



Ciència Forense

cejfe

Estudi de les fractures d'ós llarg per projectil d'arma de foc

Ajut a la investigació 2022

Autor

Joan Ignasi Galtés Vicente
Xavier Jordna Comín
Maria Luisa Ortega Sánchez

Any 2023



Generalitat de Catalunya
**Centre d'Estudis Jurídics
i Formació Especialitzada**

El Centre d'Estudis Jurídics i Formació Especialitzada ha editat aquesta recerca respectant el text original dels autors, que en són responsables de la correcció lingüística.

Les idees i opinions expressades en la recerca són de responsabilitat exclusiva dels autors, i no s'identifiquen necessàriament amb les del Centre d'Estudis Jurídics i Formació Especialitzada.

Avis legal



Els continguts d'aquesta obra estan subjectes a una llicència de Reconeixement_no Comercial_Sense Obra derivada 4.0. Internacional (CC BY-NC-ND 4.0) de Creative Commons. Se'n permet la reproducció, la distribució i la comunicació pública sempre que se'n citi el titular dels drets (Generalitat de Catalunya, Centre d'Estudis Jurídics i formació Especialitzada) i no se'n faci un ús comercial. Aquesta obra no es pot transformar per generar obres derivades. La llicència completa es pot consultar a: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

© **Generalitat de Catalunya**
Centre d'Estudis Jurídics
i Formació Especialitzada

Resum

La interpretació de lesions òssies per projectil d'arma de foc en casos de cadàver en mal estat o restes esquelètiques, representen un repte important pel patòleg i antropòleg forense. Tot i que existeix literatura sobre les lesions resultants a crani, les lesions a l'os llarg no han estat suficientment estudiades i actualment el diagnòstic continua sent un desafiament per al professional que s'hi enfronta. Aquest estudi proposa realitzar i implementar el disseny experimental d'un test balístic per reproduir fractures per projectil d'arma de foc en os llarg humà, a fi de caracteritzar el patró de fractura resultant. La mostra utilitzada considera els tres models experimentals possibles: 5 exemplars sintètics, 5 fèmurs de cérvol comú i 5 húmer humans procedents de donants. L'estudi ha permès construir un dispositiu de subjecció axial per col·locar l'espècimen ossi en posició vertical estàtica mentre s'efectua el tret, així com elaborar un motlle de gelatina balística que simula la presència de parts toves rodejant l'os. Els resultats obtinguts permeten disposar de 5 exemplars sintètics, 4 d'animals i 5 d'humans disparats en condicions controlades de laboratori. En tots els casos, els húmer humans presenten un patró de fractura primària i secundàries, configurant una fractura comminuta estrellada. En el cas dels fèmurs animals, ha estat impossible reconstruir la fractura primària, essent la resta anàloga al resultat humà. En un futur, disposar d'aquesta mostra i ampliar-la, permetrà aprofundir en la biomecànica de la fractura de l'os llarg associada a projectil d'arma de foc.

Descriptors: patologia forense, antropologia forense, traumatismes per arma de foc, lesió balística, perimortalitat

Resumen

La interpretación de lesiones óseas por proyectil de arma de fuego en casos de cadáver en mal estado o restos esqueléticos, representan un reto importante para el patólogo y antropólogo forense. Aunque existe literatura sobre las lesiones resultantes en cráneo, las lesiones en el hueso largo no han sido suficientemente estudiadas y actualmente el diagnóstico sigue siendo un desafío para el profesional. Este estudio propone realizar e implementar el diseño experimental de un test balístico para reproducir fracturas por proyectil de arma de fuego en hueso largo humano, a fin de caracterizar el patrón de fractura resultante. La muestra utilizada considera los tres modelos experimentales posibles: 5 ejemplares sintéticos, 5 fémures de ciervo común y 5 húmeros humanos procedentes de donantes. El estudio ha permitido construir un dispositivo de sujeción axial para colocar el espécimen óseo en posición vertical estática mientras se efectúa el disparo, así como elaborar un molde de gelatina balística que simula la presencia de partes blandas rodeando el hueso. Los resultados obtenidos permiten disponer de 5 ejemplares sintéticos, 4 animales y 5 humanos disparados en condiciones controladas de laboratorio. En todos los casos, los húmeros humanos presentan un patrón de fractura primaria y secundarias, configurando una fractura conminuta estrellada. En el caso de los fémures animales, ha sido imposible reconstruir la fractura primaria, siendo el resto análogo al resultado humano. En un futuro, disponer de esta muestra y ampliarla permitirá profundizar en la biomecánica de la fractura del hueso largo asociada a proyectil de arma de fuego.

Descriptor: patología forense, antropología forense, traumatismos por arma de fuego, lesión balística, perimortalidad

Abstract

The interpretation of bone injuries by a firearm projectile in cases of a corpse in poor condition or skeletal remains, represent a major challenge for the pathologist and forensic anthropologist. Although there is literature on the resulting injuries to the skull, injuries to the long bone have not been sufficiently studied and currently the diagnosis remains a challenge for the professional who faces them. This study proposes to carry out and implement the experimental design of a ballistic test to reproduce fractures by a firearm projectile in a human long bone, in order to characterize the resulting fracture pattern. The sample used considers the three possible experimental models: 5 surrogate specimens, 5 deer femurs and 5 human humeri from donors. The study has made it possible to construct an axial clamping device to place the bone specimen in a static vertical position while the shot is being fired, as well as to develop a ballistic gelatin mold that simulates the presence of soft tissues surrounding the bone. The results obtained make it possible to have 5 synthetic specimens, 4 of animals and 5 of humans shot in controlled laboratory conditions. In all cases, human humeri show a primary and secondary fracture pattern, forming a comminuted stellate fracture. In the case of animal femurs, it has been impossible to reconstruct the primary fracture, the rest being analogous to the human result. In the future, having this sample and expanding it will allow us to get further knowledge about the biomechanics of the long bone fracture associated with firearm injuries.

Descriptors: forensic pathology, forensic anthropology, gunshot trauma, ballistic trauma, perimortem

Índex

1. Introducció	5
2. Objectius	8
3. Marc teòric	8
3.1. Fractures diafisàries	8
3.2. Fractures a metàfisi i epífisi d'os llarg	10
3.3. Fractures indirectes	11
4. Hipòtesis	12
5. Metodologia	12
5.1. Entitats implicades	12
5.2. Investigadors principals	12
5.3. Mostres	13
5.4. Aspectes metodològics particulars	14
5.4.1. Tests balístics	14
5.4.2. Anàlisi de fractures en l'os fresc	15
5.4.3. Aspectes ètics	16
5.5. Cronograma i desenvolupament de la recerca	16
6. Resultats	19
6.1. Disseny experimental	19
6.1.1. Mostra	19
6.1.2. Simulació de parts toves: blocs de gelatina	21
6.1.3. Equipament per a la realització de la prova balística	25
6.1.4. Prova balística i resultats en os sintètic	29
6.1.5. Esqueletització d'exemplars biològics (humans i animals)	33
6.2. Caracterització macroscòpica del patró de fractura en os llarg humà	34
6.3. Caracterització histològica de patró de fractura en os llarg humà	38
6.4. Caracterització macroscòpica del patró de fractura en os animal	38
6.5. Limitacions	40
7. Conclusions	41
8. Propostes	42
8.1. Implicacions dels resultats obtinguts	42
8.2. Propostes de futur	44
9. Referències bibliogràfiques	44

1. Introducció

La medicina forense és una especialitat mèdica que, dins de les ciències forenses, aplica l'experiència i els coneixements científics i concretament mèdics als diferents àmbits del dret.

La recerca en el camp de la medicina forense, igual que en totes les especialitats mèdiques, és necessària per tal d'adaptar els estàndards de qualitat al desenvolupament tècnic i al coneixement actuals. La investigació en medicina forense s'ha caracteritzat tradicionalment per dades obtingudes a partir d'observacions d'un cas clínic (*case report*) (Covas-Cerdà i Galtés, 2020). La preferència per a aquest format en els resultats d'investigacions forenses és fonamentalment derivat de les barreres ètiques que fan que el treball experimental i la simulació d'esdeveniments traumàtics sigui difícil o impossible (Madea, 2007). Tenint en compte el baix nivell d'evidència científica que aporten els casos clínics, la investigació experimental d'alta qualitat s'ha convertit en un objectiu molt necessari en medicina forense (Madea et al. , 2007).

Les lesions òssies per projectil d'arma de foc són un important element d'estudi forense, especialment en cadàvers en mal estat o restes esquelètiques, útil per a la reconstrucció de la causa i sobretot les circumstàncies de la mort. Tot i que existeix força literatura sobre les lesions resultants a crani, les lesions a l'os llarg no han estat suficientment estudiades i actualment el diagnòstic continua sent un repte per al professional que s'hi enfronta, disposant, d'altra banda, de pocs elements de certesa per establir una bona correlació entre les variables balístiques i el traumatisme ossi resultant. Aquest estudi pretén aprofundir en aquestes qüestions des d'un vessant experimental.

