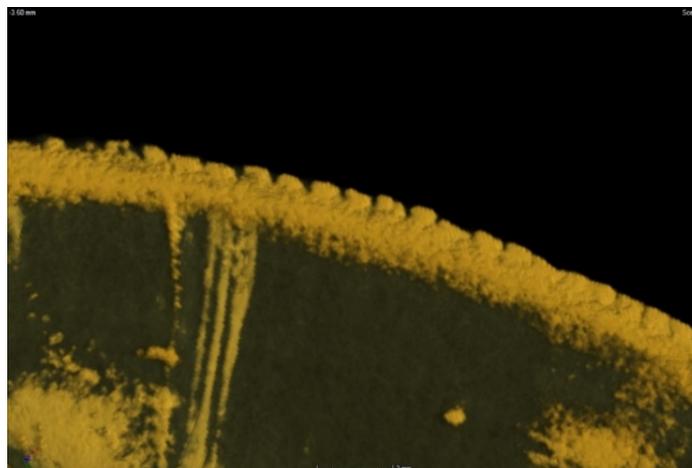


**Figura A.1:** Carena anteriore basale (sezione) di A1. (Scala: 1 mm). I denticoli sembrano avere forma perlopiù rettangolare.

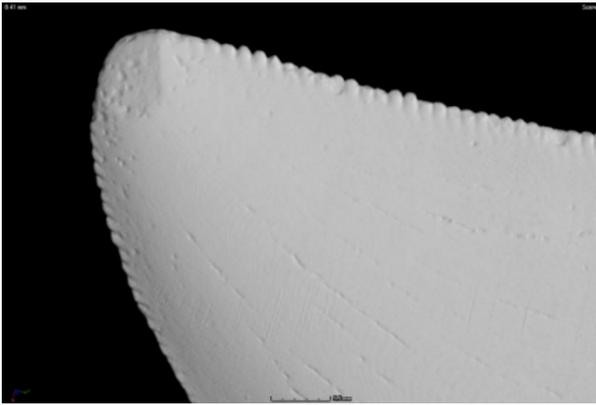


**Figura A.2:** Carena posteriore basale (sezione) di A1. (Scala: 1.5 mm). I denticoli sembrano avere forma rettangolare, ma è difficile distinguerla con chiarezza a causa della mal preservazione della carena.

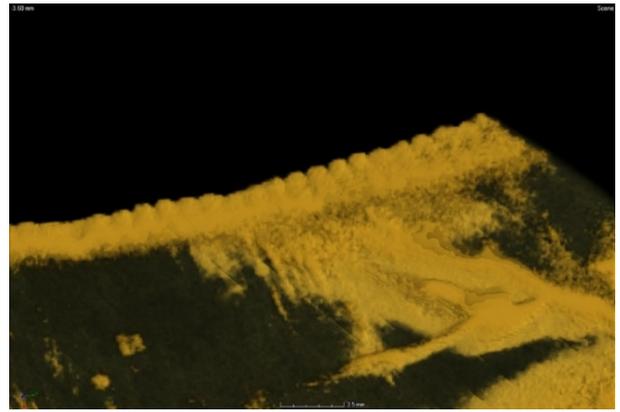
## A2



**Figura A.3:** Carena anteriore apicale (sezione) di A2. (Scala: 1 mm). I denticoli sembrano avere forma rettangolare.

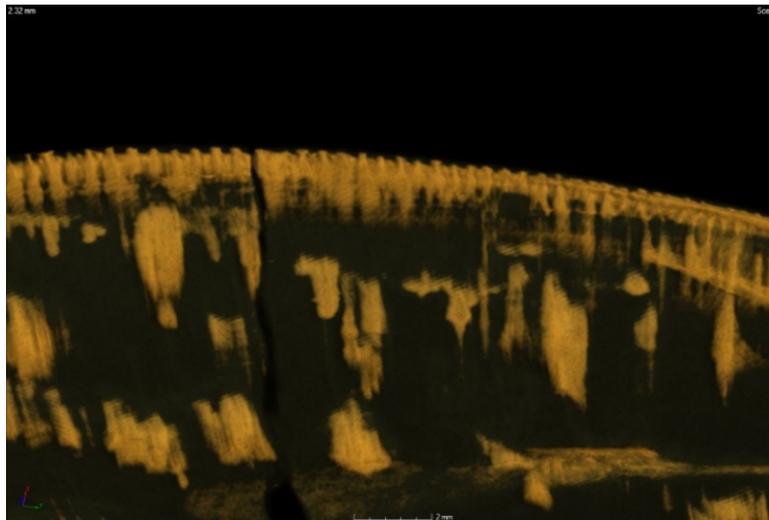


**Figura A.4:** Carena anteriore apicale e carena posteriore apicale di A2. (Scala: 2 mm). I denticoli sembrano avere forma rotonda in entrambe le carene.

