UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA,
DELL'AMBIENTE E DELLA VITA (DISTAV)

Classe delle Lauree Magistrali in Biologia LM/6

Corso di Laurea Magistrale in
BIOLOGIA APPLICATA E SPERIMENTALE

ANALISI ANTROPOLOGICA DEI TRAUMI SCHELETRICI IN DUE DIFFERENTI DISASTRI: IL CASO DEL VAJONT E L'INCIDENTE AEREO DI SAN DONATO MILANESE

Laureanda:
Nicole Baroni

Relatori:
Prof. Stefano Vanin
Prof.ssa Cristina Cattaneo
Dott.ssa Giulia Caccia

Correlatore:
Prof. Fabio Ghiotto

ANNO ACCADEMICO 2026/2027

RIASSUNTO

Nell'ambito dell'antropologia forense, lo studio della lesività scheletrica rappresenta uno strumento importante per la ricostruzione della dinamica traumatica, soprattutto nei contesti caratterizzati da eventi ad alta energia, nei quali possono agire simultaneamente più forze e meccanismi lesivi. Il presente studio ha analizzato e confrontato due campioni di resti umani provenienti da differenti disastri di massa: l'incidente aereo di San Donato Milanese avvenuto il 3 ottobre 2021 e il disastro del Vajont del 9 ottobre 1963.

Sono stati esaminati 222 frammenti ossei provenienti dall'incidente aereo e i resti scheletrici di tre individui adulti appartenenti alle vittime del Vajont. L'analisi è stata condotta principalmente mediante osservazione macroscopica, integrata dall'utilizzo di microscopia a luce riflessa. Per ciascun reperto sono state valutate la morfologia delle lesioni, le caratteristiche dei margini e delle superfici di frattura, la distribuzione delle alterazioni e l'eventuale presenza di materiale esogeno. Le caratteristiche osservate sono state successivamente confrontate con i pattern descritti in letteratura per i traumi contusivi, gli eventi ad alta energia e inclusi, a fini comparativi, alcuni meccanismi della lesività da esplosione.

Nel campione di San Donato Milanese è stata osservata un'elevata frammentazione dei resti, associata, in alcuni reperti, alla presenza di materiale esogeno e ad alterazioni cromatiche riconducibili all'esposizione al calore e all'incendio post-impatto. Il quadro lesivo risulta coerente con l'azione combinata di differenti meccanismi traumatici, tra cui l'impatto ad alta energia, la proiezione di detriti e le successive collisioni con strutture presenti nell'ambiente. Nel campione del Vajont, invece, le lesioni devono essere interpretate alla luce della complessa dinamica dell'evento, caratterizzata dallo spostamento d'aria, dall'azione della massa d'acqua e dalla mobilizzazione di detriti e materiale roccioso.

Il confronto tra i due campioni ha evidenziato alcune caratteristiche morfologiche ricorrenti, tra cui lesioni prevalentemente a tutto spessore, forme lineari-rettilinee o irregolari, margini finemente irregolari o irregolari con angoli acuti e ottusi e superficie di frattura frequentemente granulari. Tali analogie indicano che eventi differenti, quando caratterizzati da elevata energia e dall'azione combinata di più forze, possono produrre esiti scheletrici parzialmente sovrapponibili.

Sono emerse anche differenze tra i due campioni, in particolare per quanto riguarda il grado di frammentazione e le dimensioni medie dei reperti, inferiori nel campione di San Donato Milanese.

Tale dato deve tuttavia essere interpretato con cautela, poiché il campione dell'incidente aereo è costituito prevalentemente da frammenti non attribuiti alle singole vittime e non rappresenta l'intero insieme dei resti recuperati.

Nel complesso, i risultati evidenziano che nessuna singola caratteristica lesiva può essere considerata diagnostica di uno specifico meccanismo traumatico. La ricostruzione della dinamica richiede una valutazione integrata del quadro scheletrico, che comprende morfologia e distribuzione delle lesioni, grado di frammentazione, presenza di materiale esogeno e informazioni circostanziali relative all'evento. L'analisi sistematica dei pattern traumatici può pertanto rappresentare uno strumento utile di supporto all'interpretazione antropologico-forense dei disastri ad alta energia.

INDICE

INTRODUZIONE **6**

1.1 I DISASTRI DI MASSA (*MASS DISASTERS*) 6

1.2 LA LESIVITÀ SCHELETRICA 10

1.2.1 PRINCIPI GENERALI E BIOMECCANICA 10

1.2.2 La lesività contusiva *12*

1.3 LESIVITÀ ASSOCIATA AD EVENTI AD ALTA ENERGIA 15

1.3.1 Lesività da esplosione (blast trauma) *16*

1.3.2 Pattern scheletrici in eventi idrodinamici ad alta energia *24*

SCOPO DELLA TESI **28**

MATERIALI E METODI **30**

3.1 MATERIALI 30

3.2.1 Incidente aereo di San Donato Milanese- 3 ottobre 2021 ..... *30*

3.2.2 La tragedia della Diga del Vajont *34*

3.3 METODI 37

3.3.1 Pulizia dei campioni *37*

3.3.2 Analisi delle alterazioni scheletriche *39*

3.4 ELABORAZIONE DEI DATI 41

RISULTATI E DISCUSSIONE **43**

4.1 ANALISI DEI FRAMMENTI OSSEI PROVENIENTI DALLE VITTIME DELL'INCIDENTE DI SAN DONATO MILANESE 43

4.1.2 Discussione delle alterazioni scheletriche riscontrate nei resti ossei delle vittime dell'incidente aereo di San Donato Milanese *55*

4.2 ANALISI DEI FRAMMENTI OSSEI DELLA DIGA DEL VAJONT 58

4.2.2 Valutazione delle fratture della diga del Vajont *72*

4.3 CONFRONTO DIRETTO TRA I DUE CAMPIONI 74

CONCLUSIONI **77**

BIBLIOGRAFIA **79**

RINGRAZIAMENTI **82**

INTRODUZIONE

Il presente lavoro verte sull'analisi delle alterazioni scheletriche osservate in due campioni di resti umani appartenenti alle vittime di due differenti disastri di massa: l'incidente aereo di San Donato Milanese e il disastro del Vajont. Sebbene caratterizzati da dinamiche differenti, i due contesti condividono la natura di evento catastrofico e la presenza di traumi ad altissima energia.
L'obiettivo principale dello studio è analizzare i pattern di lesività scheletrica riscontrati nei due campioni, valutandone eventuali analogie con quadri traumatici noti, quali quelli associati a traumi contusivi e ad eventi ad elevata energia, inclusa la lesività da esplosione. Parallelamente, verrà indagata l'eventuale presenza di caratteristiche peculiari e ricorrenti di ciascuno dei due contesti.
Il fine ultimo è verificare se l'analisi sistematica dei pattern di lesività scheletrica possa contribuire alla ricostruzione della dinamica traumatica e, più in generale, alla comprensione degli eventi che hanno determinato la morte delle vittime.

1.1 I disastri di massa (*Mass disasters*)

I disastri di massa sono eventi caratterizzati da numerose vittime che, per le loro implicazioni umane e per le condizioni operative, richiedono una risposta organizzativa e medico-legale straordinaria. In letteratura, al momento non è stata ancora stabilita una soglia minima entro la quale un evento viene definito "*mass disaster*", infatti la definizione propria dell'evento dipende dalla sua estensione, dalla dinamica e anche dalle risorse disponibili al momento in cui questo è avvenuto (De Boer et al. 2019; Wiersema e Woody 2016).

Questi eventi straordinari possono essere distinti in due categorie: *closed mass disasters*, i quali sono caratterizzati da un numero e un elenco di vittime coinvolte note e *open mass disasters*, nei quali invece, il numero delle vittime non può essere determinato con certezza. Nei disastri di massa, la gestione delle vittime richiede un approccio multidisciplinare finalizzato al recupero dei resti umani, ma anche alla necessità di raccogliere dati *postmortem* e *antemortem* da poter utilizzare ai fini identificativi. Di conseguenza, la presenza di protocolli nei disastri di massa è fondamentale in quanto consente di mantenere traccia di tutti i reperti rinvenuti sulla scena (De Boer et al. 2019).

In situazioni estreme, quali i disastri di massa, le caratteristiche dell'evento possono influire profondamente sul grado di conservazione e di completezza dei resti umani. A seconda della natura e dell'intensità delle forze coinvolte, i corpi possono essere recuperati integri, parzialmente conservati oppure presentarsi sotto forma di parti corporee, elementi scheletrici isolati o frammenti di dimensioni ridotte. Inoltre, in alcuni contesti, i resti possono essere interessati da alterazioni termiche o da successive modificazioni tafonomiche. In particolare, gli eventi caratterizzati da elevate energie possono determinare una marcata disgregazione corporea e scheletrica, accompagnata dalla dispersione dei resti su aree anche molto estese e dalla conseguente commistione (*commingling*) di elementi appartenenti a individui differenti (De Boer et al., 2020).

La frammentazione e la commistione dei resti possono rendere particolarmente complesse le procedure di recupero, analisi e identificazione delle vittime. In presenza di materiale frammentario, la prima fase dell'analisi consiste nella distinzione dei resti umani dal materiale non umano e nella valutazione dei singoli reperti, al fine di riconoscere eventuali elementi duplicati, incompatibilità o possibili ri-associazioni. Tali procedure richiedono particolare attenzione e una rigorosa documentazione, poiché errori nella separazione o nell'attribuzione dei frammenti possono generare ulteriori commistioni e complicare le successive fasi di identificazione e ricostruzione dell'evento (De Boer et al., 2020). In tale contesto, l'esame antropologico dei singoli elementi assume particolare rilevanza per il riconoscimento e la caratterizzazione delle lesioni traumatiche, che possono fornire informazioni utili alla ricostruzione della dinamica dell'evento.

I disastri di massa possono essere classificati, in base alla loro causa, in due categorie principali: naturali (*natural disasters)* e tecnologici (*technological disasters*), talvolta indicati in letteratura anche con il termine *"man-made",* i quali possono essere ulteriormente suddivisi in intenzionali e non intenzionali. Alcuni disastri naturali, come gli tsunami e i terremoti, possono essere previsti con un breve preavviso, anche se la maggior parte dei disastri di massa si verifica in modo improvviso. Di conseguenza, è necessario sviluppare in anticipo dei piani d'azione che permettano di gestire gli incidenti caratterizzati da un numero elevato di vittime (Nasir et al., 2021; Below et al., 2009).

I disastri naturali vengono a loro volta suddivisi in 6 gruppi principali **(Figura 1):** disastri geofisici (*Geophysical*), disastri idrologici (*Hydrological*), disastri meteorologici (*Meteorological*), disastri climatologici (*Climatological*), disastri biologici (*Biological*) e disastri extraterrestri (*Extra-terrestrial)* (Below et al., 2009).

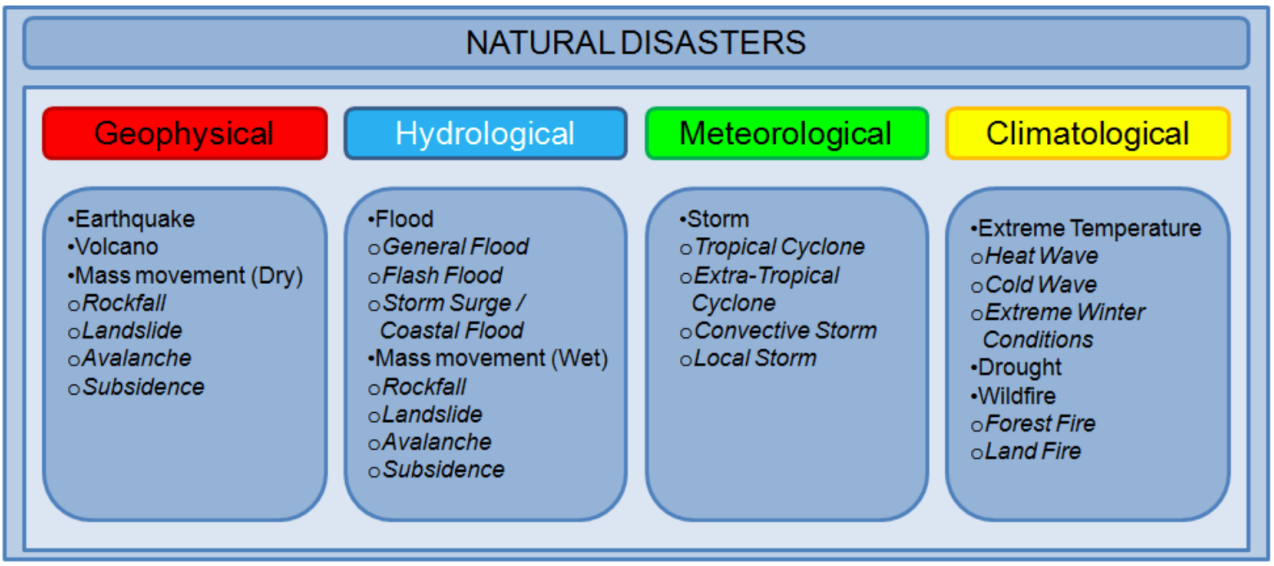


Figura 1- *Rappresentazione grafica della classificazione dei disastri di massa in sei categorie: geofisici, idrologici, meteorologici e climatologici, biologici e extra-terrestri (Below et al., 2009)*

I **disastri geofisici** (*Geophysical disasters*) sono eventi che hanno origine dalla Terra solida e comprendono fenomeni come i terremoti, i movimenti di massa a secco e gli eventi legati all'attività dei vulcani. I terremoti sono dovuti allo spostamento del suolo a seguito di onde sismiche causate dal rilascio improvviso di energia accumulata nella crosta terrestre e possono avere origine sia tettonica sia vulcanica. I terremoti, soprattutto quelli sottomarini, possono causare tsunami. I movimenti di massa a secco comprendono la caduta di rocce, le frane e le valanghe di neve, causate dallo scivolamento di neve lungo il versante di una montagna sotto l'azione della forza di gravità. Spesso, questi fenomeni raccolgono e trasportano con sé anche il materiale situato al di sotto del manto nevoso come terreno, roccia e sedimento. Le attività legate ai vulcani comportano, invece, lo spostamento di magma o gas verso la superficie terrestre e possono essere accompagnate da eruzioni esplosive, colate laviche e alla caduta di ceneri (Below et al., 2009).

I **disastri idrologici** (*Hydrological disasters*) sono eventi causati dalla deviazione del normale ciclo dell'acqua o dallo straripamento di bacini idrici a seguito dell'azione dei venti. Questi disastri comprendono le inondazioni o alluvioni e i movimenti di massa ad umido. Le inondazioni sono dovute a un'elevata quantità di pioggia o allo scioglimento di neve e ghiacciai, ma anche a mareggiate o esondazioni provocate da forti venti che spingono l'acqua verso la costa. I movimenti di massa ad umido, invece, comprendono frane bagnate o colate di fango e sono dovuti alle variazioni del contenuto d'acqua nel suolo o alla degradazione del permafrost (Below et al., 2009).

I **disastri meteorologici** (*Meteorological disasters*) sono causati da processi atmosferici a breve termine e si verificano nell'arco di minuti o giorni. Questa tipologia di disastri naturali comprende i cicloni tropicali, caratterizzati da un centro di bassa pressione e da forti venti, che vengono alimentati dal calore rilasciato quando l'aria umida sale e il vapore acqueo in essa condensa. A seconda della loro posizione e intensità possono essere definiti uragani, tifoni, cicloni, tempeste e depressioni tropicali (Below et al., 2009).

I **disastri climatologici** *(Climatological disasters)* sono causati da processi a lungo termine e presentano una variabilità climatica legata alla stagione. I fenomeni associati a questa categoria comprendono le temperature estreme come le *heat wave* e le *cold wave*, ma anche la siccità, un evento di lunga durata causato dalla mancanza di precipitazioni. La siccità può portare a perdite nell'agricoltura, compromettere le centrali idroelettriche e causare una carenza di acqua potabile o carestie. Gli incendi boschivi o di vegetazione, invece, possono essere innescati da cause naturali, come fulmini o vulcani, ma anche dall'azione dell'uomo (Below et al., 2009).

I **disastri biologici** *(Biological disasters)* sono causati dall'esposizione di organismi viventi a germi, agenti patogeni o sostanze tossiche. Questa categoria comprende epidemie, infestazioni di insetti e fughe o calpestamenti da parte di animali, mentre i **disastri extraterresti** *(Extra-terrestrial disasters)* sono eventi generati nello spazio e comprendono l'impatto di meteoriti o asteroidi sulla Terra (Below et al., 2009).

I disastri tecnologici, anche indicati in letteratura come *man-made disasters,* vengono classificati in tre categorie: incidenti industriali (*Industrial accidents*), incidenti di trasporto (*Transport accidents*) e incidenti di varia natura (*Miscellaneous accidents*). Sebbene siano prevalentemente dovuti a decisioni o attività umane, in alcuni casi possono essere innescati da fenomeni naturali. Questi eventi sono noti come *Natural Hazards Triggering Technological Accidents* (Natech) e si verificano quando un fenomeno naturale, come un terremoto o un'alluvione, provoca un incidente tecnologico, come il danneggiamento di un impianto industriale o il rilascio di sostanze pericolose (Fernández García et al., 2025; CRED, 2022).

Gli **incidenti di trasporto** comprendono eventi associati ai diversi sistemi di trasporto e possono essere distinti in incidenti marittimi, terrestri o aerei. Gli **incidenti industriali***,* invece, comprendono eventi associati all'attività di infrastrutture, come fuoriuscite di petrolio o sostanze chimiche, fughe di gas, esplosioni o incidenti connessi a impianti nucleari (Fernández García et al., 2025).

La categoria degli **incidenti di varia natura** comprende eventi che non possono essere ricondotti alle categorie precedentemente citate, come il crollo di un edificio o di una struttura, le esplosioni e gli incendi, che possono coinvolgere edifici o strutture (Fernández García et al., 2025).

1.2 La lesività scheletrica

1.2.1 Principi generali e biomeccanica

L'antropologia forense è una branca dell'antropologia fisica che si occupa dello studio dei resti umani rinvenuti in indagini medico-legali. La sua principale applicazione riguarda lo studio e l'analisi dello scheletro a fini identificativi, attraverso la ricostruzione del profilo biologico del soggetto. Oltre a costruire l'identikit di una vittima a partire dai suoi resti, l'antropologo può analizzare eventuali alterazioni scheletriche per comprendere al meglio la dinamica di morte (Cattaneo 2007).

Il trauma scheletrico può essere definito come un'alterazione o un danno a carico dell'osso o degli altri tessuti duri. L'analisi della lesività scheletrica riveste particolare importanza in ambito forense, poiché le modificazioni prodotte da un evento traumatico possono conservarsi sul tessuto osseo anche in resti parzialmente o completamente scheletrizzati, consentendo di acquisire informazioni sulla natura e sulla dinamica del trauma. In questo contesto, l'obiettivo dell'antropologia forense è ricostruire il meccanismo di produzione della lesione e determinare quando è stata prodotta, stabilendo se essa sia riconducibile all'evento mortale, se la vittima sia sopravvissuta o se questa sia avvenuta dopo la morte, ad esempio durante le operazioni di recupero dei resti (Passalacqua et al. 2015)

In ambito forense è necessario determinare l'arco temporale in cui il trauma scheletrico è avvenuto, valutando se il trauma si è verificato prima della morte (*antemortem*), intorno alla morte (*perimortem*) o dopo la morte (*postmortem*). Il trauma *antemortem* è indicato dalla presenza di segni di guarigione come arrotondamento dei margini di frattura e presenza di callo osseo in diversi stadi di rimodellamento. Le fratture *perimortem* si verificano quando l'osso mantiene caratteristiche biomeccaniche simili all'osso fresco: i margini di frattura sono netti, possono essere individuate spicole e la rima di frattura presenta generalmente angoli acuti ed ottusi. Quindi, sono presenti tutti segni di risposta elastica dell'osso, ma non si osservano i processi di guarigione e di conseguenza i segni tipici delle lesioni *antemortem*. Le fratture *postmortem* sono alterazioni avvenute su osso privo di risposta elastica. Presentano margini più regolari, con angoli retti e più chiari rispetto all'osso circostante (Cattaneo et al. 2009; Kranioti 2015).

Il trauma meccanico deriva dall'applicazione di forze esterne al tessuto osseo. La risposta dell'osso a tali sollecitazioni dipende dalle sue caratteristiche strutturali e materiali: l'osso è infatti un materiale anisotropo, il cui comportamento è influenzato da diversi fattori, tra cui la modalità e la velocità di applicazione del carico. Entro il range elastico, la deformazione prodotta dal carico è reversibile; superato il punto di snervamento (*yield point*), si entra nella regione *post-yield*, caratterizzata dall'accumulo di danno strutturale fino all'eventuale cedimento e alla formazione della frattura. Le principali modalità di carico comprendono compressione, trazione, flessione, torsione e taglio, che possono agire singolarmente o in combinazione. La morfologia della frattura risultante dipende pertanto dalle caratteristiche del carico, tra cui direzione, intensità e velocità di applicazione, ma anche dalle proprietà intrinseche dell'osso e dalla geometria dell'elemento scheletrico (Blau 2017; Love e Wiersema 2016).

Un parametro particolarmente rilevante è lo *strain rate*, ovvero la velocità con cui l'osso viene deformato. *Hansen et al. (2008)* hanno studiato il comportamento dell'osso corticale di un femore umano sottoposto a diverse velocità di deformazione, sia in tensione sia in compressione. I risultati mostrano che l'aumento dello *strain rate* rende l'osso più rigido e, soprattutto in condizioni di tensione, l'osso diventa più fragile con una minore capacità di deformarsi prima della frattura (Hansen et al. 2008).

L'effetto della velocità d'impatto sull'osso è stato valutato da *Cohen et al. (2016)* attraverso uno studio su 30 femori di suino a differenti velocità. Rispetto agli impatti a bassa velocità, gli impatti ad alta velocità hanno prodotto un numero maggiore di linee di frattura, mediamente più lunghe e con un grado maggiore di curvatura. Inoltre, negli impatti ad alta velocità sono state osservate anche una maggiore frequenza di fratture comminute e un andamento obliquo-radiale. Questi risultati evidenziano un'associazione tra la velocità dell'impatto e la complessità della frattura, anche se la sola morfologia non permette di ricavare in modo univoco la velocità di applicazione della forza (Cohen et al. 2016).

Nell'ambito dell'antropologia forense, le lesioni scheletriche di origine traumatica vengono distinte, in relazione al meccanismo lesivo, in trauma contusivo (*blunt force trauma*), trauma da forza tagliente (*sharp force trauma*) e trauma da arma da fuoco (*firearm trauma*). Oltre a queste categorie sono presenti anche le alterazioni termiche, dovute all'esposizione delle ossa a fonti di calore (Love e Wiersema 2016).

Tra queste categorie, il trauma contusivo assume particolare rilevanza nei contesti di disastro caratterizzati da impatti ad elevata energia, nei quali l'interazione tra intensità, velocità e direzione delle forze può determinare quadri lesivi scheletrici complessi.

1.2.2 La lesività contusiva

Il trauma contusivo comprende tutte le lesioni prodotte dall'impatto del corpo contro un oggetto o una superficie piana o ottusa. La risposta dell'osso a questo tipo di sollecitazione dipende dall'interazione tra fattori intrinseci, quali geometria, densità e caratteristiche strutturali dell'osso, e fattori estrinseci, tra cui area della superficie d'impatto, velocità e intensità del carico. La combinazione di questi fattori influenza il modo in cui la forza viene trasmessa all'osso e di conseguenza la morfologia della frattura (Love e Wiersema 2016).

L'analisi della morfologia e della distribuzione delle fratture può pertanto fornire informazioni sulle caratteristiche dell'evento traumatico, quali la localizzazione e la direzione dell'impatto, l'estensione della superficie impattante e, in alcuni casi, il numero minimo di impatti. Tuttavia, l'interpretazione del *pattern* deve tenere conto della variabilità strutturale dell'osso e dell'interazione tra i diversi fattori biomeccanici coinvolti (Love e Wiersema 2016).

Secondo la classificazione di *Kranioti et al. (2015),* le fratture craniche da trauma contusivo possono essere suddivise in lineari, depresse e irregolari o di altro tipo. Le fratture lineari includono fratture capillari (*hairline fractures*) e fissurative (*fissure fractures*), che interessano prevalentemente la volta cranica, le fratture basilari, che interessano la base cranica e le fratture diastatiche caratterizzate dalla separazione lungo suture craniche preesistenti. Oltre a queste fratture si possono trovare fratture a cerniera (*hinge fractures*) o lesioni da schiacciamento, che si verificano in seguito alla compressione della testa tra una superficie rigida e un oggetto pesante. Nella loro forma trasversa possono attraversare il *dorsum sellae* e determinare la separazione del cranio in due porzioni (Kranioti 2015).