La balística és la ciència de la mecànica de la trajectòria, el comportament i els efectes del projectil disparat per una arma de foc. La lesió balística és el resultat de l'impacte i comportament del projectil dins dels teixits corporals. La gravetat del traumatisme balístic depèn de les característiques i la interacció entre el projectil i el teixit (Hollermann et al., 1990). Es considera que la massa, la forma, la velocitat, l'eix, l'orientació i la deformació del projectil estan relacionats

directament amb l'energia que transferida als teixits es tradueix amb lesió (Cooper i Ryan, 1990).

L'estudi dels efectes del projectil sobre els teixits tous (pell, múscul, òrgans interns) és la font principal de coneixement en patologia forense (DiMaio, 2015; Saukko i Knight, 2015). L'examen dels teixits tous, no només permet plantejar el diagnòstic diferencial amb altres mecanismes lesius, sinó que proporciona informació essencial per a la reconstrucció dels esdeveniments associats a la lesió, com ara interpretar la distància i la direcció del tret (DiMaio, 2015; Saukko i Knight, 2015). Tanmateix, en casos on aquests teixits tous no hi són o no són suficientment informatius, cas de les restes esqueletitzades o dels cadàvers en mal estat (descomposició, esquarteraments, carbonització), se'ns planteja una important limitació a l'hora d'obtenir evidències forenses, havent de recórrer a l'estudi de l'os, com a única evidència disponible (Sorg i Haglund, 1996; Sauer, 1998). D'aquesta manera, tots els estudis dirigits a generar coneixement interpretatiu de lesions traumàtiques a partir del teixit esquelètic són de gran valor, doncs ajuden a incrementar el potencial diagnòstic i la confiança de les conclusions forenses (Galtés 2013; Cappella et al, 2014).

A nivell ossi, les lesions per projectil d'arma de foc causen freqüentment diversos tipus de fractura (Dougherty i Najibi, 2006). Mentre que en el crani aquestes fractures estan força ben documentades i els patrons resultants admeten un alt nivell d'inferència forense, a nivell d'os llarg (ossos d'extremitats) el coneixement és més restringit i la literatura més limitada (Berryman i Symes, 1998; Smith et al., 1987, 2003; Quatrehomme i Istanbul, 1997). Tot i que els traumatismes per arma de foc a extremitats rarament són la causa de la mort, sí que són una bona font de coneixement quan es pretén reconstruir la dinàmica de les lesions. Bland-Sutton, (1915) descriu els següents tipus de fractura per arma de foc: (1) fractura transversal de la diàfisi, (2) fractura perforant, (3) fractura i impactació del projectil en l'os, (4) fractura comminuta o en papallona de la diàfisi, i (5) fractura comminuta epifisaria. Tanmateix, la balística ha canviat molt en 100 anys i cal una actualització d'aquests efectes lesius.

Considerant treballs més recents sobre aquesta temàtica, la majoria es situen sobretot en el pla descriptiu (Berryman i Gunther, 2000; Dougherty et al., 2009;

Long et al., 2003; Ryan et al., 1981), hi ha pocs estudis experimentals, i la major part s'han realitzat en models animals (Henwood i Applebv -Thomas, 2020; Kieser et al., 2013; Kneubuehl i Thali, 2003; Zhang et al., 2015) i material plàstic simulador d'os (Bir et al, 2016; Henwood i Applebv, 2020; Kneubuehl i Thali, 2003). Només una minoria utilitzen ossos humans frescos, i estan sobretot centrats en l'estudi de variables balístiques, radiològiques i els efectes traumàtics s'analitzen fonamentalment a nivell d'epífisis, essent aquesta regió poc informativa pel que fa a les exigències forenses (Galtés, 2019). En aquest sentit, Huelke et al. (1967, 1968a, 1968b) van utilitzar esferes d'acer de diverses mides i velocitats per a determinar la quantitat d'energia perduda pels projectils després de l'impacte. Ragsdale i Josselson (1988) analitzen els efectes lesius a nivell d'epífisis distals de fèmur i tibia. Robens i Küsswetter (1982) caracteritzen radiològicament les fractures metafisàries de la tibia en humans. Coudane et al. (1982) utilitzen armes de caça per produir lesions a les extremitats de dos cossos i també les caracteritzen radiològicament. Més recentment, Dougherty et al. (2011) van investigar les lesions indirectes produïdes pel pas a distància de projectils disparats sobre diàfisis femorals de cadàvers. Per últim, Bir et al. (2016) estudien la probabilitat de fractura en funció de la velocitat del projectil i del seu efecte (impacte) directe i indirecte experimentant sobre 36 fèmurs humans i 24 ossos sintètics de poliuretà (Synbone®). Els autors assenyalen la semblança entre els dos tipus de mostres, tanmateix, no acaben de poder validar la fiabilitat del model sintètic, doncs no aconsegueixen reproduir fractures en tots els exemplars de la mostra. D'altra banda, i pel que fa a les mostres humanes, observen gran variabilitat de resposta que atribueixen a la possible heterogeneïtat ontogenètica de les mostres, sobretot edat, sense poder descartar patologia subjacent.

Com veiem doncs, els pocs estudis experimentals en humans que s'han realitzat, s'omet l'estudi descriptiu pròpiament de la tipologia fracturària i, sobretot, veiem que queda al marge l'objectiu d'identificar un patró distintiu de característiques òssies que es puguin relacionar directament amb l'acció d'un projectil d'arma de foc. Com hem comentat, aquest coneixement seria de gran utilitat en l'àmbit de les ciències forenses i particularment en la Patologia i l'Antropologia forense, sobretot pel que fa al potencial de diagnosticar lesions per arma de foc en restes

esquelètiques i cadàvers en mal estat. En aquests casos, és molt important disposar de protocols validats científicament que permetin reconèixer el mecanisme lesiu i inferir-ne les circumstàncies en les que s'ha produït.

2. Objectius

- 1) Realitzar i implementar el disseny experimental del test balístic per reproduir fractures per projectil d'arma de foc en os llarg humà en condicions in vitro.
- 2) Caracteritzar macroscòpicament el patró de fractura en os llarg humà resultant de l'acció d'un projectil d'arma de foc.
- 3) Caracteritzar histològicament el patró de fractura en os llarg humà resultant de l'acció d'un projectil d'arma de foc.
- 4) Caracteritzar macroscòpicament el patró de fractura en os animal resultant de l'acció d'un projectil d'arma de foc.

3. Marc teòric

A l'hora de descriure els patrons de fractures d'ossos llargs resultants d'un traumatisme per arma de foc, els autors fan una distinció entre les fractures diafisàries i les metafisis/epifisàries. Les fractures directes i indirectes també es tracten per separat. Els primers són causats per un impacte directe de bala a l'os. Les fractures indirectes són causades per les forces transferides per una bala sobre el teixit tou adjacent a l'os.

3.1. Fractures diafisàries

Les fractures a la diàfisi femoral són les lesions més reportades tant en estudis mèdics com forenses sobre traumatismes per arma de foc als ossos llargs (Dougherty et al., 2009). Les publicacions mèdiques solen informar de patrons generals de fractura, com ara fractures lineals, obliqües i comminutes que no són específiques del trauma per arma de foc (Müller et al., 1990).

Les fractures lineals es produeixen amb bales perforants i poden estendre's des del punt d'impacte fins als extrems de la diàfisi, recorrent tota la longitud de l'eix.

Les fractures obliqües són fractures que danyen diagonalment l'os. Poden provocar una línia de fractura però també la separació diagonal de l'os en dues peces (Ryan et al. 1981; Dougherty et al., 2009). Les fractures comminutes (separació d'os en més de dues peces), sovint amb fragmentació severa, són el tipus de fractura més freqüent relacionada amb el trauma per arma de foc (Symes et al., 2012). Quan la fragmentació és menys severa, s'han informat fractures més detallades i específiques com una fractura en papallona, fractura de perforació, defecte de forat de pany o fractura de divot (mantenint la terminologia anglesa per manca de mot adequat).

Una fractura en papallona representa una combinació de dues fractures obliqües, que donen lloc a un fragment en forma de falca. El terme fractura en papallona també es veu en el trauma contundent, on l'os es trenca perquè no pot compensar les forces de flexió a l'àrea d'impacte (Reber i Simmons, 2015). Com que es creu que el procés biomecànic de la força contundent i el trauma de bala és diferent, el terme falsa papallona es va utilitzar en articles recents per a la fractura produïda per bala (Martrille i Symes, 2019). Una fractura en doble de papallona, que és l'ocurrència de més de dues fractures obliqües radiants originades en el punt d'impacte d'una sola bala i que formen dos fragments en forma de falca, també es va informar com una altra fractura comuna relacionada amb un trauma diafisari per arma de foc. Les fractures de perforació, també anomenades fractures perforades (Smith et al., 2003) o fractures plug-and-spall (Symes et al., 2012), generalment impliquen el desplaçament d'una peça cilíndrica d'os. El forat és similar al con de percussió, la qual cosa implica el mateix mecanisme, però dona lloc a una forma diferent. El conus de percussió té forma internament de conus i s'eixampla cap al costat de sortida. Les fractures esmentades anteriorment són defectes localitzats i generalment es manté la integritat de l'os circumdant. Tot i ser més freqüents a l'epífisi, també poden aparèixer a la diàfisi i, per tant, s'esmenten sota aquest epígraf. Ryan et al. (1981) descriuen un orifici de projectil d'arma de foc al terç distal del fèmur que s'associa amb una fractura en espiral proximal al lloc de l'impacte. Per tant, les fractures esmentades anteriorment es poden associar a altres tipus de fractures, com les fractures en espiral, ja que actuen com a elevadors d'estrès i provoquen una

segona fractura quan la víctima corre o cau després de rebre el tret (Ryan et al., 1981).

