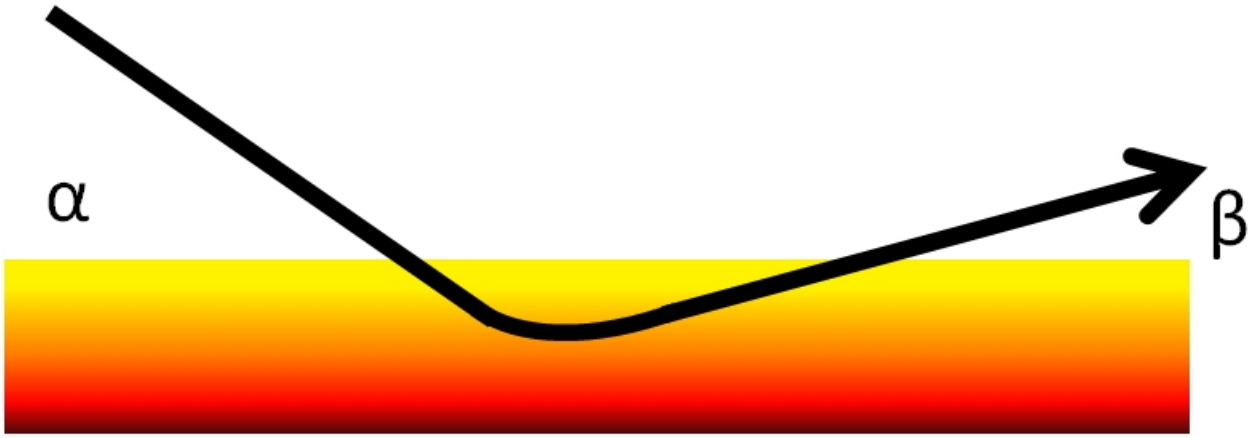
Il colpo di rimbalzo

di

Dr. Ing. Cristian Bettin



Copia gratuita per scopi didattici
Versione 1.3
Ottobre 2018

Dedicato a
Thomas, Lorenzo, Matteo, Marianna e Angela.
E anche al mio caro amico Luigi, per il quale ho ingrandito i caratteri di un punto in questa nova revisione… dato che sono io a scrivere troppo piccolo e non è lui che ci vede poco.

Un ringraziamento a tutti coloro che mi hanno fornito documenti e aiutato nella ricerca bibliografica, in particolare al Dr. sc. forens., Dr. med. h. c. Beat P. Kneubuehl, al Dr. Marco Morin e ai collaboratori del BKA die Wiesbaden (D), dei quali rispettiamo l'anonimato.

Per commenti, suggerimenti e domande è possibile contattare l'autore all'indirizzo: crisbettin@libero.it

Versione	Data	Modifica
1.1	15.09.2012	Modificata copertina
1.2	23.06.2013	Aggiunto studio sui rimbalzi dei proiettili militari dall'acqua. Correzioni stilistiche dei capitoli 4 e 5.
1.3	09.10.2018	Correzioni ortografiche, grammaticali e innumerevoli errori di battitura. Ingrandimento dei caratteri del testo. Correzione di qualche parola sbagliata. Aggiunta della presentazione del pericolo rimbalzi a caccia.

Sommario

1 Introduzione
1.1 Premessa
1.2 Un lavoro in continuo sviluppo
1.3 Motivazioni dello studio
1.4 Definizione del campo di analisi

2 Fondamenti di fisica dei rimbalzi
2.1 Introduzione
2.2 Sistema di riferimento e di misura
2.3 Concetti fondamentali di fisica
2.3.1 Conservazione della massa e del baricentro
2.3.2 Legge di Newton
2.3.3 Conservazione dell'energia
2.4 Le leggi degli urti
2.4.1 Tipi di urto
2.4.2 Urto centrale frontale
2.4.3 Urto centrale obliquo
2.4.4 Urto eccentrico frontale
2.4.5 Urto eccentrico obliquo
2.5 Cenni sui movimenti rotatori dei corpi rigidi e sulla stabilità in volo

3 Teoria del rimbalzo
3.1 Introduzione
3.2 Definizione e simboli
3.3 Parametri che influenzano il colpo di rimbalzo
3.4 Il proiettile schematizzato come punto materiale
3.4.1 Assunzioni e semplificazioni preliminari
3.4.2 Urto tra punto materiale e corpo di grande massa
3.4.2.1 Considerazioni generali
3.4.2.2 Teoria del rimbalzo applicata al punto materiale
3.4.2.3 Andamento delle funzioni e approssimazioni
3.4.3 Urto tra punto materiale e corpo di massa piccola
3.4.3.1 Premessa
3.4.3.2 Angolo di deviazione massimo
3.4.3.3 Perdita di velocità e di energia
3.4.3.4 Deviazione di un proiettile a causa di rametti e vegetazione sottile
3.4.3.5 Gocce di pioggia
3.5 Il proiettile schematizzato come corpo rigido
3.5.1 Considerazioni generali
3.5.2 La normale d'urto nei vari tipi di proiettile
3.5.2.1 Definizioni
3.5.2.2 Proiettili a punta tonda (ellisoidale)
3.5.2.2 Proiettili a punta tonda (parabolica)
3.5.2.3 Proiettili a punta ogivale
3.5.2.4 Proiettili troncoconici e a punta piatta
3.5.3 Dati geometrici e fisici dei proiettili

3.5.3.1 Momento d'inerzia e posizione del baricentro
3.5.4. L'impulso ribaltante generato dall'urto
3.5.4.1 Calcolo dell'impulso ribaltante
3.5.4.2 Effetti dell'impulso ribaltante
3.6 Cenni su altre teorie formulate e disponibili in letteratura
3.6.1 Teoria di K. Sellier
3.6.2 Teoria di Jahuari
3.6.3 Teoria di Birkhoff per gli specchi d'acqua

4 La pratica dei rimbalzi – teoria e analisi
4.1 Introduzione
4.2 Definizioni
4.3 Considerazioni generali
4.4 Parametri che influenzano il rimbalzo
4.5 Classificazione delle superfici d'impatto
4.6 Risposta delle superfici d'impatto
4.6.1 Superfici rigide (non cedevoli)
4.6.2 Superfici cedevoli, cedevoli frangibili e liquide
4.7 Impatti contro materiali duri, non cedevoli
4.8 Impatti contro materiali cedevoli e frangibili
4.9 Impatti contro materiali cedevoli ma non frangibili
4.9.1 L'acqua, un elemento particolare
4.10 I doppi segni di rimbalzo
4.11 Considerazioni tattiche sui colpi di rimbalzo

5 La pratica dei rimbalzi – risultati sperimentali
5.1 Considerazioni sulle prove di rimbalzo
5.2 Risultati sperimentali pubblicati in letteratura
5.2.1 Metallo
5.2.1.1 Superfici di metallo spesse (superfici indeformabili in genere)
5.2.1.2 Lamiere sottili di metallo
5.2.2 Legno
5.2.2.1 Tavole di legno
5.2.2.2 Tronchi d'albero
5.2.2.3 Rami e cespugli
5.2.3 Calcestruzzo
5.2.3.1 Proiettili per arma corta (pistola, rivoltella)
5.2.3.2 Proiettili per carabina
5.2.4 Asfalto
5.2.5 Sabbia
5.2.6 Acqua
5.2.7 Strade sterrate e terreni
5.2.8 Studi particolari
5.2.8.1. Das Abprallen der Geschosse aus forensischer Sicht
5.2.8.2. Abprallverhalten von Jagdmunition – Il rimbalzo dei proiettili da caccia
Bibliografia in ordine alfabetico
Bibliografia in ordine numerico
Presentazione: Rimbalzi dei proiettili a caccia, Riva del Garda 2018

1 Introduzione

1.1 Premessa

Il rimbalzo dei proiettili è un argomento minore della balistica, le sue leggi sono sconosciute alla massa di coloro che, per lavoro o per diletto, usano le armi da fuoco. Escludendo pochissime eccezioni, il rimbalzo non è un fenomeno voluto poiché la traiettoria conseguente a un rimbalzo è, in molti casi, prevedibile solo con un discreto margine d'errore.

La teoria degli urti, insegnata nei corsi di fisica, non descrive il fenomeno con riferimento ai proiettili sparati da un'arma da fuoco, e sia i libri di balistica sia quelli di fisica non affrontano la teoria del rimbalzo con finalità pratica. I rari articoli di balistica forense, pubblicati su testate internazionali, sono spesso limitati alla sola descrizione degli eventi osservati e non offrono alcuna spiegazione o analisi scientifica del fenomeno. Le persone interessate a comprendere e analizzare un rimbalzo sono spesso professionisti appartenenti a settori molto diversi tra loro (avvocati, giudici, medici, operatori di pubblica sicurezza, investigatori forensi, ecc.), i quali si confrontano con l'argomento principalmente in concomitanza con discussioni sulla sicurezza nell'uso delle armi da fuoco o nell'ambito di analisi, ricostruzioni o valutazioni di eventi legati all'uso delle armi [2,3,4,8,9,10,11,12,13,14,15]. Non sorprende, quindi, che i pochi testi disponibili sul rimbalzo dei proiettili siano spesso molto specifici e limitati all'analisi di uno o pochi casi particolari.

Negli ultimi decenni, ad alcuni laboratori accademici sono state commissionate una serie di ricerche volte all'analisi delle leggi e delle regole che governano il fenomeno, contribuendo alla comprensione del rimbalzo dei proiettili e fornendo una base scientifica per le ricostruzioni forensi. Purtroppo gli studi di questi scienziati sono poco noti al pubblico italiano.

Questo testo è stato scritto per divulgare i risultati di decenni di ricerche internazionali e metterli a disposizione di coloro che, per lavoro o per diletto, si confrontano con il rimbalzo dei proiettili, proponendo le nozioni e i concetti fondamentali che regolano il rimbalzo dei proiettili, descrivendo alcuni metodi e strumenti necessari per condurre l'analisi di un rimbalzo e fornendo una casistica di combinazioni proiettile–velocità–bersaglio.

A causa della natura tecnica e soprattutto matematica della teoria fisica, la comprensione di alcuni passaggi richiede una conoscenza base della tecnologia delle armi da fuoco e nozioni di fisica e di matematica, per le quali si rimanda a testi appositi.

Al fine di facilitare la lettura a un pubblico poco incline alla matematica e per offrire un taglio da manuale a coloro che sono interessati unicamente alla ricostruzione e l'interpretazione degli eventi, il libro è stato strutturato in due parti, indipendenti tra loro.

La prima parte comprende i capitoli due e tre e riassume i principi fisici dei rimbalzi. Il secondo capitolo descrive le leggi che regolano il fenomeno e propone le formule necessarie per un'analisi numerica. Il terzo unisce la teoria pura alla pratica sperimentale dei rimbalzi. Le formule e i metodi descritti sono utilizzati per analizzare le leggi naturali che governano i casi di rimbalzo. La lettura di questa parte richiede una buona base di fisica e di matematica, ed è di ausilio per comprendere il perché dei rimbalzi. I capitoli contengono alcune nozioni di balistica ed esempi trasposti alle armi da fuoco. Se ne consiglia comunque la lettura anche a chi non avesse molta simpatia per le formule, semplicemente ignorando le equazioni matematiche e concentrandosi sul testo e sulle tabelle.

La seconda parte riporta invece una descrizione pratica del rimbalzo e i risultati di numerose prove. Questa parte non richiede lo studio dei capitoli precedenti ed è stata scritta tenendo conto dei lettori interessati alla ricostruzione degli eventi piuttosto che all'analisi dei principi fisici. Il

quarto capitolo è dedicato alla comprensione e l'interpretazione delle prove pratiche di rimbalzo. Il quinto capitolo descrive gli strumenti e i metodi usati dall'autore durante le proprie prove e riassume i principali dati sperimentali riportati in letteratura. I capitoli quattro e cinque non richiedono particolari conoscenze matematiche o di fisica ma danno per scontato alcune nozioni sulle armi da fuoco.

Per una migliore comprensione della materia si consiglia a tutti di leggere la parte sulla definizione dei simboli e dei termini utilizzati, raccolta all'inizio del capitolo 3 e riproposta nel capitolo 4 in forma semplificata.

Alcuni passaggi nel capitolo sulla teoria fisica sono stati scritti usando un linguaggio corrente, sicuramente difettando nel rigore scientifico, ma in favore di una comprensione più alla portata di tutti.

1.2 Un lavoro in continuo sviluppo

Questo libro contiene riferimenti a studi svolti e pubblicati su testate internazionali, ricerche di proprietà governative, ricerche di istituti privati, università e lavori di singoli. Oltre ad alcuni studi condotti dall'autore. I riferimenti bibliografici, le citazioni e la provenienza delle immagini sono riportati tra parentesi quadre [-]. Il lettore noterà molti riferimenti a studi in lingua tedesca. Questa scelta è condizionata dalla disponibilità di ottimo materiale in sola lingua tedesca e dai contatti personali dell'autore con alcuni dei ricercatori svizzeri e tedeschi citati, oltre al fatto che l'autore stesso è bilingue (italiano-tedesco) e lavora prevalentemente con i paesi di lingua tedesca.

E' stato scelto di distribuire gratuitamente questo libro, poiché molte delle informazioni raccolte sono pervenute all'autore in forma gratuita o sotto forma di scambio reciproco. Con questo gesto l'autore spera di invogliare eventuali ricercatori italiani (presenti o futuri) ad un mutuo scambio di informazioni e di offrire uno scorcio sugli studi che vengono effettuati all'estero in ambito balistico.

Il testo non è ancora completo. Entro metà del 2013 terminerà un secondo studio sui rimbalzi finanziato dal governo tedesco e l'autore eseguirà una serie di prove per analizzare dei casi particolari. Appena saranno disponibili i dati e le nuove foto saranno integrate nel libro.

Il materiale contenuto in questo libro è messo a disposizione gratuitamente per soli scopi didattici, rimangono invariati tutti i diritti d'autore dei testi citati e del materiale di proprietà dell'autore.

1.3 Motivazioni dello studio

La necessità di prevedere o ricostruire la traiettoria di un proiettile deriva solitamente dal bisogno di sicurezza (definizione delle aree di tiro -> prevenzione) o dalla ricostruzione a posteriori di eventi spesso legati ad azioni delittuose (-> ricostruzione). L'autore di questo libro opera nel settore delle munizioni e si è trovato più volte a dover valutare, prevenire o limitare il rimbalzo dei proiettili sviluppati o prodotti.