Le fratture depresse **(Figura 2)** sono associate ad un carico lento su una piccola area del cranio, dove l'impatto produce molteplici linee di frattura determinando la formazione di frammenti ossei ed il loro spostamento verso la cavità cranica. Un esempio tipico è rappresentato dalle fratture stellate, dove l'impatto causa l'affossamento del frammento osseo nel punto di contatto (*imbedding*) e la flessione verso l'esterno delle aree circostanti (*outbending*). Dalla zona di *outbending* si possono originare delle fratture radianti che si propagano sia verso il punto d'impatto, sia nella direzione opposta fino ad arrestarsi o essere deviate quando incontrano le suture craniche.

Infine, si formano le fratture concentriche perpendicolari a quelle radianti. Tale modello non è tuttavia univoco, poiché studi sperimentali successivi hanno documentato modalità differenti di innesco e propagazione delle fratture. Nel cranio possono essere presenti anche fratture ad anello (*ring fractures*), le quali causano una frattura circolare attorno al forame magno associate a fenomeni di compressione della colonna vertebrale, come a seguito di una caduta da elevata altezza con atteraggio sui piedi (Kranioti 2015).

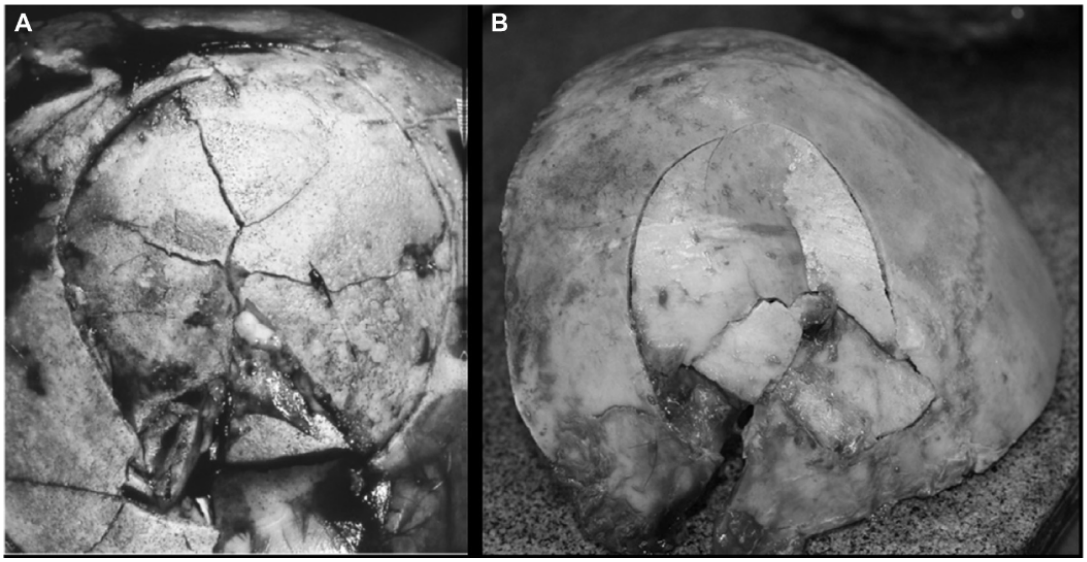


***Figura 2**- Esempio di una frattura depressa (Kranioti, 2015)*

Il cranio può anche essere interessato da lesioni multiple, più frequentemente associate a eventi violenti. La stima del numero di impatti e la sequenza temporale con la quale si sono verificati può essere stimato grazie alla regola di Puppe, secondo cui la rima di frattura derivante da un secondo colpo si arresta quando incontra una frattura preesistente (Kranioti 2015).

Le fratture delle ossa lunghe possono derivare dall'applicazione diretta o indiretta di una forza e possono essere prodotte da differenti modalità di carico, quali trazione, compressione, taglio, flessione e torsione, che frequentemente agiscono anche in combinazione. Nelle lesioni dirette, il cedimento dell'osso si verifica in corrispondenza della sede di applicazione della forza. In base all'entità della forza e all'estensione della superficie sulla quale essa agisce, queste possono essere distinte, secondo una classificazione biomeccanica, in fratture **(Figura 3)** da colpo semplice (*tapping*), da schiacciamento (*crushing*) e penetranti *(penetrating*) (Moraitis e Spiliopoulou 2006).

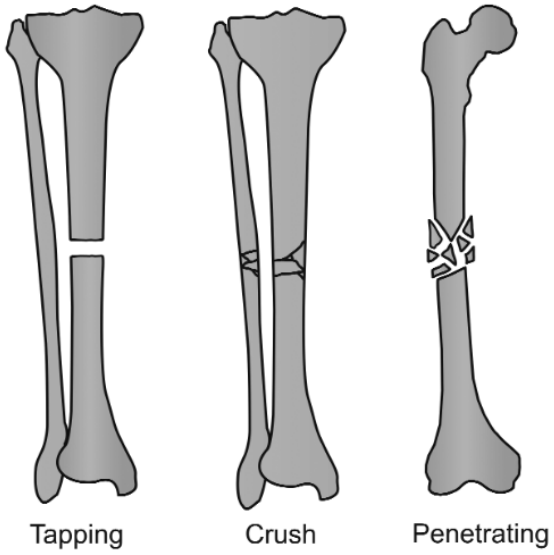


***Figura 3**- Frattura delle ossa lunghe causata da un trauma contusivo diretto (Moraitis e Spiliopoulou, 2006)*

Nelle lesioni indirette, invece, la forza applicata viene trasmessa attraverso il segmento corporeo e il cedimento osseo si verifica a distanza dalla sua sede di applicazione **(Figura 4)**. La morfologia della frattura può variare in relazione alla modalità prevalente di carico. L'osso è meno resistente alla tensione, mentre risulta essere più resistente alla compressione, di conseguenza quando l'osso è sottoposto alla tensione si può generare una frattura trasversale, orientata perpendicolarmente alla direzione della forza. Invece, se sottoposto a una compressione elevata, l'osso inizialmente resiste allo schiacciamento, ma a causa della sua minor resistenza al taglio rispetto alla compressione, cede formando una linea diagonale inclinata di 45° rispetto alla lunghezza dell'osso (Gitajn e Rodriguez, 2011) (Moraitis e Spiliopoulou 2006).

La flessione causa un carico combinato sul tessuto osseo, in particolare sul lato convesso prevale la forza di tensione, mentre sul lato concavo prevale la forza di compressione. In tali condizioni, la frattura si può innescare sul lato convesso, propagandosi inizialmente con un andamento trasversale netto e successivamente biforcarsi in due linee oblique quando raggiunge il lato concavo. Questo meccanismo può causare il distacco di un frammento cuneiforme triangolare, che prende il nome di *butterfly fragment*. Se l'osso viene ruotato, la frattura segue un andamento a spirale (Gitajn e Rodriguez, 2011).

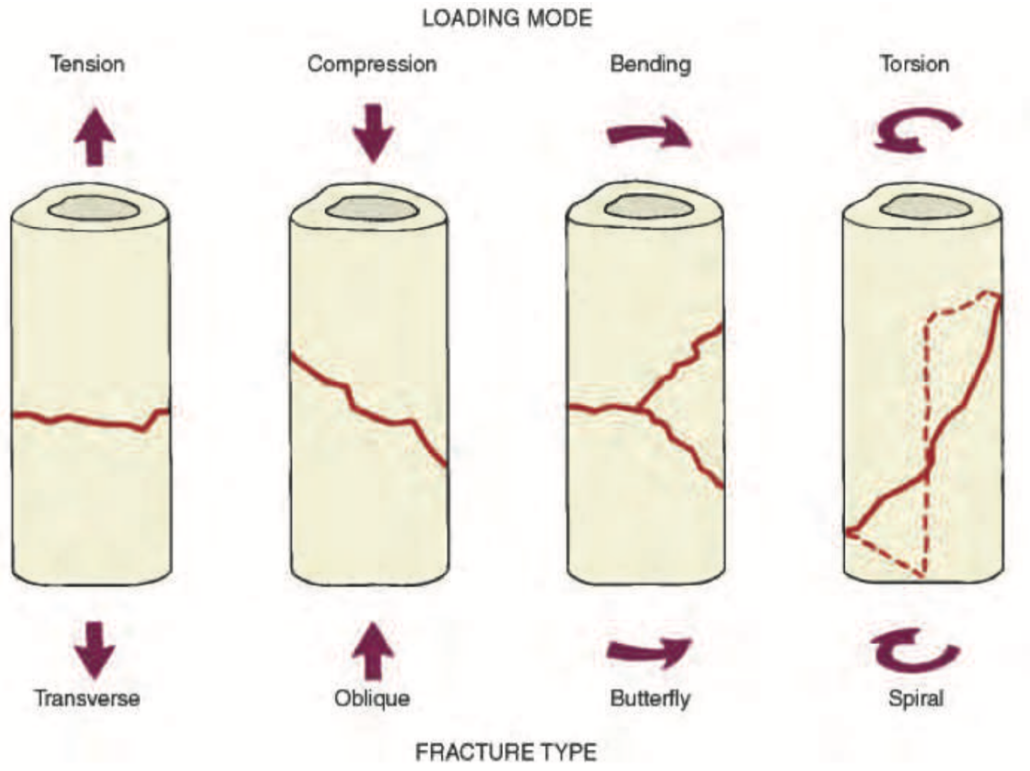


Figura 4- Pattern delle fratture dovuto all'applicazione di tensione, compressione, flessione e torsione (Gitajn e Rodriguez, 2011)

1.3 Lesività associata ad eventi ad alta energia

Il termine "trauma ad alta energia" viene utilizzato per descrivere eventi caratterizzati da un elevato trasferimento di energia al corpo, come avviene negli incidenti stradali ad elevata velocità, cadute da grandi altezze, incidenti aeronautici ed esplosioni. In ambito antropologico-forense, tali eventi possono determinare quadri traumatici complessi, caratterizzati dal coinvolgimento di più distretti scheletrici e dall'azione combinata di differenti modalità di carico (Blau et al., 2018; Palmiotto et al., 2020).

A differenza di un singolo trauma contusivo localizzato, negli eventi ad alta energia il corpo può essere sottoposto a una successione rapida di impatti, compressioni, accelerazioni e decelerazioni, flessioni e torsioni. La distribuzione e la morfologia delle lesioni dipendono non soltanto dall'entità dell'energia coinvolta, ma anche dalla posizione dell'individuo, dalla direzione delle forze, dalle superfici con cui il corpo entra in contatto e dalla sequenza degli eventi traumatici (Blau et al., 2018; Palmiotto et al., 2020).

Gli incidenti aeronautici rappresentano un esempio particolarmente significativo di tale complessità. L'impatto e la brusca decelerazione possono determinare lesioni multiple e diffuse dello scheletro, prodotte da meccanismi differenti e secondo diverse direzioni di forza. Per questo motivo, nell'interpretazione antropologico-forense di tali contesti assume particolare rilevanza l'analisi della distribuzione complessiva delle lesioni, piuttosto che la valutazione isolata della singola frattura (Palmiotto et al., 2020).

Il concetto di trauma ad alta energia non identifica tuttavia uno specifico pattern scheletrico. Eventi differenti possono infatti produrre caratteristiche traumatiche parzialmente sovrapponibili e, analogamente, uno stesso tipo di evento può determinare pattern differenti in relazione alle specifiche modalità con cui le forze vengono trasmesse al corpo. L'interpretazione deve quindi basarsi sull'insieme delle lesioni e sul contesto dell'evento (Blau et al., 2018; Palmiotto et al., 2020).

1.3.1 Lesività da esplosione (*blast trauma*)

Quando un esplosivo si innesca, la reazione chimica è immediata e l'esplosivo viene subito convertito in gas caldo ad elevata pressione. Questo gas si espande, generando un'onda di pressione che prende il nome di *blast wave*, la quale è caratterizzata inizialmente da un rapido incremento della pressione al di sopra di quella atmosferica, seguito da una progressiva riduzione e da una successiva fase di pressione negativa, durante la quale l'aria tende a muoversi nuovamente verso il centro dell'esplosione (Ramasamy et al. 2011).

Il trauma originato da un'esplosione può esporre l'organismo a differenti meccanismi lesivi. L'esplosione può determinare la proiezione di frammenti e detriti, ma anche lo spostamento del corpo che può impattare contro strutture circostanti e il collasso di edifici o altri elementi dell'ambiente. Possono essere presenti anche conseguenze legate al calore e ai prodotti della combustione. La gravità del danno dipende da molteplici fattori, tra i quali si sottolineano il tipo di esplosivo, la quantità di materiale coinvolto, la distanza dalla sorgente, ma anche la possibile presenza di strutture tra il corpo e la fonte esplosiva (Galante et al. 2021).

È bene considerare che un singolo evento esplosivo può produrre differenti meccanismi, causando la presenza di effetti primari, secondari e terziari anche contemporaneamente. Questa condizione è stata evidenziata da *Ramasamy et al.,* i quali nel loro studio hanno dimostrato la presenza di effetti primari e secondari che contribuivano contemporaneamente al danno (Ramasamy et al. 2011).

Le lesioni da esplosione, in base al meccanismo, vengono generalmente classificate in primarie, secondarie, terziarie e quaternarie.
Gli **effetti primari** (*Primary blast injury*) sono causati dalla propagazione dell'onda d'urto generata dall'esplosione e dalla sua interazione con l'organismo. I principali traumi riguardano la distruzione dei tessuti molli e la formazione di microfratture nelle ossa. La *blast wave* interessa soprattutto le strutture che contengono aria o gas, nei quali la variazione di pressione può causare fenomeni di compressione e deformazione dei tessuti. Per questo motivo gli effetti primari sono associati anche a danni all'apparato uditivo, respiratorio e al tratto gastrointestinale (Ramasamy et al. 2011).

Gli **effetti secondari** (*Secondary blast injury*) sono causati dai frammenti e dai detriti che vengono proiettati a seguito dell'esplosione. Il trauma è causato dall'impatto di questi elementi che viaggiano a diverse velocità contro il corpo e possono generare traumi diversi a seconda del tipo di materiale coinvolto. Questi frammenti possono derivare dalla struttura dell'esplosivo stesso, ma anche dalle strutture circostanti. Gli effetti secondari diventano relativamente importanti quando l'esplosione causa una grande dispersione di materiale frammentato, infatti il trauma all'organismo può essere causato dalla combinazione di numerosi frammenti che presentano caratteristiche diverse (Ramasamy et al. 2011).

Gli **effetti terziari** (*Tertiary blast injury*) sono generati dallo spostamento del corpo per mezzo dell'onda d'urto e dall'impatto dello stesso su strutture ed oggetti presenti sulla scena e che possono essere stati spostati dall'esplosione stessa. I danni riportati sono, quindi, una conseguenza del movimento e non sono direttamente associati alla *blast wave*. La presenza degli effetti terziari dimostra che il trauma non dipende solo dalla posizione rispetto alla sorgente o dall'intensità dell'esplosione, ma anche dalle caratteristiche dell'ambiente (Ramasamy et al. 2011).

Gli **effetti quaternari** (*Quaternary blast injury*) comprendono gli effetti non riconducibili ai primi tre meccanismi, tra cui ustioni termiche o chimiche, inalazioni di fumi, polveri o sostanze e altre conseguenze legate ai prodotti di combustione (Galante et al. 2021).

Dal punto di vista scheletrico, le diverse categorie possono produrre manifestazioni differenti: l'onda d'urto può contribuire direttamente alla formazione di fratture e amputazioni traumatiche; i frammenti possono produrre lesioni penetranti, radianti o comminute; gli effetti terziari possono generare quadri assimilabili al trauma contusivo ad alta energia; infine, gli effetti quaternari possono determinare modificazioni termiche del tessuto osseo (Ramasamy et al. 2011).

Un singolo evento esplosivo può determinare contemporaneamente più di uno di questi meccanismi. In particolare, possono coesistere effetti primari e secondari, come avviene quando l'onda d'urto e i frammenti prodotti dall'esplosione agiscono quasi simultaneamente sul corpo. Tale sovrapposizione contribuisce alla complessità e variabilità dei pattern traumatici osservabili nei contesti esplosivi (Ramasamy et al. 2011).

L'interazione tra l'organismo e l'esplosione dipende anche dal tipo di ambiente nel quale l'evento si verifica, infatti è possibile distinguere eventi in campo aperto (*open/free field*) da quelli che avvengono in un ambiente confinato (*enclosed environment*). Questa distinzione assume un aspetto rilevante, in quanto la presenza di strutture circostanti può alterare la dinamica degli eventi.
Nelle esplosioni in campo aperto, l'onda si propaga senza particolari ostacoli dovuti a strutture circostanti tipiche degli ambienti confinati. Generalmente in questi casi i principali danni sono dovuti all'onda d'urto e alla proiezione di frammenti provenienti sia dalla sorgente esplosiva che dall'ambiente circostante. In un ambiente chiuso, invece, la presenza di strutture può alterare il meccanismo: le pareti e gli oggetti presenti nella struttura possono essere danneggiati, alterati o spostati, diventando loro stessi una fonte di trauma. In questi casi, quindi, il soggetto è esposto sia all'azione dell'esplosione sia agli oggetti presenti nell'ambiente circostante. *Ramasamy et al. (2011)* hanno evidenziato differenze significative tra le due condizioni. Nel loro studio, i soggetti esposti in ambiente chiuso presentavano una netta maggioranza di effetti terziari, causati dallo spostamento del corpo e di oggetti presenti nelle vicinanze. Al contrario, in condizioni di campo aperto era presente un maggior contributo di effetti secondari, dovuti all'impatto di frammenti (Ramasamy et al. 2011).

La distribuzione delle lesioni scheletriche da esplosione può essere estremamente ampia. *Márquez-Grant et al. (2021),* integrando i dati provenienti da differenti eventi esplosivi, hanno evidenziato come quasi tutti i distretti dello scheletro possano essere interessati, sebbene la localizzazione e la prevalenza delle lesioni variano considerevolmente in relazione alle caratteristiche dello specifico evento (Márquez-Grant et al. 2021).

Gli arti inferiori rappresentano la sede maggiormente coinvolta. In alcuni contesti anche il piede può essere interessato, in particolare il calcagno può presentare fratture comminute associate a un elevato carico assiale. Questo meccanismo può verificarsi quando la vittima si trova sopra l'esplosivo oppure quando il corpo viene proiettato e ricade sui piedi. Le lesioni alla tibia e fibula, invece, possono essere comminute e essere associate sia ai materiali proiettati dall'esplosione sia all'impatto del corpo contro strutture **(Figura 5)** (Ramasamy et al. 2011).

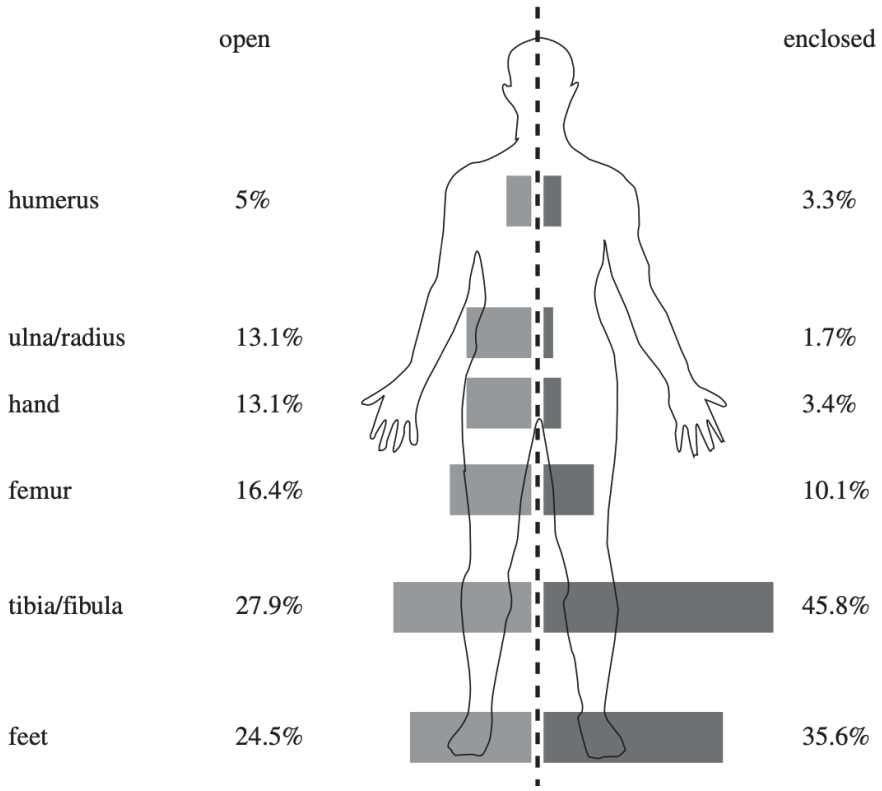


***Figura 5**- Rappresentazione grafica degli elementi ossei più colpiti nelle esplosioni in campo aperto e ambienti confinati (Ramasamy et al., 2011)*

I pattern di lesività scheletrica da esplosione possono presentare morfologie differenti in relazione ai diversi meccanismi coinvolti. In particolare, *Ramasamy et al. (2011),* basandosi sugli studi precedentemente svolti da Hull, propongono, per gli effetti primari, un possibile meccanismo di frattura delle ossa lunghe degli arti inferiori. Hull spiega che, quando l'onda d'urto colpisce la tibia genera una propagazione di stress all'interno dell'osso prima che si verifichi un significativo spostamento dell'arto. Quando l'onda investe lateralmente la tibia, le forze di flessione, associate alla geometria dell'osso e alla differente mobilità consentita dalle articolazioni del ginocchio e della caviglia, determinano una concentrazione degli stress nel terzo prossimale. Gli stress assiali e di taglio possono quindi superare la resistenza dell'osso e determinarne la frattura (Hull e Cooper 1996; Ramasamy et al. 2011).

Ramasamy et al. (2011), basandosi sulla sua anatomia, propongono un meccanismo analogo che può essere esteso anche al femore. Infatti, il femore presenta un meccanismo simile alla tibia, in quanto il movimento è consentito dall'anca e dal ginocchio. Anche in questo caso si può avere una concentrazione degli stress in specifiche regioni della diafisi. Dopo la frattura iniziale indotta dall'onda d'urto, le ulteriori sollecitazioni associate ai prodotti della detonazione possono contribuire al completamento dell'amputazione traumatica. In tali circostanze, il moncone osseo può presentare una morfologia di frattura corto-obliqua o trasversa **(Figura 6)** (Ramasamy et al. 2011).

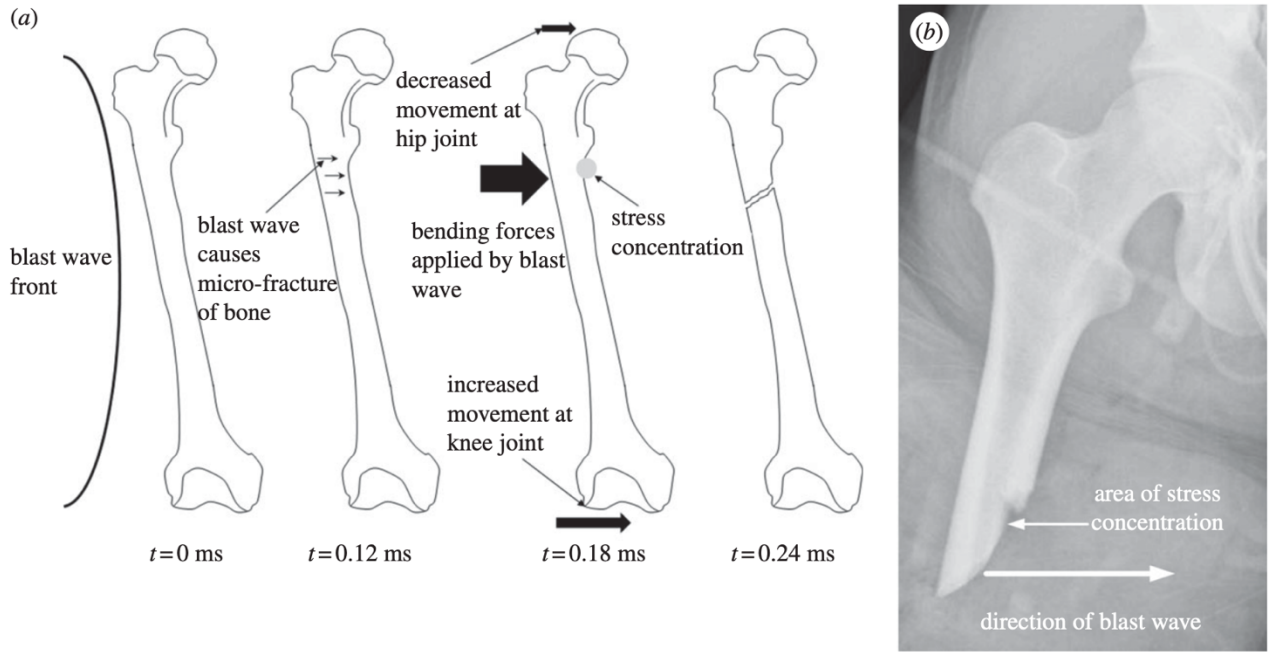


***Figura 6**- Rappresentazione schematica dell'interazione dell'onda d'urto con l'osso con conseguente formazione della frattura (Ramasamy et al., 2011)*

Alcuni pattern possono essere ricondotti anche agli effetti terziari, dovuti allo spostamento del corpo o del suo impatto contro oggetti presenti nell'ambiente. Il pattern dipende dalla direzione e dall'intensità del carico applicato e dalle proprietà biomeccaniche dell'osso. In generale carichi applicati perpendicolarmente **(Figura 7a)** all'osso causano una frattura a cuneo di trazione: questo tipo di fratture si originano in una posizione opposta al punto di impatto a causa della tensione massima presente. Le fratture spirali **(Figura 7b),** invece, compaiono quando l'osso è soggetto carichi torsionali (Ramasamy et al. 2011).