Finalment, s'han reportat defectes en forat de pany de clau i fractures en divot en ossos llargs. Tots dos tipus estan especialment implicats en els casos en què la bala colpeja, però no perfora l'eix. Un defecte de pany està format per la unió d'un defecte circular i un triangular, que se sap que és el resultat d'un impacte tangencial de bala. La part triangular d'un forat de pany consta de dues fractures radiants que segueixen la direcció de la trajectòria de la bala. Aquest tipus de fractura és més freqüent al crani, però també s'ha descrit en un cas forense en què l'húmer va patir un tret no penetrant (Berryman et al., 2000; Smith et al., 2003). Una fractura en divot es descriu com un petit tros de còrtex que es raspa per un impacte sense cap fractura addicional. De manera característica, en aquesta fractura la trajectòria tangencial de la bala provoca una empremta o solc a la superfície cortical de la diàfisi (Ronan et al, 2004).

3.2. Fractures a metàfisi i epífisi d'os llarg

La diferenciació entre el trauma diafisari per arma de foc i la metàfisi proximal o distal i/o l'epífisi dels ossos llargs, se sol fer en el camp de l'antropologia forense.

Les fractures comminutes són les fractures per arma de foc més descrites a la metàfisi i l'epífisi. Les fractures perforants que ja s'han esmentat a la diàfisi sovint es troben a prop dels extrems distals i proximals (Symes et al., 2012; Ryan et al., 1981) i, per tant, suposadament es troben a l'epífisi o properes a aquesta regió. La zona central de la metàfisi pot mostrar fractures perforants, mentre que les vores de la metàfisi són propenses a fractures en divot (Rose et al., 1988). Típica de la metàfisi i l'epífisi és la separació explosiva de l'eix. Els trets directes al cap femoral poden fer-lo trencar, donant lloc a comminució, mentre que les lesions tangencials al cap femoral produeixen una fractura en divot amb petites fractures lineals. S'observen fractures en espiral originades a la diàfisi de l'os que s'estenen a la metàfisi i l'epífisi.

3.3. Fractures indirectes

S'han observat fractures en ossos llargs sense impactes directes de bala, on només es va afectar el teixit tou circumdant, amb o sense un os veí. Existeix certa controvèrsia a la literatura sobre el mecanisme causal exacte de les fractures indirectes. Es proposen dues teories principals. La primera teoria se centra en l'expansió de la cavitat temporal i el desplaçament del teixit (Dougherty et al., 2011; Zhang et al., 2015; Cooper i Ryan 1990. La segona teoria es basa en l'ona de xoc [Li et al., 1988]. Aquesta ona (inicialment supersònica) és enviada a través del teixit per la bala impactant (Zhang et al., 2015) i es propaga a través del teixit a una velocitat que inicialment supera la velocitat del so, sense desplaçar el teixit. La majoria de les publicacions, incloses les més recents (Kieser et al., 2013; Dougherty et al., 2011; Sherman 2007) descriuen la cavitat temporal i el desplaçament del teixit com el principal mecanisme causant de fractures indirectes.

A la literatura revisada, les fractures indirectes solen ser reportades a l'avantbraç o la cama inferior. Quan un dels dos ossos és impactat per una bala, s'ha observat que l'os veí presenta fractures transversals a la mateixa alçada. S'han reportat fractures en espiral en casos en què la bala només ha afectat el teixit tou. Una fractura més específica que és causada per una bala que passa un os llarg sense afectar-lo realment, és una fractura en forma de falca. El vèrtex de la falca normalment apunta distalment a la trajectòria de la bala (Kieser et al., 2013). També s'han reportat fractures en espiral a la diàfisi, distal o proximal d'altres fractures, com a conseqüència de córrer després de rebre un tret a les extremitats inferiors. La fractura inicial actua com un augment de l'estrès que fa que l'extremitat inferior se sobrecarregui pel pes corporal de la víctima mentre corre i provoca fractures en espiral distals o proximals a l'altra fractura (impacte) (Ryan 1981). Aquestes fractures en espiral es van reportar principalment en publicacions centrades en les ferides militars on les víctimes van poder relatar el que va passar després de rebre un tret. Com que aquestes fractures no són causades per l'impacte inicial de la bala, sinó pel moviment i la càrrega posterior a l'os, aquestes fractures es poden classificar com a indirectes.

4. Hipòtesis

La hipòtesi de partida del present treball d'investigació, és que la lesió per projectil d'arma de foc en un os llarg, té un patró de fractura específic d'aquest mecanisme lesiu i diferenciat d'altres tipologies de traumatisme.

5. Metodologia

5.1. Entitats implicades

- 1) Servei de Patologia Forense. Institut de Medicina Legal i Ciències Forenses de Catalunya (IMLCFC).
- 2) Unitat d'Anatomia i Embriologia del Departament de Ciències Morfològiques de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).
- 3) Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).
- 4) Facultat de Veterinària. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).
- 5) Unitat Central de Balística i Traces Instrumentals. Mossos d'Esquadra de la Generalitat de Catalunya.

5.2. Investigadors principals

Dr. Ignasi Galtés Vicente. Metge Forense. Servei de Patologia Forense. Institut de Medicina Legal i Ciències Forenses de Catalunya (IMLCFC). Professor associat laboral del Departament de Psiquiatria i Medicina Legal i del Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

Dra. Marisa Ortega Sánchez. Metgessa Forense. Servei de Patologia Forense. Institut de Medicina Legal i Ciències Forenses de Catalunya (IMLCFC). Professora associada laboral del Departament de de Ciències Morfològiques de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

Dr. Xavier Jordana Comín. Professor Agregat, Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).

5.3. Mostres

Aquest estudi utilitza tres tipus de mostres: ossis sintètics, ossos animals i ossos humans. Els ossos sintètics s'han emprat per implementar el disseny experimental del test balístic (primer objectiu). Els exemplars humans s'han utilitzat per a la caracterització del patró de fractura per projectil d'arma de foc (segon i tercer objectiu). Per últim, els ossos animals s'han utilitzat per caracteritzar-ne també la lesió resultant de l'acció del projectil d'arma de foc (quart objectiu).

Concretament:

- a) 5 ossos sintètics Synbone ® (Synbone AG, Suïssa): Model PR0109. Aquest model ha estat àmpliament utilitzat en estudis previs (Bir et al, 2016; Henwood i Applebv, 2020; Kneubuehl i Thali, 2003).
- b) 5 húmer humans d'homes adults d'entre 40 i 65 anys. Considerem l'húmer com a prototip d'os llarg humà, amb suficient gruix cortical com per permetre l'anàlisi del patró de fractura i essent l'os més accessible en termes de disponibilitat. Inicialment, es va preveure que aquest material procedís de cadàvers de donants del Departament de Ciències Morfològiques de la Facultat de Medicina de la UAB. Posteriorment, i per motiu de major idoneïtat de la mostra pel que fa a l'edat dels donants, aquests húmer es van obtenir de casos descartats del Banc de Sang i Teixits de Barcelona amb el qual l'IMLCFC té conveni on s'estableix la possibilitat de realitzar de manera conjunta activitats de recerca.

L'obtenció d'aquestes mostres de donants es basa en el consentiment informat dels donants o famílies, per tant, compleix amb els requisits ètics corresponents. D'altra banda, es disposa d'informe favorable del Comitè d'Ètica i Investigació de l'Hospital Universitari de Bellvitge-IDIBELL (Ref. PR416/20) i de la Comissió de Formació i Recerca de l'IMLCFC.

S'han descartat donants amb patologia que pogués afectar directament l'os, i concretament les seves propietats mecàniques (Ruff, 2008). S'ha acotat l'edat i reduït la variabilitat dels individus.

c) 5 fèmurs de cérvol comú (*Cervus elaphus*) femella. Aquesta mostra s'ha obtingut procedent de la Facultat de Veterinària de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). L'os de cérvol és un dels models més emprats en Antropologia Forense com a comparativa amb humà (Symes et al., 2012).

5.4. Aspectes metodològics particulars

5.4.1. Tests balístics

El disseny i implementació del test balístic s'ha realitzat en col·laboració amb la Unitat de Balística de Mossos d'Esquadra. El model experimental i el calibratge de les variables amb els models sintètics s'han ajustat als protocols publicats a la literatura (Henwood i Appleby, 2020; Kneubuehl i Thali, 2003).