Alla fine degli anni novanta, la polizia tedesca introdusse nel proprio capitola di fornitura un test di verifica sul rimbalzo dei proiettili [45]. La stesura del capitolato coinvolse balistici appartenenti a laboratori nazionali e l'industria delle munizioni, ed ebbe come conseguenza la

formazione di un piccolo gruppo di tecnici, usi a trattare l'argomento in modo scientifico e aperti allo scambio d'informazioni.

La volontà di incrementare i dati disponibili sui propri progetti e la necessità di verificare le informazioni raccolte hanno fornito all'autore una notevole mole di materiale sull'argomento. Guardando la bibliografia elencata in appendice si nota subito che, tra tutti i testi riportati, nessuno è in lingua italiana. La scelta di condividere in italiano le informazioni raccolte ha infine dato il via alla stesura di questo studio.

Studiando i lavori citati si nota una differenza d'impostazione. Gli autori di estrazione forense prediligono un approccio pratico-empirico (vedere cosa succede e asserire se un rimbalzo sia possibile o meno), mentre i ricercatori accademici seguono una via teorico-analitica (ipotesi, simulazione, verifica e postulazione/deduzione del significato). Molti studi sono stati pubblicati su riviste scientifiche in lingua inglese e sono accessibili tramite i canali informativi accademici, ma esistono ricerche molto interessanti scritte in lingue diverse e mai tradotte, oppure pubblicate su riviste ritenute troppo specialistiche per il mondo universitario italiano. Negli anni settanta del secolo scorso, lo studio del rimbalzo dei proiettili in Europa si focalizzò nella parte centrale del continente (Germania e Svizzera in testa), attorno ad un piccolo gruppo di ricercatori prolifici, i quali scrissero però quasi esclusivamente in lingua tedesca. Il loro lavoro è passato alla generazione di studiosi seguente, accrescendosi, ma continuando ad essere pubblicato in lingua locale. L'autore di questo libro si è egli stesso formato con le nozioni impartite da questa scuola, ed essendo legato professionalmente al contesto della balistica svizzera e tedesca, il lettore non dovrà meravigliarsi della presenza ricorrente di sigle e nomi tedeschi.

1.4 Definizione del campo di analisi

Lo studi del rimbalzo dei proiettili fa parte della balistica terminale, cioè di quel ramo della fisica che studia l'interazione tra il proiettile in volo e un altro corpo (solido o liquido) - chiamato bersaglio. Le leggi fisiche che governano l'interazione tra questi due corpi appartengono alla teoria degli urti.

Purtroppo non è possibile studiare le leggi naturali senza affrontare la teoria fisica, ma è possibile capire e prevedere il comportamento di un proiettile avvalendosi della sperimentazione pratica e osservando il fenomeno, cioè usando un approccio empirico. Ciò fa dello studio dei rimbalzi una scienza squisitamente sperimentale che, se supportata da una fondata cognizione teorica, permette di rispondere a molte domande.

Dall'analisi di un proiettile rimbalzato e del suo punto d'impatto è possibile ricavare molte informazioni riguardo alla dinamica dell'evento[8]. Rimbalzo e volo sono soggetti alle leggi naturali della fisica e quindi legate l'uno all'altro.

Avvalendosi di un processo di ragionamenti logici è possibile dedurre alcune semplici regole che facilitano l'analisi pratica (come vedremo nei capitoli dedicati alla sperimentazione) ed hanno valore generale.

Per restringere il campo di ricerca e ridurre il numero di prove da eseguire (e di conseguenza i costi), si fa spesso uso di questa deduzione basata sulla naturale comprensione delle leggi fisiche.

Diamo un esempio: La sequenza dinamica di un rimbalzo è data da tre fasi, l'avvicinamento del proiettile al bersaglio, l'interazione tra proiettile e bersaglio e l'allontanamento del proiettile dal bersaglio.

Alcune deduzioni di fisica alla portata di tutti sono che: maggiore è l'angolo con cui un proiettile impatta contro un corpo, tanto più grandi sono le forze che agiscono al momento dell'urto e maggiore sarà il lavoro cui è sottoposto il proiettile durante la fase di rimbalzo. Di conseguenza, la perdita di velocità e la deformazione del proiettile saranno più grandi rispetto a quelle che si avrebbero con un impatto a un angolo d'incidenza minore. Inoltre, si può anche affermare che se la superficie d'impatto è cedevole, la deformazione o distruzione che subirà crescerà all'aumentare dell'angolo d'incidenza [8].

L'importanza di queste deduzioni "concatenate" risiede nel fatto che il numero di variabili con le quali è possibile eseguire una prova di rimbalzo è molto grande. Le combinazioni calibro/tipo di proiettile/velocità d'impatto/angolo d'impatto/bersaglio possibili sono talmente tante che non è possibile provarle tutte. Fortunatamente non è neppure necessario, poiché il rimbalzo dei proiettili segue alcune regole (come vedremo nei prossimi capitoli).

Riportiamo a titolo informativo che le deduzioni dell'analisi svolta dinanzi non sono solo frutto di un ragionamento logico, ma sono anche state ampiamente studiate e verificate (vedi bibliografia di Backman M., Goldsmith W. [1]).

I testi di balistica terminale descrivono diverse possibili interazioni tra un proiettile e il suo bersaglio [1]. Per lo studio dell'argomento trattato di seguito le riassumiamo in tre classi:

- Il proiettile (integro o in pezzi) rimbalza contro il bersaglio → rimbalzo
- Il proiettile rimane conficcato nel bersaglio → inglobato
- Il proiettile perfora il bersaglio ed esce (integro o in pezzi) dalla parte posteriore del bersaglio → perforazione

Quale di questi casi subentra dipende principalmente dall'angolo d'incidenza e dall'energia posseduta dal proiettile al momento dell'urto, ma anche dal materiale, dalle dimensioni del bersaglio e dalla struttura del proiettile [3].

Backman e Goldsmith [1] hanno proposto un diagramma delle fasi visualizzando in due dimensioni le tre fasi descritte. Il grafico mette in relazione l'angolo d'incidenza con l'energia del proiettile.
Notare che il diagramma delle fasi raffigurato (fig.1.1) riporta in ordinata la velocità del proiettile anziché l'energia.

Si ricorda che l'energia posseduta dal proiettile prima dell'impatto è quella cinetica. Dato che un proiettile non varia il suo peso mentre vola, l'energia posseduta è direttamente correlata alla sua velocità.

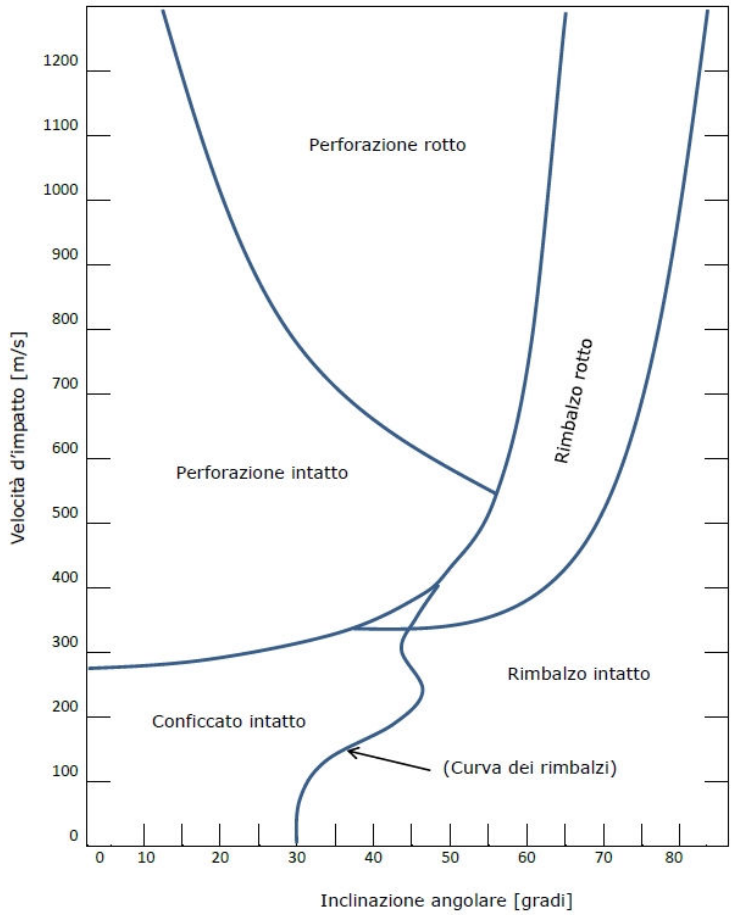


Fig. 1.1 Diagramma di Backman Goldsmith per un proiettile ogivale calibro 6,35mm contro una piastra di alluminio spessa 6,35mm [1].

Dato che il materiale del bersaglio e il tipo di proiettile sono due parametri fondamentali per la creazione di un diagramma di Backman-Goldsmith, ogni grafico è valido unicamente per la combinazione proiettile/bersaglio studiata. La costruzione di un diagramma di Backman-Goldsmith richiede molto lavoro, poiché copre un angolo d'impatto di 90° e un campo di velocità molto ampio [3].
Fortunatamente lo studio dei rimbalzi non ha bisogno di tutto il diagramma, ma si avvale solo della curva dei rimbalzi.

La riduzione del campo di analisi è spesso imposta da esigenze dell'indagine che si vuole condurre. Il campo di velocità si limita in genere a quelle tipiche di alcuni calibri, e gli angoli d'incidenza a poche situazioni per le quali si vuole una valutazione ([2], [3], [8]).
Molti studi sui rimbalzi dei proiettili si propongono di rispondere a una o più delle seguenti domande:

- La determinazione dell'angolo d'incidenza massimo per una data combinazione arma/ proiettile/ bersaglio (→ trovare l'angolo critico).
- La possibilità o meno di ottenere un certo angolo di rimbalzo con una specifica combinazione arma/ proiettile/ bersaglio (→ ricostruzione di un evento).
- Stabilire il potenziale lesivo di un proiettile rimbalzato (→ balistica lesionale).

L'aspetto della ricostruzione di un evento, assieme a quello della balistica lesionale, è probabilmente tra i più noti e più studiati. Gli articoli che trattano questa casistica sono spesso pubblicati in lingua inglese, ma esistono molti documenti interessanti che sono scritti in lingua locale, in particolare le tesi di dottorato e gli studi commissionati dal governo ai propri laboratori. L'autore di questo libro ritiene che alcune delle monografie più significative degli ultimi anni siano state scritte in tedesco e sono tutte, non a caso, scaturite da un'unica scuola, che continua ancora oggi ad evolversi e a studiare il fenomeno. Stralci di questi studi sono stati trovati in diversi articoli, alcuni pubblicati anche in Italia, e purtroppo non sempre esenti da errori di traduzione o d'interpretazione. Confrontando alcune ricerche in lingua tedesca con quelle pubblicate in altri paesi, si possono notare delle sottigliezze lessicali con un risvolto pratico. La lingua di Goethe usa in balistica alcuni termini specifici che non sono mai stati tradotti univocamente. Segnaliamo (a titolo di curiosità più che di nozione) tre parole meritevoli di attenzione, i termini "Prellschuβ", "Abpraller" e "Querschläger". I primi due sono sinonimi e indicano un proiettile di rimbalzo. Prellschuβ e Abpraller sono tradotti sia in inglese che in francese con la medesima parola, "ricochet". Il vocabolario tedesco possiede in più il termine Querschläger, spesso tradotto erroneamente anch'esso con ricochet. Un Querschläger indica effettivamente un proiettile che impatta dopo un volo instabile, ma non ascrive l'instabilità ad un urto. La traduzione letterale di Querschläger è "impattato di traverso". Non è strano per un colpo di rimbalzo colpire di traverso ma, a differenza di altri casi, quando si parla di rimbalzi si conosce sempre la causa dell'instabilità (ovvero l'urto subito). Per la ricostruzione degli eventi è però fondamentale capire se il foro sul bersaglio ha forma irregolare a seguito di un'instabilità causata da un urto o per un altro motivo.
L'instabilità di un proiettile causata dall'urto contro un corpo (per esempio un ramo, un muro o il suolo) è, infatti, diversa da quella ascritta a un'insufficiente stabilizzazione del proiettile da parte dell'arma.
Il colpo di rimbalzo, "Abpraller" o "ricochet", è un proiettile originariamente in volo stabile che ha subito un urto lungo la sua traiettoria. In seguito alla perturbazione esterna, il suo asse longitudinale inizia a muoversi con un movimento conico piuttosto complicato (vedi cap.2.5). Questo movimento è smorzato dal momento giroscopico stabilizzante impresso dalla rigatura dell'arma (il quale agisce comunque sul proiettile, nonostante l'urto). Un colpo instabile a causa di un rimbalzo ritorna quindi in condizione di volo stabile (con la punta in avanti) dopo un certo tempo di volo [4].
E' possibile visualizzare l'instabilità di un proiettile tramite i fori che fustella colpendo dei cartoncini posti lungo la sua traiettoria. La figura 1.2 mostra quattro fori su cartone di un proiettile reso instabile a seguito di un urto.

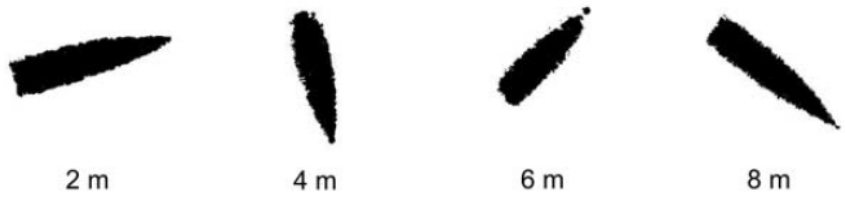


Fig 1.2 Visualizzazione su cartone dell'instabilità causata da un urto, da [4].

L'asse del proiettile ruota lungo un cono attorno alla traiettoria e cambia continuamente direzione.

Il termine "Querschläger" indica invece un proiettile che non è stato stabilizzato sufficientemente dall'arma (per esempio a causa di una canna usurata). Il proiettile vola ruotando lungo un asse

trasversale (si ribalta in continuazione) e non procede mai con la punta rivolta verso la direzione di volo (cioè non assume mai una posizione di stabilità) [4]. La figura 1.3 mostra i fori lasciati da un proiettile sparato senza stabilizzazione.

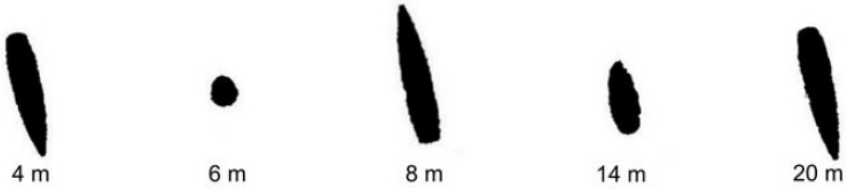


Fig. 1.3 Fori su cartone di un proiettile con insufficiente stabilità causata da una canna consumata. L'asse del proiettile ruota sempre sullo stesso piano, producendo periodicamente un foro tondo, da [4].