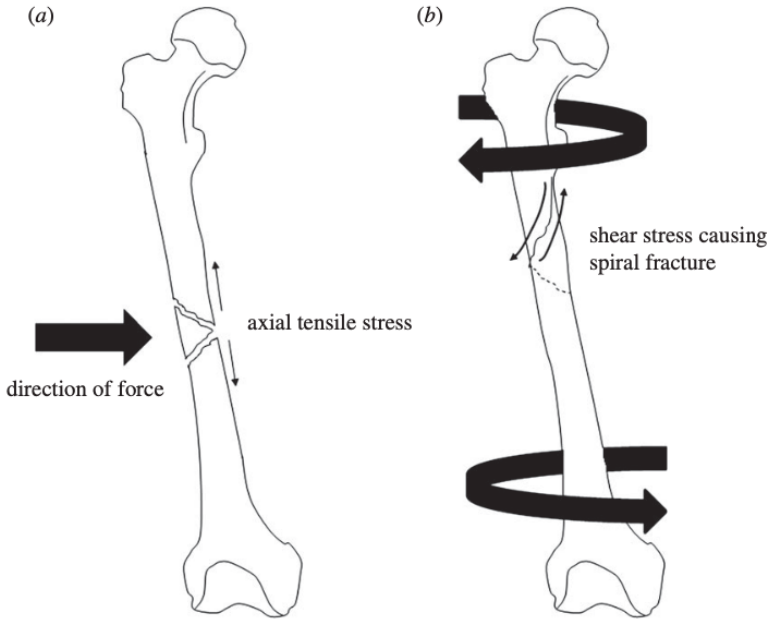


***Figura** 7- (a) forza applicata perpendicolarmente all'osso; (b) forza di torsione che produce una frattura a spirale (Ramasamy et al. 2011)*

Possono essere presenti anche fratture a carico degli arti superiori, in particolare sono state descritte lesioni dell'omero, radio e ulna. Inoltre, possono essere interessate anche le ossa della mano con i metacarpi come principale osso coinvolto. Le lesioni possono essere dovute all'impatto di frammenti e materiali proiettati dall'esplosione e possono presentare una morfologia complessa. In particolare possono essere comminute e causare la perdita di sostanza ossea o amputazioni traumatiche. Nello studio di *Márquez-Grant et al (2021)* è stata riportata la presenza di fratture comminute, segmentali e articolari associate alle amputazioni. Le amputazioni traumatiche rappresentano infatti una categoria ricorrente nei casi relativi alle esplosioni e possono interessare sia gli arti superiori che inferiori (Márquez-Grant et al. 2021).

La clavicola e la scapola possono essere coinvolte e anche in questo caso le lesioni possono essere causate dai detriti, ma possono anche essere associate all'impatto del corpo contro oggetti presenti nell'ambiente (Márquez-Grant et al. 2021).

La gabbia toracica è caratterizzata da una ricorrente presenza di fratture costali che possono interessare una o più coste e associarsi anche a danni allo sterno e alla colonna vertebrale. In uno studio condotto da *Christensen et al. (2013),* eseguito su maiali, è stata evidenziata la presenza di numerose fratture a farfalla (*butterfly fractures*) sulla superficie viscerale delle coste, causate dalla forza d'urto dell'esplosione applicata in direzione ventrale (Christensen e Smith 2013).

Le coste possono andare incontro a differenti pattern di frattura in relazione alla direzione e alla modalità di applicazione delle forze. Nelle fratture da flessione, il lato convesso dell'osso è sottoposto a trazione, mentre quello concavo a compressione; la sede dell'indicatore di trazione può pertanto fornire informazioni sulla direzione della deformazione. Nello studio di *Christensen et al. (2013)* è stato osservato che la frattura si originava dalla superficie viscerale delle coste, ovvero nella direzione opposta al modello tipicamente osservato nei traumi contusivi **(Figura 8)**. Gli autori hanno ipotizzato che l'onda esplosiva applicata ventralmente determini un'espansione della gabbia toracica e un aumento della curvatura verso l'esterno delle coste, ponendo la superficie viscerale in trazione. A seguito di queste osservazioni e di verifiche sperimentali, questo pattern **(Figura 9)** è stato proposto come un possibile indicatore di trauma da esplosione (Christensen e Smith 2013).

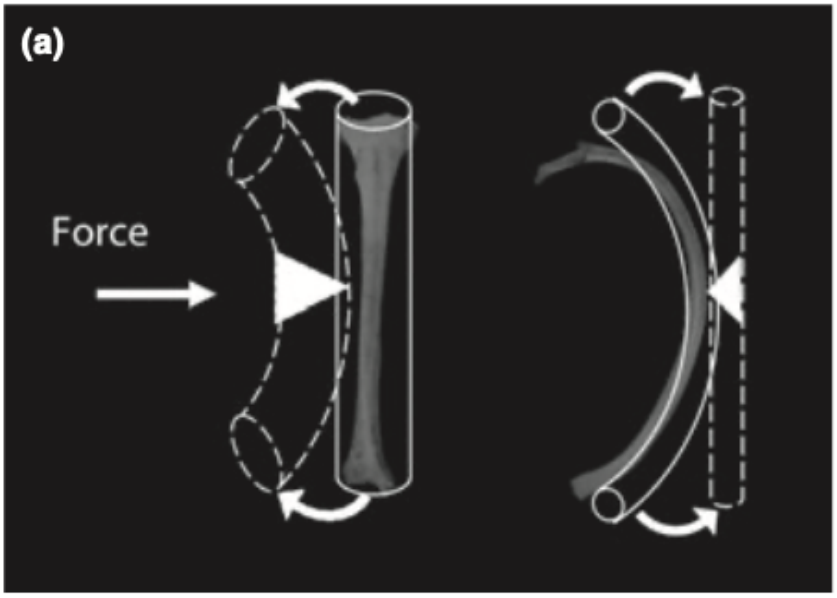


*Figura 8- A **sinistra (a),** è rappresentato il tipico pattern osservato in un trauma contusivo, mentre a **destra (b)** il pattern osservato da Christensen et al. a seguito di un'esplosione (Christensen e Smith, 2013)*

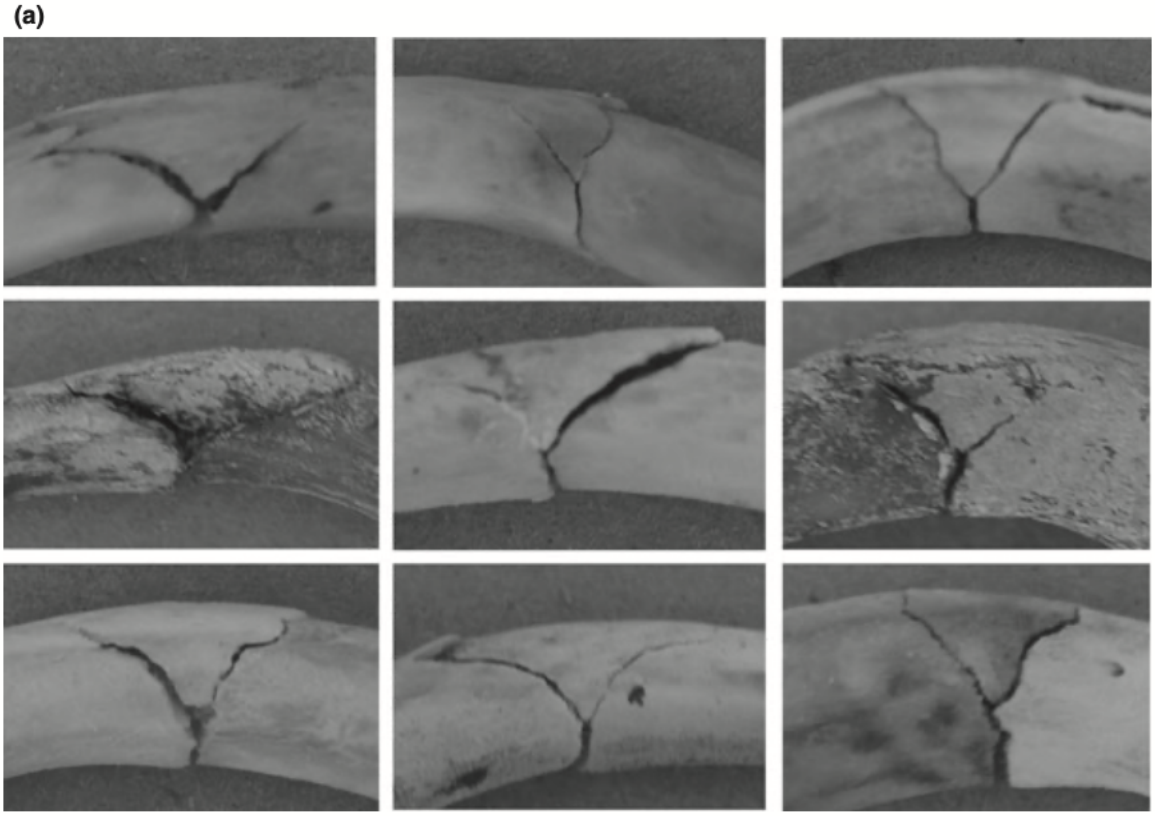


Figura 9*- Rappresentazione delle fratture a farfalla a seguito di un esplosione (Christensen e Smith, 2013)*

Le lesioni da esplosione possono interessare anche la colonna vertebrale e il cingolo pelvico. *Márquez-Grant et al. (2021)* riportano fratture vertebrali in diversi degli eventi analizzati, con prevalenze molto variabili e senza l'individuazione di un pattern anatomico univoco. Le fratture del cingolo pelvico risultano meno frequentemente riportate; la loro presenza può tuttavia essere indicativa dell'azione di forze di notevole entità, considerata l'elevata energia generalmente necessaria per determinare la discontinuità dell'anello pelvico (Márquez-Grant et al. 2021).

Anche fratture al cranio possono essere presenti ed interessare sia il neurocranio che il massiccio facciale, ma anche lesioni a carico di strutture particolarmente fragili quali l'osso temporale e lo zigomatico. Inoltre, nello studio di *Márquez- Grant et al.(2021)* sono state descritte anche fratture delle cavità orbitarie e delle ossa nasali. Infine è stata documentata anche la presenza di lesioni dentarie trasversali e la rottura di ossicini dell'orecchio, in particolare l'incudine (Márquez-Grant et al. 2021).

A livello cranico, i traumi associati ad eventi esplosivi possono determinare pattern complessi, nei quali possono coesistere lesioni riconducibili a differenti meccanismi traumatici. *McCormick et al. (2023),* nell'analisi di due individui della Seconda Guerra Mondiale con contesto compatibile con *blast trauma*, hanno osservato un'estesa combinazione di lesioni da trauma contusivo e da proiettile. Gli autori sottolineano tuttavia come la notevole variabilità degli eventi esplosivi e la sovrapposizione con pattern osservabili in altre modalità traumatiche non consentano di identificare, sulla base delle sole caratteristiche morfologiche delle fratture craniche, un pattern specifico e diagnostico di lesività da esplosione. L'interpretazione deve pertanto basarsi sulla distribuzione complessiva delle lesioni, sulle caratteristiche biomeccaniche e sul contesto dell'evento (McCormick et al. 2023).

Tra le morfologie osservabili possono essere presenti anche fratture lineari, radianti e concentriche; queste ultime sono correlate ai fenomeni di deformazione della teca cranica attorno alla sede di applicazione della forza. Tali caratteristiche, tuttavia, non sono specifiche del *blast trauma* e devono essere interpretate nell'ambito del pattern lesivo complessivo (McCormick et al. 2023; Berryman et al. 1998).

1.3.2 Pattern scheletrici in eventi idrodinamici ad alta energia

Uno tsunami si genera quando viene spostata una grande quantità di acqua di mare, generalmente a causa di un terremoto sottomarino con una magnitudo superiore a 7.0. Il terremoto genera onde che viaggiano nell'oceano aperto e che tendono a muoversi verso la costa: man mano che si avvicinano a riva si comprimono e aumentano in altezza raggiungendo anche i 10 metri. Di conseguenza appaiono come un muro d'acqua che spazza via tutti gli oggetti presenti lungo il tragitto. Le lesioni possono essere dovute all'azione dell'acqua, ma anche all'impatto del corpo contro strutture o oggetti che sono stati trasportati dalla corrente. Infatti, durante l'evento, la corrente può travolgere le persone e il corpo può entrare in collisione con edifici, veicoli o ostacoli lungo il percorso. Sono comuni le lesioni da corpo contundente causate da detriti come legno, roccia, cemento e metallo e lesioni da schiacciamento dovute alla compressione da parte di alberi, case e autoveicoli (Kaewlai et al. 2009).

La presenza dei detriti è stata ben documentata nelle lesioni: nello studio radiologico di *Kaewlai et al. (2007),* corpi estranei sono stati rinvenuti nei tessuti molli di 22 pazienti su 225 (9,8%). Altri studi hanno evidenziato una frequente contaminazione delle ferite con fango, sabbia, detriti e acqua marina (Kaewlai et al. 2007).

Lo studio sulla dinamica dei detriti evidenzia che il loro movimento è influenzato da numerose variabili e presenta una componente casuale, rendendo più difficile la ricostruzione della dinamica dell'evento. Infatti, l'azione dei detriti dipende non solo dalle caratteristiche della corrente, ma anche dalla massa, forma e dimensioni del detrito. Un ulteriore fattore da considerare è la velocità raggiunta dal detrito al momento dell'impatto, anche se la velocità e la sua traiettoria sono difficili da determinare dopo l'evento (Nistor et al. 2017).

Gli tsunami possono causare un ampio spettro di lesioni traumatiche, che comprendono anche il coinvolgimento dell'apparato muscoloscheletrico: le indagini radiologiche condotte su 225 delle persone coinvolte nello tsnunami del 2004 in Thailandia hanno evidenziato che le lesioni ossee rappresentano il 54,5 % dei reperti positivi all'imaging. Fratture e lussazioni degli arti sono le lesioni più comuni e rappresentano circa dal 7% al 15% delle lesioni da tsunami (Kaewlai et al. 2009; Kaewlai et al. 2007).

Tra i pattern descritti radiologicamente, *Kaewlai et al. (2009)* riportano, ad esempio, l'associazione tra una frattura trasversale del malleolo mediale e una frattura obliqua del perone distale, interpretata come compatibile con un meccanismo di abduzione **(Figura 10).**



***Figura 10**- Frattura trasversale del malleolo mediale e una frattura obliqua del perone distale, compatibile con una lesione da abduzione (Kaewlai et al. 2009)*

Dei 102 traumi musco-scheletrici 28 erano fratture e 8 lussazioni. Le lesioni hanno coinvolto principalmente le estremità (84,6%) con una maggior concentrazione degli arti inferiori. Inoltre, in un paziente **(Figura 11)** è stata evidenziata una diastasi della sinfisi pubica e fratture dei rami ischio-pubico e ileo-pubico di destra (Kaewlai et al. 2007).



Figura 11*- fratture pelvica a livello della diastasi della sinfisi pubica e fratture dei rami pubici superiori e inferiori destri (Kaewlai et al. 2007)*

Prasartritha et al. (2008), nell'analisi delle lesioni riportate dai sopravvissuti allo tsunami del 2004 in Thailandia, hanno documentato diverse tipologie di frattura, prevalentemente a carico degli arti inferiori. Tra gli esempi illustrati figurano fratture segmentarie del femore e dell'omero distale (A e D), una frattura-lussazione dell'anca (B) e fratture comminute, anche esposte, delle ossa degli arti superiori e inferiori (C e E) **(Figura 12).**

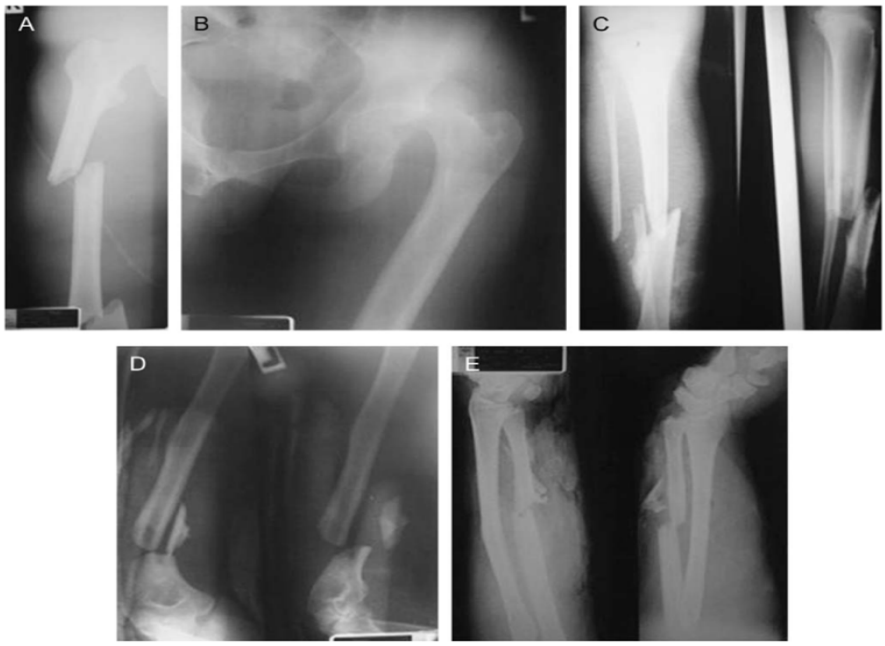


Figura 12*- Pattern di frattura. (A) Frattura segmentaria del femore, (B) Dislocazione e frattura dell'anca, (C) Frattura comminuta di entrambi gli arti inferiori, (D) Frattura segmentaria dell'omero, (E) Frattura comminuta degli arti superiori (Prasartritha et al. 2008)*

A livello cranio-facciale sono state documentate fratture riconducibili prevalentemente a meccanismi contusivi, che possono interessare diversi elementi ossei, tra cui frontale, sfenoide, zigomatico, mascellare, mandibola e ossa nasali (Kaewlai et al. 2009).

Un ulteriore contributo alla comprensione della lesività associata a eventi naturali ad elevata energia deriva dagli studi condotti su vittime di alluvioni e frane. In uno studio condotto tramite tomografia computerizzata post-mortem (PMCT) su 43 vittime di alluvioni e frane, sono state descritte lesioni a diversi distretti scheletrici, tra cui fratture composte e comminute. Sebbene questi dati non siano direttamente riferiti agli tsunami, essi mostrano come eventi naturali caratterizzati dal rapido movimento di acqua, fango e detriti possano determinare lesioni traumatiche scheletriche complesse e rappresentano pertanto un utile termine di confronto nell'analisi di altri disastri idrogeologici (Mondello et al. 2022).

La letteratura disponibile evidenzia una grande varietà di lesioni scheletriche associate agli tsunami, tra cui fratture chiuse, esposte, comminute, segmentarie e lussazioni. Tuttavia, i dati disponibili non sono sufficienti per identificare un pattern specifico legato al trauma. Gli studi forniscono informazioni sulle lesioni osservate, ma la variabilità e le condizioni dell'evento rendono difficile correlare il tipo di lesione scheletrica a una precisa dinamica dello tsunami (Kaewlai et al. 2007; Prasartritha et al. 2008).

SCOPO DELLA TESI

Lo scopo della presente tesi è analizzare e confrontare la lesività scheletrica osservata in due campioni derivanti da eventi traumatici ad elevata energia, caratterizzati da dinamiche differenti e da una possibile combinazione di diversi meccanismi lesivi. Il primo campione è costituito da frammenti scheletrici provenienti da un incidente aereo avvenuto nella periferia di Milano, mentre il secondo è rappresentato dai resti scheletrici di tre individui appartenenti alle vittime della diga del Vajont.

Il primo obiettivo dello studio è descrivere e caratterizzare le lesioni *perimortem* presenti nei due campioni, prendendo in considerazione la morfologia, il pattern fratturativo, la distribuzione nei diversi distretti scheletrici e le caratteristiche delle superfici e dei margini di frattura. Inoltre, verrà valutato il timing delle alterazioni osservate, al fine di distinguere le lesioni *perimortem* da eventuali modificazioni prodotte in momenti differenti. Questa fase è finalizzata a ricavare i dati di base, necessari per i successivi confronti.

Successivamente, le caratteristiche osservate verranno confrontate con i pattern descritti in letteratura per il trauma contusivo, i traumatismi ad alta energia e la lesività da esplosione. Il confronto con quest'ultima non presuppone un'equivalenza tra gli eventi analizzati e un evento esplosivo, ma deriva dalla possibile sovrapposizione di alcuni meccanismi e pattern traumatici. Le esplosioni, infatti, possono determinare lesioni attraverso differenti meccanismi, comprendenti l'azione diretta dell'onda d'urto, l'impatto di frammenti proiettati e lo spostamento del corpo con successivo impatto contro superfici o strutture. Il confronto con la letteratura permetterà quindi di identificare eventuali analogie e differenze tra le caratteristiche osservate nei due campioni e quelle documentate in altri contesti traumatici ad elevata energia, valutando se tali differenze possano essere messe in relazione con le specifiche dinamiche dei due eventi.

Il secondo obiettivo riguarderà il confronto diretto tra i due campioni, finalizzato a verificare se, nonostante la diversa natura degli eventi, siano presenti caratteristiche lesive ricorrenti o condivise, oppure se ciascun campione presenti quadri lesivi distinti. Attraverso questo confronto, la tesi mira a caratterizzare la distribuzione e la morfologia della lesività scheletrica osservata nei due contesti e a valutare se i dati ottenuti risultino coerenti con quanto riportato in letteratura.

Il fine ultimo dello studio è valutare in quale misura l'analisi sistematica dei pattern di lesività scheletrica possa fornire elementi utili alla ricostruzione della dinamica traumatica e, più in generale, alla comprensione degli eventi che hanno determinato le lesioni osservate.

MATERIALI E METODI

3.1 Materiali

Lo studio ha incluso due set di campioni:

- 222 frammenti ossei provenienti da un incidente aereo avvenuto nella periferia sud-est di Milano (San Donato milanese, 3 ottobre 2021);
- Resti scheletrici di tre individui appartenenti a vittime della diga del Vajont (9 ottobre 1963, Erto).

3.2.1 Incidente aereo di San Donato Milanese- 3 ottobre 2021

Il 3 ottobre 2021 si è verificato un incidente aereo nella periferia sud-est di Milano, al confine con il comune di San Donato Milanese, più precisamente al capolinea della linea 3 della metropolitana. Un aereo privato, modello Pilatus PC-12/47E **(Figura 13)**, decollato dall'aeroporto di Linate diretto all'aeroporto di Olbia - Costa Smeralda con un totale di otto occupanti, si è schiantato in picchiata a pochi metri dall'uscita della fermata della metropolitana, colpendo il tetto e parte della facciata di un edificio in costruzione in Via Giuseppe Impastato **(Figura 14),** adibito a biglietteria, uffici e foresteria per autisti di autobus. Questo evento ha innescato una deflagrazione che ha causato la dispersione tanto dei resti del velivolo quanto dei corpi degli occupanti, provocando anche un incendio. Nello schianto hanno perso la vita tutti gli otto passeggeri dell'aereo.