Cada espècimen disparat s'ha inclòs en gelatina balística al 10% (Clearballistics -FBI®) seguint els protocols i la sistemàtica d'altres estudis paral·lels (Alley et al., 2011; Swain et al., 2014; Wen et al., 2012). S'ha treballat amb una espessor de gelatina de 2 cm per davant de l'os. La gelatina ha permès simular el gruix de parts toves, reproduint les condicions en les quals es produeix un tret a un individu. La gelatina simula el teixit tou i la seva transparència permet orientar el tret de manera òptima i l'observació i registre del comportament de projectil i os (Jussila, 2005).

Els blocs de gelatina, amb els espècimens a l'interior, s'han col·locat a 2 metres de l'arma de foc, emprant un simulador balístic de tret amb cartutx blindat de 9 mm Luger (Laboratori de Balística de Mossos d'Esquadra). Amb aquest simulador és possible centrar el tret sobre la diàfisi amb un marge d'error ínfim, el que garanteix l'èxit del tret provocant la fractura.

Pel que fa a l'anàlisi cinemàtica, es va registrar la velocitat a partir d'un sensor de moviment Drello LS 11-03 amb un sistema computeritzat associat Drello VC 4043-09 que permet obtenir els càlculs cinemàtics i energètics necessaris per a l'anàlisi balística (màxim, mínim, mitjana, desviació estàndard i Energia cinètica). Tot el procés s'enregistrà amb una càmera d'alta velocitat (Phantom V2012) de fins a 663000 fps (fotogrames per segon), per capturar la velocitat abans i

després de l'impacte del projectil. L'Energia cinètica dels projectils abans i després de l'impacte es va calcular a partir de la massa i la velocitat registrada.

5.4.2. Anàlisi de fractures en l'os fresc

Els exemplars d'ossos frescos es dissecaren de manera que únicament es va preservar el periosti adherit a la cortical. Seguidament, un cop col·locats en els blocs de gelatina balística, els motlles amb els ossos es van refredar a temperatura ambient durant 24 hores per obtenir blocs de gelatina solidificats complets.

Un cop provocada la fractura, els ossos i fragments es van extreure del bloc de gelatina i s'efectuà una neteja mitjançant maceració a 90-100°C al Laboratori d'Antropologia de l'IMLCFC. El protocol seguit fou el de Scheirs et al., (2017). El resultat va ser l'obtenció d'un material excel·lent per a la visualització i anàlisi de tota la superfície cortical de l'os. Els patrons de fractura i alteracions s'avaluaren a l'àrea cortical, que és més informativa que la zona de trabècula (Galtés, 2019).

Per a l'estudi histològic, s'emprà la tècnica de la làmina fina (Boer i Wood, 1989; Ebacher et al., 2012) a la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), treballant amb fragments de la fractura comminuta obtinguda. Les mostres es van mantenir seqüencialment en una sèrie de solucions d'etanol (70%, 80%, 90%, 100%) durant 24 h per pas. Després de deixar-se assecat, els fragments d'os es van incrustar en resina epoxi i es van seccionar en un pla transversal, es van esmolar, es van polir i es van muntar sobre vidres esmerilats.

Es van tallar seccions primes dels blocs ossis fixos amb una serra Buehler Isomet amb un gruix final de 100 µm. Posteriorment, les seccions histològiques es van posar en un gradient d'alcohol (70%, 96%, 100%) seguit d'un agent de neteja (Histolemon®) per ajudar a fixar la secció. Després, es va utilitzar DPX (Dibutyltalat de poliestirè xilè) com a mitjà de muntatge per unir el cobreobjectes al portaobjectes fins que es va polimeritzar.

La inspecció histològica de l'os cortical es va realitzar amb un microscopi Leica DMD 108 del qual es van obtenir micrografies amb un augment de 4 × de tota la capa cortical.

5.4.3. Aspectes ètics

Aquest estudi ha estat aprovat pel Comit  de  tica de la Investigació del Hospital Universitari de Bellvitge (Ref. PR416/20), aix  com per la Comiss  de Recerca i Docència de l'Institut de Medicina Legal i Ciències Forenses de Catalunya. Pel que fa a les mostres de donants de Banc de Sang i Teixits, prèviament, es va demanar el consentiment a familiars per  s mèdic i/o experimentació dels teixits obtinguts, entrant les mostres emprades en aquest segon supòsit, doncs es va descartar la seva utilització m dica.

5.5. Cronograma i desenvolupament de la recerca

L'estudi efectuat s'ha ajustat al cronograma establert en el pla inicial de recerca (Fig. 1).

	Gen	Feb	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Set	Oct	Nov
Obtenció mostra											
Preparació i condicionament dels espècimens frescos											
Disseny experimental de la prova balística											
Proves preliminars i implementació del test											
Realització dels experiments balístics											
Neteja/condicionament dels ossos frescos fracturats											
Caracterització macroscòpica de les fractures											
Caracterització histològica de les fractures											
Anàlisi i discussió dels resultats											
Redacció de resultats. Finalització del projecte											

Figura 1. Cronograma previst de gener a novembre de 2022, període de realització del treball de recerca.

Mitjans disponibles i desenvolupament del cronograma

a) Obtenció mostra

5 ossos sintètics Synbone   (Synbone AG, Suïssa): Model PR0109.

5 fèmurs de cérvol comú.

5 húmer humans.

b) Preparació i condicionament dels espècimens frescos

Comporta la dissecció dels húmer humans i fèmurs animals, neteja i eliminació de parts toves, exceptuant el periosti que es mantindrà durant els experiments. Aquest procediment implica tasques mecàniques amb instrumental de dissecció.

S'han utilitzat tant la sala de dissecció del Departament de Ciències Morfològiques de la Facultat de Medicina de la UAB, com les instal·lacions de la Unitat d'Antropologia de l'Institut de Medicina Legal i Ciències Forenses de Catalunya.

c) Disseny experimental de la prova balística

Coordinació amb Mossos d'Esquadra per la preparació dels sistemes de subjecció de l'os, calibratge de variables del tret, infraestructura per a la realització dels blocs de gelatina balística.

Els tests s'han realitzat al laboratori balístic de la Unitat Central de Balística i Traces Instrumentals de Mossos d'Esquadra de Sabadell. Complex Central Egara.

d) Proves preliminars i implementació del test

Utilitzant els ossos sintètics i seguint els protocols publicats a la literatura, s'han efectuat proves preliminars ajustar les variables de l'experiment i elaborat una sistemàtica per implementar el test de manera que sigui reproducible i garanteixi uns resultats científicament òptims.

Els tests s'han realitzat al laboratori balístic de la Unitat Central de Balística i Traces Instrumentals de Mossos d'Esquadra de Sabadell. Complex Central Egara.

e) Realització dels experiments balístics

Reproducció experimental de les fractures balístiques en els ossos frescos humans i animals dins dels blocs de gelatina balística i seguint la sistemàtica anteriorment elaborada. Els experiments s'han realitzat al laboratori balístic de la Unitat Central de Balística i Traces Instrumentals de Mossos d'Esquadra de Sabadell. Complex Central Egara.

f) Neteja/condicionament dels ossos frescos fracturats (humans i animals)

Un cop fracturats, comporta la neteja i esqueletització, eliminant per maceració amb aigua a 90°C, el periosti i restes de parts toves que hagin quedat, condicionant-los adequadament per permetre l'anàlisi macroscòpic i microscòpic. Aquestes tasques s'han realitzat a les instal·lacions de la Unitat d'Antropologia de l'Institut de Medicina Legal i Ciències Forenses de Catalunya.

g) Caracterització macroscòpica de les fractures

Els patrons de fractura i alteracions corticals a la superfície s'han avaluat a l'àrea cortical, que és més informativa que la zona de trabècula (Galtés, 2019). Les característiques associades a la fractura s'han analitzat macroscòpicament. Aquestes tasques s'han realitzat a les instal·lacions de la Unitat d'Antropologia de l'Institut de Medicina Legal i Ciències Forenses de Catalunya.

h) Caracterització histològica de les fractures

Tècnica de la làmina fina en teixit ossi no descalcificat i observació en microscòpia òptica amb llum polaritzada (Boer, 1989; Ebacher et al., 2012). Aquestes anàlisis s'han efectuat als laboratoris de la UAB Biologia i Geologia.

i) Anàlisi i redacció dels resultats

6. Resultats

6.1. Disseny experimental

6.1.1. Mostra

Integrada per ossos 5 ossos sintètics Synbone® (Synbone AG, Suïssa): Model PR 0109 (Fig. 2); 5 fèmurs de cérvol comú (Fig. 3); 5 húmer humans (Fig. 4).

Els 5 fèmurs de cérvol comú (*Cervus elaphus*) femella s'han obtingut a través de la Facultat de Veterinària, procedents del Pirineu català, caçats a la temporada de tardor del 2021 i que han estat preservats en congelació un cop descarnats, deixant periosti intacte, i preservats embolcallats amb solució fisiològica.