L'effetto terminale di un proiettile che colpisce il bersaglio volando secondo la fig.1.2 o la fig.1.3 può essere lo stesso, ma il motivo per cui il bersaglio presenta un foro allungato non è necessariamente ascrivibile a priori (vedi il foro a 4m in fig.1.2 e quello a 20m in fig.1.3). La trattazione di questo testo riguarda il primo caso, ma le considerazioni di balistica esterna che seguiranno sono valide anche per il secondo.

2 Fondamenti di fisica dei rimbalzi

2.1 Introduzione

Il rimbalzo dei corpi rigidi è un argomento marginale, o addirittura assente, nella maggior parte dei testi di meccanica e di fisica. Poiché lo studio analitico del fenomeno non può prescindere dalla conoscenza della fisica, si è scelto di riassumere le leggi necessarie per studiare il rimbalzo dei proiettili.

Questo capitolo vuole proporre le nozioni utili per distinguere i casi di rimbalzo da un punto di vista della fisica e fornire alcuni strumenti analitici utili per descrivere il sistema osservato.

I casi di rimbalzo saranno schematizzati in quattro modelli. Per ogni modello le incognite cercate sono la velocità, la direzione e l'energia del proiettile, prima e dopo l'urto.

Le formule necessarie per calcolare i parametri cercati sono proposte senza esplicitarne i passaggi matematici.

Saranno introdotti anche dei parametri utili per lo studio pratico dei rimbalzi, spiegandone il significato e proponendo alcuni strumenti per determinarli analiticamente.

Il paragrafo sui movimenti rotatori del corpo rigido e sulla stabilità di un proiettile ha validità generale e descrive il volo reale di un proiettile, indicando le implicazioni che questo ha nello studio dei rimbalzi.

La teoria fisica e le informazioni dei grafici riportati in questo capitolo sono tratte da [3,5,6,26,31,44].

2.2 Sistema di riferimento e di misura

Il sistema di riferimento usato in questo libro è il sistema di coordinate balistico. Gli assi x e y formano un piano verticale sul quale l'asse x procede in orizzontale, mentre l'asse y ha verso opposto a quello della forza di gravità. L'asse z completa la terna formando un sistema destrorso (vedi fig. 2.1).

Le unità di misura seguono il sistema internazionale (SI) – kg, m, s ecc.

Nota: le lettere in grassetto indicano grandezze vettoriali.

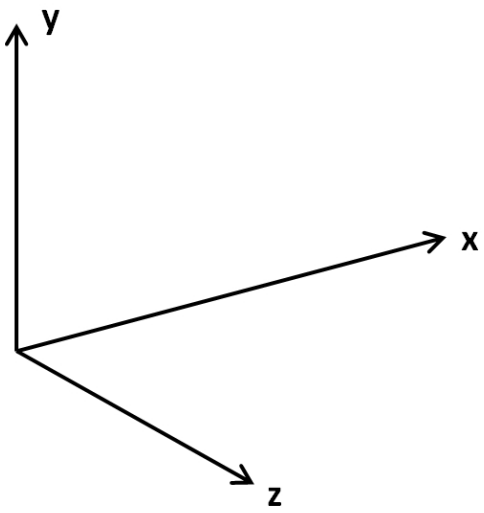


Fig. 2.1. Sistema di coordinate balistico

2.3 Concetti fondamentali di fisica

2.3.1 Conservazione della massa e del baricentro

In questo capitolo trova applicazione il principio di conservazione della massa. Lo studio dei rimbalzi richiede, talvolta, anche l'applicazione del principio di conservazione del baricentro. Questo secondo principio afferma che la posizione del baricentro di una massa (o di un sistema di masse) non viene modificata da eventuali forze interne presenti in un corpo. Qualora il corpo dovesse frantumarsi, la traiettoria del baricentro dell'insieme di tutti i pezzi proseguirà lungo la traiettoria che avrebbe avuto il corpo integro.

2.3.2 Legge di Newton

Alla base della trattazione degli urti sta il secondo principio della dinamica, noto anche con il nome di legge di Newton:

(2.1) $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$ [N]

Introducendo la definizione di quantità di moto:

(2.2) $\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$ [N]

si ricorda che la variazione temporale dell'impulso è uguale alla somma delle forze agenti:

(2.3) $d/dt \sum p_i = d/dt (m_i \cdot v_i) = \sum F_k$ [N]

In mancanza di forze estere ne deriva il principio di conservazione dell'impulso:

(2.4) $p_{tot} = \sum p_i = cost.$ [N·s]

2.3.3 Conservazione dell'energia

La termodinamica insegna che nei processi meccanici è possibile suddividere l'energia (sotto forma di lavoro) in energia meccanica ed energia termica. L'energia meccanica si suddivide a sua volta in energia potenziale (E_{pot}), energia cinetica (E_{kin}) ed energia rotazionale (E_{rot}). In un sistema chiuso la somma delle energie rimane costante. Se Q simboleggia l'energia termica, possiamo scrivere:

(2.5) $E_{pot} + E_{kin} + E_{rot} + Q = cost.$ [J]

Nella trattazione degli urti è lecito omettere la componente termica solo in casi molto rari (urto completamente elastico).

2.4 Le leggi degli urti

2.4.1 Tipi di urto

E' possibile descrivere il fenomeno dell'urto come due corpi (masse) che si scontrano. Durante la loro mutua interazione, i corpi si scambiano parti della loro energia e del loro impulso. Una certa quantità di energia cinetica può anche essere trasformata in calore o lavoro meccanico (deformazione di uno o entrambi i corpi). Ne consegue che l'urto modifica i vettori velocità dei corpi.

Per descrivere le tipologie di urto utilizziamo i vettori, che indicano la direzione di movimento dei corpi, e una retta, chiamata normale d'urto. La normale d'urto passa per il punto di contatto dei due corpi ed è perpendicolare al piano tangente in comune nel punto di contatto (vedi fig. 2.2). La normale d'urto è in pratica la retta d'azione lungo cui agiscono le forze d'urto.

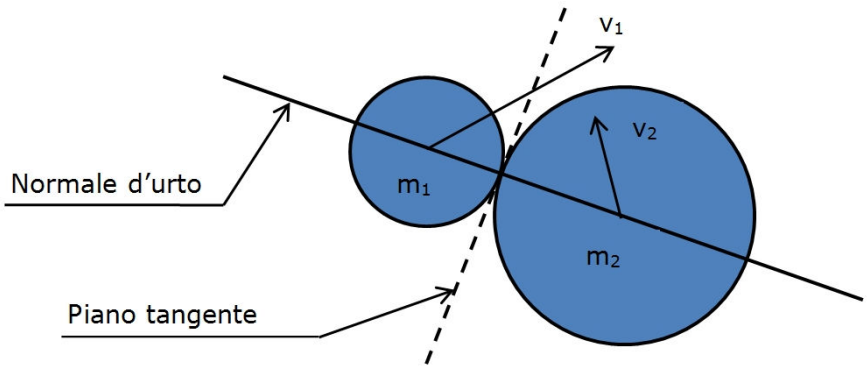


Fig. 2.2 Definizione della normale d'urto

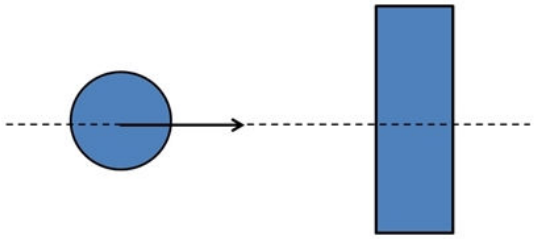
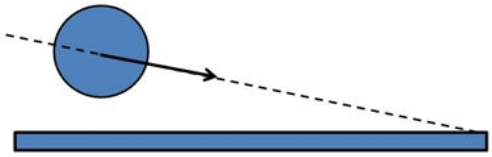
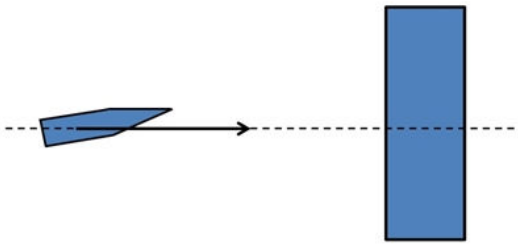
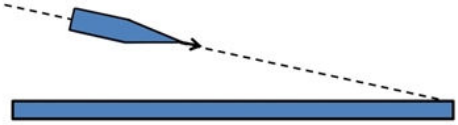
I tipi di urto che presentiamo sono quattro e si differenziano sia per la direzione reciproca che possono assumere i vettori velocità $\mathbf{v}_1$ e $\mathbf{v}_2$ sia per la posizione dei baricentri dei corpi nel momento dell'urto. Ricordiamo che l'origine dei vettori velocità è sempre il baricentro di massa.
Differenziamo i tipi d'urto in:

- **Urto frontale:** I vettori velocità dei due corpi sono posti su una retta in comune.

- **Urto obliquo:** I vettori velocità sono posti su due rette sghembe (ovvero due rette non parallele ma che neppure si incrociano nello spazio) e la distanza minima tra le rette è tale da portare in collisione i due corpi.

- **Urto centrale e urto eccentrico**: Se nel momento dell'urto i baricentri dei due corpi si trovano sulla normale d'urto, si ha il caso di un urto centrale, altrimenti si parla di urto eccentrico.

I quattro tipi di urto sono raffigurati nella tabella 2.1.

	frontale	obliquo
centrale	 Sfera → impatto frontale	 Sfera → impatto obliquo
eccentrico	 Proiettile→ impatto con angolo d'incidenza	 Proiettile → impatto obliquo

Tab 2.1 Tipi di urto riscontrabili nei rimbalzi dei proiettili

Nella pratica degli urti di proiettili, tutti e quattro i casi descritti trovano applicazione.

La teoria classica degli urti (quella insegnata a scuola) differenzia gli urti in base alla conservazione dell'energia e non con i quattro modelli introdotti. Ricordiamo brevemente questi concetti:

Se durante l'urto l'energia cinetica totale si conserva, si parla di urto **elastico**.

Se in seguito all'urto i corpi si muovono con la stessa velocità, si parla di urto **totalmente inelastico (o anelastico)**.

Gli urti in cui l'energia cinetica totale diminuisce e i corpi possiedono velocità diverse anche dopo l'impatto, si chiamano **parzialmente elastici**.

Nella pratica quotidiana, il caso più comune che si può incontrare con i proiettili è quello eccentrico, obliquo e parzialmente elastico [3].

Per ognuno dei quattro tipi di urto proposti in tabella 2.1 ricaveremo nei prossimi paragrafi le formule necessarie per descrivere il sistema prima e dopo l'urto.

Per agevolare l'analisi introduciamo alcune semplificazioni e definiamo una notazione di scrittura:

Nei passaggi assumeremo che uno dei due corpi è fermo nell'istante prima dell'urto. Dato che dobbiamo mantenere inalterate le condizioni dinamiche del sistema originale, la velocità del corpo in movimento sarà rapportata a quella del corpo assunto fermo.

Gli indici 1 e 2 usati nelle formule identificano i due corpi. 1 indica il corpo in movimento (il proiettile), 2 indica il corpo con velocità nulla prima dell'urto ($v_2 = 0$). Indichiamo inoltre con v le

velocità prima dell'urto e con u le velocità dopo l'urto. Energia e impulso dopo l'urto sono indicizzati con n. Le componenti tangenziali e normali vengono indicizzate rispettivamente con T e N.

2.4.2 Urto centrale frontale

Applicando la legge di conservazione dell'energia, la legge di conservazione dell'impulso, usando le semplificazioni riportate in 2.3.1 e considerando la condizione di urto totalmente inelastico si ha:

(2.6) $m_1 \cdot v_1 = (m_1 + m_2) \cdot u$ [kg·m/s]

(2.7) $½ \cdot m_1 \cdot v_1^2 = ½ \cdot (m_1 + m_2) \cdot u^2 + Q$ [J]

Introducendo il rapporto delle masse $\mu = m_1/m_2$ ed esplicitando la velocità u e il lavoro di deformazione Q otteniamo:

(2.8) $u = \mu/(\mu+1) \cdot v_1$ [m/s]

(2.9) $E_n = \mu/(\mu+1) \cdot E_1$; $Q = 1/(\mu+1) \cdot E_1$ [J]

Notare che E_1 indica l'energia del corpo 1 prima dell'urto, ma data l'ipotesi $v_2 = 0$, E_1 equivale all'energia cinetica totale.

Se una parte del lavoro di deformazione Q è ritrasformata in energia cinetica, l'urto diventa di tipo parzialmente elastico.

Per descrivere la parte di energia cinetica recuperata, E_r, introduciamo il coefficiente di restituzione k. Per convenzione si usa il rapporto:

(2.10) $E_r = k^2 \cdot Q$ [J]

k assume valori compresi tra 0 (urto totalmente inelastico) e 1 (urto elastico).

La quantità di energia cinetica perduta si calcola con:

(2.11) $Q_T = Q – E_r = (1- k^2) \cdot Q = (1- k^2)/(\mu+1) \cdot E_1$ [J]

Q_T indica il lavoro di deformazione scambiato durante l'urto. Lavoro che viene infine scambiato con l'ambiente sotto forma di energia termica.

Il coefficiente di restituzione k non dipende solamente dal materiale o dalla struttura dei corpi che impattano (come si potrebbe credere in un primo istante), ma anche dalla quantità di energia presente durante l'urto. Basti pensare al caso di un proiettile sferico di acciaio (per esempio una biglia) lanciato contro una lastra di ferro. Se la biglia vola a velocità relativamente bassa, l'urto è quasi totalmente elastico (k = 0,95) e la biglia rimbalza. Se invece la stessa biglia vola a velocità molto elevata, perfora la lastra (k = 0).

Applicando le leggi di conservazione (impulso ed energia) all'urto inelastico si ha:

(2.12) $m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2$ [kg·m/s]

(2.13) $\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot u_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot u_2^2 + Q_T$ [J]

Le formule 2.11, 2.12 e 2.13 permettono di esplicitare le velocità e le energie residue dopo l'urto:

(2.14 a,b) $u_1 = (\mu-k)/(\mu+1) \cdot v_1$; $u_2 = (1+k) \cdot \mu /(\mu+1) \cdot v_1$ [m/s]

(2.15 a,b) $E_{1,n} = [(\mu-k)/(\mu-1)]^2 \cdot E_1$; $E_{2,n} = (1+k^2) \cdot \mu/(\mu+1)^2 \cdot E_1$ [J]

Ponendo nelle formule k = 1 si ottengono le leggi che regolano l'urto elastico. Ponendo invece k = 0 si ricavano le leggi per l'urto totalmente inelastico (2.8 e 2.9).