***Figura 13**- L'aereo privato Pilatus PC-12/47E decollato dall'aeroporto di Linate. L'immagine è stata ottenuta da un articolo del Corriere*



Figura 14- *Un dettaglio del tetto e della facciata dell'edificio adibito a biglietteria, uffici e foresteria per gli autisti degli autobus contro il quale si è schiantato l'aereo*

L'attività di sopralluogo è stata eseguita dal personale dell'Istituto di Medicina Legale dell'Università degli Studi di Milano e del LABANOF, in collaborazione con la Polizia Scientifica del comune di Milano, la Protezione Civile, i Vigili del Fuoco e la Croce Rossa Italiana. Le operazioni medico-legali e scientifico-forensi sono state autorizzate in seguito alla messa in sicurezza della scena da parte dei Vigili del Fuoco. In primo luogo, è stata eseguita una ricognizione preliminare del luogo dell'impatto, finalizzata a delimitare l'area interessata dalla dispersione dei detriti e dei resti organici. L'area dell'impatto e le zone circostanti sono state suddivise in sei settori, identificati con le lettere "A", "B", "C", "D", "E" e "F".

Sono state successivamente avviate le attività di sopralluogo sistematico e di recupero del materiale di interesse medico-legale. Contestualmente alla repertazione, la posizione geografica di ciascun campione è stata registrata mediante un'applicazione mobile (MioGPSCoordinate), al fine di garantire la tracciabilità e di fornire elementi utili alla ricostruzione della dinamica dell'evento. Infine, il materiale recuperato è stato collocato in apposite body bag e trasferito presso l'Istituto di Medicina Legale di Milano per i successivi accertamenti medico-legali, antropologici, odontologici, nonché per i successivi esami di laboratorio (tossicologici, genetici e istopatologici) volti ad identificare le vittime e comprendere le cause, le modalità e le dinamiche di morte delle stesse.

Per questo studio sono stati analizzati frammenti ossei facenti parte di un campione, con dimensioni comprese tra un massimo di 9,5 cm e un minimo di 0,6 cm. A causa delle ridotte dimensioni e dell'assenza di elementi antropologicamente o odontologicamente utili all'identificazione, tali frammenti non sono stati attribuiti ad una specifica vittima e per questo motivo sono tuttora in custodia presso l'Istituto di Medicina Legale di Milano. Questi resti sono stati oggetto di ricerca nel presente progetto di tesi in conformità con l'articolo 43 del Decreto del Presidente della Repubblica Italiana (D.P.R.) n. 285 del 10 settembre 1990 che approva il Regolamento Mortuario della Polizia Nazionale.

I frammenti sono stati numerati e suddivisi in base alla loro appartenenza in cranio (C) e post- cranio (PC) e organizzati in una tabella che riporta un codice identificativo univoco del singolo frammento, composto dall'elemento osseo di appartenenza del frammento, laddove l'identificazione e la lateralizzazione sono state possibile. In questo studio sono stati analizzati 122 frammenti cranici e 100 frammenti del post-cranio, per un totale di 222 frammenti ossei.

ID	**Elemento/elementi ossei presenti**
01C	Ala dello sfenoide, squama frontale, squama temporale
02C	Due frammenti di teca cranica
03C	Angolo mandibolare destro delle mandibola
04C	Un frammento di teca cranica
05C	Un frammento di teca cranica, cresta del frontale destro, parietale
06C	Due frammenti di teca cranica
07C	Due frammenti di teca cranica
08C	Due frammenti di teca cranica, frontale
09C	Mascellare destro
10C	Un frammento di teca cranica, occipitale
11C	Due frammenti di parietale, occipitale
12C	Un frammento di teca cranica, frontale, bozza del frontale, parietale sinistro, occipitale
13C	Due frammenti di parietale sinistro, un frammento di parietale, un frammento di teca cranica, occipitale
14C	Condilo mandibolare sinistro, zigomatico, parietale, 23 frammenti comminuti
15C	Due frammenti di teca cranica, due frammenti occipitale, frontale
16C	Occipitale, parietale

17C	Un frammento di teca cranica, parietale, occipitale, 11 frammenti comminuti
18C	Due frammenti di teca cranica, occipitale, squama del temporale
19C	Un frammento di teca cranica, squama del temporale, frontale, parietale, processo palatino, mascellare sinistro
20C	Cinque frammenti di teca cranica, due frammenti di rocca petrosa, processo mastoideo sinistro, parietale sinistro, frontale, sfenoide, 25 frammenti comminuti
21C	Due frammenti di teca cranica, due frammenti di temporale, frontale, un frammento comminuti
22C	Dieci frammenti di teca cranica, due frammenti di occipitale, tre frammenti di temporale, parietale
23C	Tre frammenti di parietale, tre frammenti di occipitale, rocca petrosa, condilo della mandibola destra, temporale, processo clinoideo destro, 5 frammenti comminuti
24C	Due frammenti di occipitale
25C	Quattro frammenti di occipitale, angolo mandibolare sinistro, palatino sinistro, frontale, temporale, occipitale, 12 frammenti comminuti
26C	Frontale
01PC	Frammento di ulna sinistra
02PC	Frammento omero
03PC	Frammento diafisi arto inferiore
04PC	Frammento tibia
05PC	Due frammenti arto superiore, Frammento omero destro, 11 frammenti comminuti
06PC	Tre frammenti di arto superiore, frammento scapola destra, frammento diafisi radio destro, frammento diafisi ulna destra, capitello radio
07PC	Capitello radio sinistro
08PC	Quattro frammenti di vertebre, 3 frammenti comminuti
09PC	4 frammenti di costa, frammento scapola sinistra
10 PC	Un frammento arto, quattro frammenti comminuti
11PC	Undici frammenti di coste, frammento epifisi prossimale osso lungo, vertebra, frammento di femore
12PC	Due frammenti osso lungo
13PC	Cinque frammenti di coste
14PC	Un frammento di arto superiore, due frammenti di radio, 3 frammenti comminuti
15PC	Tre frammenti di osso lungo

16PC	Frammento di costa
17PC	Un frammento di epifisi di osso lungo, sei frammenti di costa, sterno, frammento di scapola
18PC	Quattro frammenti di osso lungo, due frammenti ulna destra frammento di clavicola, 11 frammenti comminuti
19PC	13 frammenti osso lungo, quattro frammenti arto superiore, frammento di femore, frammento di scapola, 14 frammenti comminuti

3.2.2 La tragedia della Diga del Vajont

Il 9 ottobre 1963, alle ore 22:39, si verificò una frana di circa 260 milioni di metri cubi di roccia che interessò il versante del Monte Toc e raggiunse il bacino artificiale del Vajont a una velocità stimata tra 70 e 90 km/h. L'impatto della massa franata con l'acqua determinò la formazione di un'onda di circa 250 metri di altezza che si propagò in due direzioni.

Una parte dell'acqua si riversò verso l'abitato di Erto, interessando e distruggendo le località di Frasegn, Val del Luoc, Cristo, Spesse, Pineda, Ceva, Marzana e San Martino. L'altra parte dell'onda superò la diga del Vajont che rimase strutturalmente integra e si riversò nella sottostante valle del Piave. In circa quattro minuti l'onda raggiunse l'area di Longarone **(Figura 15),** Pirago, Rivalta, Villanova e Faè, danneggiando profondamente Codissago, Castellavazzo, Fortogna, Dogna e Provagna. L'evento interessò anche i comuni di Soverzene, Ponte nelle Alpi, la località di Borgo Piave nel comune di Belluno e la borgata di Caorera nel comune di Quero Vas, dove l'innalzamento del livello del Piave provocò l'allagamento dell'abitato **(Figura 16).**



Figure 15 - Longarone prima (a sinistra) e dopo (a destra) il 9 ottobre 1963 (dall'archivio della biblioteca del comune di Belluno).



***Figure 16**- Il versante settentrionale del monte Toc prima (in alto) e dopo (in basso) la catastrofica frana del 9 ottobre 1963*

Secondo una ricerca effettuata nel 2003, il numero complessivo delle vittime accertate fu di 1.910 persone. Di queste 1.458 residenti nel comune di Longarone, 111 nel comune di Castellavazzo, 158 nel comune di Erto e Casso. Le restanti 183 vi ttime erano residenti in altri comuni e comprendevano anche 54 operai impiegati nei lavori presso la diga.

A partire dalle prime luci dell'alba del 10 ottobre 1963 vennero istituiti tredici centri destinati alla raccolta e alla registrazione delle salme recuperate. Parallelamente venne individuata in una frazione del comune di Longarone, un'area destinata alla sepoltura delle vittime. Nei giorni successivi furono avviate le operazioni di identificazione dei corpi: il riconoscimento si basava principalmente sugli elementi disponibili, come effetti personali rinvenuti tra cui anelli, collane ed orecchini e sulle caratteristiche fisiche delle vittime.

Le operazioni risultarono particolarmente complesse a causa della carenza di personale, della mancanza di familiari in grado di riconoscere i corpi e anche per via della temperatura quasi estiva di quei giorni che rendeva necessario provvedere nel più breve tempo possibile alla tumulazione delle salme.

I corpi vennero lavati, ricomposti e, nei casi in cui fosse ancora possibile riconoscere i tratti del volto, vennero realizzate delle fotografie a scopo identificativo. Nel cimitero Monumentale delle Vittime del Vajont vennero sepolte 1.464 salme, di queste 703 furono identificate, mentre per le restanti 761 non fu possibile stabilire l'identità sia per la totale scomparsa di parenti e conoscenti sia per lo stato in cui vennero trovati i corpi (*Comitato sopravvissuti del Vajont – Longarone; Notizie Comuni-Italiani.it. Longarone – Vajont 50 anni dopo*).

Nel 2025 il comune di Erto ha chiesto la riesumazione dei resti scheletrici conservati presso il cimitero locale. L'intervento era focalizzato su sei loculi contenenti resti ossei di vittime senza nome, tre dei quali poi risulteranno vuoti. La riesumazione è stata effettuata con lo scopo di consentire una valutazione antropologica e medico-legale dei resti, sfruttando le metodologie attualmente disponibili e le conoscenze acquisite in ambito antropologico forense finalizzato alla determinazione del numero minimo di individui, alla ricostruzione del loro profilo biologico ed alla raccolta di elementi utili alla loro identificazione personale, in parallelo con attività di raccolta delle informazioni *antemortem* presso uffici comunali e parenti.

Lo studio antropologico dei resti, già oggetto di una tesi precedente, ha permesso di raccogliere le seguenti informazioni: le tre cassette in zinco contenevano un numero minimo di sei individui, di cui tre adulti, due maschi e una femmina, tutti di origine biogeografica europea, 2 bambini, uno di 1,5/2 anni e un altro di 6 mesi/1 anno e un feto di 26 settimane. Il presente studio si concentra sull'analisi dei segni di lesività perimortem presenti sui tre individui adulti, denominati Erto 1-2, Erto 2- 1 e Erto 3.

3.3 Metodi

3.3.1 Pulizia dei campioni

I campioni ossei provenienti dall'incidente di San Donato Milanese presentavano, al momento dell'esame, una consistente quantità di tessuto molle adeso. Si è pertanto proceduto a una fase preliminare di pulizia mediante macerazione a freddo. I campioni sono stati immersi in acqua fredda per alcuni giorni, dopodiché il tessuto molle, alterato dalla permanenza in acqua è stato delicatamente rimosso mediante l'uso di pinzette e spazzolini.

Il trattamento si è protratto per diverse settimane durante le quali sono stati alternati giorni di permanenza in acqua a fasi di rimozione meccanica del tessuto molle. Infine, nelle fasi finali della macerazione è stato aggiunto all'acqua anche un piccolo quantitativo di detersivo per piatti, al fine di favorire la rimozione degli ultimi residui di natura lipidica presenti sulla superficie. Gli eventuali elementi di interesse, sia di origine esogena che endogeni, quali frammenti metallici, peli e capelli sono stati conservati in apposite provette, ciascuna contrassegnata con il relativo numero identificativo. Una volta puliti, i campioni sono stati posti ad asciugare su vassoi in plastica opportunatamente siglati con il codice originario del campione, per alcuni giorni ed infine, dopo l'esame della lesività, archiviati in buste di plastica pulite e siglate.

Nel caso dei resti delle tre vittime della tragedia del Vajont, già scheletrizzati, non è stato necessario ricorrere a procedure di macerazione. I resti di ciascun individuo sono stati disposti su un piano da lavoro in posizione anatomica e sottoposti esclusivamente alla rimozione del particolato superficiale mediante uno spazzolino morbido. Per ciascun individuo sono stati realizzati degli schemi, nei quali sono stati riportati gli elementi ossei presenti e le alterazioni ossee **(Figura 17).** Le lesioni identificate come *perimortem* sono state successivamente evidenziate. In caso di lesività complessa sono stati realizzati dei disegni **(Figura 18**) finalizzati a rappresentare lo stato di completezza del distretto in esame e la distribuzione delle lesioni osservate.

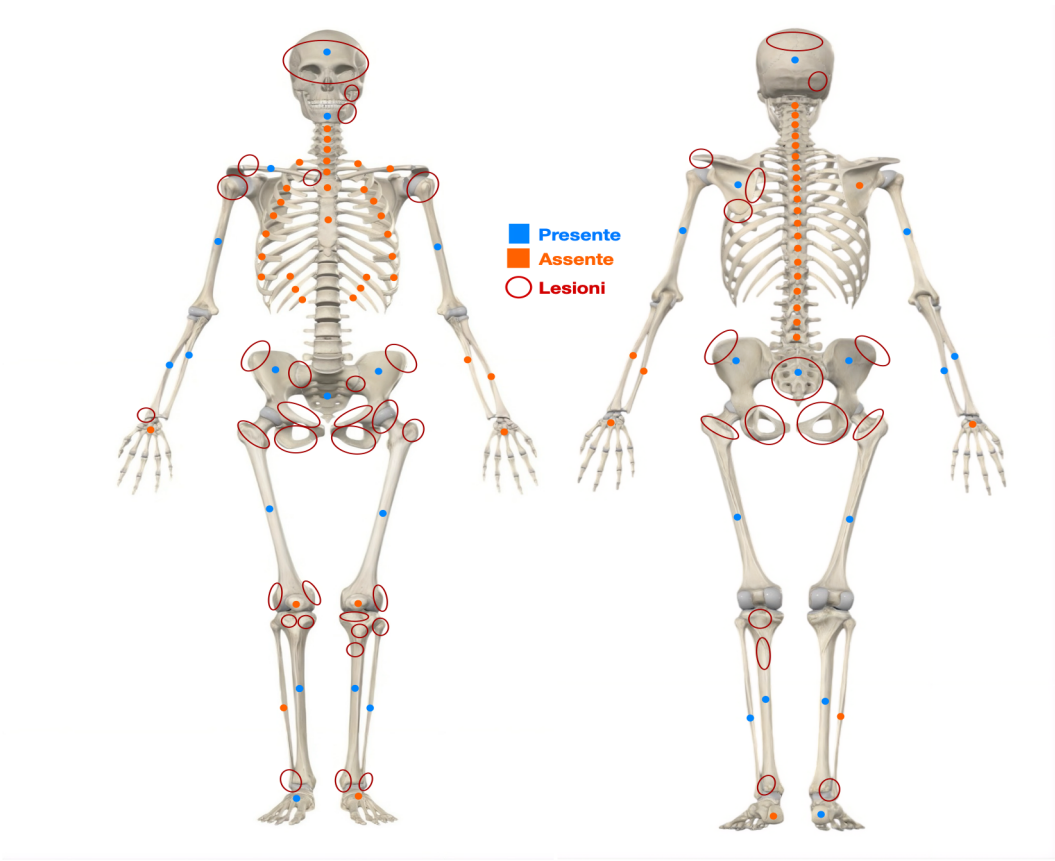


Figura 17- *Schemi che rappresentano gli elementi ossei presenti, gli elementi ossei assenti e le lesioni totali rinvenute sullo scheletro*

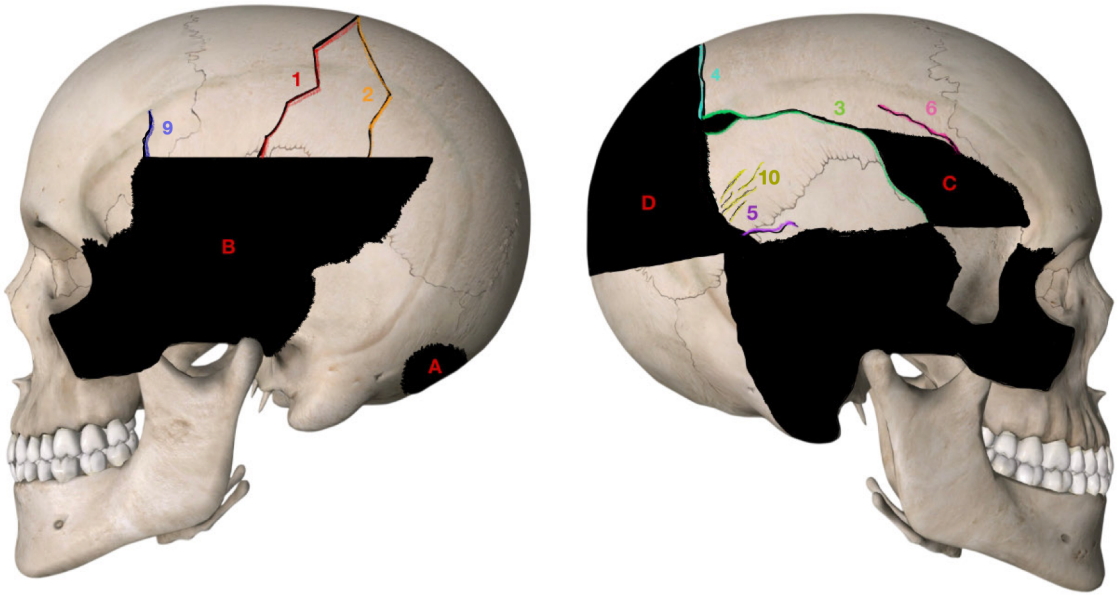


Figura 18*- Schema che riporta lo stato di completezza del distretto in esame e la distribuzione delle lesioni osservate*

3.3.2 Analisi delle alterazioni scheletriche

I metodi di analisi dei campioni si sono basati su osservazioni macroscopiche, effettuata ad occhio nudo e mediante l'ausilio di lenti di ingrandimento e un microscopio a luce riflessa che consente ingrandimenti compresi tra 6 e 40x **(Figura 19) (Wild Heerbrug M650),** il quale ha permesso l'osservazioni di eventuali frammenti di materiale esogeno adeso all'osso o pattern ossei difficili da analizzare ad occhio nudo.



Figura 19- Dettaglio microscopio a luce riflessa che consente ingrandimenti compresi tra 6 e 40x (Wild Heerbrug M650)

3.3.3 Descrizione della modalità di studio delle lesioni

Le alterazioni scheletriche sono state studiate osservando le caratteristiche morfologiche delle singole lesioni. Per raccogliere i dati è stato creato un foglio Excel nel quale a ciascuna lesione è stato associato un codice identificativo e ne sono stati valutati i principali aspetti morfologici in accordo con la letteratura di settore. Sono stati raccolti i seguenti dati **(Figura 20)**:

- **Soluzione di continuo/perdita di sostanza**: per soluzione di continuo si intende un'interruzione dell'integrità del tessuto senza perdita dello stesso, mentre la perdita di sostanza consiste nell'asportazione e la perdita di una porzione di tessuto osseo
- **Localizzazione della lesione**: identificazione dell'elemento osseo in cui si colloca la lesione indicando quando possibile, la lateralizzazione e la parte anatomica dell'osso;
- **Timing**: antemortem, perimortem e postmortem

- **Dimensioni della lesione**: in questo campo si riportano le misure di lunghezza e larghezza delle lesioni in centimetri;
- **Profondità:** viene valutata l'estensione della lesione, quindi se la lesione interessa lo strato superficiale dell'osso o gli strati sottostanti. Benché il principio di valutazione sia analogo, è necessario fare una distinzione di terminologia tra cranio e il post-cranio. Per le lesioni craniche si valuta se il segno interessa solo il tavolato esterno o quello interno, il tavolato esterno e la diploe, il tavolato interno e la diploe o l'osso a tutto spessore. Per le ossa del post- cranio si valuta se la lesione coinvolge lo strato corticale, lo strato spugnoso o entrambi, se interessa l'osso a tutta circonferenza o a parziale circonferenza;
- **Forma della lesione**:
  - Per le soluzioni di continuo (SDC): lineare rettilinea, lineare spezzata, lineare curvilinea, lineare serpentiforme, lineare irregolare, lineare altro, oppure irregolare;
  - Per le perdite di sostanza: irregolare, formata, puntiforme, nastriforme, a forma circolare/ovalare con diametro inferiore su tavolato/lato esterno e diametro maggiore su tavolato/lato interno, a forma circolare/ovalare con diametro inferiore su tavolato/lato interno e diametro maggiore su tavolato/lato esterno, minima con fondo a V, moderata con pareti perpendicolari al fondo, significativa con fondo a V, con fondo a W, forma triangolare, forma a losanga e toppa di serratura;
- **Diastasi** (per la sola soluzione di continuo): in questa sezione viene valutato se vi sia o meno allontanamento dei margini della lesione;
- **Aspetto del margine**:
  - Colore: uguale o diverso da quello del tessuto circostante;
  - Morfologia: può essere netto, irregolare con angoli acuti e ottusi, irregolare con angoli retti, finemente irregolare. Se è presente eterogeneità si indica la localizzazione delle diverse morfologie;
  - Presenza di spicole o flaking: Si segnala la presenza di spicole estroflesse/introflesse o, se è presente, la corticale sfaldata (flaking);
- **Aspetto della superficie**:
  - Per le SDC: granulare, netto o presentare delle intaccature e indentature. Anche in questo caso si indica la localizzazione in caso di eterogeneità;
  - Per le perdite di sostanza: con strie regolari parallele al fondo, con strie irregolari, con strie perpendicolari al fondo, con aspetto granulare, con intaccature o indentature, netta, linea mammellonata, con o senza presenza di sperone e altre eventuali;

- **Presenza di materiale esogeno**: elementi estranei associati alla lesione, come quelli ad esempio di natura geologica, merceologica etc;
- **Presenza di alterazioni cromatiche in prossimità della lesione**: le alterazioni sono state classificate in base al colore: nero, verde, giallo, grigio e marrone;
- **Note**: in questa sezione è possibile aggiungere eventuali annotazioni che non rientrano nelle voci precedenti, come la presenza di materiale esogeno non direttamente collegato ai frammenti ossei rinvenuti, ma a contatto con i tessuti molli che sono stati rimossi e la comunicazione di rime di frattura tra due lesioni ossee.

nº identificativo	Elemento osseo	Localizzazione	Timing	Dimensione della lesione (in mm)	Profondità	Forma	Presenza di materiale esogeno	Alterazione cromatica in prossimità della lesione	Aspetto del margine				Aspetto della superficie
									Colore	Forma	Localizzazione	Spicole/ flaking	Morfologia

Figura 20- tabella che riassume per ciascuna lesione i principali aspetti morfologici in accordo con la letteratura di settore

3.4 Elaborazione dei dati

I dati registrati nel foglio Excel, relativi alle caratteristiche morfologiche osservate per ciascun frammento osseo, sono stati sottoposti ad un'analisi descrittiva. Per ciascuna voce e per ogni relativa sottocategoria è stata calcolata la frequenza assoluta e la frequenza relativa in percentuale, con l'obiettivo di quantificare e confrontare la distribuzione delle diverse caratteristiche morfologiche nei due campioni.

A titolo esplicativo, per la variabile relativa alla profondità della lesione, nel caso del cranio è stata calcolata la frequenza con cui ciascuna delle diverse profondità risultava presente nel campione, distinguendo tra le lesioni che interessavano solo il tavolato esterno o interno, il tavolato esterno e la diploe, il tavolato interno e la diploe oppure tutto lo spessore. Analogamente, per il post-cranio, la frequenza è stata determinata a seconda che la lesione interessasse lo strato corticale, lo strato spugnoso, l'osso a tutta o parziale circonferenza. La medesima procedura è stata applicata a tutte le altre voci riportate nel foglio Excel.

Al fine di rendere possibile un confronto sistematico tra i diversi distretti anatomici e di evidenziare le possibili differenze nella distribuzione delle caratteristiche morfologiche nei due campioni, i risultati sono stati successivamente organizzati in quattro grafici principali. I grafici sono stati distinti in base a due criteri: la tipologia di lesione, distinguendo le soluzioni di continuo dalle perdite di sostanza e la regione anatomica interessata. Sono stati pertanto realizzati i seguenti grafici:

- Soluzioni di continuo- Cranio: il grafico comprende le lesioni riconducibili all'interruzione della continuità del tessuto osseo a livello del cranio, includendo sia le lesioni del neurocranio sia quelle dello splancnocranio;
- Perdita di sostanza - Cranio: il grafico considera le lesioni caratterizzate da una perdita di tessuto osseo a livello del cranio, comprendendo anche questo caso sia il neurocranio sia lo splancnocranio;
- Soluzioni di continuo- Post-cranio: il grafico comprende le lesioni analizzate a livello del post-cranio;
- Perdita di sostanza- Post cranio: il grafico valuta la perdita di tessuto osseo a livello del post-cranio.