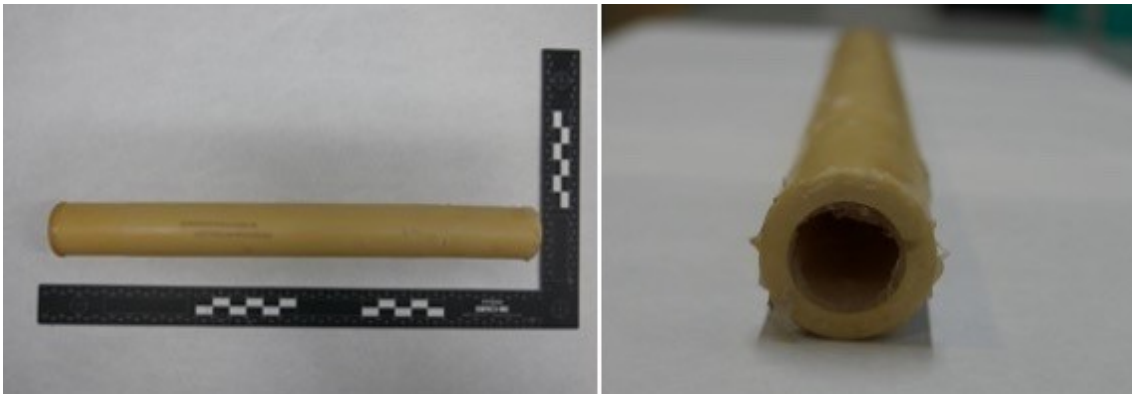


Figura 2. d'os sintètic Synbone® (Synbone AG, Suïssa)



Figura 3. Extremitat posterior de cèrvol, previa eliminació de parts toves adherides a l'os.



Figura 4. Dos húmer humans del mateix individu, netejats preservant sols periosti i restes d'entesis.

Respecte als espècimens biològics (humans i animals), s'ha seguit dues fases de preparació successives, prèvies a l'experiment balístic:

- Dissecció, neteja i eliminació de parts toves exceptuant el periosti, que s'ha mantingut durant els experiments. S'han emprat instruments mecànics, no químics ni abrasius, preservant en tot moment la integritat de la cortical de l'os.
- Un cop dissecats i eliminades les masses musculars (Fig. 4), hem preservat els espècimens en congelació a -80°C , embolcallats amb embenat i solució fisiològica per tal de preservar les condicions d'humitat fins a descongelar-los per l'experiment.

6.1.2. Simulació de parts toves: blocs de gelatina

Hem dissenyat i construït 4 dispositius metàl·lics a mode de dipòsits per tal de crear el motlle de gelatina balística al voltant de la diàfisi òssia, permetent que l'os quedi paral·lel a l'eix del cilindre de gelatina, a 2 cm de profunditat en la zona d'impacte i garantint la reproductibilitat del mètode (Figs. 5-10). El temps de secat òptim s'ha estimat en 24 hores.



Figura 5. Dispositiu metàl·lic per construir el motlle al voltant de l'espècimen. En la imatge s'il·lustra amb un os sintètic.



Figura 6. Procediment de rebliment del motlle amb gelatina balística líquida. En la imatge s'il·lustra amb un os sintètic. El motlle es deixa assecat amb un peu metàl·lic que permet garantir la verticalitat.



Figura 7. Obertura del dispositiu metàl·lic i extracció del motlle. En la imatge s'il·lustra amb un os sintètic.



Figura 8. Motlles resultants amb exemplars sintètics.



Figura 9. Motlle resultant en el cas d'un os animal.



Figura 10. Mottle resultant en el cas d'un os humà.

6.1.3. Equipament per a la realització de la prova balística

Hem dissenyat i construït un dispositiu de subjecció basculant axial que ens permet col·locar l'os en condicions reproduïbles a la sala – laboratori d'assajos balístics de Mossos d'Esquadra (laboratori balístic de la Unitat Central de Balística i Traces Instrumentals de Mossos d'Esquadra de Sabadell. Complex Central Egara). La perpendicularitat de l'eix sobre els dos plans de subjecció es garanteix per dues guies fixes que s'han dissenyat i construït a propòsit i que van subjectades a la plataforma superior i inferior. Ambdues plataformes són mòbils, el que permet que el sistema es pugui adaptar a qualsevol longitud dins d'un màxim de 50 cm (Figs. 11 i 12).

A les Figures 13 i 14 es presenta l'entorn experimental al laboratori balístic de la Unitat Central de Balística i Traces Instrumentals de Mossos d'Esquadra de Sabadell. Complex Central Egara.



Figura 11. Dispositiu de subjecció axial basculant que permet col·locar l'espècimen a disparar en posició vertical. La plataforma superior és mòbil, el que permet ajustar diferents longituds d'os. Tant la plataforma superior, com la inferior, porten uns sistemes de subjecció que permet aguantar l'espècimen en aquesta posició. Aquests sistemes, son variables en funció de si es tracta d'ossos sintètics, animals o humans. En aquest cas veiem col·locat un os sintètic.



Figura 12. Dispositiu de subjecció axial basculant amb os humà subjectat, rodejat per bloc de gelatina. A la dreta, detalls del sistema de fixació proximal i distal. El sistema evita la lesió de l'os, per tant artefactuar els resultats creant punts de dissipació de l'estrès.



Figura 13. Entorn experimental en el laboratori de balística. Els blocs de gelatina, amb els espècimens a l'interior, s'han col·locat a 2 metres de l'arma de foc, emprant un simulador balístic de tret (Laboratori de Balística de Mossos d'Esquadra). Sensor de moviment Drello LS 11-03 amb un sistema computeritzat associat Drello VC 4043-09 Càmera d'alta velocitat (Phantom V2012) de fins a 663000 fps (fotogrames per segon).



Figura 14. Detall del simulador balístic de tret (Laboratori de Balística de Mossos d'Esquadra).

6.1.4. Prova balística i resultats en os sintètic

Els blocs de gelatina amb el cilindre a l'interior es varen col·locar a 2 metres de l'arma del simulador de tret amb cartutx blindat de 9 mm Luger. L'objectiu del tret es va localitzar en el punt central de diàfisi. El marge d'error es va estimar com a no significatiu ($p < 0,005$). Addicionalment, es va col·locar un sensor de moviment Drello LS 11-03 amb sistema computeritzat associat Drello VC 4043-09 per tal d'obtenir el càlcul energètic del tret (Energia cinètica).

Les Figures 15-17 exemplifiquen els resultats de disparar els exemplars sintètics. Tots ells presentaven el mateix patró de fractura, caracteritzat per un patró comminut, integrat per una fractura primària, d'entrada, i un patró irradiat definint les clàssiques fractures secundàries.

L'objectiu de l'estudi, en utilitzar els ossos sintètics, fou implementar la tècnica posant en pràctica tot el disseny i equipament experimental, prèvia la realització de l'experimentació en os animal i humà.

En tots els espècimens sintètics, la diana fou correctament disparada a zona central de diàfisi, permetent l'estabilitat del sistema i la reproductibilitat dels resultats, pel que fa a la morfologia de la fractura que presenta un aspecte comminut en tots els casos, amb entrada regular arrodonida i sortida més gran amb conus invertit característic, també en tots els espècimens (Figs. 16 i 17). No obstant això, l'estudi cinemàtic no va aportar resultats concloents, sent necessària ampliar la mostra per poder millorar la captura de les diferents variables que intervenen en el càlcul energètic.

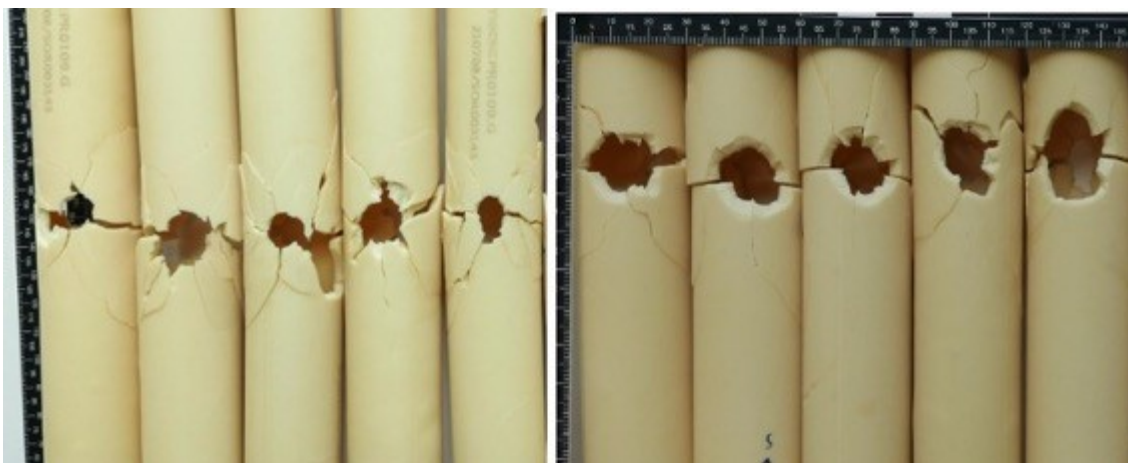


Figura 15. Fotografia que mostra el resultat de cadascun dels espècimens d'os sintètic disparats. El patró de fractura comminuta es repeteix en tots els casos. Entrada (esquerra), sortida (dreta). La fractura s'ha consolidat amb un pegament comercial d'us domèstic a base de nitrat de cel·lulosa.