Nella pratica dei rimbalzi dei proiettili, il rapporto tra il peso del proiettile e quello del corpo urtato è spesso molto grande. Questa condizione permette di semplificare le leggi ricavate.
A questo proposito vogliamo evidenziare tre casi particolari di rapporto delle masse. L'ordine con cui sono proposti rispecchia la frequenza riscontrabile nella pratica quotidiana:

A : $m_1 << m_2$ la massa che urta è molto più piccola della massa del corpo urtato. Il rapporto delle masse μ diventa molto piccolo (μ → 0)

B : $m_1 >> m_2$ la massa che urta è molto più grande della massa del corpo urtato. Il rapporto delle masse μ diventa molto grande (μ+1 → μ)

C : $m_1 = m_2$ Le masse sono grandi uguali. Il rapporto delle masse μ equivale a 1

2.4.3 Urto centrale obliquo

In un urto centrale obliquo i vettori forza agenti nell'istante dell'urto passano per i baricentri dei due corpi. Ne consegue che sui corpi non agiscono momenti.

La normale d'urto e il vettore velocità del corpo 1 formano un piano ortogonale al piano tangente. L'origine del sistema di riferimento è posizionata nel punto di contatto dei due corpi, dirigendo l'asse x lungo l'intersezione dei due piani e l'asse y coincidente con la normale d'urto (vedi fig. 2.3).

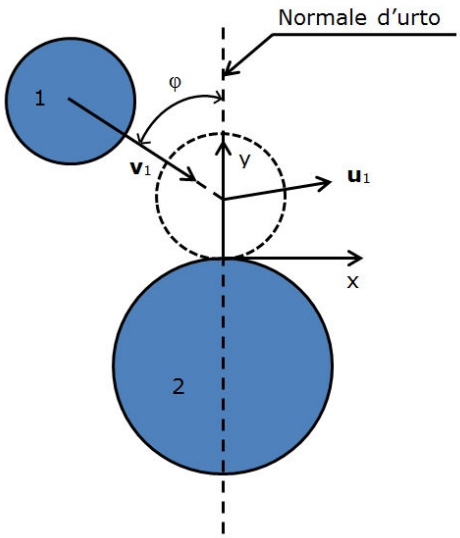


Fig. 2.3 Urto centrale obliquo

Assumendo $\mathbf{v}_2 = 0$ e la direzione di $\mathbf{v}_1$ tale da formare un angolo ϕ con la normale d'urto, abbiamo

$$\mathbf{v}_1 = v_1 \cdot \begin{pmatrix} \sin\varphi \\ -\cos\varphi \end{pmatrix}$$

da cui:

(2.16) $v_{1N} = - v_1 \cdot \cos\phi$ [m/s]

(2.17) $v_{1T} = v_1 \cdot \sin\phi$ [m/s]

Assumendo un urto privo di attriti si ha:

(2.18 a,b) $u_{1T} = v_{1T}$; $u_{2T} = 0$ [m/s]

e applicando le formule (2.14 a,b) si ottiene

(2.19 a,b) $u_{1N} = \frac{\mu-k}{\mu+1} \cdot v_{1N}$; $u_{2N} = \frac{(1+k)\cdot\mu}{\mu+1} \cdot v_{1N}$ [m/s]

con le (2.16) e (2.18 a,b) si può scrivere:

(2.20 a) $\mathbf{u}_1 = v_1/(\mu+1) \cdot \begin{pmatrix} (\mu+1)\sin\varphi \\ -(\mu-k)\cos\varphi \end{pmatrix}$; [m/s]

(2.20 b) $\mathbf{u}_2 = (v_1 \cdot (1+k)\cdot\mu)/(\mu+1) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos\varphi \end{pmatrix}$ [m/s]

Dalle formule si evince che il corpo urtato si sposta lungo la normale d'urto. Il corpo che urta si muove invece con un angolo di rimbalzo β:

(2.21) $\beta = \arctan\left(\frac{\mu-k}{\mu+1} \cdot \cot\varphi\right)$ [°]

La velocità relativa tra i due corpi è data da:

(2.22) $\mathbf{u}_{1\text{-}2} = v_1 \cdot \begin{pmatrix} (\sin\varphi \\ k\cos\varphi \end{pmatrix}$ [m/s]

La perdita di energia cinetica si calcola con:

(2.23) $Q_T = (1- k^2)/(\mu+1) \cdot E_1 \cdot \cos^2\phi$ [J]

2.4.4 Urto eccentrico frontale

L'urto eccentrico frontale è caratterizzato da una variazione dell'impulso e dalla presenza di un momento rotatorio che agisce sui corpi. Nelle formule della conservazione dell'energia e dell'impulso compare quindi un membro che tiene conto del momento agente.

Per semplificare i calcoli riportiamo le equazioni in forma scalare. Inoltre assumiamo che la normale d'urto passi per il baricentro del corpo urtato, cosi che il momento agente sul corpo 2 sia nullo (vedi fig.2.4).

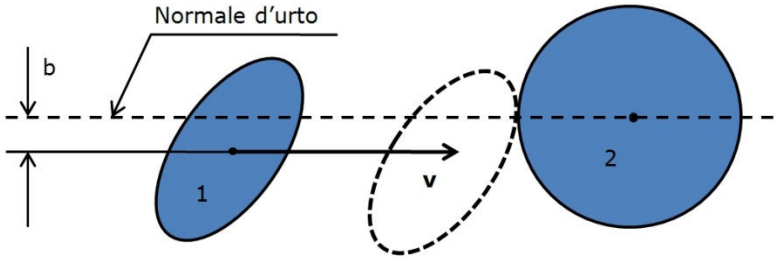


Fig. 2.4 Urto eccentrico frontale

Tenendo sempre valida la semplificazione $\mathbf{v}_2=0$ e applicando le leggi di conservazione già usate nei paragrafi precedenti, si ha:

(2.24) $m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2$ [kg·m/s]

(2.25) $J_1 \cdot \omega_1 = m_1 \cdot (u_1 - v_1) \cdot b$ [kg·m^2/s]

(2.26) $k = -(u_1 - u_2 + \omega_1 \cdot b)/v_1$ [-]

(2.27) $\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot u_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot u_2^2 + \frac{1}{2} \cdot J_1 \cdot \omega^2 + Q_T$ [J]

J_1 indica il momento d'inerzia del corpo che urta, ω_1 la velocità angolare dopo l'urto e b la distanza tra la normale d'urto e il baricentro del corpo che urta.

Le equazioni (2.23 - 2.26) formano un sistema di equazioni non lineare per le velocità di traslazione u_1 e u_2, per la velocità angolare ω_1 e per la perdita di energia cinetica Q_T.

Scriviamo subito il risultato necessario per calcolare i parametri che interessano, senza dilungarci in passaggi matematici. Allo scopo introduciamo il parametro adimensionale θ che chiamiamo coefficiente d'inerzia:

(2.28) $\theta = m_1 \cdot b^2/J_1$ [-]

(2.29) $u_1 = \frac{\mu - k + \theta}{\mu + 1 + \theta} \cdot v_1$ [m/s]

(2.30) $u_2 = \frac{(1+k)\cdot\mu}{\mu + 1 + \theta} \cdot v_1$ [m/s]

(2.31) $\omega_1 = \frac{(1+k)\cdot b}{J \cdot (\mu + 1 + \theta)} \cdot m_1 \cdot v_1$ [1/s]

(2.32) $Q_T = [(1-k^2)/(\mu + 1 + \theta)] \cdot E_1$ [J]

2.4.5 Urto eccentrico obliquo

L'urto eccentrico obliquo è il caso più generico e anche il più frequente nella pratica dei rimbalzi dei proiettili. Durante un urto eccentrico obliquo il corpo che urta (il proiettile) subisce una deviazione ed è soggetto a un momento rotazionale.

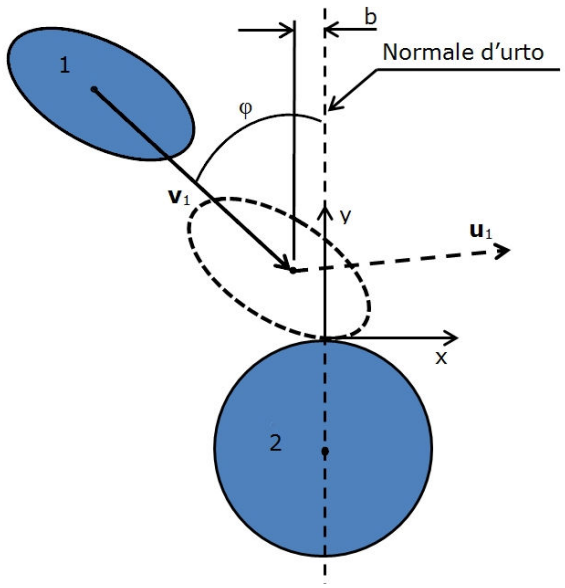


Fig. 2.5 Urto eccentrico obliquo

Le velocità dopo l'urto e la perdita di energia cinetica si calcolano analogamente al caso precedente. Per le componenti del moto dopo l'urto otteniamo:

(2.33) $\mathbf{u}_1 = v_1/(\mu+1+\theta) \cdot \begin{pmatrix} (\mu+1+\theta)\sin\varphi \\ -(\mu-k+\theta)\cos\varphi \end{pmatrix}$ [m/s]

(2.34) $\mathbf{u}_2 = (v_1 \cdot (1+k) \cdot \mu)/(\mu+1+\theta) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ -\cos\varphi \end{pmatrix}$ [m/s]

(2.35) $\omega_1 = \frac{(1+k)\cdot b}{J \cdot (\mu+1+\theta)} \cdot m_1 \cdot v_1 \cdot \cos\phi$ [1/s]

(2.36) $Q_T = [(1-k^2)/(\mu+1+\theta)] \cdot E_1 \cdot \cos^2\phi$ [J]

(2.37) $\beta = \arctan[(\mu-k+\theta)/(\mu+1+\theta) \cdot \cot\phi]$ [°]

(β indica l'angolo di rimbalzo).

Un altro valore d'interesse partico è la deviazione angolare λ (vedi cap. 3.1 per la definizione grafica). λ indica la deviazione totale del proiettile, cioè l'angolo compreso tra la direzione d'incidenza e quella di rimbalzo. Omettiamo i passaggi matematici per calcolare λ e ne forniamo direttamente la formula:

(2.38) $\lambda = \text{acrtan}[(1+k)\sin\phi\cos\phi/(\mu+\theta+\sin^2\phi-k\cdot\cos^2\phi)]$ [°]

2.5 Cenni sui movimenti rotatori dei corpi rigidi e sulla stabilità in volo

L'importanza dei moti rotatori dei corpi rigidi risiede nel fatto che quasi tutti i proiettili analizzati per motivi forensi sono corpi stabilizzati giroscopicamente. Espresso in parole più semplici, i proiettili sparati dalle armi con canna rigata volano stabilmente grazie alla rotazione impressa dalla rigatura della canna al proiettile stesso e sono paragonabili (da un punto di vista della fisica) a delle trottole (dei giroscopi).

La caratteristica peculiare di un giroscopio è che, mentre basta una piccola forza per fare deviare l'asse giroscopico di un corpo quando è in quiete, ne occorre invece una di notevole entità per produrre una sensibile deviazione dell'asse se il corpo è in rapida rotazione intorno ad esso. Si manifesta in tal caso una tenacia che attenua notevolmente l'azione deviatrice di una data forza [49].

La trattazione matematica dei giroscopi è assai complessa, ne daremo qui solo un cenno descrittivo con finalità pratica. Chi volesse approfondire la parte analitica troverà un sunto nell'opera di Kneubuehl [4].

Un proiettile in volo si trova in una condizione di riposo (da un punto di vista fisico) quando l'asse del proiettile coincide con la tangente alla sua traiettoria. L'aria che agisce sul proiettile in volo genera una forza di disturbo, la quale crea un momento ribaltante che tende a spostare l'asse del proiettile dalla sua posizione di riposo. Il proiettile sparato da una canna rigata gira attorno al proprio asse longitudinale con una velocità di rotazione molto elevata e riconduce l'analisi del sistema al caso di un giroscopio soggetto a una forza esterna. Una delle peculiarità dei giroscopi è che reagiscono a una forza esterna non deviando lungo la direzione della forza, ma in direzione perpendicolare alla forza agente. Ne consegue che, a seguito della resistenza posta dall'aria, l'asse longitudinale del proiettile si muove lungo una superficie generante un cono attorno alla direzione di volo (vedi fig. 2.4.1) [5,6]. Questo movimento si chiama **precessione** del proiettile.

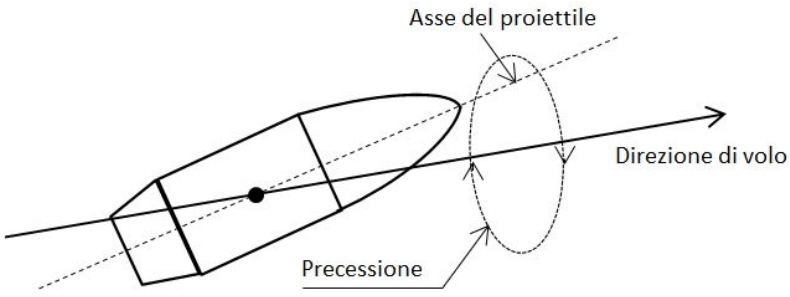


Fig. 2.6 Movimento di precessione

L'angolo compreso tra l'asse del proiettile e la direzione di volo si chiama angolo d'incidenza θ (riferito al volo, da non confondere con l'angolo d'incidenza con cui il proiettile si avvicina al corpo che urterà). Il volo si definisce stabile se l'angolo d'incidenza cala con il procedere del proiettile lungo la traiettoria di volo. Affinché ciò avvenga, è necessario che il momento giroscopico

stabilizzante sia maggiore del momento ribaltante, cioè che sia soddisfatta la condizione di stabilità:

(2.39) $s = (J_a)^2 \cdot \omega^2 \cdot \tan\theta / 4 \cdot J_t \cdot M > 1$ [-]

s si chiama stabilità giroscopica, J_a indica il momento d'inerzia assiale, J_t il momento d'inerzia trasversale, ω la velocità angolare del proiettile, M il momento ribaltante. La disequazione (2.38) è una condizione necessaria ma non sufficiente per la stabilità di un proiettile. Per approfondimenti vedere [31].