Oltre alla rappresentazione grafica delle singole variabili morfologiche, sono stati realizzati ulteriori grafici a torta volti a fornire una visione generale della composizione dei due campioni. Il primo grafico rappresenta la distribuzione anatomica dei reperti, evidenziando i frammenti ossei che appartengono al cranio e al post-cranio. Per il campione di San Donato Milanese sono stati analizzati 122 frammenti di cranio e 100 di post cranio. Per il campione del Vajont sono stati analizzati 14 frammenti del cranio e 17 del post cranio. Il grafico riporta sia il valore assoluto dei frammenti e anche la relativa percentuale sul totale del campione.

Il secondo grafico è stato realizzato per rappresentare il numero totale di lesioni e come queste sono distribuite all'interno dei due campioni. Nel campione di San Donato Milanese sono state analizzate complessivamente 818 lesioni, di cui 494 a livello cranico e 324 a livello post-cranico. Nel campione del Vajont sono state analizzate complessivamente 83 lesioni, di cui 43 appartenenti al cranio e 40 al post-cranio.

RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Analisi dei frammenti ossei provenienti dalle vittime dell'incidente di San Donato Milanese

Sono stati analizzati complessivamente 222 frammenti ossei, di cui 122 frammenti di cranio e 100 frammenti di post-cranio. Come rappresentato nel grafico **(Grafico 1),** i frammenti cranici rappresentano il 55% del totale dei frammenti analizzati, mentre quelli post-cranici costituiscono il restante 45%. Per quanto riguarda le lesioni osservate, sono state individuate 819 lesioni, di cui 495 appartenenti ai frammenti di cranio e 324 ai frammenti di post-cranio.

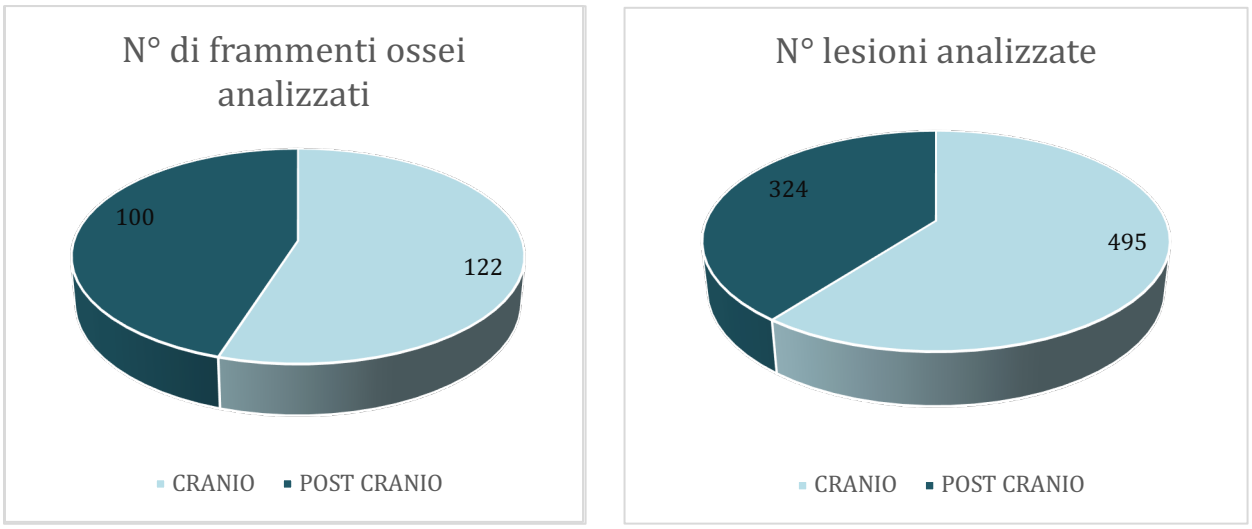


***Grafico 1**- A sinistra, la distribuzione dei frammenti in cranio e post-cranio, a destra il numero di lesioni analizzate*

I frammenti analizzati, sia del cranio sia del post-cranio, presentano dimensioni eterogenee. In particolare, il frammento di cranio di maggiori dimensioni **(Figura 21a)** è costituito da una porzione di osso frontale e parietale destro, uniti a livello della sutura coronale. Esso ha una forma triangolare, con una base di 9,5 cm e un'altezza di 6,3 cm. Il frammento di minori dimensioni, invece, è costituito da una porzione di volta cranica non meglio localizzata, di forma piramidale **(Figura 21b)** con una base di 1,3 cm e un'altezza di 0,6 cm.

Per quanto riguarda il post-cranio, il frammento più grande è rappresentato da una porzione di diafisi di omero della lunghezza di 7,3 cm e della larghezza di 2,1 cm. Il frammento più piccolo, invece, è costituito da una porzione di diafisi di ulna destra che misura 1,24 cm di lunghezza e di 1 cm di larghezza.



Figura 21- A sinistra (a) il frammento cranico di dimensioni maggiori, a destra (b) il frammento cranico di dimensioni minori

Di seguito viene riportato l'istogramma riassuntivo relativo alle caratteristiche riscontrate nelle soluzioni di continuo osservate sui frammenti di cranio **(Grafico 2),** per un totale di 480 lesioni rilevate all'interno del campione. La maggior parte delle soluzioni di continuo (87%) è a tutto spessore e una parte (19,7%) presenta anche una perdita di sostanza. Solo l'8,5% delle lesioni interessa esclusivamente il tavolato esterno (8,5%), mentre risultano pressoché assenti le altre opzioni di spessore. La forma delle lesioni risulta eterogenea: si osserva tuttavia una debole prevalenza di andamento lineare-retto (36,2%) e lineare-irregolare (27,9%), seguito da quelle con andamento lineare-curvilineo (20,2%). Sono invece, meno rappresentate le forme lineare-spezzata (13,7%), mentre non sono state osservate lesioni di forma serpentiforme. Per quanto riguarda la colorazione, la maggior parte presenta lo stesso colore del tessuto circostante (83,5%). Tuttavia, in alcuni frammenti sono state osservate alterazioni cromatiche di diversa natura, in particolare **(Figura 22):**

- 24 soluzioni di continuo (5%) presentano alterazioni cromatiche riconducibili a fenomeni di carbonizzazione e calcinazione, ragionevolmente dovute all'incendio propagatosi a seguito dell'esplosione;
- 47 soluzioni di continuo (9,7%) presentano, in prossimità della lesione una colorazione nerastra non da carbonizzazione;
- 8 soluzioni di continuo (1,7%) presentano una colorazione marrone;
- 4 soluzioni di continuo (0,8%) presentano colorazione grigia;
- 4 soluzioni di continuo (0,8%) presentano colorazione beige;
- 1 soluzione di continuo (0,2%) presenta colorazione verde.

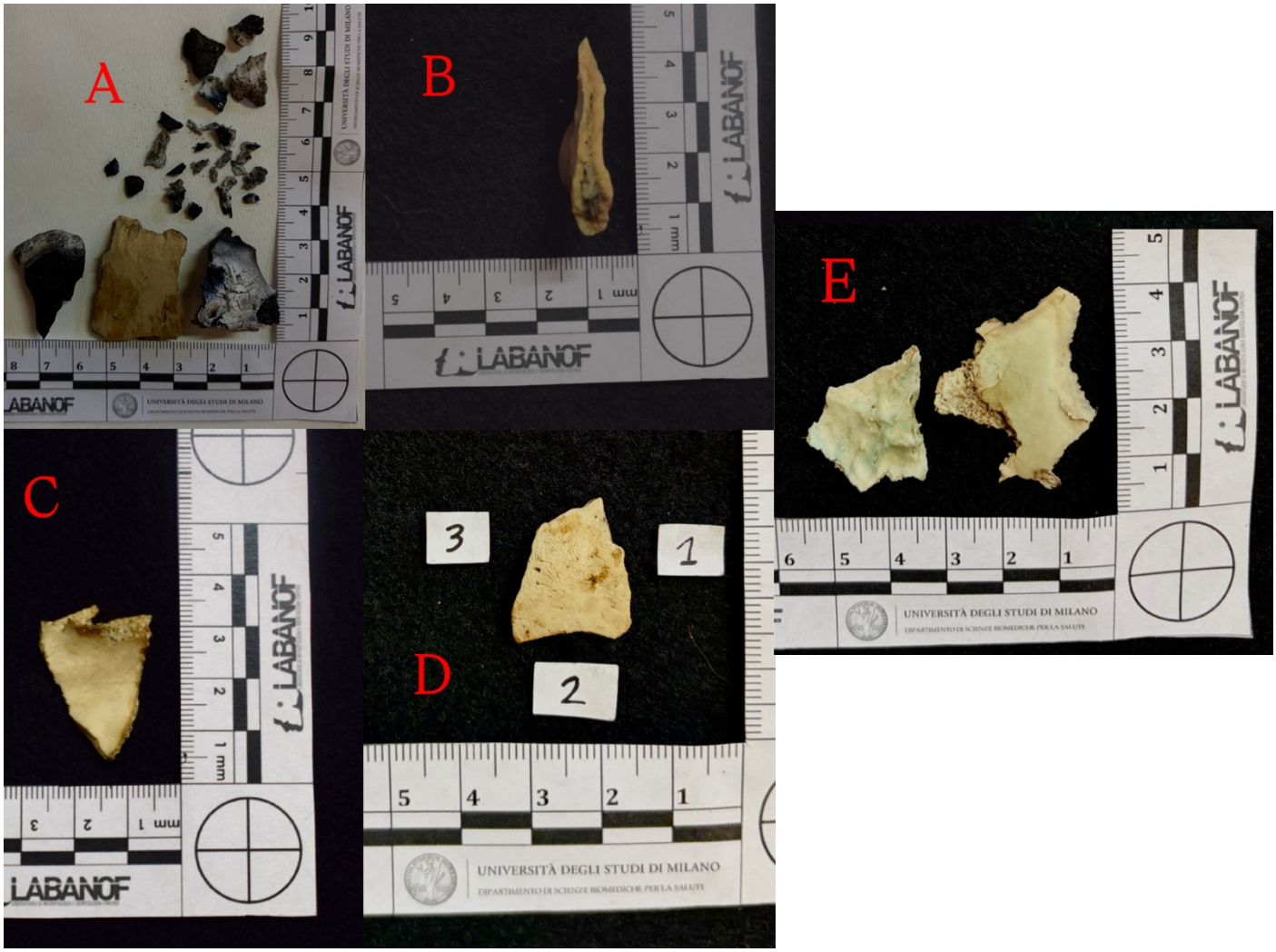


Figura 22 – Diverse alterazionI cromatiche in 5 campioni diversi. Il frammento A presenta alterazioni da carbonizzazione e calcinazione, il frammento B una colorazione nera, il frammento C marrone, il frammento D beige e il frammento E verde

La morfologia dei margini è molto eterogenea, con una prevalenza di margini finemente irregolari (70,2%), ma sono presenti anche margini irregolari con angoli acuti e ottusi (21,4%) e margini netti (8,1%). Su alcune soluzioni di continuo sono state osservate spicole introflesse ed estroflesse (8,1%), mentre in 78 lesioni si osserva flaking lungo il margine (16,2%). Infine, per quanto riguarda la superficie, nella maggior parte dei casi presenta un aspetto granulare (40,2%), mentre nel 14,3% appare caratterizzata dalla presenza di indentature e intaccature (14,3%).

Si sottolinea che, qualora la percentuale complessiva relativa ad uno specifico carattere, ad esempio la morfologia del margine, superasse il 100%, è da attribuirsi al fatto che la medesima lesione può presentare caratteristiche del margine differenti in punti differenti della sua estensione.

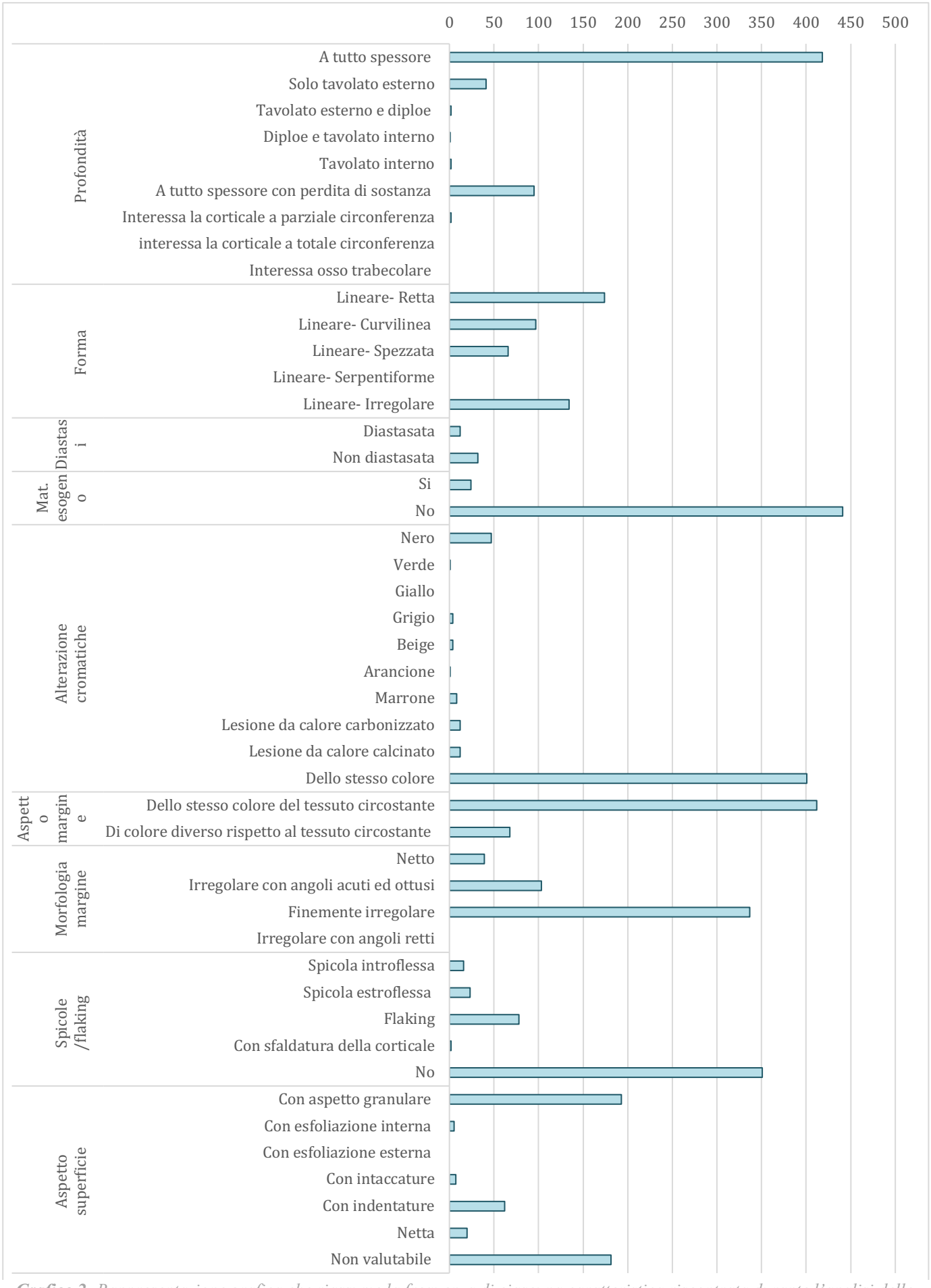


***Grafico 2**- Rappresentazione grafica che riassume la frequenza di ciascuna caratteristica riscontrata durante l'analisi delle soluzioni di continuo del cranio*

A titolo d'esempio, qui vengono riportate le caratteristiche osservate sulle soluzioni di continuo di due frammenti di cranio. Sono stati selezionati questi due frammenti di cranio dal campione dell'incidente aereo di San Donato per due particolari aspetti, relativi alla presenza di materiale esogeno adeso alla superficie e ad un'alterazione cromatica in prossimità della lesione.

Il campione 04C **(Figura 23a)** è costituito da un frammento di teca cranica di forma rettangolare che misura 1,35 cm di lunghezza e 0,65 cm di larghezza, mostrante una soluzione di continuo che interessa solo il tavolato esterno di forma irregolare. Il colore del margine di tale soluzione di continuo appare omogeneo con quello del tessuto circostante, con morfologia finemente irregolare e non si osservano spicole o fenomeni di flaking. La superficie della lesione presenta un aspetto granulare. All'interno della soluzione di continuo si rileva la presenza di un frammento esogeno di color grigio, dalle dimensioni di 0,3 cm di lunghezza e 0,1 cm di larghezza. Per le sue caratteristiche, tale frammento potrebbe essere compatibile con materiale metallico, riconducibile verosimilmente a componeneti dell'aereo.

Il frammento 15C **(Figura 23b)** rappresenta un probabile frammento di osso frontale situato in prossimità della Glabella che misura 1,9 cm di lunghezza e 1,6 cm di larghezza. Esso presenta soluzioni di continuo a tutto spessore di forma principalmente lineare-retta e non presenta materiale esogeno adeso. I margini hanno una morfologia finemente irregolare, senza presenza di spicole o flaking e la superficie di frattura ha un aspetto granulare. Questo frammento presenta una particolare colorazione bianco/beige associata ad un aspetto alterato dell'osso. La superfice infatti, anziché apparire liscia e lucida, si presenta ruvida e irregolare. Tali caratteristiche risultano aspecifiche e potrebbero essere riconducibili a processi di alterazione post-mortale, ambientale o termica, la cui natura non può essere determinata sulla base solo di un'analisi macroscopica.

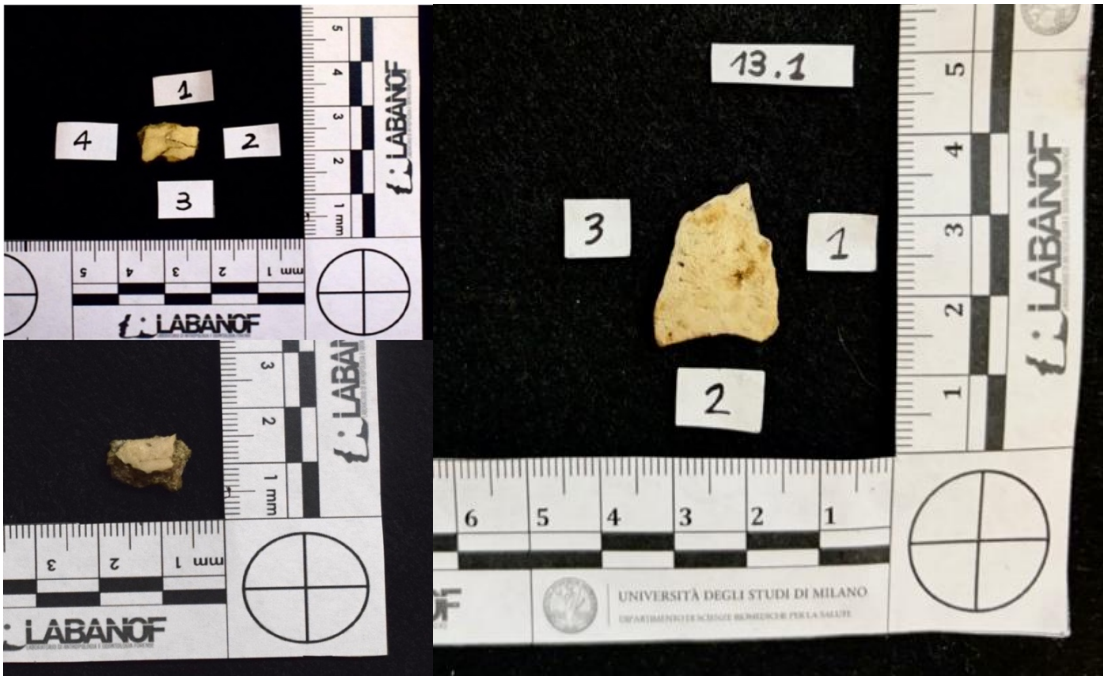


Figura 23- A sinistra (a) il frammento di teca cranica che interessa solo il tavolato esterno e presenta materiale esogeno, a destra (b) il frammento di frontale con alterazione cromatica in prossimità della lesione

Di seguito si riporta il grafico relativo alle perdite di sostanza del cranio osservate sui frammenti di cranio **(Grafico 3)**, il quale deriva dall'analisi di 15 lesioni riscontrate in 14 frammenti.

La maggior parte delle perdite di sostanza coinvolge il solo tavolato esterno (60%), mentre un numero limitato di campioni interessa la diploe e il tavolato interno (40%), del tutto assenti risultano le altre categorie di spessore. La morfologia delle lesioni è prevalentemente lineare-irregolare (73,3%) e, in nessun caso, è stata osservata la presenza di materiale esogeno adeso. La morfologia della superficie ha un aspetto molto eterogeneo, in particolare 6 lesioni presentano margini finemente irregolari (40%), 6 irregolare con angoli acuti ed ottusi (40%) e le 2 lesioni restanti presentano margini netti (20%). Per quanto riguarda la superficie delle lesioni, nella maggior parte dei casi si osserva un aspetto granulare (60%), mentre non è stata rilevata la presenza di spicole introflesse o estroflesse, né di fenomeni di flaking.

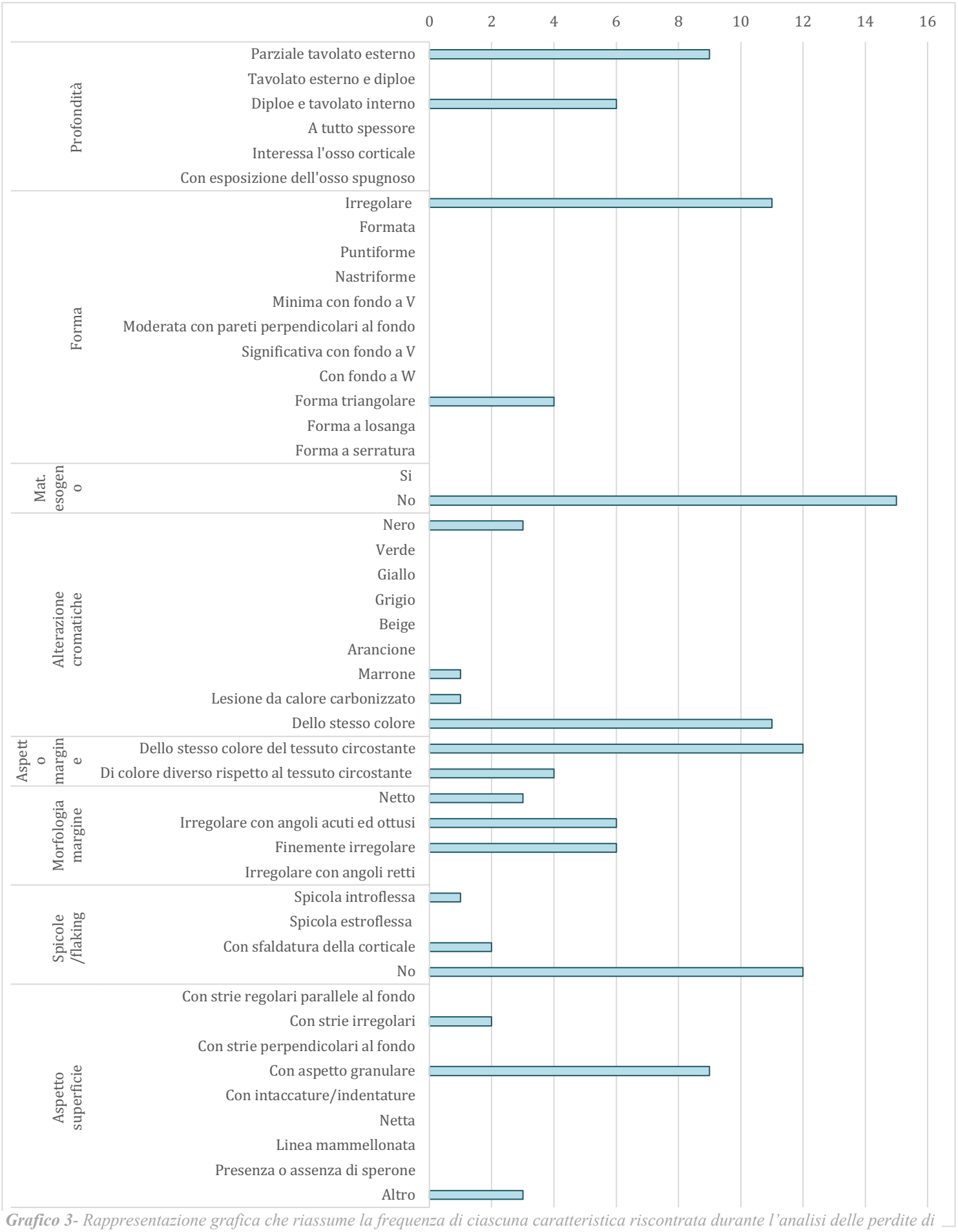


Grafico 3- *Rappresentazione grafica che riassume la frequenza di ciascuna caratteristica riscontrata durante l'analisi delle perdite di sostanza del cranio*

A titolo d'esempio, di seguito vengono riportare le caratteristiche osservate in due perdite di sostanza provenienti da due campioni diversi, rispettivamente del cranio. Sono stati selezionati questi due frammenti di cranio dal campione dell'incidente aereo di San Donato Milanese per un particolare aspetto, relativo alla profondità della lesione, che interessa solo parzialmente il tavolato esterno. Inoltre, nel primo campione si osserva anche un'alterazione cromatica di color marrone in prossimità della lesione.