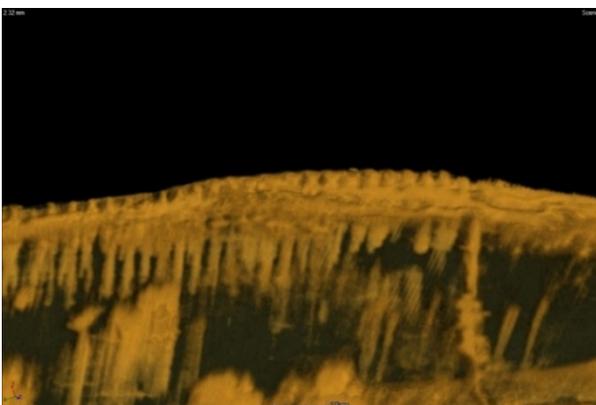


**Figura A.5:** Carena posteriore basale(sezione) di A2. (Scala: 1.5 mm). I denticoli sembrano avere forma rotonda.

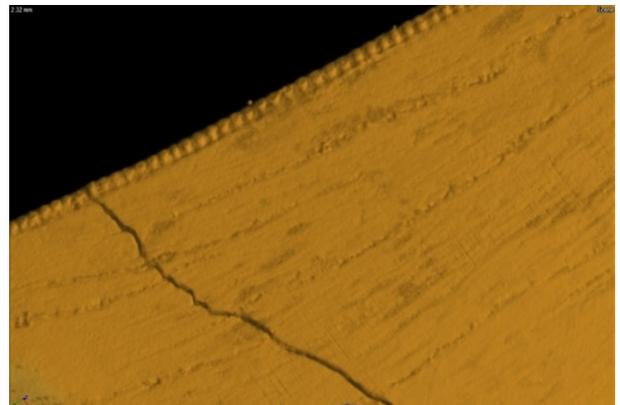
### A3



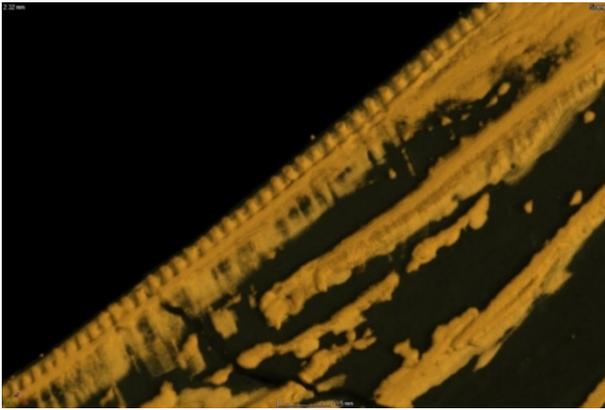
**Figura A.6:** Carena anteriore basale (sezione) di A3. (Scala: 2 mm). I denticoli sembrano essere cuneiformi.



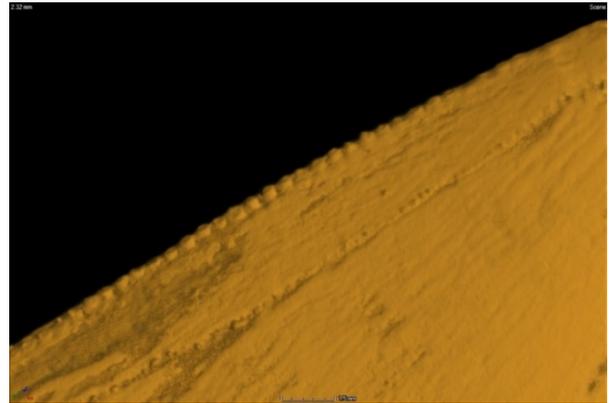
**Figura A.7:** Carena anteriore mesiale (sezione) di A3. (Scala: 1.5 mm). I denticoli sembrano essere cuneiformi.



**Figura A.8:** Carena posteriore basale di A3. (Scala: 2 mm). I denticoli risultano in parte smussati e sembrano avere forma rettangolare.

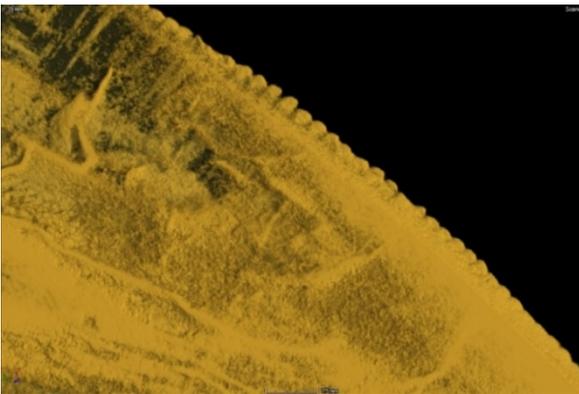


**Figura A.9:** Carena posteriore mesiale (sezione) di A3. (Scala: 1.5 mm). I denticoli sembrano avere forma rettangolare.

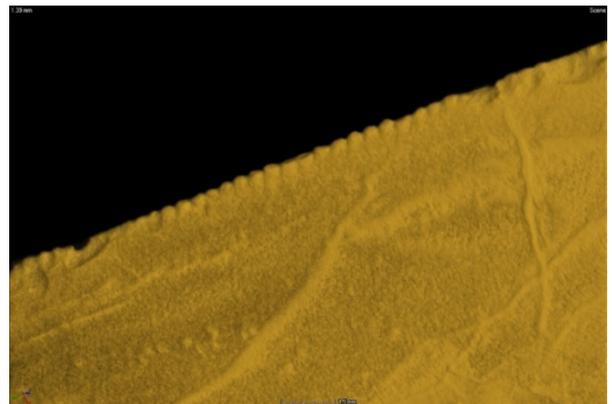


**Figura A.10:** Carena posteriore apicale di A3. (Scala: 1.5 mm). I denticoli sono mal preservati e sembrano avere forma rettangolare.

## A4



**Figura A.11:** Carena anteriore apicale (sezione) di A4. (Scala: 1.5 mm). I denticoli sembrano avere forma rettangolare.



**Figura A.12:** Carena posteriore apicale (sezione) di A4. (Scala: 1.5 mm). I denticoli sembrano avere forma rotonda.