Quando un proiettile subisce una perturbazione che tende a farlo ribaltare, al movimento di precessione si sovrappone un altro fenomeno, la **nutazione**. La nutazione fa si che l'asse del proiettile compia delle rotazioni sovrapposte a quella di precessione [5,6].

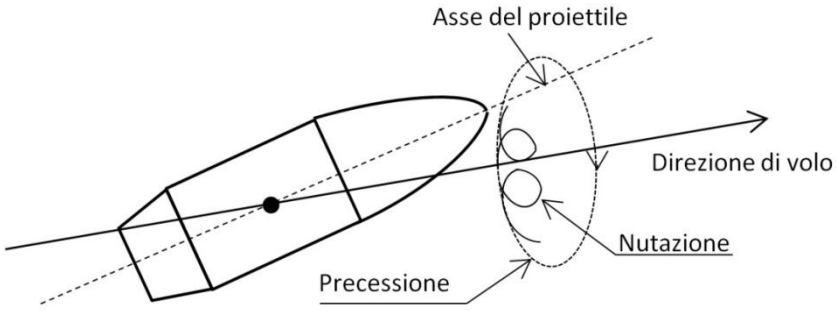


Fig. 2.7 Movimento di precessione e di nutazione

Ogni proiettile compie entrambi i movimenti. La precessione è causata dalla resistenza dell'aria (e quindi un movimento sempre presente fintantoché il proiettile vola), mentre una causa per la nutazione sono, per esempio, i gas di sparo che superano il proiettile nel momento in cui questo esce dalla canna, oppure l'urto contro un oggetto lungo la traiettoria di volo. Poiché la nutazione ha origine da fenomeni di disturbo esterni, il movimento causato dai gas alla volata si smorza nel tempo (la causa generante cessa di esistere), d'altra arte può comparire nuovamente in un punto imprecisato della traiettoria, cioè li dove il proiettile subisce una forza di disturbo esterna (qualunque sia la causa generante).

Il momento ribaltante M, generato dalla resistenza dell'aria, viene spesso descritto in balistica introducendo un coefficiente adimensionale, c_m:

(2.40) $M = c_m \cdot \rho/2 \cdot v^2 \cdot A \cdot d$ [N·m]

ρ è la densità dell'aria, v la velocità del proiettile, A e d rispettivamente l'area e la lunghezza di riferimento (per la quale nella balistica viene scelto il calibro) [5,6].

Inserendo la (2.39) nella (2.38) esplicitiamo s in funzione di alcuni parametri geometrici del proiettile e della velocità di volo:

(2.41) $s = 2/\pi \cdot [((J_a)^2 \cdot \omega^2)/ J_t \cdot c_m \cdot \rho \cdot v^2 \cdot d^3]$ [-]

tenendo c_m costante si osserva che s aumenta al diminuire della velocità di volo, ovvero la stabilità aumenta con la distanza percorsa dal proiettile. Inoltre la perdita di velocità di rotazione ω è nettamente inferiore alla diminuzione di v. Quindi, durante un volo indisturbato, l'instabilità maggiore di un proiettile si ha nella prima fase di volo, a poca distanza dalla volata dell'arma.

Nota: La supposizione di c_m costante è valida fintantoché il proiettile vola in regime supersonico o subsonico. Il passaggio da Mach >1 a Mach <1 (cioè il passaggio della "barriera del suono") agisce da disturbo esterno e può destabilizzare il proiettile.

L'instabilità maggiore non si manifesta immediatamente all'uscita del proiettile dalla canna, ma un poco più avanti, da qualche decina di centimetri fino a qualche metro. I moti di precessione e nutazione non sono immediati ma richiedono un certo tratto di volo per evidenziarne gli effetti.

Nella pratica dei rimbalzi, è interessante sapere che la stabilità di un proiettile è influenzata principalmente dal momento ribaltante e dall'effetto che velocità e angolo d'incidenza del proiettile hanno sul momento ribaltante. L'angolo d'incidenza del proiettile viene però imposto dalla precessione e dalla nutazione, quindi la stabilità di un colpo rimbalzato dipenderà sostanzialmente da come questo reagisce a un urto in quanto giroscopio (cioè da fattori geometrici del corpo).

3 Teoria del rimbalzo

3.1 Introduzione

La balistica pratica non è, purtroppo, una scienza esatta e specialmente nei rimbalzi sono pochi i casi in cui è possibile prevedere l'esatto risultato di una prova. La quantità di variabili che influenza la dinamica di uno sparo è tale da renderlo un evento unico e irripetibile, ma si tratta pur sempre di un fenomeno legato alle leggi della fisica e, in quanto tale, si presta ad essere analizzato con l'ausilio di appositi modelli. Le formule presentate nel secondo capitolo formano la base dalla quale ricavare gli strumenti necessari per elaborare i dati raccolti durante le prove.

Per il lettore interessato all'aspetto pratico e/o ricostruttivo di un rimbalzo di proiettile d'arma da fuoco, il terzo capitolo rappresenta la giunzione tra teoria e sperimentazione. Le nozioni presentate vogliono dare una base analitica, utile per comprendere le leggi che regolano il rimbalzo. Alcune formule forniscono un risultato numerico e sono utili per trovare un primo valore di riferimento, come preparazione di una prova o per verificare la plausibilità di un rimbalzo. Le formule proposte si avvalgono spesso di semplificazioni concettuali e sono valide limitatamente alle ipotesi formulate nei vari paragrafi. Per facilitare la comprensione della materia, il capitolo riporta alcune tabelle numeriche con i valori calcolati dalle formule presentate e riferiti a proiettili veri, a dimostrazione del fatto che, per quanto l'approccio teorico si basi su modelli astratti, applicando la teoria giusta a un caso specifico è possibile ottenere risultati molto vicini alla realtà.

Poiché lo studio della materia non può prescindere da un linguaggio univoco, il capitolo si apre con la definizione dei termini usati per descrivere un rimbalzo.

Si prega di prestare particolare attenzione alla definizione dell'angolo d'incidenza. L'angolo d'incidenza forense (usato in questo libro) è diverso da quello NATO. L'angolo NATO indica con 0° un impatto perpendicolare al bersaglio, mentre nei rimbalzi l'angolo di 0° indica un proiettile che vola tangente al bersaglio. La differenza deriva dal soggetto che si vuole studiare. L'ambito militare è interessato a valutare la capacità di penetrazione e assegna alla situazione più favorevole (per perforare il bersaglio) il valore minimo. La situazione più favorevole nello studio dei rimbalzi si riscontra invece quando il proiettile subisce la deviazione minima, tendente allo zero. In quel caso si conoscono tutti i parametri richiesti, poiché il proiettile struscia lungo il bersaglio senza subire deviazioni dalla traiettoria originale.

Per ricavare le formule di uso pratico il proiettile sarà schematizzato in due modi diversi. Prima sarà ridotto a un punto materiale, ricavando le formule necessarie per descrivere l'evento. Poi si passerà alla trattazione dei corpi rigidi, descrivendo le proprietà geometriche dei proiettili con le conseguenze che queste hanno nella pratica.

I calcoli per determinare i parametri di rimbalzo sono tutti proposti nel modello del punto materiale. L'approccio è giustificato dalle leggi di conservazione presentate nel capitolo di fisica e dalla necessità di fornire delle formule utilizzabili nella pratica quotidiana.
In chiusura del capitolo sono riportate alcune teorie pubblicate in letteratura.

Questo capitolo è tratto liberamente dalla tesi di Kneubuehl [3]. Alcuni passaggi, ritenuti troppo matematici, sono stati omessi e certi concetti di fisica, dati per scontati nell'opera citata, sono stati descritti nel tentativo di facilitarne la comprensione ai lettori poco avvezzi alla fisica.

3.2 Definizione e simboli

La tabella riassume i termini e i simboli usati nelle descrizioni dei rimbalzi.

Definizione	Simbolo	Descrizione
Corpo urtato		Un corpo soldo o liquido che intercetta il proiettile lungo la sua traiettoria di volo.
Punto d'impatto	P_A	Il punto in cui il proiettile tocca la superficie del corpo urtato.
Piano d'impatto		Piano tangente al corpo urtato nel punto di impatto.
Piano d'incidenza		Piano normale al piano d'impatto e lungo la traiettoria indisturbata del proiettile (ovvero prima di impattare sul corpo urato).
Direzione d'incidenza		Vettore tangente alla traiettoria indisturbata del proiettile nel punto d'impatto (parallelo al vettore velocità).
Angolo d'incidenza	α	Angolo tra piano d'impatto e direzione d'incidenza.
Angolo d'impatto	ϕ	Angolo compreso tra la direzione d'incidenza e la normale al piano d'impatto (ϕ= 90°- α). Corrisponde all'angolo NATO.
Velocità d'incidenza	v	Velocità con cui il proiettile colpisce il corpo urtato.
Punto di rimbalzo	P_B	Punto in cui il proiettile abbandona la superficie del corpo urtato.
Piano di rimbalzo		Piano normale al piano d'impatto e lungo la traiettoria del proiettile rimbalzato.
Direzione di rimbalzo		Vettore tangente alla traiettoria del proiettile rimbalzato dal punto di rimbalzo (parallelo al vettore velocità del proiettile rimbalzato).
Angolo di rimbalzo	β	Angolo tra il piano d'impatto e la tangente alla traiettoria del proiettile rimbalzato.
Velocità di rimbalzo	u	Velocità con cui il proiettile si allontana dal corpo urtato.
Deviazione laterale	γ	Angolo compreso tra il piano d'incidenza e il piano di rimbalzo.
Deviazione angolare	λ	Angolo compreso tra la direzione d'incidenza e la direzione di rimbalzo.
Lunghezza della traccia	s_x	Distanza tra il punto d'impatto P_A e il punto di rimbalzo P_B.
Profondità della traccia	s_y	Profondità massima della traccia lasciata sul corpo urtato.
Tempo di contatto	t_c	Durata temporale del contatto tra proiettile e corpo urtato.

Tab. 3.1 Definizioni e simboli

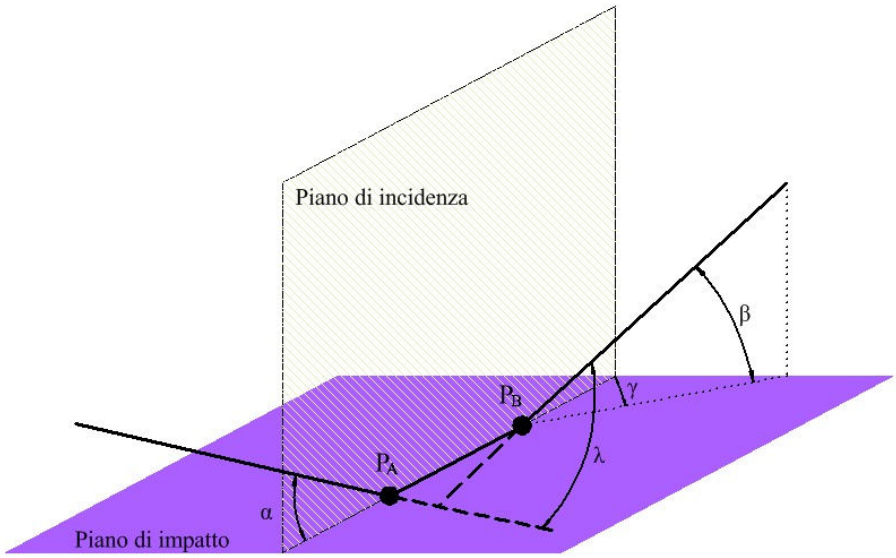


Fig. 3.1 Definizione dei piani, degli angoli e dei punti.

L'origine del sistema di riferimento è collocata nel punto d'impatto P_A. L'asse x è dato dall'intersezione tra il piano d'impatto e il piano d'incidenza. L'asse y è perpendicolare al piano d'impatto mentre l'asse z completa il sistema formando una terna destra (vedi fig.2.1).

Nello studio dei rimbalzi è pratica introdurre alcune semplificazioni geometriche per descrivere il sistema, poiché queste non modificano sostanzialmente la validità generale degli enunciati che seguiranno (ma facilitano molto i calcoli).

Assumiamo quindi che in prossimità del punto d'impatto P_A e di quello di rimbalzo P_B le rispettive traiettorie d'incidenza e di rimbalzo giacciano ognuna su di un piano proprio (chiamati piano d'incidenza e piano di rimbalzo). Con questa semplificazione eliminiamo la variabile di una traiettoria curva in prossimità dei punti d'impatto e di rimbalzo.

Inoltre poniamo i punti d'impatto e di rimbalzo su di un piano in comune (il piano d'impatto).

Le semplificazioni descritte permettono di calcolare la deviazione angolare λ, usando le relazioni geometriche fornite dall'angolo d'incidenza α e da quello di rimbalzo β (vedi fig. 3.1)

(3.1) $\lambda = \arccos(\cos\alpha \cdot \cos\beta \cdot \cos\gamma - \sin\alpha \cdot \sin\beta)$ [°]

Se γ è piccolo (ovvero $\gamma < ¼ \cdot (\alpha + \beta)$ → una condizione che si verifica molto spesso nella pratica) è possibile calcolare la deviazione angolare λ semplicemente sommando l'angolo di impatto con l'angolo di rimbalzo. In questo caso l'errore non supera il 3%

(3.2) $\lambda = \alpha + \beta$ se $\gamma < ¼ \cdot (\alpha + \beta)$ [°]

Qualora si volesse determinare la traiettoria di un proiettile rimbalzato a distanze relativamente grandi, non è più ammissibile semplificare tanto e bisogna considerare anche le piccole deviazioni laterali.

3.3 Parametri che influenzano il colpo di rimbalzo

Il rimbalzo di un proiettile è influenzato dai seguenti parametri:

- **Massa del corpo urtato**. Il rapporto tra la massa del corpo che urta (il proiettile) e quella del corpo urtato definisce quale legge fisica si applica al caso in esame (vedi anche capitolo 2).
- **Materiale e struttura del corpo urtato**. La capacità di penetrare il corpo urtato dipende dal materiale di cui esso è composto. Per l'analisi dell'evento è fondamentale stabilire se il proiettile penetra il corpo contro cui urta e poi rimbalza. Se un proiettile penetra il copro urtato, è possibile che l'angolo di rimbalzo sia diverso da quello che si avrebbe se il proiettile si muovesse solamente sulla superficie del corpo.
- **Dimensione del corpo urtato.** Se la distanza tra il punto d'impatto e il limite esterno del corpo urtato è nell'ordine di grandezza del calibro del proiettile, si osserveranno fenomeni diversi rispetto a una situazione in cui il punto d'impatto si trova più lontano dal bordo del corpo.