Il frammento 10C **(Figura 24a)** è costituito da una porzione di occipitale che misura una lunghezza di 2,7 cm e una larghezza di 1,9 cm. Il frammento presenta una perdita di sostanza di forma irregolare che coinvolge parzialmente il tavolato esterno. L'area interessata si distingue dal tessuto circostante per una differente colorazione, tendente al marrone. I margini mostrano una morfologia irregolare con angoli acuti ed ottusi e non si osservano fenomeni di flaking. La superficie presenta un aspetto granulare.

Il frammento 12C **(Figura 24b)** è costituto da un frammento di parietale sinistro di lunghezza 5,4 cm e larghezza di 5,3 cm, che presenta una perdita di sostanza di forma irregolare e coinvolge parzialmente il tavolato esterno. Il colore è uguale a quello del tessuto circostante, mentre i margini mostrano una morfologia finemente irregolare. Non si osservano spicole o fenomeni di flaking e la superficie della lesione presenta un aspetto granulare.



Figura 24- A sinistra (a) il frammento di occipitale, a destra (b) il frammento di parietale sinistro

Il grafico relativo alle soluzioni di continuo del post-cranio **(Grafico 4)** si basa sull'analisi delle caratteristiche morfologiche di 324 lesioni rinvenute nel campione.

La maggior parte delle soluzioni di continuo (81,7%) è a tutto spessore e il 14,5% presenta anche una perdita di sostanza. 34 lesioni interessano la corticale a parziale circonferenza (10,4%), mentre solo 2 soluzioni di continuo coinvolgono la corticale a tutta circonferenza (0,6%), assenti le altre categorie di spessore. La forma ha un aspetto più eterogeneo, con una prevalenza della forma lineare-retta (33,6%) e lineare-irregolare (33,9%). La forma lineare-curvilinea (19,4%) e lineare-spezzata (12,6%) hanno una ricorrenza simile all'interno del campione. Per quanto riguarda la colorazione, la maggior parte delle lesioni presenta lo stesso colore del tessuto circostante (83,3%). Tuttavia, in alcuni frammenti sono state osservate alterazioni cromatiche. In particolare **(Figura 25):**

- 24 soluzioni di continuo (7,4%) presentano alterazioni cromatiche riconducibili a fenomeni di carbonizzazione e calcinazione, dovute verosimilmente all' incendio che si è propagato a seguito dell'esplosione;
- 9 soluzioni di continuo (2,7%) presentano in prossimità della lesione una colorazione nerastra;
- 13 soluzioni di continuo (4%) presentano una colorazione verde;
- 5 soluzioni di continuo (1,5%) presentano una colorazione marrone;
- 6 soluzioni di continuo (1,8%) presentano una colorazione beige.

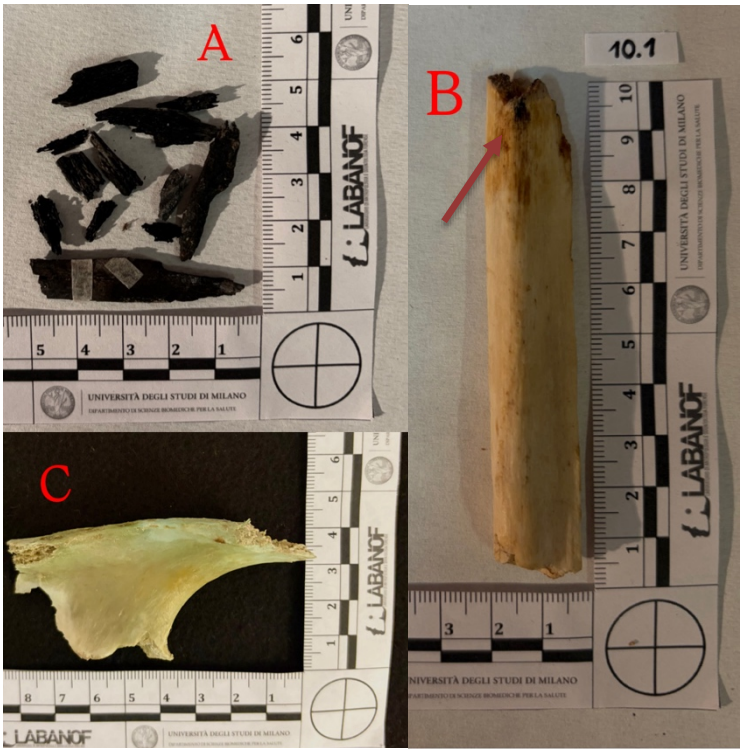


Figura 25 – Diverse alterazioni cromatiche in 3 campioni diversi. Il frammento A presenta alterazioni da carbonizzazione, il frammento B una colorazione nera e marrone, il frammento C verde

La morfologia del margine risulta eterogenea con una prevalenza di margini finemente irregolari (56,1%), ma sono presenti anche lesioni con margini irregolari con angoli acuti e ottusi (29,6%) e margini netti (13,5%). In alcune lesioni sono state osservate anche spicole (18,5%) **(Figura 26),** con una percentuale maggiore per le spicole estroflesse (12,3%). Inoltre, 29 lesioni presentano aree di sfaldatura della corticale (8,9%), mentre 12 mostrano fenomeni di flaking (3,7%). Infine, la superficie presenta prevalentemente un aspetto granulare (43,5%), anche se in una minor percentuale sono state osservate indentature (5,2%).

Si sottolinea che, qualora la percentuale complessiva relativa ad uno specifico carattere, ad esempio la morfologia del margine, superasse il 100%, è da attribuirsi al fatto che la medesima lesione può presentare caratteristiche del margine differenti in punti differenti della sua estensione.



Figura 26- Dettaglio della presenza di spicole estroflesse e introflesse nei campioni. A sinistra, vengono mostrati due frammenti di costa in norma anteriore, mentre a destra un frammento di osso lungo

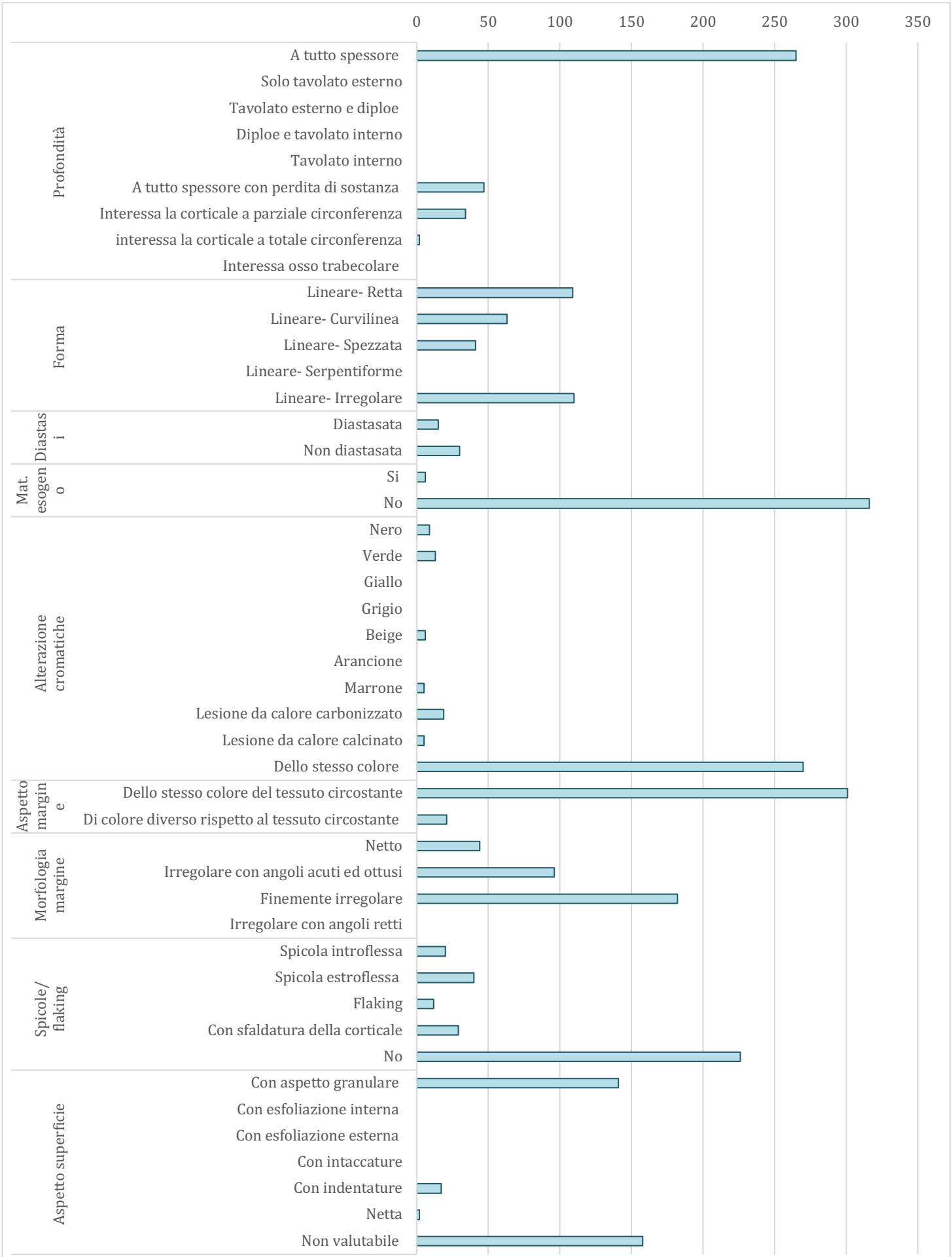


Grafico 4- *Rappresentazione grafica che riassume la frequenza di ciascuna caratteristica riscontrata durante l'analisi delle soluzioni di continuo del post-cranio*

A titolo d'esempio, di seguito vengono riportate le caratteristiche morfologiche osservate in un frammento a livello del post-cranio. È stato selezionato questo frammento dal campione dell'incidente aereo di San Donato per un particolare aspetto, relativo alla presenza di un'alterazione cromatica in prossimità della lesione.

Il campione 06PC **(Figura 27)** è costituito da un frammento di scapola destra che mostra diverse soluzioni di continuo a tutto spessore, di forma prevalentemente lineare-spezzata e irregolare. I margini mostrano una morfologia irregolare con angoli acuti ed ottusi e sono caratterizzati dalla presenza di spicole sia introflesse che estroflesse. A causa dello spessore ridotto della corticale, la superficie appare non valutabile su tutta l'area. Inoltre, il frammento presenta un'alterazione cromatica di colore verde estesa all'intera superficie, caratteristica riscontrata anche in un altro frammento osseo dello stesso campione. Tale frammmento è costituito da una porzione di diafisi di omero di forma quadrangolare che misura 5 cm di lunghezza e 1,8 cm di larghezza.



Figura 27- *A sinistra il frammento di scapola destra con alterazione cromatica verde, a destra i frammenti contenuti nello stesso campione*

4.1.2 Discussione delle alterazioni scheletriche riscontrate nei resti ossei delle vittime dell'incidente aereo di San Donato Milanese

Il quadro osservato può essere interpretato considerando la sovrapposizione di differenti meccanismi traumatici. L'aereo di San Donato è precipitato in picchiata, colpendo il tetto e parte della facciata di un edificio in costruzione adibito a biglietteria, uffici e foresteria per autisti di autobus e innescando una deflagrazione, la quale ha determinato la dispersione di materiale metallico, ma anche di porzioni corporee, aumentando la complessità del quadro lesivo. Di conseguenza, le lesioni osservate nei frammenti possono avere diverse origini, tra cui l'impatto dell'aereo al suolo e contro gli edifici citati e la proiezione di frammenti, ma anche l'impatto del corpo contro oggetti presenti nell'area circostante. Tali meccanismi possono determinare diverse tipologie di lesioni scheletriche, incluse fratture, lesioni penetranti, amputazioni e traumi da corpo contundente. Inoltre, gli effetti associati ad un'esplosione possono coesistere nello stesso individuo, quindi nel caso di San Donato è plausibile che le lesioni osservate siano il risultato della sovrapposizione di più meccanismi piuttosto che all'azione di una singola forza (Márquez-Grant et al. 2020; Ramasamy et al. 2011; Galante et al. 2021).

In situazioni estreme come i disastri di massa, i resti umani possono essere recuperati integri, parzialmente conservati o dispersi anche su ampie aree in porzioni di dimensioni varie, talvolta ridotte. Questa condizione è stata osservata nel caso dell'incidente aereo di San Donato Milanese, nel quale i resti analizzati sono costituiti prevalentemente da frammenti di piccole dimensioni comprese tra 0,6 cm e 9,5 cm. Tale caratteristica può essere ricondotta al fatto che gli eventi traumatici ad alta energia possono determinare un'elevata frammentazione dei resti (De Boer et al., 2020). Tuttavia, va sottolineato che, come già citato all'inizio di questo elaborato, i frammenti oggetto di studio consistevano in resti ossei non riassociati ai corpi e che per tale motivo non sono stati restituiti alle famiglie delle vittime. La selezione quindi non è stata fatta sull'intero campione dei resti ossei delle vittime.

La presenza di materiale esogeno osservata in alcuni campioni ossei potrebbe essere compatibile con un meccanismo di proiezione di detriti ad alta energia. Nell'ambito delle esplosioni, tale meccanismo rientra tra i cosiddetti effetti secondari, determinati dall'impatto di frammenti dell'ordigno o di materiali presenti nell'ambiente e messi in movimento dall'evento esplosivo.

Ramasamy et al. (2011), confrontando soggetti coinvolti in esplosioni avvenute in ambiente aperto con soggetti protetti da veicoli o strutture, hanno osservato un maggiore contributo di questi effetti alle lesioni scheletriche nel primo gruppo. Gli autori attribuiscono tale differenza alla maggiore esposizione diretta ai frammenti nei soggetti non protetti da strutture. Nel caso dell'incidente di San Donato Milanese, tuttavia, il confronto deve essere considerato con cautela, poiché la dinamica dell'evento differisce dalle esplosioni analizzate da *Ramasamy et al. (2011)* e comprende l'impatto ad alta energia del velivolo contro un edificio. La presenza di materiale esogeno nei frammenti ossei può pertanto essere interpretata come indicativa dell'interazione con detriti proiettati durante l'impatto, anche se nel caso in esame si tratterebbe di un caso di ambiente chiuso, essendo le vittime protette dal velivolo. Tuttavia, il velivolo si è completamente disintegrato durante l'impatto determinando probabilmente l'esposizione immediata dei corpi all'ambiente esterno. Di conseguenza il velivolo non solo non ha protetto, ma ha fornito una fonte abbondante di materiale esogeno che è stata poi messa in movimento dalla deflagrazione. La maggior parte di questi frammenti esogeni è costituita da redisui metallici provenienti dall'aereo in seguito all'impatto. Oltre ai frammenti metallici, è stata rilevata anche la presenza di frammenti di cavi e vetro. Tali residui non si trovavano direttamente a contatto con le lesioni, infatti sono stati rinvenuti nei tessuti molli ancora adesi all'osso prima del procedimento di pulizia.

Inoltre, alcune delle alterazioni cromatiche osservate sui frammenti ossei, riconducibili all'esposizione ad alte temperature e a fenomeni di carbonizzazione e calcinazione, sono compatibili con gli effetti termici inclusi, nella classificazione delle *blast injuries*, tra le lesioni quaternarie. Queste lesioni infatti comprendono non solo gli effetti termici immediatamente associati all'evento esplosivo, ma anche quelli derivanti da incendi secondari (Kimmerle et al., 2008; Dussault et al., 2014; Márquez-Grant et al., 2021). Nel caso di San Donato Milanese, le alterazioni osservate possono pertanto essere ricondotte all'esposizione all'incendio sviluppatosi a seguito dell'impatto del velivolo, senza che esse costituiscano di per sé, evidenza di un meccanismo esplosivo.

Oltre alla colorazione nera, alcuni frammenti presentavano alterazioni di colore verde **(Figura 28),** che possono essere dovute al contatto prolungato dei frammenti ossei con elementi metallici quali il rame (Borrini et al., 2012; Concato et al., 2026).

La colorazione verde osservata su alcuni frammenti ossei del campione potrebbe essere correlata al contatto con materiale contenente rame, elemento comunemente presente nei cablaggi e in altri componenti elettrici degli aeromobili **(Figura 29).** Tale ipotesi è supportata anche dall'identificazione del rame mediante XRF su elementi ossei con la medesima provenienza, oggetto di un lavoro precedente di tesi.



Figura 28- Dettaglio di alcuni frammenti ossei con alterazione cromatica di colore verde



Figura 29- Dettaglio delle aree dell'aereo con possibile presenza di rame

4.2 Analisi dei frammenti ossei della diga del Vajont

Sono stati analizzati complessivamente 31 elementi ossei, di cui 14 appartenenti al cranio e 17 al post-cranio. Come rappresentato nel grafico **(Grafico 5),** gli elementi cranici costituiscono il 45% del totale degli elementi ossei analizzati, mentre quelli post-cranici rappresentano il restante 55%. Per quanto riguarda le lesioni osservate, sono state individuate 80 lesioni, di cui 43 appartenenti al cranio e 37 al post-cranio.

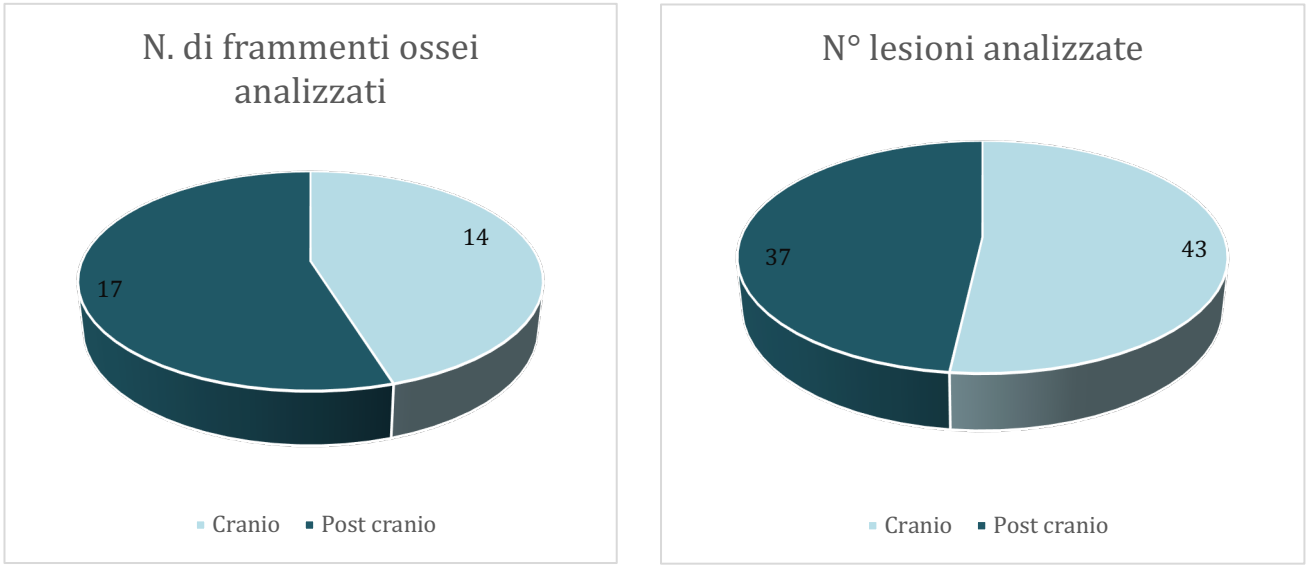


Grafico 5- A sinistra, la distribuzione dei frammenti in cranio e post-cranio, a destra il numero di lesioni analizzate

I frammenti analizzati, sia del cranio sia del post-cranio, presentano dimensioni eterogenee. Il frammento cranico di dimensioni maggiori **(Figura 30a)** appartiene all'individuo denominato Erto 2-1 e comprende il parietale destro e sinistro, dove la frattura, sviluppata su un piano frontale, ha causato la separazione della calotta cranica in due frammenti, uno anteriore e uno posteriore. Il frammento anteriore è quello di dimensioni maggiori e misura una lunghezza di 18,5 cm e una larghezza di 7,5 cm. Il frammento di dimensioni minori, invece, appartiene all'individuo identificato come Erto 1-2 ed è costituito da una porzione di mandibola che misura 6,2 cm di lunghezza e 7,3 cm di larghezza.

Per quanto riguarda il post-cranio, il frammento di maggiori dimensioni appartiene all'individuo Erto 1-2 e si localizza a livello della tibia sinistra, dove la frattura ha causato la separazione dell'osso in due porzioni. Il frammento presenta una lunghezza di 12,2 cm e una larghezza di 4,7 cm. Il frammento più piccolo, invece, appartiene a Erto 2-1 ed è localizzato a livello della scapola sinistra **(Figura 30b),** dove la soluzione di continuo ha determinato il distacco di un frammento di 7,5 cm di lunghezza e 4,2 cm di larghezza.



Figura 30- A sinistra (a) il frammento cranico di dimensioni maggiori, a destra (b) il frammento post-cranico di dimensioni minori

Di seguito viene riportato il grafico relativo alle soluzioni di continuo osservate a livello del cranio **(Grafico 6),** il quale si basa sull'analisi delle caratteristiche morfologiche di 32 lesioni individuate nel campione. La maggior parte delle soluzioni di continuo è a tutto spessore (84,3%) e tra queste, il 12,5% presenta una perdita di sostanza, mentre il 15,6% interessa esclusivamente il tavolato esterno, del tutto assenti le altre categorie di spessore. La forma delle lesioni è eterogenea: si osserva una prevalenza per la forma lineare-retta (37,5%) e lineare-curvilinea (37,5%), seguite da quelle lineare-spezzata (15,6%) e lineare-irregolare (9,3%). Nella maggior parte dei casi non si osserva materiale esogeno adeso, che è presente solo nel 9,3% delle lesioni. Il margine risulta pressoché costantemente dello stesso colore del tessuto circostante (90,6%). La morfologia del margine risulta prevalentemente finemente irregolare (84,3%), ma alcune soluzioni di continuo presentano una morfologia irregolare con angoli acuti ed ottusi (18,7%). La superficie ha un aspetto prevalentemente granulare (46,8%), solo nel 6,2% dei casi sono state osservate indentature.