Figura 16. Experiment efectuat sobre os sintètic. Els resultats mostren la presència d'una fractura comminuta, amb presència de fractura primària i secundàries. A la fila inferior, detalls de l'orifici d'entrada (fractura primària) (fotografia esquerra) i orifici de sortida (fotografia de la dreta). La fractura s'ha consolidat amb un pegament comercial d'us domèstic a base de nitrat de cel·lulosa.



Figura 17. Experiment efectuat sobre os sintètic. Els resultats mostren la presència d'una fractura comminuta, amb presència de fractura primària i secundàries. A la fila inferior, detalls de l'orifici d'entrada (fractura primària) (fotografia esquerra) i orifici de sortida (fotografia de la dreta). La fractura s'ha consolidat amb un pegament comercial d'us domèstic a base de nitrat de cel·lulosa.

6.1.5. Esqueletització d'exemplars biològics (humans i animals)

Un cop fracturats, els espècimens animals i humans, es varen traslladar al Laboratori d'Antropologia Forense de l'IMLCFC, per tal de netejar-los i esqueletitzar completament, eliminant per maceració amb aigua a 90°C, el periosti i restes de parts toves (Figs. 18 i 19).

En alguns casos, els més greixosos, ha estat necessari complementar la maceració amb una solució d'amoníac al 5% i posterior assecat amb material absorbent.



Figura 18. Procediment de maceració amb aigua calenta, per esqueletitzar els espècimens biològics animals i humans. El protocol seguit fou el de Scheirs et al., (2017).



Figura 19. Resultat final de l'esqueletització efectuada després de disparar l'exemplar. L'absència total de parts toves, permet una visualització total de la fractura. Fotografia superior, fèmur animal. Fotografia inferior, detall de focus de fractura d'os humà.

6.2. Caracterització macroscòpica del patró de fractura en os llarg humà

La Figura 20 mostra el procediment de consolidació d'un dels espècimens, com a pas previ a la caracterització morfològica. Això s'ha efectuat amb els 5 exemplars humans disparats.



Figura 20. Exemplar d'humer humà que exemplifica la consolidació de la fractura, un cop disparat, esqueletitzat i condicionat el material ossi. La fractura s'ha consolidat amb un pegament comercial d'us domèstic a base de nitrat de cel·lulosa.

Els resultats es mostren a les figures 21 i 22. Els 5 espècimens humans presenten un patró de fractura integrat per una fractura primària, o forat d'entrada, i un conjunt de fractures radiades o secundàries, que parteixen de la primària i configuren un patró estrellat que envolta tot el terç mig de la diàfisi i intersecciona amb el patró anàleg procedent de l'orifici de sortida. En general, també s'observa que l'orifici d'entrada és de major dimensió que el de sortida.

En un futur i ampliant la mostra experimental, caldrà aprofundir en els detalls d'aquest patró estrellat, analitzant les característiques associades a la fractura primària i al patró d'irradiació.



Figura 21. Visió anterior dels espècimens humans un cop disparats a la zona mitja de la diàfisi. Per facilitar la manipulació i conservació, s'han seccionat ambdues epífisis. El patró mostra una pèrdua de substància en la zona central del tret, fractura primària, de forma arrodonida i ben definida, amb un conjunt de fractures radiades o secundàries, que parteixen del punt d'impacte.



Figura 22. Visió posterior dels espècimens humans un cop disparats a la zona mitja de la diàfisi. Per facilitar la manipulació i conservació, s'han seccionat ambdues epífisis. El patró mostra una pèrdua de substància en la zona central del tret, fractura primària de sortida, de forma més irregular que el punt d'entrada, amb major pèrdua de substància, amb un conjunt de fractures radiades o secundàries que intersecciona amb les corresponents del punt d'entrada.

En aquest estudi, s'ha decidit considerar totes les fractures existents que radiaven del punt primari d'entrada, independentment de si es tractava de fractures completes o incompletes. Tanmateix, si considerem sols les fractures principals, tenim un patró en ales de papallona com el que descriuen altres autors (Martrille i Symes, 2019).

6.3. Caracterització histològica de patró de fractura en os llarg humà

Els resultats de l'estudi histològic de les fractures no son concloents. L'abordatge preliminar ha permès implementar part de la tècnica, però és necessari, d'una banda, aprofundir en la caracterització macroscòpica del patró de fractura i, d'altra, augmentar la mostra. En el moment actual de la recerca, ens trobem en que cal definir la localització on s'ha d'efectuar el mostreig histològic i, per poder avançar necessitem més mostra, més variabilitat de casos, i sobretot acabar de caracteritzar totalment el patró primari i secundari de fractura.

6.4. Caracterització macroscòpica del patró de fractura en os animal

Les figures 23 i 24 mostren els resultats obtinguts en quatre dels cinc espècimens utilitzats. El cinquè espècimen es va descartar de l'estudi degut a que es produir un error en l'experiment que va invalidar el resultat.

Els resultats preliminars mostren que en tots ells únicament és possible analitzar el patró de fractures radiades o secundàries, doncs la pèrdua d'os al voltant de la fractura primària impossibilita la seva reconstrucció, per tant, anàlisi. Aquest patró és igual en els quatre exemplars analitzats, i anàleg al patró estrellat que es produeix en os humà. En aquest sentit, i en relació amb el patró o tipologia general de fractura, sense considerar característiques més de detall que hauran de ser avaluades en futurs anàlisis incrementant la mostra, els resultats són concordants en el que estableix la literatura, i que considera el fèmur de cérvol, com una alternativa experimental vàlida per extrapolar resultats en humans (Berryman i Symes, 1998; Smith et al., 1987, 2003; Quatrehomme i Istanbul, 1997; Symes et al., 2012).



Figura 23. Visió anterior dels espècimens animals un cop disparats a la zona mitja de la diàfisi. El patró mostra una pèrdua de substància en la zona central del tret, fractura primària, amb impossibilitat de reconstruir-la, i un conjunt de fractures radiades o secundàries, que parteixen del punt d'impacte.



Figura 24. Visió posterior dels espècimens animals un cop disparats a la zona mitja de la diàfisi. El patró mostra una important pèrdua de substància en la zona de sortida, que impossibilita la seva reconstrucció. S'identifiquen fractures radiades o secundàries, que parteixen de l'àrea de sortida.

6.5. Limitacions

La limitació principal d'aquest estudi ha estat el factor temps. La construcció i implementació de l'equip i tècnica per disparar el material ha estat laboriosa i això ha condicionat poder aprofundir més en els resultats obtinguts, tant macroscòpics com microscòpics. En qualsevol cas, el disseny experimental i resultats ha estat exitós en els tres models utilitzats. El material obtingut servirà per donar continuïtat a la recerca i poder ampliar la mostra, sobretot de casuística humana, per poder acabar de definir els detalls característics que configuren el patró de fractura associat a les lesions per arma de foc. En el moment actual, podem dir que el patró de fractura caracteritzat és concordant amb les dades existents a la literatura, tant experimental com observacional amb casos reals (Martrille i Symes, 2019).

Inicialment, es va registrar la velocitat a partir d'un sensor de moviment Drello LS 11-03 amb un sistema computeritzat associat Drello VC 4043-09 que permet obtenir els càlculs cinemàtics i energètics necessaris per a l'anàlisi balística (màxim, mínim, mitjana, desviació estàndard i Energia cinètica). Tot el procés s'enregistrà amb una càmera d'alta velocitat (Phantom V2012) de fins a 663000 fps (fotogrames per segon), per capturar la velocitat abans i després de l'impacte del projectil. L'Energia cinètica dels projectils abans i després de l'impacte es va calcular a partir de la massa i la velocitat registrada. Tanmateix, en el moment actual, no es disposa de suficients dades concloents per extreure'n conclusions significatives. En un futur, serà necessari incrementar la mida mostral.

Per últim, i referent a la tècnica pròpiament dita, cal assenyalar que la gelatina com a simulant artificial és isotròpica i, per tant, no pot reproduir totalment les característiques heterogènies del teixit viu i les seves interaccions. Per exemple, la relativa duresa i elasticitat de la pell redueixen el 5% de l'energia del projectil (Rybeck, 1974). Tanmateix, aquest és el protocol àmpliament utilitzat i validat per la comunitat científica en el moment de plantejar l'estudi (Jussila, 2005; Alley et al., 2011; Swain et al., 2014; Wen et al., 2012), per tant, és el model més adequat i àmpliament acceptat per poder extreure conclusions sobre el comportament de l'os enfront a un traumatisme per projectil d'arma de foc.