  Corpi urtati sottili possono deformarsi e generano fenomeni di rimbalzo completamente diversi rispetto a corpi dello stesso materiale ma più spessi.
- **Materiale e struttura del proiettile.** Sia le proprietà del materiale che la struttura di cui è composto un proiettile (per esempio con o senza mantello di rame o acciaio, a punta cava o piena, con nucleo in piombo o di ottone) influenzano l'angolo e la velocità di rimbalzo.
- **Comportamento del proiettile.** A seguito dell'urto il proiettile può deformarsi, frantumarsi o rimanere inalterato. Quale di queste tre possibilità si manifesterà dipende dalla configurazione del corpo urtato e dalla struttura del proiettile.
- **Energia d'impatto.** In un urto, l'energia cinetica del proiettile influenza il comportamento del proiettile stesso. Un proiettile penetra il corpo urtato solamente se l'energia cinetica posseduta al momento dell'impatto supera una certa soglia minima (l'energia minima dipende dal tipo di materiale del corpo urtato). Se il proiettile non possiede questa quantità minima di energia, le condizioni di rimbalzo saranno completamente diverse rispetto a quelle che avrebbe lo stesso proiettile dotato di energia cinetica superiore alla soglia richiesta (vedi anche il diagramma di Backman-Goldsmith nel primo capitolo). Anche la deformazione e la frammentazione del proiettile richiedono un'energia minima, senza la quale non possono avvenire.
- **Condizioni di volo dopo il rimbalzo.** L'urto tra proiettile e corpo urtato imprime al proiettile una forza e un momento. In funzione dell'intensità della forza e del momento trasmessi, il proiettile prosegue il suo volo in una condizione di stabilità o di instabilità.

3.4 Il proiettile schematizzato come punto materiale

3.4.1 Assunzioni e semplificazioni preliminari

Molti quesiti pratici sui rimbalzi possono essere risolti riducendo il proiettile a un punto materiale. Per semplificare ulteriormente il modello immaginiamo di racchiudere tutto quello che avviene tra proiettile e bersaglio in una scatola. La scatola non ci permette di vedere cosa succede al suo interno, ma solamente di osservare gli istanti prima e dopo il rimbalzo (vedi fig. 3.2).
Inoltre non consideriamo il movimento proprio del proiettile (nutazione, precessione, ecc.) e le sue eventuali deformazioni. Infine assumiamo anche che la massa del proiettile rimanga costante.
Le variabili che ci servono per descrivere il fenomeno di rimbalzo sono l'angolo e la velocità del proiettile e l'angolo e la velocità del corpo urtato, valutati negli istanti prima e dopo l'urto.

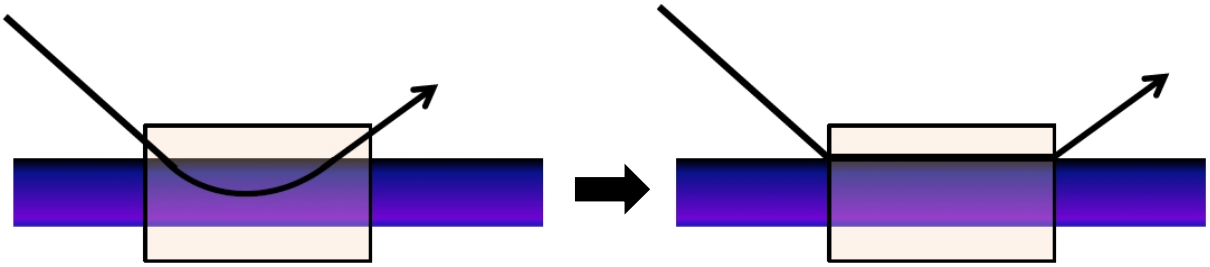


Fig. 3.2 Rimbalzo schematizzato come punto materiale

3.4.2 Urto tra punto materiale e corpo di grande massa

3.4.2.1 Considerazioni generali

Il modello del punto materiale che urta contro un corpo di massa molto più grande al suo è un caso assai frequente nella realtà. Basti pensare a un proiettile che impatta contro un pavimento, un muro o altri oggetti molto pesanti.

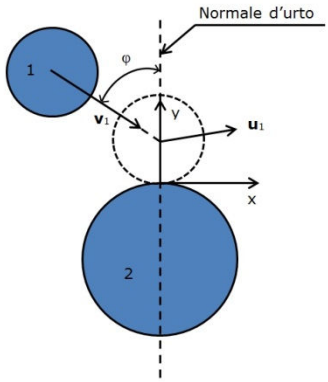
I corpi urtati di grande massa si dividono in due tipologie. Corpi **teneri**, che permettono al proiettile di penetrare (per esempio legno, sabbia, acqua) e corpi **duri**, per i quali l'interazione tra corpo urtato e proiettile avviene esclusivamente sulla superficie del corpo urtato (per esempio lastre spesse di acciaio, calcestruzzo compatto).

Una caratteristica di questo problema è che, in una visione globale del sistema, il proiettile non trasmette alcuna componente di impulso al corpo urtato. Non escludiamo che localmente questo possa avvenire, si pensi per esempio al materiale scagliato durante l'urto con un corpo tenero, ma nella visione globale del sistema la massa del corpo urtato è tale da non risentire dell'urto del proiettile.

La riduzione del proiettile a punto materiale pone le premesse per utilizzare la teoria dell'urto centrale obliquo. Nel seguito del paragrafo 3.4.2 utilizzeremo quindi le relazioni sviluppate nel paragrafo 2.4.3 con la condizione $\mu \rightarrow 0$.

3.4.2.2 Teoria del rimbalzo applicata al punto materiale

L'indipendenza dei moti ci consente di scomporre un movimento in due componenti.



Scomponiamo il vettore d'incidenza $\mathbf{v}_1$ in una componente normale ($\mathbf{v}_y$) e una parallela ($\mathbf{v}_x$) al piano d'impatto e analizziamo questi due vettori individualmente. Poiché valgono le formule ricavate nel capitolo 2.4.3, prima dell'urto si ha:

(3.3) $v_x = v \cdot \cos\alpha$ $v_y = -v \cdot \sin\alpha$ [m/s]

Dopo l'urto la componente normale si scrive secondo la (2.20a)

(3.4) $u_y = v \cdot k \cdot \sin\alpha$ [m/s]

Il coefficiente di restituzione k non è una costante, ma varia in funzione dell'angolo d'incidenza α. All'aumentare della componente normale della velocità d'impatto, sia il proiettile che il corpo urtato tendono a deformarsi e la parte di energia recuperata tende a diminuire. In alcuni casi è addirittura possibile che all'aumentare dell'angolo d'incidenza l'energia recuperata aumenti, per esempio se il proiettile viene deviato piuttosto che rimbalzare (vedi cap.4).

Per semplificare i passaggi matematici, nel secondo capitolo è stata assunta la mancanza di attrito tra il piano urtato e il proiettile.

Avvicinandoci alla realtà non possiamo più tenere valida questa semplificazione e tralasciare la forza d'attrito, dato che, durante l'interazione tra proiettile e corpo urtato, la componente di velocità parallela al piano d'impatto cala. Le cause di questo calo non sono però imputabili solamente all'attrito ma anche alla deformazione del corpo urtato o alla dislocazione di materiale lungo la scia di contatto tra proiettile e corpo urtato.

Analizzando i fenomeni nel modello del punto materiale, possiamo riassumere tutti i fattori di disturbo della velocità del proiettile in un unico parametro di attrito globale, che indichiamo con σ.

Consideriamo la forza di attrito R_x proporzionale alla forza F_y (F_y indica la forza con cui il proiettile è schiacciato lungo il piano d'impatto). Scriviamo:

(3.5) $R_x = \sigma \cdot F_y$ [N]

Il coefficiente σ dipende da diversi parametri, tra cui l'angolo d'incidenza α. Infatti, all'aumentare della deformazione del proiettile (che è funzione di α) aumenta la superficie di contatto dei due corpi e di conseguenza l'attrito.

Vedendo la formula 3.5 si potrebbe pensare che σ sia il classico coefficiente d'attrito noto dalla meccanica, ma non è quel parametro. σ include, infatti, il valore della forza di attrito, il tempo di contatto tra i due corpi e quella parte di deformazione imputabile alle forze tangenziali.

Applicando il secondo assioma di Newton (la conservazione dell'impulso) e dato il tempo di contatto t_c, tra proiettile e corpo urtato, scriviamo:

(3.6) $R_x \cdot t_c = m \cdot (u_x - v_x)$ [N·s]

(3.7) $F_y \cdot t_c = -m \cdot (u_y - v_y) = m \cdot v_y \cdot (1+k)$ [N·s]

Esplicitando e sostituendo con le formule ricavate otteniamo

(3.8) $u_x = v_x + \sigma \cdot v_y \cdot (1+k)$ [m/s]

Le componenti di velocità presenti dopo l'urto, u_x e u_y, ci forniscono l'angolo di rimbalzo β:

(3.9) $\tan\beta = u_x/u_y = (-k \cdot v_y)/(v_x + \sigma \cdot v_y \cdot (1+k)$ [-]

Con $\tan\alpha = -v_y/v_x$ e precisando che k e σ sono funzioni dell'angolo d'incidenza, cioè k=k(α), σ=σ(α), otteniamo una relazione tra angolo d'incidenza e angolo di rimbalzo

(3.10) $\tan\beta = (k(\alpha) \cdot \tan\alpha) / [1 - \sigma(\alpha) \cdot \tan\alpha \cdot (1 + k(\alpha))]$ [-]

Noto l'angolo d'incidenza α possiamo determinare l'angolo di rimbalzo β conoscendo il coefficiente di restituzione k e quello di attrito σ.

Se misuriamo la velocità prima e dopo l'impatto, e gli angoli d'incidenza e di rimbalzo, possiamo calcolare i valori di k e σ:

(3.11 a,b) $k(\alpha) = -u_y/v_y$; $\sigma(\alpha) = (u_x - v_x) / (u_y - v_y)$ [-]

da cui con la (3.10) otteniamo la relazione

(3.12) $\sigma = (\cot\alpha - k \cdot \cot\beta) / (1+k)$ [-]

E' possibile definire dei limiti approssimativi per i due coefficienti k e σ. Ponendo la premessa che σ sia positivo, la (3.12) e (3.10) forniscono le stime:

(3.13) $0 \leq k(\alpha) \leq \tan\beta/\tan\alpha$; $\alpha, \beta > 0$ [-]

(3.14) $0 \leq \sigma(\alpha) \leq \cot\alpha / (1 + k(\alpha))$; $\alpha > 0$ [-]

Ricavando sperimentalmente le due funzioni k=k(α) e σ=σ(α) si può descrivere il rimbalzo per una data combinazione proiettile - corpo urtato. La conoscenza delle funzioni ci consente di stimare le

componenti del proiettile rimbalzato (angolo e velocità di rimbalzo) per tutta una serie di angoli d'incidenza.

Le figure 3.3 e 3.4 mostrano l'andamento di alcune funzioni tipiche:

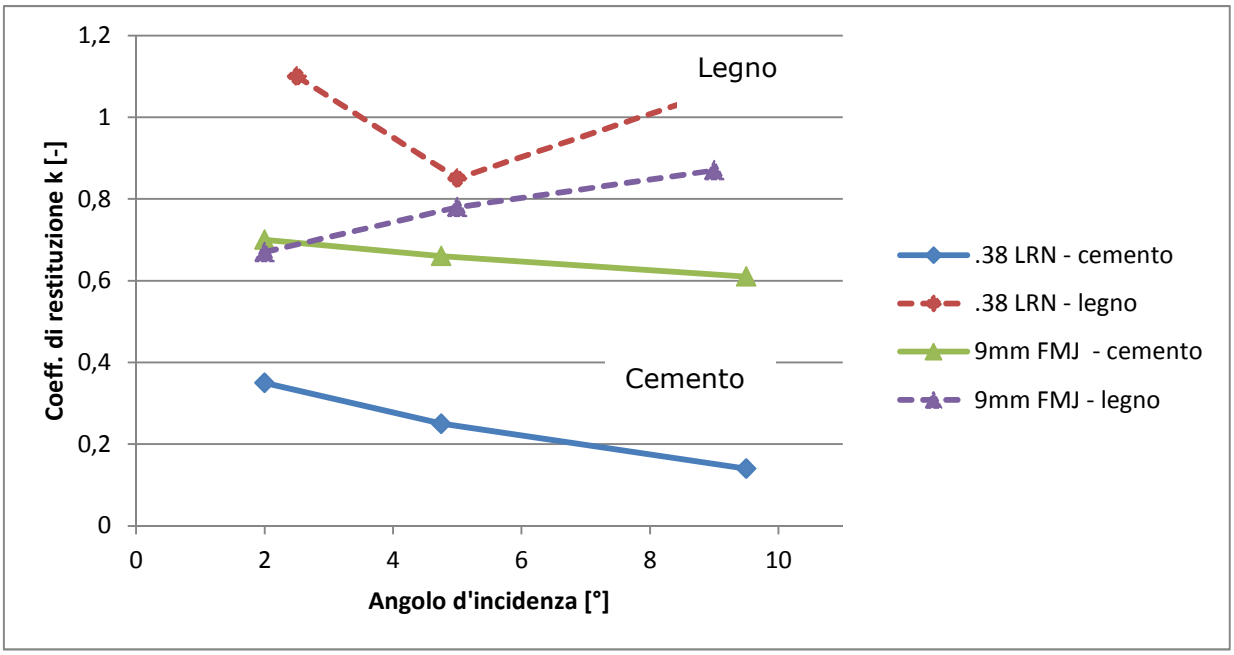


Fig 3.3 esempio per il coefficiente di restituzione k(α)

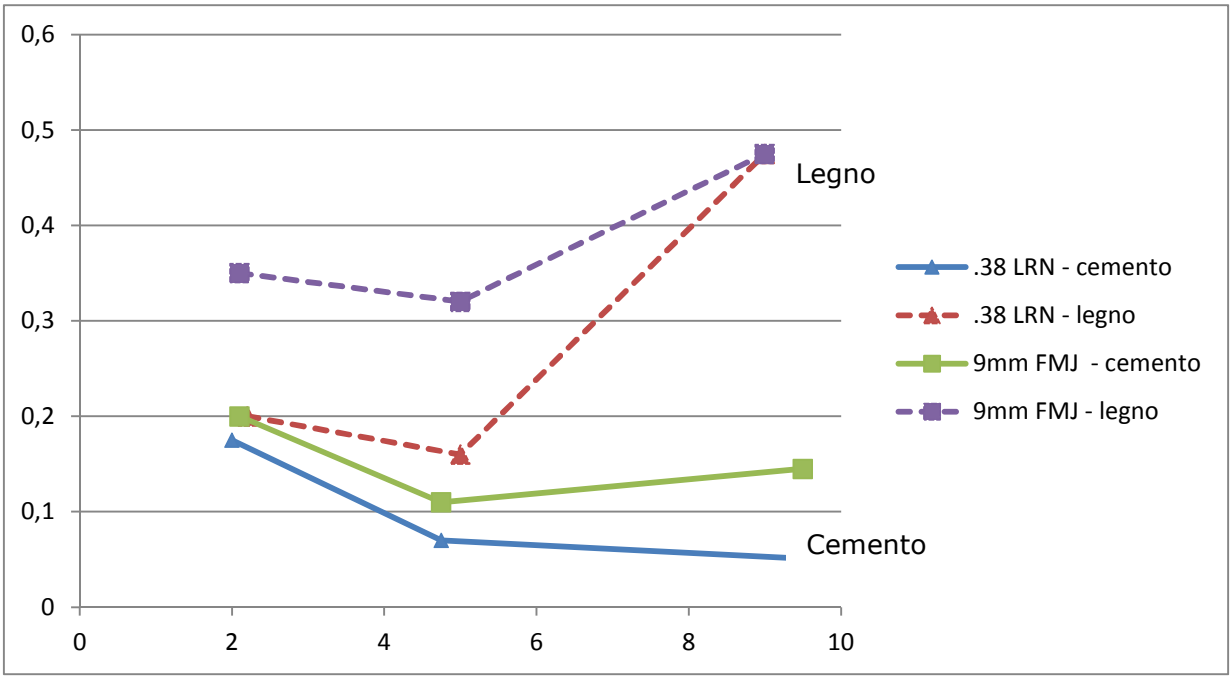


Fig 3.4 esempio per il coefficiente di attrito σ(α)

Se il proiettile rimane conficcato nel bersaglio si ha k=0 e di conseguenza σ = cotα. Il coefficiente di attrito ha quindi un limite che può essere di aiuto nella creazione dei diagrammi.