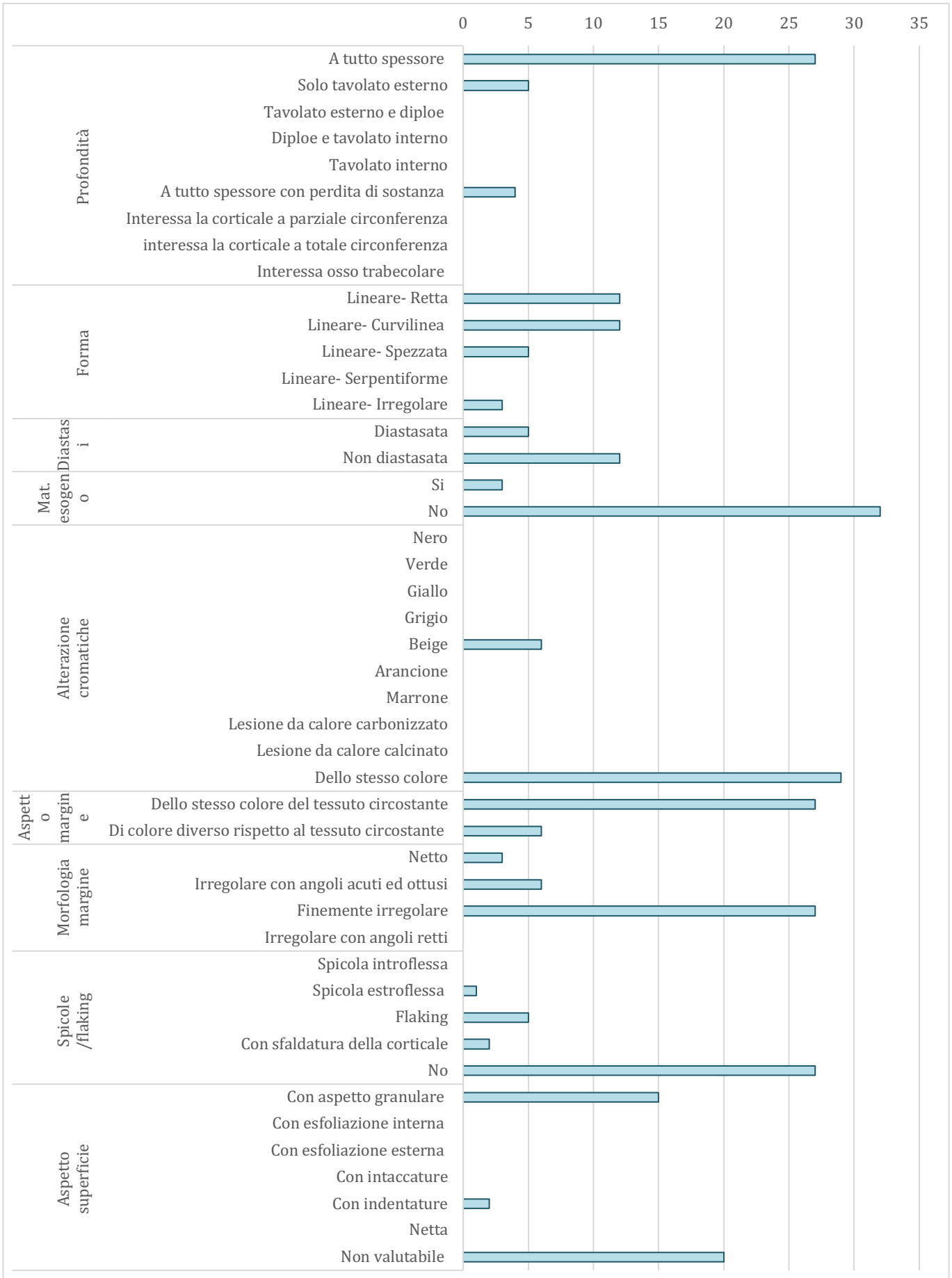


***Grafico 6**- Rappresentazione grafica che riassume la frequenza di ciascuna caratteristica riscontrata durante l'analisi delle soluzioni di continuo del cranio*

A titolo d'esempio, di seguito vengono riportate le caratteristiche morfologiche osservate in una soluzione di continuo a livello della madibola. È stato selezionato questo frammento di cranio dal campione del disastro della diga del Vajont per un particolare aspetto, relativo alla presenza di una soluzione di continuo di forma lineare-retta.

La porzione di mandibola attribuita all'individuo denominato Erto 3 **(Figura 31)** misura 6,7 cm di lunghezza e 8,2 cm di larghezza. Su di essa si osserva una soluzione di continuo a tutto spessore con una forma prelaventemente lineare-retta. In prossimità della lesione non si osservano alterazioni cromatiche ed anche i margini sono dello stesso colore del tessuto circostante. La morfologia è finemente irregolare.



***Figura 31**- Il frammento di mandibola attribuita all'individuo denominato Erto 3*

Il grafico relativo alle perdite di sostanza del cranio **(Grafico 7)** si basa sull'analisi morfologica di 11 perdite di sostanza. Le lesioni sono esclusivamente a tutto spessore, con una forma irregolare e non presentano materiale esogeno adeso alla superficie o alterazioni cromatiche in prossimità della lesione. Il margine ha una morfologia prevalentemenre irregolare con angoli acuti ed ottusi (54,5%) o finemente irregolare (45,4%) e non presenta né spicole né flaking, mentre la superficie mostra nel 54,5% delle perdite di sostanza un aspetto granulare .

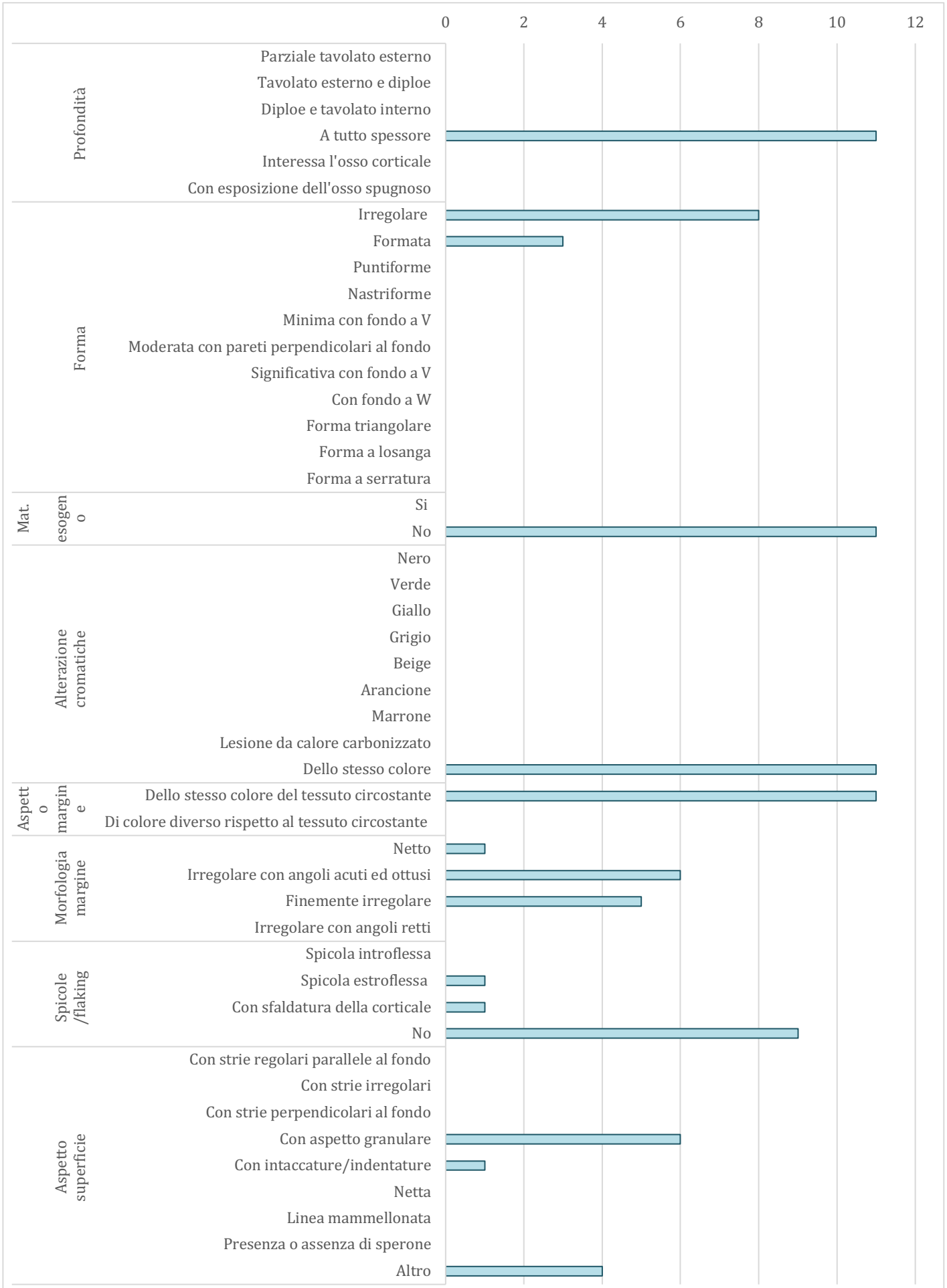


***Grafico 7**- Rappresentazione grafica che riassume la frequenza di ciascuna caratteristica riscontrata durante l'analisi delle perdite di sostanza del cranio*

A titolo d'esempio, di seguito vengono riportate le caratteristiche morfologiche osservate in una perdita di sostanza individuata a livello del cranio nell'individuo denominato Erto 3. La lesione è stata selezionata nel campione relativo al disastro del Vajont per la sua peculiare morfologia.

Il parietale sinistro **(Figura 32)** presenta una perdita di sostanza di forma romboidale, con una lunghezza di 5,7 cm e una larghezza di 4,1 cm. Si tratta di una lesione a tutto spessore, priva di materiale esogeno adeso alla superficie e dello stesso colore del tessuto circostante. Tuttavia si può notare, dal punto di vista cromatico, che il tessuto osseo mostra colorazioni eterogenee con la porzione antero-inferiore di colore più chiaro e quella postero-superiore di colore più scuro. Il margine si presenta finemente irregolare in corrispondenza dell'estremità superiore e netto nell'estremità inferiore. La superficie mostra un aspetto granulare. La perdita di sostanza presenta un andamento curvilineo peculiare nel margine inferiore, che appare leggermente obliquo, svasato verso l'esterno nel tratto laterale e verso l'interno di quello mediale. Tale perdita di sostanza è in realtà determinata dalla perdita di un tassello osseo e presenta, in corrispondenza dei suoi quattro vertici, altre soluzioni di continuo che costituiscono un probabile prolungamento di quelle che hanno orginato la perdita di sostanza.



Figura 32- In alto, la perdita di sostanza di forma romboidale a livello del parietale sinistro. In basso,lo schema delle perdite di sostanza a livello cranico dell'individuo Erto 3

Il grafico relativo alle soluzioni di continuo del post-cranio **(Grafico 8)** si basa sull'analisi delle caratteristiche morfologiche di 32 lesioni rinvenute nel campione. La maggior parte delle soluzioni di continuo (75%) è a tutto spessore e una parte di queste (40,6%) presenta anche una perdita di sostanza. Nel campione sono anche presenti lesioni che interessano l'osso trabecolare (3,1%) e la corticale a parziale circonferenza (18,7%), assenti le altre categorie di spessore. La forma prevalente è lineare-curvilinea (37,5%), ma una buona parte dei frammenti presenta anche una forma lineare-retta (34,3%) e lineare-spezzata (25%). La maggior parte delle soluzioni non presenta materiale esogeno adeso (87,5%) e nessuna presenta alterazioni cromatiche in prossimità della lesione. Il margine ha una morfologia prevalentemente finemente irregolare (71,8%), con una percentuale più piccola con margini irregolari con angoli acuti ed ottusi (9,3%). La presenza di spicole/flaking è molto eterogenea, con una predominanza di fenomeni di flaking (15,6%) **(Figura 33)**, rispetto alle spicole (12,5%), che, quando presenti, risultano estroflesse. La superficie, invece, ha un aspetto prevalentemente granulare (28,1%), mentre una piccola percentuale presenta indentature (6,2%).



Figura 33- Dettaglio del fenomeno di flaking nei frammenti di post-cranio. In alto, il fenomeno è presente in una perdita di sostanza a livello della tibia, mentre in basso in una soluzione di continuo a livello della clavicola

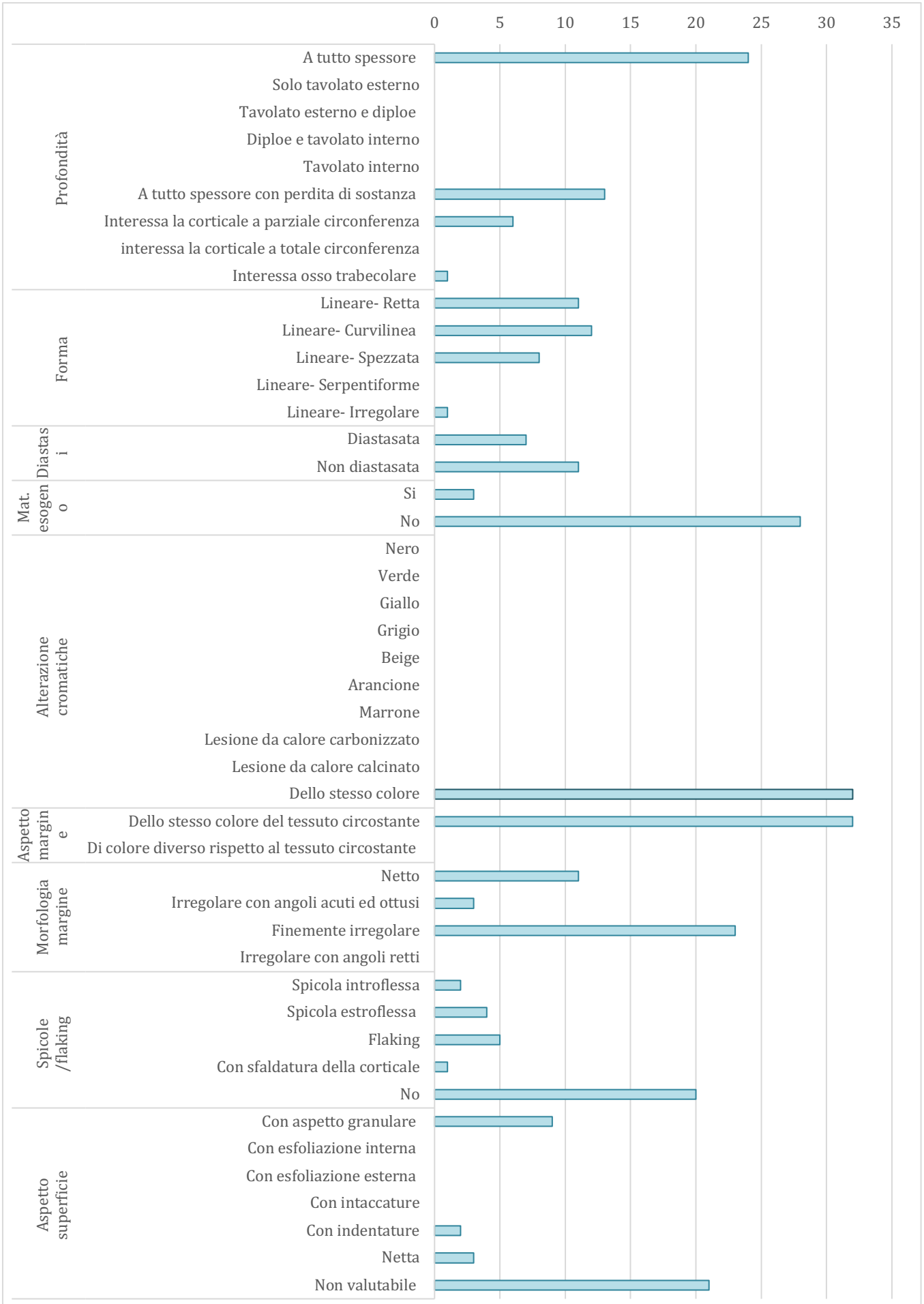


***Grafico 8**- Rappresentazione grafica che riassume la frequenza di ciascuna caratteristica riscontrata durante l'analisi delle soluzioni di continuo del post-cranio*

A titolo d'esempio, di seguito vengono riportate le caratteristiche morfologiche osservate in due soluzioni di continuo del post-cranio. Sono stati selezionati questi frammenti dal campione del disastro della diga del Vajont per un particolare aspetto, relativo alla presenza di materiale esogeno adeso alla superficie.

L'omero destro attribuito all'individuo denominato Erto 3 **(Figura 34)** presenta, in corrispondenza della fossa coronoidea, una lesione che interessa la corticale a parziale circonferenza. In prossimità della lesione non sono presenti alterazioni cromatiche e i margini sono dello stesso colore del tessuto circostante. L'elemento osseo presenta del materiale esogeno adeso **(Figura 35),** identificato grazie al microscopio a luce riflessa come un frammento di roccia.



Figura 34- Il frammento di omero destro attribuito all'individuo denominato Erto 3



Figura 35- Il frammento di materiale esogeno rinvenuto nella fossa coronoidea dell'omero destro di Erto 3

La clavicola destra attribuita all'individuo denominato Erto 2-1 **(Figura 36)** misura 14,3 cm di lunghezza e 1,7 cm di larghezza. In corrispondenza dell'estremità sternale, si osserva una lesione a tutto spessore con perdita di sostanza e forma prevalentemente lineare-spezzata. Il margine si presenta netto nella porzione anteriore e finemente irregolare nella porzione posteriore. Inoltre, a 5 cm dall'estremità sternale, in corrispondenza della porzione posteriore della clavicola **(Figura 37)** è presente un'altra lesione che presenta un andamento lineare-obliquo e del materiale esogeno adeso



Figura 36- Il frammento di clavicola destra attribuita all'individuo Erto 2-1



Figura 37- Materiale esogeno nella lesione posizionata a 5 cm dall'estremità sternale nella porzione posteriore della clavicola

La presenza di materiale esogeno di natura geologica è stata rivenuta anche nella tibia sinistra, attribuita all'individuo denominato Erto 1-2, e nell'ulna sinistra, attribuita all'individuo denominato Erto 3. In entrami i casi, la presenza di materiale è stata confermata mediante osservazione al microscopio.

La tibia sinistra, attribuita all'individuo denominato Erto 1-2, **(Figura 38)** presenta, in corrispondenza della diafisi, due soluzioni di continuo a tutto spessore, caratterizzate da perdita di sostanza. Le lesioni misurano una lunghezza massima di 2,5 cm e minima di 1,2 cm. Non si sono osservate alterazioni cromatiche, ma è stata rilevata la presenza di materiale esogeno di natura geologica **(Figura 39).** I margini risultano finemente irregolari, mentre la superficie presenta un aspetto granulare.



Figura 38- Il frammento di tibia sinistra attribuita all'individuo Erto 1-2



Figura 39- Il materiale esogeno individuato nella soluzione di continuo

L'ulna sinistra, attribuita all'individuo denominato Erto 3 **(Figura 40),** presenta, in corrispondenza dell'epifisi distale nell'estremità posteriore, una soluzione di continuo con andamento parallelo all'asse longitudinale dell'osso. La lesione misura 1,2 cm di lunghezza e interessa l'osso trabecolare. Non si sono osservate alterazioni cromatiche, ma è stata rilevata la presenza di materiale esogeno di natura geologica **(Figura 41).** I margini risultano finemente irregolari, mentre la superficie presenta un aspetto granulare.



Figura 40- Il frammento di ulna sinistra attribuita all'individuo Erto 3

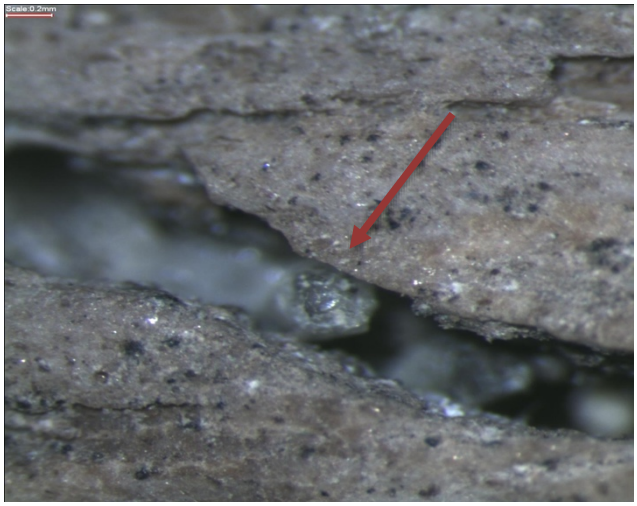


Figura 41- Il materiale esogeno individuato nella soluzione di continuo

Il grafico relativo alle perdite di sostanza del post-cranio (**Grafico 9)** è basato sull'analisi di 5 perdite di sostanza individuate nel campione. La maggior parte sono a tutto spessore (60%), mentre una interessa esclusivamente l'osso corticale (20%) e una è caratterizzata dall'esposizione dell'osso spugnoso (20%). Due perdite di sostanza (40%) presentano materiale esogeno adeso, mentre in nessun campione sono state individuate alterazioni cromatiche in prossimità della lesione. I margini sono prevalentemente finemente irregolare (80%), mentre la superficie ha sempre un aspetto principalmente granulare (60%), ad eccezione di due casi in cui essa appare diversa da tutte le categorie previste.

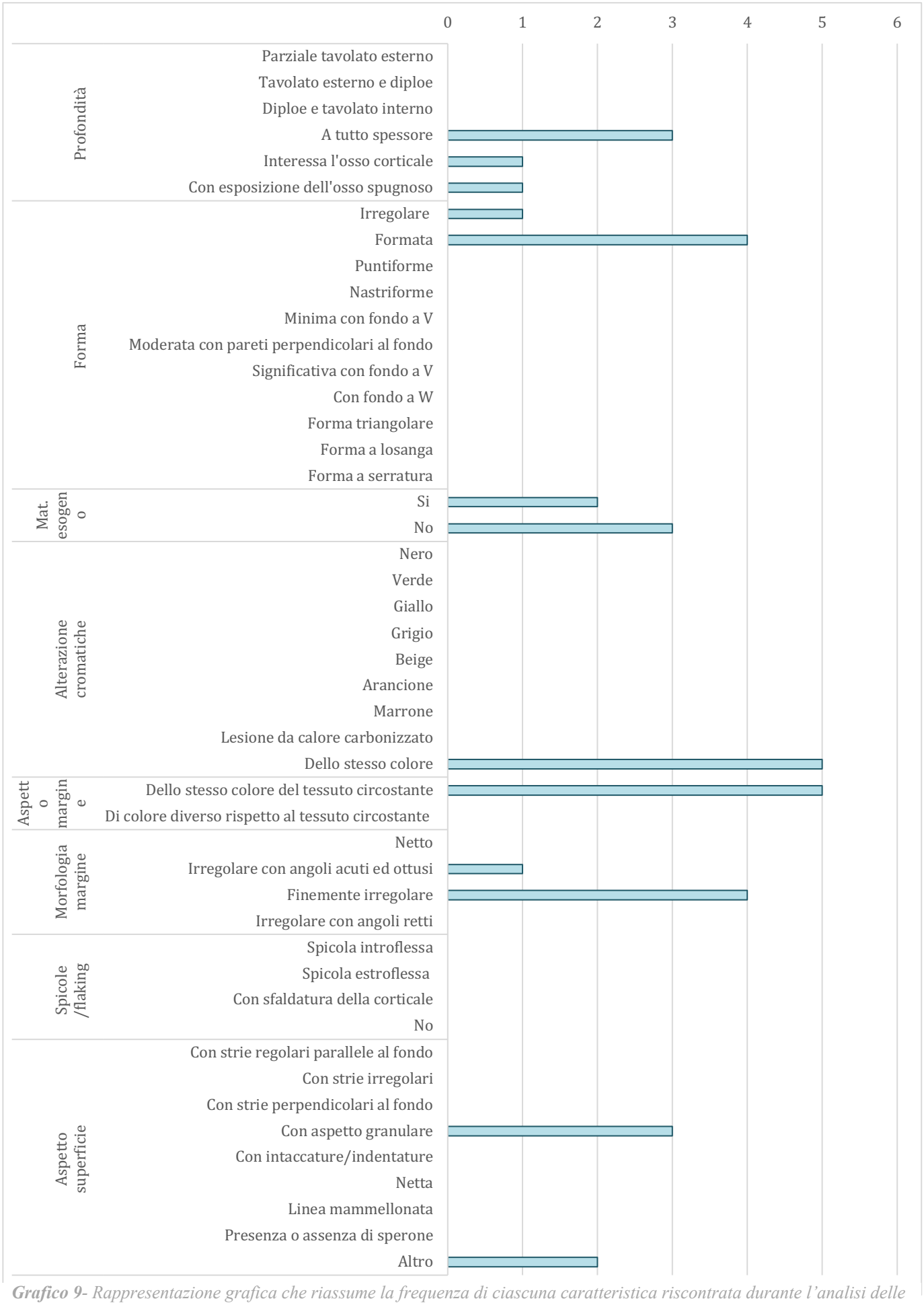


Grafico 9- *Rappresentazione grafica che riassume la frequenza di ciascuna caratteristica riscontrata durante l'analisi delle perdite di sostanza del post-cranio*

A titolo d'esempio, di seguito vengono riportate le caratteristiche morfologiche di una perdita di sostanza individuata a livello post-cranico nell'individuo denominato Erto 2-1. La lesione è stata selezionata nel campione relativo al disastro del Vajont per il suo peculiare aspetto morfologico, in quanto tale alterazione appare compatibile con un'interazione con materiale di natura non determinata, che ha interessato la corticale dell'osso.

La tibia destra dell'individuo Erto 2-1 **(Figura 42)** presenta una perdita di sostanza di forma ovalare, con dimensioni pari a 1,3 cm di lunghezza e 1,1 cm di larghezza. La lesione interessa la corticale a tutto spessore, affondando nella spugnosa sottostanze, non presenta materiale esogeno e mostra il margine dello stesso colore del tessuto circostante. Il margine si presenta finemente irregolare e la superficie mostra un aspetto granulare. In corrispondenza dell'estremità infero-posteriore è stata rilevata la presenza di flaking.

La forma ovalare della perdita di sostanza potrebbe essere riconducibile all'azione di materiale esogeno, probabilmente di natura geologica, che potrebbe essere stato successivamente perso, in quanto non è stato rivenuto durante l'osservazione. Inoltre, può anche essere possibile che la lesione sia stata prodotta da uno strumento dotato di una parte appuntita. Sebbene la morfologia della lesione risulti compatibile con le caratteristiche delle lesioni *perimortem*, non si può escludere che essa sia stata prodotta durante le operazioni di scavo e recupero dei corpi. I corpi, infatti, sono stati esumati e successivamente trasferiti in cassette di zinco, quindi tali operazioni potrebbero aver determinato la formazione della lesione.