7. Conclusions

- S'ha dissenyat i construït un dispositiu de subjecció axial basculant que permet col·locar l'espècimen ossi en posició vertical i romandre estàtic mentre s'efectua el tret. El sistema admet diferents mides i morfologies, i permet ser usat pels tres models experimentals (sintètic, animal i humà).
- S'ha dissenyat i construït un dispositiu metàl·lic per elaborar el motlle de gelatina balística al voltant de l'espècimen ossi. El sistema simula el teixit tou que rodeja l'os en condicions normals, al mateix temps que optimitza la quantitat de gelatina a utilitzar.
- Els resultats obtinguts permeten disposar de 5 exemplars sintètics, 4 d'animals i 5 d'humans disparats en condicions controlades de laboratori,

utilitzant un projectil blindat de 9mm a una distància de 2 m, en perpendicular sobre el punt mig de la diàfisi/exemplar.

- En tots els casos, els húmer humans presenten un patró de fractura primària i secundàries, configurant una fractura comminuta estrellada. Hem constatat que l'orifici de sortida és major que el d'entrada.
- En el cas dels espècimens animals, si bé tots ells presenten un patró irradiat (secundari) que configura una fractura comminuta estrellada, no és possible reconstruir la fractura primària per la pèrdua existent de material.
- El model animal, si bé permet analitzar i extrapolar informació sobre el patró general de fractura, no permet efectuar un estudi de característiques de detall, en particular dels orificis d'entrada i sortida.
- En un futur, disposar de la mostra obtinguda i ampliar-la, permetrà acabar de caracteritzar els detalls associats a aquests patrons lesionals, i aprofundir en la biomecànica de la fractura de l'os llarg associada a projectil d'arma de foc. Els resultats mostren que el principal model d'estudi hauria de ser l'humà.

8. Propostes

8.1. Implicacions dels resultats obtinguts

La incidència de lesions per arma de foc està augmentant a tot el món, i en particular a Europa (Jena et al., 2014; Kobbe et al., 2008; Maqungo et al., 2020; Papadopoulos et al., 2013; Riddez, 2014). En el 50% de les lesions per arma de foc estan afectades les extremitats en forma de fractures (Dougherty et al., 2006, 2009, 2011).

En l'àmbit de les ciències forenses i en particular en l'Antropologia Forense, un dels principals reptes a que s'enfronten els professionals és el reconeixement i interpretació de les lesions per arma de foc. El problema és la manca de sistemàtiques metodològiques que permetin reconèixer i diferenciar aquestes lesions d'altres tipologies lesives i extreure'n consideracions d'interès forense relacionades amb el seu mecanisme i producció (tipus de projectil, arma, distància, direcció etc.). Els resultats d'aquest treball aporten coneixement i evidència científica en aquests dos grans àmbits i, molt important, aplicar-lo a la

pràctica diària, tant a partir dels casos que es treballen des de l'IMLCFC, com i pel que respecta a la investigació criminalística per Mossos d'Esquadra.

Pel que fa a l'aplicabilitat dels resultats, també cal subratllar la importància en l'àmbit específic de l'acció humanitària forense. Durant el segle XX, centenars de milers de persones han estat víctimes d'execucions extrajudicials. En la majoria d'aquests casos, les víctimes han estat enterrades il·legalment en fosses comunes clandestines (Rios et 2014). A l'estat espanyol, destaquen els projectes de memòria històrica i estudi forense i identificador de víctimes de la Guerra Civil espanyola i dictadura franquista, projectes en els quals l'IMLCFC col·labora estretament, tant pel que fa a la comissió de fosses, com amb l'elaboració de pericials forenses de les víctimes recuperades.

Les exhumacions després de conflictes armats són cada cop més freqüents, ja que les investigacions sobre crims de guerra són cada vegada més demandades. La rellevància d'aquestes investigacions ve donada pel Tribunal Penal Internacional. Entitats com el Comitè Internacional de la Creu Roja (CICR), l'Equip Argentí d'Antropologia Forense, o la Sociedad de Ciencias Aranzadi, han liderat projectes en aquest camp emergent de l'acció forense humanitària. Els Instituts de Medicina Legal, i en el cas concret de l'IMLCFC, ha pres part en nombrosos projectes internacionals liderats per aquestes entitats. D'aquesta manera, els especialistes forenses tenen un paper fonamental en la recuperació, identificació i determinació de la causa i les circumstàncies de la mort de les persones mortes, les restes de les quals estan esqueletitzades, descompostes, cremades, mutilades o irreconeixibles (Galtés, 2013). Amb aquest propòsit, la ciència, els protocols, metodologies i coneixement forense de les lesions esquelètiques són necessàries amb urgència per donar suport a les activitats humanitàries (Blewitt, 1997; Cordner i Tidball-Binz, 2017). Els resultats d'aquest projecte d'investigació aporten coneixement per millorar el grau d'evidència científica de les proves pericials que s'utilitzen i es presenten a tribunals i comissions de veritat nacionals i internacionals.

8.2. Propostes de futur

Les propostes de futur passen per ampliar la mostra i millorar la part experimental, en el sentit de salvar les limitacions comentades. Principalment, l'objectiu futur és obtenir més informació sobre els trets característics de fractura, modificar les condicions experimentals introduint noves variables (canvi de projectil, distància de tret, direcció de tret), i d'aquesta manera millorar la descripció del patró lesional, així com obtenir més informació de les variables de les quals en depèn. D'igual manera, la millora en l'estudi cinemàtic, ajudarà a obtenir més coneixement sobre la formació i interpretació de com s'inicia i es desenvolupa la fractura. D'altra banda, les propostes de futur passen per acabar d'implementar la tècnica histològica per tal de definir el patró de microfractures corticals, tant osteonals com intersticials, associat al trauma balístic en l'os humà. En resum, podem sintetitzar les propostes i línies de futur en els següents punts:

- a) Comparar les fractures en os sintètic amb l'os humà i animal
- b) Validar el model sintètic àmpliament utilitzat en experimentació per arma de foc.
- c) Aprofundir en els trets característics de la lesió balística en os llarg humà, augmentant la mostra i variabilitat en l'experiment.
- d) Descripció del patró de microfractures osteonals i intersticials i comparar el patró amb la informació disponible relativa al trauma contundent.

9. Referències bibliogràfiques

Alley, M. D., Schimzize, B. R., & Son, S. F. (2011). Experimental modeling of explosive blast-related traumatic brain injuries. *Neuroimage*, 54, S45-S54.

Berryman, H. E., Symes, S. A. (1998). Recognizing gunshot and blunt cranial trauma through fracture interpretation. A K. J. Reichs (Ed.), *Forensic osteology: advances in the identification of human remains* (pp. 80-100). Charles C Thomas.

Berryman, H. E., Gunther, W. M. (2000). Keyhole defect production in tubular bone. *Journal of Forensic Science*, 45(2), 483-487.

Berryman, H. E., Lanfear, A. K., Shirley, N. R. (2012). The biomechanics of gunshot trauma to bone: research considerations within the present judicial climate. A D. C. Dirkmaat (Ed.), *A companion to forensic anthropology* (pp. 390-399). Wiley-Blackwell.

Bir, C., Andreovich, C., DeMaio, M., Dougherty, P. J. (2016). Evaluation of bone surrogates for indirect and direct ballistic fractures. *Forensic Science International*, 261(1), 1-7.

Bland-Sutton, J. (1915). Observations on Injuries of the Bones of the Limbs by the S. Bullet. *BMJ Military Health*, 24(4), 314-323.

Blewitt, G. T. (1997). The role of forensic investigations in genocide prosecutions before an International Criminal Tribunal. *Medicine, Science and the Law*, 37(4), 284-288.

Boer, H. H., & Wood, M. B. (1989). Bone changes in the vascularised fibular graft. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 71(3), 374-378.

Cappella, A., Castoldi, E., Sforza, C., Cattaneo, C. (2014). An osteological revisit of autopsies: comparing anthropological findings on exhumed skeletons to their respective autopsy reports in seven cases. *Forensic Science International*, 244, 315-e1.

Cooper GJ, Ryan JM. (1990). Interaction of penetrating missiles with tissues: Some common misapprehensions and implications for wound management. *British Journal of Surgery*, 77(6):606–610.

Cordner, S., & Tidball-Binz, M. (2017). Humanitarian forensic action—its origins and future. *Forensic science international*, 279, 65-71.

Coudane, H., Grosdidier, G., Borrelly, J., Sommelet, J., Wack, B., de Ren, G., Mole, D. (1982). Experimental study of limb lesions due to hunting weapons. *Acta chirurgica Scandinavica Supplementum*, 508, 229-234.

Covas-Cerdà, X., Galtés, I. (2020). Investigación forense sobre muerte súbita publicada en España. *Revista Española de Medicina Legal*, 47, 16-23.

DiMaio, V.J. (2015). *Gunshot wounds: practical aspects of firearms, ballistics, and forensic techniques*. CRC press.

Dixon DS. Keyhole Lesions in Gunshot Wounds of the Skull and Direction of Fire. (1982). *Journal of Forensic Science*, 27(3):555–565.

Dougherty, P. J., Najibi, S. (2006). Gunshot and wartime injuries. A P. Tornetta, W.M. Ricci (Eds.), *Rockwood and Green's Fractures in Adults* (pp. 303-330). Lippincott Williams & Wilkins.