3.4.2.3 Andamento delle funzioni e approssimazioni

I risultati sperimentali e le considerazioni teoriche di fisica permettono di affermare che la funzione k(α) presenta solitamente due andamenti:

Se un proiettile urta contro corpi talmente duri da non riuscire a penetrarli (cemento, lastre di ferro spesse, ecc.), all'aumentare dell'angolo d'incidenza il coefficiente di restituzione k diminuirà. Più il proiettile tende a deformarsi maggiore sarà la diminuzione di k. In questo caso k sarà sempre minore di 1.

Bersagli morbidi e deformabili (legno, lamiere sottili, ecc.) non offrono sufficiente resistenza alla penetrazione e può accadere che il proiettile venga deviato senza essere deformato in modo significativo. Di conseguenza k aumenta e può superare il valore 1, ma è limitato dalla (3.13). Se il proiettile rimane conficcato, il valore di k scende a zero.

I due andamenti appena descritti possono essere approssimati con le funzioni:

(3.15 a,b) $k(\alpha) = c_1 \cdot e^{-c2 \cdot \alpha}$; $k(\alpha) = c_0 - c_1 \cdot e^{-c2 \cdot \alpha}$ [-]

Il coefficiente d'attrito σ(α) può essere assunto inizialmente con andamento costante. All'aumentare dell'angolo d'incidenza aumenta anche la forza con cui il proiettile viene schiacciato contro la superficie d'impatto e aumenta la deformazione del proiettile stesso. Maggiore deformazione significa un aumento della superficie di contatto e quindi maggiore forza di attrito. Ne consegue che all'aumentare dell'angolo d'incidenza aumenta il coefficiente di attrito. Nei materiali teneri questa tendenza è particolarmente evidente (vedi diagramma 3.4), dato che oltre un certo angolo d'impatto il proiettile penetra il materiale e di conseguenza aumenta la superficie di contatto. Graficamente si vede un'impennata nel diagramma 3.4.

E' possibile approssimare σ con:

(3.16) $\sigma(\alpha) = b_0 + b_1 \cdot \alpha + b_2 \cdot \alpha^{b3}$ [-]

Le formule (3.15), (3.16), (3.10) e i dati sperimentali (angolo d'incidenza α e di rimbalzo β) permettono di calcolare le due funzioni, ma è doveroso notare che le equazioni per determinare b_i e c_i hanno più di una soluzione.

3.4.3 Urto tra punto materiale e corpo di massa piccola

3.4.3.1 Premessa

Nell'urto tra il proiettile e un corpo di massa molto più piccolo (per esempio rametti, sterpaglie, gocce di pioggia) ci interessa conoscere l'angolo di deviazione del proiettile dalla sua traiettoria originale e la perdita di velocità conseguente all'urto, e non l'angolo di rimbalzo riferito alla superficie urtata. Per trovare questi due parametri applichiamo le condizioni dell'urto centrale obliquo.

3.4.3.2 Angolo di deviazione massimo

Per definire le condizioni limite, che incontra un proiettile urtando un corpo piccolo, facciamo due semplici considerazioni (per riferimento vedi anche fig. 5.6):

- Se un proiettile colpisce e perfora un corpo in modo perfettamente centrale, la simmetria delle forze agenti sul proiettile non ne causerà una deviazione dalla sua traiettoria.
- Se un proiettile vola (e struscia) in modo perfettamente tangente lungo un corpo, anche in questo caso non sarà deviato dalla sua traiettoria.

I due casi limite permettono di postulare l'esistenza di un angolo d'incidenza, per il quale l'angolo di deviazione assume un valore di massimo.

Per calcolare l'angolo di deviazione, in funzione dell'angolo d'incidenza, adattiamo la formula (2.37) al caso centrale obliquo.
Ponendo θ = 0 si ha:

(3.17) $\tan\lambda = f(\alpha) = [(1+k) \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha / (\mu + \cos^2\alpha - k \cdot \sin^2\alpha)]$ [-]

con λ angolo di deviazione, α angolo d'incidenza, μ rapporto delle masse m1/m2 e k coefficiente di restituzione.

La figura 3.5 mostra il grafico della (3.17) per vari rapporti di massa μ e k = 0,5.

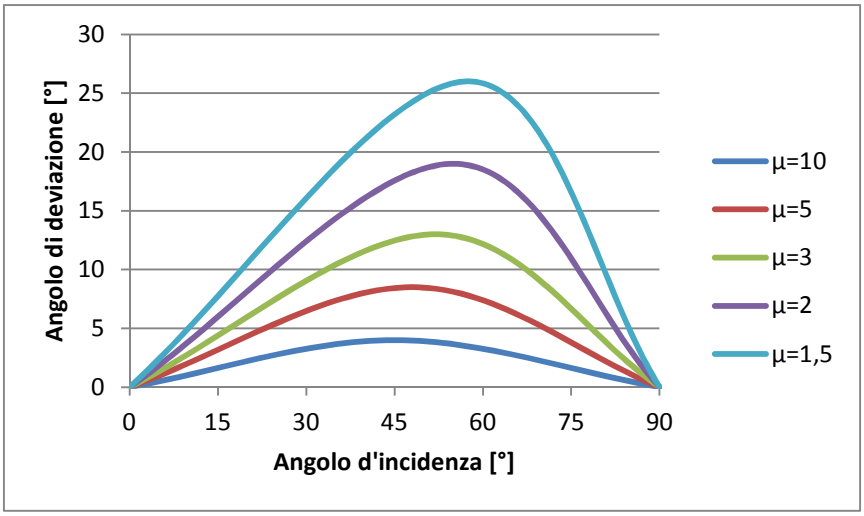


Fig 3.5 Angolo di deviazione in funzione di μ variabile e k = 0,5

Il valore massimo dell'angolo di deviazione λ si calcola con:

(3.18) $\tan\lambda_{max} = (1+k) / 2 \cdot [(\mu-k) \cdot (\mu+1)]^{0,5}$ [-]

3.4.3.3 Perdita di velocità e di energia

Dalle formule dell'urto centrale obliquo ricaviamo la velocità dopo l'urto:

(3.19) $u_1 = v_1 \cdot [\cos^2\alpha + (\frac{\mu-k}{\mu+1})^2 \cdot \sin^2\alpha]^{0,5}$ [m/s]

(3.20) $u_2 = v_1 \cdot (1 + k) \cdot \mu \ / \ [(\mu+1)(2\mu-k+1)]^{0,5}$ [m/s]

Note le velocità dopo l'urto si possono facilmente calcolare le rispettive energie cinetiche.

3.4.3.4 Deviazione di un proiettile a causa di rametti e vegetazione sottile

Le formule calcolate nei paragrafi precedenti possono avere una valida applicazione pratica, ma essendo state ricavate usando un modello, per il rigore dovuto alla scienza, dobbiamo trasporre il mondo reale al modello. Parlando di rametti e oggetti simili, supponiamo semplicemente che l'interazione tra proiettile e corpo urtato avvenga in un tempo molto breve. Per i rametti di diametro non superiore al calibro del proiettile supponiamo inoltre che un pezzo del corpo urtato venga staccato o dislocato momentaneamente (ovvero spostato dalla traiettoria del proiettile). In entrambi i casi, l'estensione della parte del corpo urtato coinvolta è limitata. Assumiamo inoltre che il pezzo coinvolto nell'urto è talmente leggero da assumere $\mu >> 1$.

Per calcolare la deviazione massima del proiettile otteniamo quindi:

(3.21) $\tan\lambda_{max} = (1+k) / 2 \cdot \mu$ [-]

Interpretando la formula si legge che, maggiore è il rapporto delle masse μ minore sarà l'angolo di deviazione. Detto in parole più semplici, la formula ci dice che i proiettili pesanti che urtano fili d'erba, rametti sottili ecc. vengono deviati meno di quelli più leggeri.
La velocità iniziale del corpo urtato si calcola con:

(3.22) $u_2 = v_1 \cdot (1 + k) \ / \ 2^{0,5}$ [m/s]

In tabella 3.2 abbiamo riassunto alcuni valori di deviazione angolare, in funzione dei vari tipi di proiettile e dei diametri dei rametti.

Proiettile	Massa	Cannetta 1mm		Rametto 3mm		Rametto 5mm	
	[g]	[°]	[cm]	[°]	[cm]	[°]	[cm]
22 lr	2,6	0,11	1,9	0,72	12,6	1,47	25,6
7,65 Browning	4,7	0,08	1,4	0,54	9,5	1.11	19,3
9x21	8,0	0,06	1,0	0,38	6,6	0,77	13,4
38 Spl.	10,2	0,045	0,8	0,29	5,2	0,60	10,5
44 Rem. Mag.	15,6	0,035	0,6	0,24	4,2	0,49	8,5
45 ACP	14,9	0,04	0,7	0,26	4,5	0,52	9,1
223 Rem	4,0	0,07	1,2	0,46	8,1	0,95	16,5
308 Win	9,5	0,04	0,7	0,27	4,7	0,55	9,5
8x68S	12,1	0,035	0,6	0,22	3,9	0,45	7,9

Tab. 3.2 Deviazione massima (k=1) e deflessione laterale a 10m di distanza dalla zona d'urto. Legno tenero e secco, densità 550kg/m^3, da [3].

3.4.3.5 Gocce di pioggia

Le gocce di pioggia presentano un diametro compreso tra 0,5 e 5mm. Qualora il diametro delle gocce sia inferiore a 0,5mm si parla di pioggia sottile. Le gocce più grandi di 5mm sono strappate dalle forze aeree agenti durante la caduta libera, e per questo motivo non se ne trovano in natura. Le gocce più pesanti pesano circa 65mg e cadono con una velocità di circa 12m/s.

Diametro [mm]	Massa [mg]	v_{gc} [m/s]
1	0,5	5,2
2	4,2	7,4
3	14,1	9,0
4	33,5	10,4
5	65,5	11,7

Tab 3.3 Diametro delle gocce di pioggia, peso e velocità di caduta, da [3]

Supponiamo che l'urto tra una goccia di pioggia e un proiettile sia totalmente inelastico (k=0). In analogia alle formule ricavate nel capitolo 2, calcoliamo la deviazione del proiettile dalla sua traiettoria, ponendoci in un sistema di riferimento solidale al proiettile. Per un utilizzo pratico non ci interessa sapere come si muove la goccia di pioggia da un punto di vista del proiettile, bensì dal nostro come tiratori. Spostare il sistema di riferimento sul proiettile ci permette, però, di utilizzare le formule ricavate in precedenza. Fatti i calcoli, ritrasformeremo il risultato in un sistema riferito al tiratore e sapremo infine quanto la pioggia influisce sul nostro tiro.

Porci nel sistema di riferimento prescelto significa osservare l'evento vedendo il proiettile fermo e la goccia di pioggia che cade verso il proiettile. Siano m_{gc} la massa della goccia di pioggia, v_{gc} la velocità di caduta della goccia di pioggia, v_r la velocità relativa della goccia di pioggia rispetto al proiettile e ζ l'angolo d'incidenza della goccia di pioggia sul proiettile (vedi fig. 3.6). La trigonometria del triangolo ci fornisce:

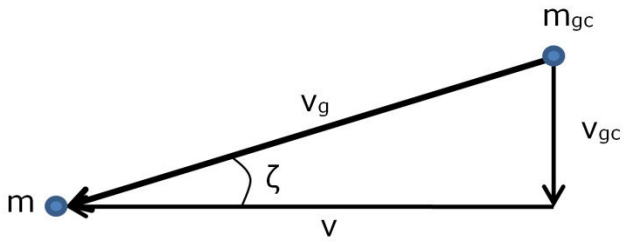


Fig 3.6 Urto tra goccia di pioggia e proiettile, sistema di riferimento solidale al proiettile

(3.23) $v_g = (v^2+v_{gc}^2)^{0,5}$ [m/s]

(3.24) $\zeta = \arctan(v_{gc}/v)$ [-]

La velocità dopo l'urto si calcola con:

(3.25) $u_g = 1/(1+\mu) \cdot v_r$ [m/s]

Il ragionamento fatto con il sistema solidale al proiettile ci fornisce le velocità calcolate riferite alla goccia di pioggia, ma, come già scritto, è un punto di vista che non ci interessa.

Per dare un senso pratico al tutto ci spostiamo ora in un sistema di riferimento solidale al tiratore e vediamo quale effetto ha la goccia di pioggia sulla traiettoria del proiettile.