***Figura 42**- La perdita di sostanza ovalare della tibia destra*

4.2.2 Valutazione delle fratture della diga del Vajont

La lesività osservata nelle fratture delle vittime del Vajont deve essere interpretata tenendo conto della particolare dinamica che ha causato l'evento. L'impatto della frana dal monte Toc nel bacino del Vajont non provocò solo la formazione di un'enorme onda d'acqua, ma determinò anche un potente spostamento d'aria. Infatti, *Kiersch (1964)* descrive come il rapido scivolamento della massa rocciosa abbia prodotto un moto ascensionale di aria, associato alla proiezione di acqua e materiale roccioso lungo le pareti della valle. L'autore riferisce inoltre che un potente *compressive air blast* precedette l'arrivo della principale massa d'acqua. Di conseguenza, i paesi vennero prima interessati dagli effetti dello spostamento d'aria e successivamente dall'impatto della massa d'acqua generata della frana (Kiersch, 1964).

L'*air blast* e la successiva azione della massa d'acqua possono esporre il corpo a differenti meccanismi traumatici. In una prima fase, il soggetto può essere investito direttamente dall'onda d'aria e dalla massa d'acqua, nonché da detriti e frammenti messi in movimento dall'evento. Successivamente, il trascinamento del corpo può determinare ulteriori lesioni dovute alla collisione contro strutture, superfici e oggetti presenti nell'ambiente circostante. Meccanismi traumatici analoghi sono descritti nella letteratura relativa alle lesioni da esplosione, nella quale vengono distinti gli effetti prodotti dalla proiezione di frammenti e quelli conseguenti allo spostamento del corpo e al successivo impatto contro superfici solide (Ramasamy et al., 2011; Galante et al., 2021). Inoltre, la presenza di lesioni muscoloscheletriche e di materiale estraneo nei tessuti è stata documentata anche nelle vittime di tsunami, evidenziando la complessità degli effetti traumatici associati a eventi caratterizzati dal movimento di grandi masse d'acqua (Kaewlai et al., 2009). Pertanto, le alterazioni scheletriche osservate nelle vittime del disastro del Vajont potrebbero riflettere la sovrapposizione di differenti meccanismi traumatici, rendendo difficile attribuire le singole lesioni all'azione di una sola forza.

La presenza di materiale esogeno su alcuni frammenti ossei potrebbe essere compatibile con il contatto con detriti e materiale roccioso messi in movimento dall'*air blast* e, soprattutto, dalla successiva massa d'acqua. Tale dinamica presenta alcune analogie con i meccanismi secondari descritti nella lesività da esplosione, nei quali materiali presenti nell'ambiente vengono proiettati contro il corpo (Ramasamy et al., 2011). Tuttavia, nel caso del Vajont, il materiale esogeno potrebbe essere stato depositato anche durante il trascinamento e il contatto con i detriti trasportati dall'acqua. Di conseguenza, la sua sola presenza non consente pertanto di stabilire né il meccanismo né il momento preciso della deposizione (Nistor et al., 2017).

Non sono state invece rilevate alterazioni ossee riconducibili all'esposizione al calore, e pertanto non sono presenti evidenze comparabili agli effetti quaternari descritti nell'ambito delle *blast injuries*.

4.3 Confronto diretto tra i due campioni

L'osservazione macroscopica dei frammenti ossei provenienti dall'incidente aereo di San Donato Milanese e dal disastro del Vajont ha evidenziato la presenza di alcune somiglianze nella forma dei frammenti e nell'aspetto dei margini e delle superfici di frattura. Ad esempio, le soluzioni di continuo del post-cranio osservate sia nel campione di San Donato Milanese sia nel campione nel disastro del Vajont sono prevalentemente a tutto spessore, con una forma lineare-retta e margini finimente irregolari, mentre la superficie ha prevalentemente un aspetto granulare.

È stata tuttavia osservata una differenza nelle dimensioni dei frammenti appartenenti ai due campioni. I frammenti cranici relativi ai resti delle tre vittime del disastro del Vajont presentano una lunghezza media di 9,8 cm e una larghezza media di 8,78 cm, mentre i frammenti post-cranici misurano una lunghezza media di 16,9 cm e una larghezza di 4 cm. Al contrario, i frammenti cranici provenienti dall'incidente di San Donato Milanese risultano essere mediamente di dimensioni inferiori, con una lunghezza media di 3,62 cm e una larghezza media di 3,40 cm. Anche i frammenti post-cranici mostrano dimensioni inferiori, con una lunghezza media di 5,17 cm e una larghezza media di 2,32 cm. Nel campione proveniente dall'incidente aereo di San Donato Milanese si osservano, sia a livello cranico sia post-cranico, dimensioni medie dei frammenti inferiori rispetto a quelle rilevate nelle tre vittime del disastro del Vajont. In termini biomeccanici, una maggiore energia assorbita dall'osso durante la frattura può determinare un aumento della comminuzione, con formazione di un maggior numero di frammenti di dimensioni inferiori (Anderson et al., 2005; Ramasamy et al., 2011). Tale relazione potrebbe contribuire a spiegare la maggiore frammentazione osservata nel campione di San Donato Milanese, caratterizzato da un impatto ad alta energia e da una complessa dinamica di decelerazione. Tuttavia, la sola dimensione dei frammenti non consente di quantificare né di confrontare direttamente l'energia trasferita nei due eventi, poiché la frammentazione ossea è influenzata da numerosi fattori biomeccanici e contestuali.

Tale interpretazione deve essere tuttavia considerata con cautela, in quanto il confronto delle dimensioni tra i due campioni potrebbe essere condizionato da un bias di selezione. Nel caso del disastro del Vajont, l'analisi ha preso in considerazione le lesioni *perimortem* presenti sull'intero scheletro delle vittime. Al contrario, nel campione relativo all'incidente di San Donato Milanese, i frammenti analizzati non comprendono l'intero insieme di quelli recuperati. Infatti, i frammenti di maggiori dimensioni, attribuiti alle singole vittime, sono stati restituiti alle rispettive famiglie.

L'analisi si è pertanto concentrata prevalentemente sui frammenti più piccoli che, a causa anche delle ridotte dimensioni e dell'assenza di elementi antropologicamente o odontologicamente utili all'identificazione, non sono stati attribuiti ad una specifica vittima e sono rimasti in custodia presso l'Istituto di Medicina Legale di Milano.

Per quanto riguarda, invece, le caratteristiche morfologiche delle lesioni, i frammenti presentano alcune caratteristiche sovrapponibili tra i due campioni. In entrambi i campioni, infatti, la maggior parte delle lesioni è a tutto spessore, con una forma lineare-retta o irregolare, margini finemente irregolari o irregolari con angoli acuti ed ottusi e superfici di frattura caratterizzate prevalentemente da un aspetto granulare **(Figura 43 a e b).**
La presenza di tali caratteristiche comuni può essere correlata al fatto che gli eventi traumatici ad alta energia possono determinare quadri lesivi complessi, caratterizzati dalla presenza di molteplici meccanismi traumatici. Nel caso dei due eventi analizzati, alcuni di questi meccanismi potrebbero essere condivisi e contribuire alla produzione di caratteristiche morfologiche sovrapponibili. Tale interpretazione è coerente con quanto riportato in letteratura, secondo cui eventi traumatici differenti possono produrre caratteristiche sovrapponibili anche in presenza di dinamiche differenti e, di conseguenza, è necessario considerare anche il quadro complessivo delle lesioni e il contesto dell'evento (Blau et al., 2018; Palmiotto et al., 2020).

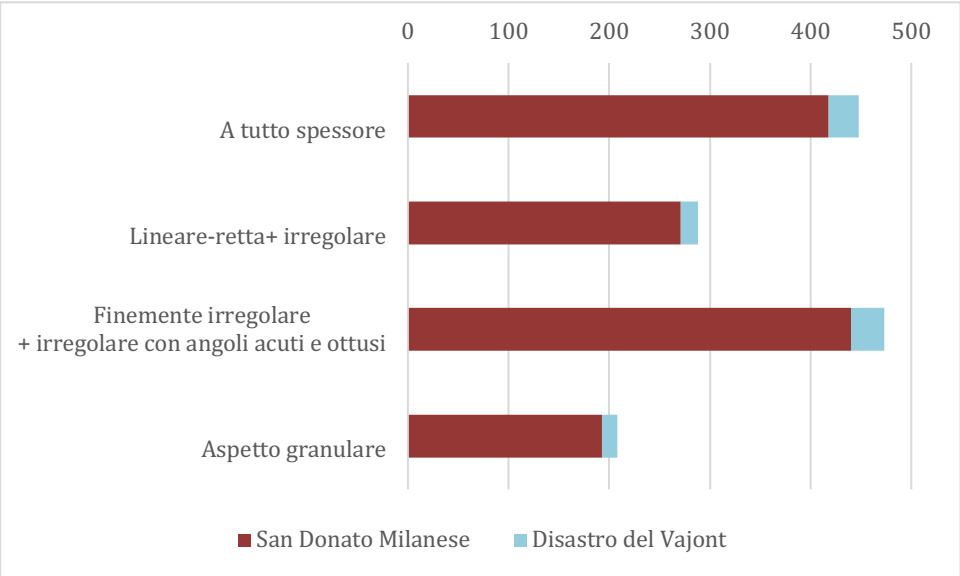


Figura 43a – Variabilità numerica delle caratteristiche morfologiche delle soluzioni di continuo del cranio tra i frammenti di San Donato Milanese e il disastro del Vajont

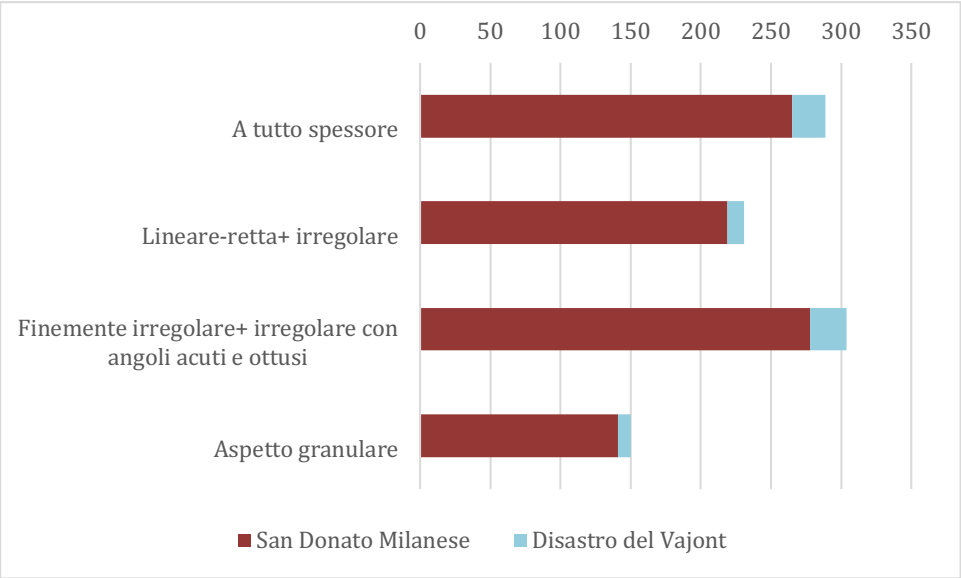


Figura 43b – Variabilità numerica delle caratteristiche morfologiche delle soluzioni di continuo del post-cranio tra i frammenti di San Donato Milanese e il disastro del Vajont

Inoltre, in entrambi i campioni è stata rilevata la presenza di materiale esogeno adeso alla superficie delle lesioni. Tale caratteristica può essere ricondotta agli effetti secondari associati alla lesività da esplosione, i quali sono determinati principalmente dalla proiezione di detriti e frammenti che, in seguito all'esplosione, possono entrare in contatto con il corpo. Nel caso dell'incidente di San Donato Milanese, la presenza di tale materiale è riconducibile all'esplosione che si è verificata a seguito dello schianto dell'aereo. Nel caso del disastro del Vajont, invece, la presenza di materiale esogeno è riconducibile alla propagazione dei detriti determinata dall'onda d'urto che ha preceduto l'arrivo della grande massa d'acqua. A ciò si aggiunge l'azione della massa d'acqua stessa che ha trasportato con sé detriti e frammenti rocciosi di varia natura. (Ramasamy et al., 2011; Kiersch, 1964).

Nonostante questa caratteristica in comune, nei frammenti appartenenti al campione del disastro del Vajont non sono state osservate lesioni riconducibili agli effetti quaternari. A differenza dell'incidente aereo di San Donato Milanese, infatti, non si è verificata un'esplosione e, di conseguenza, non sono state osservate alterazioni ossee riconducibili all'azione del calore.

CONCLUSIONI

Il presente studio ha permesso di analizzare e confrontare la lesività scheletrica osservata in due disastri di massa caratterizzati da eventi ad alta energia: l'incidente di San Donato Milanese e il disastro del Vajont. Nonostante la profonda diversità delle rispettive dinamiche, il confronto ha evidenziato alcune caratteristiche morfologiche ricorrenti in entrambi i campioni, tra cui lesioni prevalentemente a tutto spessore, forme lineari-rettilinee o irregolari, margini finemente irregolari o irregolari con angoli acuti e ottusi e superficie di frattura con aspetto granulare.

La presenza di caratteristiche parzialmente sovrapponibili suggerisce che, negli eventi ad alta energia, dinamiche differenti possano produrre esiti scheletrici simili quando il corpo viene sottoposto all'azione combinata di più forze e a una successione di eventi traumatici. Ne consegue che la morfologia di una singola frattura non può essere considerata, isolatamente, indicativa di uno specifico meccanismo lesivo. Tale osservazione assume particolare rilevanza nei disastri di massa, nei quali impatti, accelerazioni e decelerazioni, trascinamento, proiezione di detriti e collisioni con elementi dell'ambiente possono concorrere alla formazione del quadro traumatico complessivo.
Accanto alle analogie, i due campioni hanno mostrato anche alcune differenze. I resti provenienti dall'incidente di San Donato Milanese presentano una frammentazione più marcata e dimensioni medie dei frammenti inferiori rispetto al campione del Vajont. Questo dato è compatibile con una maggiore frammentazione scheletrica, ma non consente di per sé di quantificare o confrontare direttamente l'energia trasferita nei due eventi. L'interpretazione deve inoltre tenere conto della diversa composizione dei campioni, poiché quello di San Donato Milanese è costituito prevalentemente da frammenti non attribuiti alle singole vittime, mentre per il Vajont è stato possibile valutare le lesioni nell'ambito di scheletri maggiormente rappresentati.

Nel campione di San Donato Milanese, la presenza di materiale esogeno e di alterazioni cromatiche da esposizione termica documenta l'interazione dei resti con elementi presenti sulla scena e con l'incendio sviluppatosi successivamente all'impatto. Nel campione del Vajont, invece, la presenza di materiale esogeno deve essere interpretata nel contesto della complessa dinamica determinata dallo spostamento d'aria, dalla massa d'acqua e dai detriti mobilizzati durante l'evento.

In entrambi i casi, tuttavia, la sola presenza di materiale estraneo sull'osso non consente di ricostruire in maniera univoca il momento o il meccanismo attraverso il quale esso sia entrato in contatto con il reperto. Nel complesso, i risultati ottenuti evidenziano come nessuna singola caratteristica lesiva possa essere considerata diagnostica di uno specifico evento traumatico. L'interpretazione antropologico-forense deve piuttosto basarsi sulla valutazione integrata dell'intero quadro scheletrico, considerando congiuntamente la morfologia e la distribuzione delle lesioni, il grado e le modalità di frammentazione, l'eventuale presenza di materiale esogeno, le alterazioni associate e i dati circostanziali disponibili. In questa prospettiva, l'analisi sistematica del pattern traumatico può rappresentare un importante strumento di supporto alla ricostruzione della dinamica dell'evento, pur non costituendo un criterio diagnostico autonomo. Questo riflette bene anche l'impostazione teorica della tesi, secondo cui negli eventi ad alta energia il pattern dipende dall'interazione tra intensità, direzione, velocità e sequenza delle forze applicate al corpo.

Infine, il presente studio rappresenta un primo contributo alla caratterizzazione antropologica della lesività scheletrica in contesti di disastro ad alta energia caratterizzati da dinamiche differenti. L'ampliamento della casistica, attraverso campioni più numerosi e maggiormente comparabili, potrà consentire di verificare la ricorrenza delle caratteristiche osservate e di valutarne con maggiore precisione il significato interpretativo. Particolare interesse potrebbe inoltre derivare dall'integrazione dell'analisi macroscopica con indagini microscopiche delle superfici di frattura e con tecniche analitiche finalizzate alla caratterizzazione del materiale esogeno, così da approfondire ulteriormente l'interazione tra dinamica dell'evento e risposta del tessuto osseo.

BIBLIOGRAFIA

Blau S. How traumatic: A review of the role of the forensic anthropologist in the examination and interpretation of skeletal trauma. *Aust J Forensic Sci*. (2017) 49:261–280.

Blau S, Ranson D, O'Donnell C. *An atlas of skeletal trauma in medico-legal contexts*. 1st ed. London: Elsevier/Academic Press; (2018). Chapter 4, High-energy, blunt-force trauma: Motor Vehicle (MV) incidents, pp. 275–394, doi:10.1016/B978-0-12-803759-1.00004-7. Chapter 5, High-energy, blunt-force trauma: Aviation (AV) incidents, pp. 395–470.

Below, R, Wirtz, A, & Guha-Sapir, D (2009). *Disaster Category Classification and Peril Terminology for Operational Purposes* (Working Paper No. 264). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) & Munich Reinsurance Company.

Berryman, HE & Symes, SA (1998). Recognizing Gunshot and Blunt Cranial Trauma Through Fracture Interpretation. In K.J. Reichs (ed.), *Forensic Osteology: Advances in the Identification of Human Remains*, 2nd ed., pp. 333–352. Charles C. Thomas, Springfield

Borrini, M, Mariani, PP, Murgia, C, Rodriguez, C, & Tumbarello MV. (2012). Contextual Taphonomy: Superficial Bone Alterations as Contextual Indicators. *Journal of Biological Research*, *85*(1), 217–219

Cattaneo C. Forensic anthropology: Developments of a classical discipline in the new millennium. *Forensic Sci Int*. (2007) 165:185–193.

Cattaneo C, Porta D. Trauma analysis of skeletal remains. In: Jamieson A, Moenssens A, eds. *Wiley encyclopedia of forensic science*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd; (2009).

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2022, March). *Technological disasters: Trends & transport accidents* (Cred Crunch Issue No. 65). UCLouvain

Christensen AM, Smith VA. Rib butterfly fractures as a possible indicator of blast trauma. *J Forensic Sci*. (2013) 58–S4.

Cohen H, Kugel C, May H, Medlej B, Stein D, Slon V, Epstein Y, Hershkovitz I. The impact velocity and bone fracture pattern: Forensic perspective. *Forensic Sci Int*. (2016) 266:54–62.

Concato, M, Di Stefano B, Vetrini R, Carnio A, Franzoni ML, Calvano MG, Sorçaburu Ciglieri S, Introna F, & Fattorini P. (2026). Forensic Analysis of Skeletal Remains Recovered from the Second World War Mass Grave of Ossero: From Biases to Uncertainties. *Forensic Sciences*, *6*(1), articolo 21.

De Boer HH, Blau S, Delabarde T, Hackman L. The role of forensic anthropology in disaster victim identification (DVI): Recent developments and future prospects. *Forensic Sci Res*. (2019) 4:303–315.

De Boer HH, Roberts J, Delabarde T, Mundorff AZ, Blau S. Disaster victim identification operations with fragmented, burnt, or commingled remains: Experience-based recommendations. *Forensic Sci Res*. (2020) 5:191–201.

Fernández García A, Cernuda Martínez JA, Arcos González P. The epidemiological profile and morbidity-mortality patterns of technological disasters in Europe from 2000 to 2021. *Public Health*. 2025;240:125-130

Galante N, Franceschetti L, Del Sordo S, Casali MB, Genovese U. Explosion-related deaths: An overview on forensic evaluation and implications. *Forensic Sci Med Pathol*. (2021) 17:437–448.

Gitajn IL, Rodriguez EK. Biomechanics of musculoskeletal injury. In: Klika V, ed. *Biomechanics in applications*. Rijeka: InTech; (2011).

Hansen U, Zioupos P, Simpson R, Currey JD, Hynd D. The effect of strain rate on the mechanical properties of human cortical bone. *J Biomech Eng*. (2008) 130:011011.

Hull JB, Cooper GJ. Pattern and mechanism of traumatic amputation by explosive blast. *J Trauma*. (1996) 40–S205.

Kaewlai R, Meennuch W, Srisuwan T, Prasitvoranant W, Yenarkarn P, Chuapetcharasopon C. Imaging in tsunami trauma. *J Med Ultrasound*. (2009) 17:1–8.

Kaewlai R, Srisuwan T, Prasitvoranant W, Aksornprompan S, Chiewvit P. Radiologic findings in tsunami trauma: Experience with 225 patients injured in the 2004 tsunami. *Emerg Radiol*. (2007) 14:395–402.

Kiersch, GA (1964). Vaiont Reservoir Disaster: Geologic causes of tremendous landslide accompanied by destructive flood wave. *Civil Engineering*, 34(3), 32–39.

Kranioti E. Forensic investigation of cranial injuries due to blunt force trauma: Current best practice. *Res Rep Forensic Med Sci*. (2015) 5:25–37.

Love JC, Wiersema JM. Skeletal trauma: An anthropological review. *Acad Forensic Pathol*. (2016) 6:463–477.

Márquez-Grant N, Webster H, Dussault MC, Harris M, Roberts J, Errickson D, Sanabria Medina C. Identifying blast trauma in the human skeleton: Applications for forensic anthropology. In: Shvedchikova T, Barone M, Moggadham N, eds. *Crimes in the past: Archaeological and anthropological evidence*. Oxford: Archaeopress; (2021) pp. 206–243.

McCormick K, Palmiotto A, Freas LE. Interpreting perimortem blast trauma from skeletal remains: Complications and considerations. *J Forensic Sci*. (2023) 68:1359–1371.

Mondello C, Baldino G, Bottari A, Cardia L, Asmundo A, Ventura Spagnolo E, Sapienza D. The role of PMCT for the assessment of the cause of death in natural disaster (landslide and flood): A Sicilian experience. *Int J Legal Med*. (2022) 136:237–244.

Moraitis K, Spiliopoulou C. Identification and differential diagnosis of perimortem blunt force trauma in tubular long bones. *Forensic Sci Med Pathol*. (2006) 2:221–230.

Nasir, MU, Chandy, PE, Roberts, J & O'Neill, S. B. (2021). A guide to mass casualty incidents for radiology residents: Strategies, ethics, directions. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, 50 (4), 555–559.

Nistor I, Goseberg N, Stolle J. Tsunami-driven debris motion and loads: A critical review. *Front Built Environ*. (2017) 3:2.

Palmiotto A, Van Deest TL, McCormick K, Freas L. Blast and aircraft crash trauma: A selection of WWII cases from the Defense POW/MIA Accounting Agency Laboratory. *J Forensic Sci*. (2020) 65:1806–1819.

Passalacqua NV, Rainwater CW. *Skeletal trauma analysis: Case studies in forensic anthropology*. Chichester: John Wiley & Sons; (2015) pp. 1–18.

Prasartritha T, Tungsiripat R, Warachit P. The revisit of 2004 tsunami in Thailand: Characteristics of wounds. *Int Wound J*. (2008) 5:8–19.

Ramasamy A, Hill AM, Masouros S, Gibb I, Bull AMJ, Clasper JC. Blast-related fracture patterns: A forensic biomechanical approach. *J R Soc Interface*. (2011) 8:689–698.

Wiersema JM, Woody A. The forensic anthropologist in the mass fatality context. *Acad Forensic Pathol*. (2016) 6:455–462.

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine alla ***dottoressa Giulia Caccia*** e alla ***professoressa Cristina Cattaneo***, per avermi accompagnato con disponibilità, attenzione ed estrema competenza durante la realizzazione del progetto. Il loro supporto, i consigli e gli insegnamenti ricevuti hanno rappresentato un importante contributo non solo nella stesura della tesi, ma anche nella mia crescita personale e professionale.

Un sentito grazie va al ***professore Stefano Vanin***, per la supervisione, la disponibilità e l'attenzione con cui ha seguito questo percorso. Ringrazio infine il ***professore Fabio Ghiotto*** per il tempo dedicato a questo lavoro e per il suo contributo alla conclusione di questo percorso.