Dougherty, P. J., Vaidya, R., Silverton, C. D., Bartlett, C., Najibi, S. (2009). Joint and long-bone gunshot injuries. *Journal of Bone Joint Surgery American*, 91(4), 980-997.

Dougherty, P. J., Sherman, D., Dau, N., & Bir, C. (2011). Ballistic fractures: indirect fracture to bone. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 71(5), 1381-1384.

Ebacher, V., Guy, P., Oxland, T. R., Wang, R. (2012). Sub-lamellar microcracking and roles of canaliculi in human cortical bone. *Acta biomaterialia*, 8(3), 1093-1100.

Galtés, I. (2013). Estudio médico forense del cadáver en mal estado. A Sociedad Española de Patología Forense (Ed.), *Libro X Curso Patología Forense* (pp.113-141). Sociedad Española de Patología Forense.

Galtés, I. (2019). Lesiones esqueléticas por proyectil de arma de fuego. A Asociación Galega de Médicos Forenses (Ed.), *Armas de fuego y ciencias forenses* (pp. 106-113). Asociación Galega de Médicos Forenses.

Henwood, B. J., Appleby-Thomas, G. (2020). The suitability of Synbone® as a tissue analogue in ballistic impacts. *Journal of Materials Science*, 55(7), 3022-3033.

Hollerman, J. J., Fackler, M. L., Coldwell, D. M., Ben-Menachem, Y. (1990). Gunshot wounds: 1. Bullets, ballistics, and mechanisms of injury. *American Journal of Roentgenology*, 155(4), 685-690.

Huelke, D. F., Buege, L. J., Harger, J. H. (1967). Bone fractures produced by high velocity impacts. *American Journal of Anatomy*, 120(1), 123-131.

Huelke, D. F., Harger, J. H., Buege, L. J., Dingman, H. G., Harger, D. R. (1968a). An experimental study in bio-ballistics: Femoral fractures produced by projectiles. *Journal of biomechanics*, 1(2), 97-105.

Huelke, D. F., Harger, J. H., Buege, L. J., Dingman, H. G. (1968b). An experimental study in bio-ballistics: Femoral fractures produced by projectiles— II Shaft impacts. *Journal of biomechanics*, 1(4), 313-321.

Jena, A. B., Sun, E. C., & Prasad, V. (2014). Does the declining lethality of gunshot injuries mask a rising epidemic of gun violence in the United States?. *Journal of general internal medicine*, 29(7), 1065-1069.

Jussila, J. (2005). Wound ballistic simulation: assessment of the legitimacy of law enforcement firearms ammunition by means of wound ballistic simulation. *PhD Dissertation*. The Second Department of Surgery, University of Helsinki, Finland and Police Technical Centre, Helsinki, Finland.

Kieser, D. C., Carr, D. J., Leclair, S. C. J., Horsfall, I., Theis, J. C., Swain, M. V., Kieser, J. A. (2013). Gunshot induced indirect femoral fracture: mechanism of injury and fracture morphology. *BMJ Military Health*, 159(4), 294-299.

Kneubuehl, B. P., Thali, M. J. (2003). The evaluation of a synthetic long bone structure as a substitute for human tissue in gunshot experiments. *Forensic Science International*, 138(1-3), 44-49.

Kobbe, P., Frink, M., Oberbeck, R., Tarkin, I. S., Tzioupis, C., Nast-Kolb, D., et al. (2008). Versorgungsstrategien bei Schussverletzungen der Extremität. *Der Unfallchirurg*, 111(4), 247-255.

Li M, Ma, Y Y, Fu, R X, Feng, T S. (1988). The Characteristics of the Pressure Waves Generated in the Soft Target by Impact and its Contribution to Indirect Bone Fractures. *Journal of Trauma*, 28(S):104–109.

Long, W. T., Chang, W., Brien, E. W. (2003). Grading system for gunshot injuries to the femoral diaphysis in civilians. *Clinical Orthopaedics and Related Research* (1976-2007), 408, 92-100.

Madea, B. (2007). Case histories in forensic medicine. *Forensic Science International*, 165 (2-3), 111-114.

Madea, B., Saukko, P., Mußhoff, F. (2007). Tasks of research in forensic medicine—different study types in clinical research and forensic medicine. *Forensic Science International*, 165(2-3), 92-97.

Maqungo, S., Kauta, N., Held, M., Mazibuko, T., Keel, M. J., Laubscher, M., & Ahmad, S. S. (2020). Gunshot injuries to the lower extremities: Issues, Controversies and Algorithm of Management. *Injury*.

Martrille L, Symes SA. (2019). Interpretation of long bones ballistic trauma. *Forensic Science International*, 302:1–10.

Müller ME, Nazarian S, Koch P, Schatzker J. (1990). *The Comprehensive Classification of Fractures of Long Bones*. Springer-Verlag.

Papadopoulos, I. N., Kanakaris, N. K., Danias, N., Sabanis, D., Konstantudakis, G., Christo-doulou, S, et al. (2013). A structured autopsy-based audit of 370 firearm fatalities: contribution to inform policy decisions and the probability of the injured arriving alive at a hospital and receiving definitive care. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 667-677.

Quatrehomme, G., İşcan, M. Y. (1997). Bevelling in exit gunshot wounds in bones. *Forensic Science International*, 89(1-2), 93-101.

Ragsdale, B. D., Josselson, A. (1988). Experimental gunshot fractures. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 28(1), S109-S115.

Reber SL, Simmons T. (2015). Interpreting Injury Mechanisms of Blunt Force Trauma from Butterfly Fracture Formation. *Journal of Forensic Sciences*, 60(6):1401–1411.

Riddez, L. (2014). Wounds of war in the civilian sector: principles of treatment and pitfalls to avoid. *European journal of trauma and emergency surgery*, 40(4), 461-468.

Robens, W., Küsswetter, W. (1982). Fracture typing to human bone by assault missile trauma. *Acta chirurgica Scandinavica Supplementum*, 508, 223-227.

Ronan S, Ryan, M.D., Munk, Peter L. (2004). Radiology for the Surgeon Musculoskeletal case 32. *Canadian Journal of Surgery*, 47(3):197–198.

Rose SC, Keith Fujisaki C, Moore EE. (1998). Incomplete fractures associated with penetrating trauma: Etiology, appearance, and natural history. *Journal of Trauma*, 28(1):106–109.

Ryan, J. R., Hensel, R. T., Saliccioli, G. G., Pedersen, H. E. (1981). Fractures of the femur secondary to low-velocity gunshot wounds. *The Journal of Trauma*, 21(2), 160-162.

Sauer, N. J., Simson, L. R. (1984). Clarifying the role of forensic anthropologists in death investigations. *Journal of Forensic Science*, 29(4), 1081-1086.

Sauer, N. J. (1998). The timing of injuries and manner of death: distinguishing among antemortem, perimortem and postmortem trauma. *Forensic osteology: advances in the identification of human remains*, 2, 321-331.

Saukko, P., Knight, B. (2015). *Knight's forensic pathology*. CRC press.

Scheirs, S., Malgosa, A., Sanchez-Molina, D., Ortega-Sánchez, M., Velázquez-Ameijide, J., Arregui-Dalmases, C., ... i Galtés, I. (2017). New insights in the analysis of blunt force trauma in human bones. Preliminary results. *International journal of legal medicine*, 131(3), 867-875.

Sherman DC, Dougherty P, Bir CA. (2007). Indirect Fractures To Bones By Ballistic Injury. *Journal of Biomechanics*, 40(S2).

Smith, O. C., Berryman, H. E., Lahren, C. H. (1987). Cranial fracture patterns and estimate of direction from low velocity gunshot wounds. *Journal of Forensic Sciences*, 32(5), 1416-1421.

Smith, O. C., Pope, E. J., Symes, S. A. (2003). Look until you see: identification of trauma in skeletal material. *Hard evidence: case studies in forensic anthropology, Forensic Science International* 33,138-154.

Sorg, M. H., Haglund, W. D. (1996). *Forensic taphonomy: the postmortem fate of human remains*. CRC Press.

Swain, M. V., Kieser, D. C., Shah, S., & Kieser, J. A. (2014). Projectile penetration into ballistic gela-tin. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 29, 385-392.

Symes SA, l'Abbé, Ericka N, Chapman EN, Wolff I, Dirkmaat, Dennis C. (2012). Interpreting Traumatic Injury to Bone in Medicolegal Investigations. A Dennis C. Dirkmaat (Ed.), *A Companion to Forensic Anthropology* (340-388). Blackwell Publishing.

Wen, Y., Xu, C., Wang, H., Chen, A., & Batra, R. C. (2013). Impact of steel spheres on ballistic gela-tin at moderate velocities. *International Journal of Impact Engineering*, 62, 142-151.

Zhang, X., Xu, C., Wen, Y., Luo, S. (2015). The experimental and numerical study of indirect effect of a rifle bullet on the bone. *Forensic Science International*, 257, 473-480.