Nel sistema solidale al tiratore la velocità di rimbalzo della goccia, u_g, si sovrappone a quella del proiettile in volo dopo l'urto, u. Dalla fig. 3.7 e considerando che la velocità di caduta della goccia di pioggia è molto più piccola di quella di volo del proiettile, $v_{gc}<<v$, si ricava la velocità e la deviazione del proiettile dopo l'urto con la goccia.

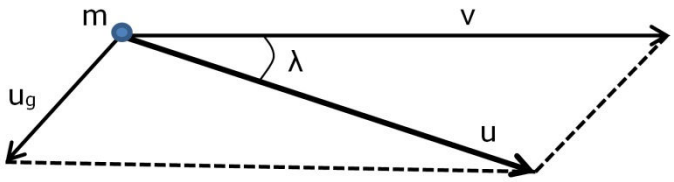


Fig 3.7 Urto tra goccia di pioggia e proiettile, sistema di riferimento solidale al tiratore

(3.26) $u = \mu /(1+\mu) \cdot v$ [m/s]

(3.27) $\sin\lambda = 1/\mu \cdot [1+ v_{gc}^2/v^2]^{0,5} \cdot \sin\zeta \quad => \quad \lambda \approx 1/\mu \cdot \zeta$ [-]

Dalle formule si deduce che più un proiettile è veloce e pesante meno risente della pioggia.

Tanto per dare un'idea dell'ordine di grandezza della deviazione di cui stiamo parlando, vediamo un esempio numerico per capire l'effetto della pioggia:

- Un proiettile del calibro 5,56x45, pesante 4g, vola a 850m/s e impatta contro una goccia di 3mm di diametro (peso 14mg, v_{gc} 9m/s). Il proiettile perderà 3m/s di velocità e subirà una deviazione di 0,038 millesimi, equivalenti a 3,8mm su 100m di volo.

Il calo di velocità e la deviazione calcolata possono sembrare minimi. Effettivamente un'unica goccia di pioggia non incide tanto, ma considerando che in una giornata piovosa si verificano tutta una serie di collisioni, l'effetto globale della pioggia è tale da poter far deviare il punto d'impatto, rispetto al punto di mira, di una quantità non trascurabile.

Precisiamo inoltre che sia il calo di velocità che la deviazione λ fanno deviare il proiettile sempre verso il basso (la goccia cade sempre dall'alto e la deviazione spinge il proiettile verso il basso).

3.5 Il proiettile schematizzato come corpo rigido

3.5.1 Considerazioni generali

Dopo aver ridotto il proiettile a un punto materiale, e ricavato le formule per calcolare alcuni parametri interessanti, vediamo ora quali effetti sortiscono le dimensioni fisiche reali di un proiettile.

Se escludiamo i pallini e i pallettoni per le armi a canna liscia, qualche proiettile di gomma e alcuni pallini sferici per le armi ad aria compressa, tutti i proiettili sparati da un'arma da fuoco sono più lunghi che larghi. Il rapporto tra lunghezza e diametro del proiettile si chiama snellezza, ed è un parametro molto importante nella balistica.

La snellezza Λ di un proiettile è un parametro adimensionale

(3.28) $\Lambda = L/D$ [-]

L indica la lunghezza totale e D il diametro massimo del proiettile, ovvero il calibro (vedi fig. 3.8).

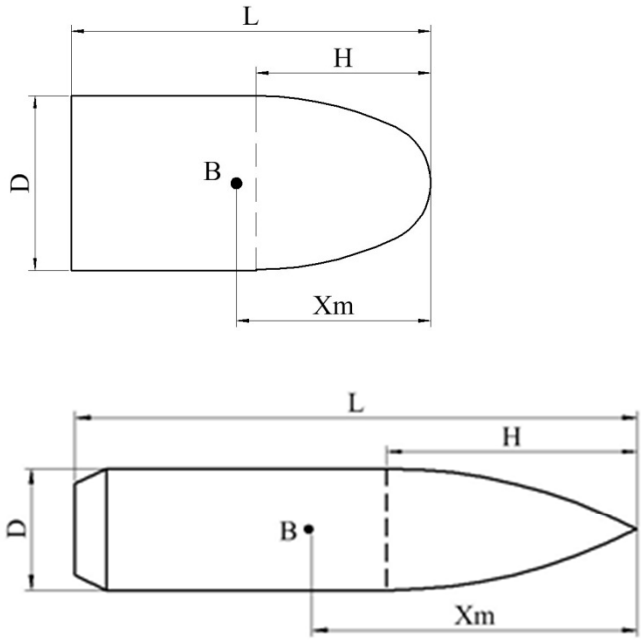


Fig. 3.8 Geometria schematica di un proiettile per arma corta (sopra) e arma lunga (sotto)

I proiettili per arma corta sono più tozzi rispetto a quelli per arma lunga. I valori della snellezza, per i due tipi, sono indicativamente:

- $\Lambda = 1{,}3 – 2$ per arma corta
- $\Lambda = 3 – 5$ per arma lunga

La snellezza di un proiettile è un parametro fondamentale quando si tratta la stabilità in volo. Poiché i proiettili sparati da una canna rigata ruotano molto velocemente attorno al proprio asse longitudinale, e sono assimilabili a dei giroscopi, un urto contro un corpo estraneo ne causa sia una deviazione del baricentro B dalla traiettoria originale, che una serie di movimenti, aventi per fulcro il baricentro. Questi movimenti sono chiamati nutazione e precessione (vedi cap. 2.5). L'urto modifica quindi la stabilità in volo. Poiché le proprietà giroscopiche di un proiettile dipendono dalle sue misure fisiche, è facile intuire l'importanza della snellezza in balistica. Infatti, definita l'arma che si vuole usare, non è più possibile variarne il calibro (ovvero il diametro del foro della canna e quindi anche del proiettile) e l'unica dimensione "libera" è la lunghezza del proiettile → espressa tramite il parametro snellezza.

3.5.2 La normale d'urto nei vari tipi di proiettile

3.5.2.1 Definizioni

Per calcolare il momento ribaltante, che agisce sul proiettile nell'istante dell'urto, è necessario conoscere il braccio del momento. Ricordiamo che un momento è il prodotto di una forza per il suo braccio, ovvero per la distanza tra la retta d'azione della forza e il centro di rotazione del proiettile. Il centro di rotazione di un corpo solido e non vincolato è il baricentro di massa B, e la retta d'azione lungo cui agiscono le forze d'impatto è la normale d'urto. Non trovandoci più nel modello del punto materiale le forze non agiscono più lungo una retta passante per B. La normale d'urto intercetta però l'asse di simmetria del proiettile in un punto N, chiamato centro di spinta.
Le grandezze necessarie per calcolare il braccio del momento si ricavano dalla geometria del proiettile.

Valgono le seguenti definizioni (vedi fig. 3.8 e seguenti):

B - Baricentro
N - Intersezione tra l'asse di simmetria del proiettile e la normale d'urto (centro di spinta)
H - Lunghezza della punta
L - Lunghezza complessiva del proiettile
D - Diametro del proiettile, r = ½ D
x_m - Distanza del baricentro dalla punta
x_n - Distanza del centro di spinta dalla punta
b - Distanza tra baricentro e centro di spinta, b = Xm-Xn (braccio del momento)

3.5.2.2 Proiettili a punta tonda (ellisoidale)

Molti proiettili a punta tonda possono essere schematizzati da un cilindro con sopra un mezzo elissoide. I proiettili per arma corta sono in genere più corti di 2 calibri e circa metà della lunghezza totale è cilindrica. I proiettili per arma lunga sono lunghi da 3 a 5 calibri e hanno una punta lunga circa un terzo della lunghezza totale. Calcoliamo la distanza del centro di spinta dalla punta del proiettile, applicando la geometria dell'ellisse:

(3.29) $$x_n = h - (h^2 - r^2) \cdot \tan\alpha \,/\, (h^2 \cdot \tan^2 \alpha + r^2)^{0,5} \quad [m]$$

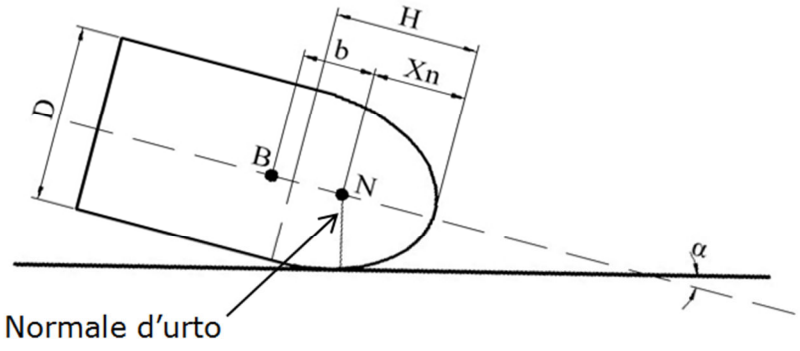


Fig. 3.9 Geometria di un proiettile a punta tonda ellissoidale

3.5.2.2 Proiettili a punta tonda (parabolica)

Alcuni proiettili a punta tonda hanno l'apice più appuntito rispetto alla forma ellittica. In questo caso una parabola offre un'approssimazione migliore per la forma della punta. Analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, calcoliamo la posizione del centro di spinta sfruttando la geometria della parabola:

(3.30) $x_n = r^2/2 \cdot h \cdot [1 + 1 / (2 \cdot \tan^2 \alpha)]$ [m]

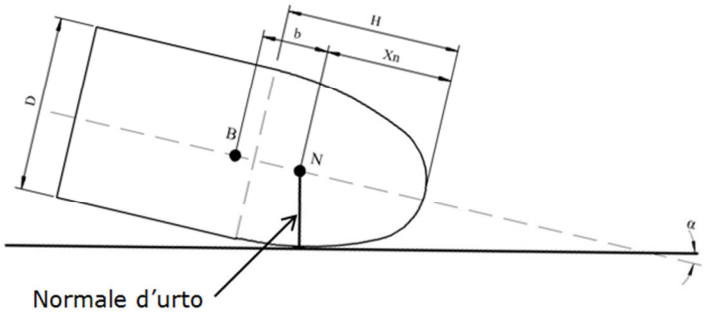


Fig. 3.10 Geometria di un proiettile a punta tonda parabolica

In questo tipo di proiettile il passaggio tra l'ellisse e il corpo cilindrico non avviene tangenzialmente, ma lungo un profilo raggiato. Qualora il proiettile dovesse urtare sul raggio si applicano le formule del paragrafo seguente.

3.5.2.3 Proiettili a punta ogivale

Un proiettile ogivale ha la punta a forma di arco di cerchio. Il passaggio tra la parte cilindrica e quella raggiata è tangente. In lingua inglese questo profilo viene detto "tangent ogive" e si usano sigle quali 7S, 8S ecc. per identificare queste ogive. Il numero indica il moltiplicatore del calibro necessario per ottenere il raggio del cerchio che forma l'ogiva.

Esempio: un proiettile del 7,62x51 (.308 win) con ogiva 8S ha la punta formata da un raggio R = 8 · 7,82mm = 62,5mm (notare che 7,62 indica il calibro nominale, mentre il proiettile ha in realtà un diametro di 7,82mm).

(3.31) $x_n = h - [(h^2-r^2) \cdot \tan \alpha / 2 \cdot r]$ [m]

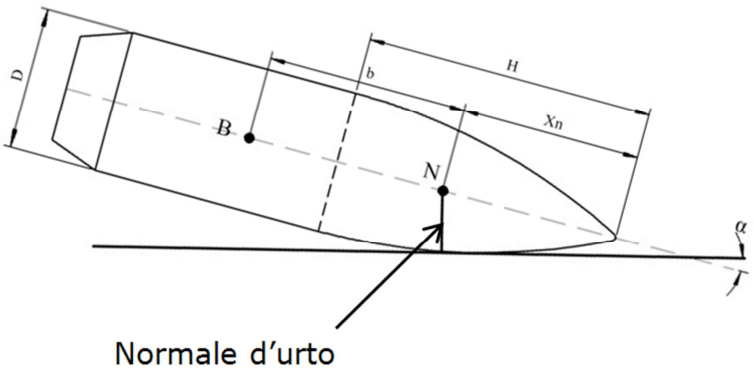


Fig. 3.11 Geometria di un proiettile a punta ogivale

3.5.2.4 Proiettili troncoconici e a punta piatta

Qualora la metà dell'angolo di apertura del cono in punta sia maggiore dell'angolo d'incidenza, i proiettili con punta conica o troncoconica possono essere trattati allo stesso modo dei proiettili a testa piatta (per esempio "wadcttuer" o "semi-wadcutter"). Si ha:

(3.32) $x_n = h + r \cdot \tan\alpha$ [m]

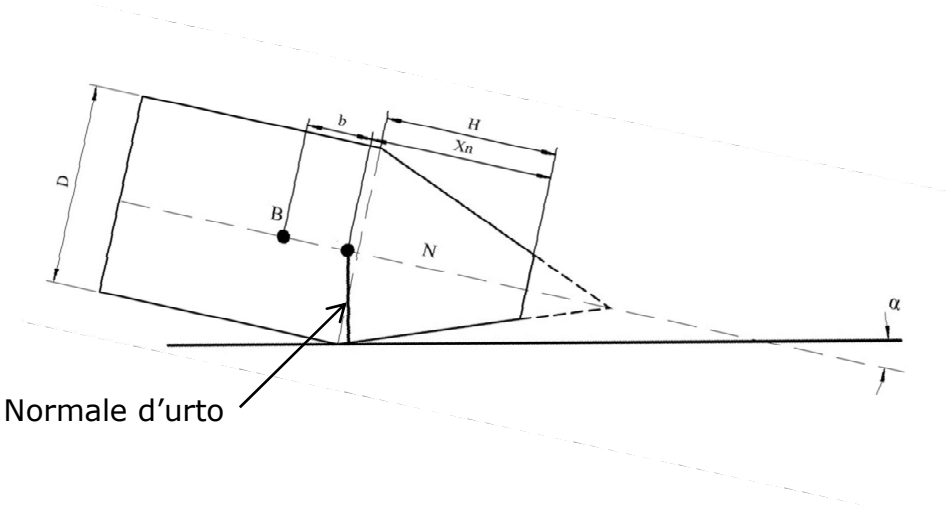


Fig. 3.12 Geometria di un proiettile troncoconico

Se invece l'angolo d'incidenza è maggiore del semiangolo del cono, il valore di r della (3.32) va sostituito con il raggio r_p del raccordo tra punta piatta e fianco del cono.

(3.33) $x_n = r_p \cdot \tan\alpha$ [m]

3.5.3 Dati geometrici e fisici dei proiettili

3.5.3.1 Momento d'inerzia e posizione del baricentro

Molte formule balistiche richiedono i dati geometrici dei proiettili, per calcolare un risultato. E' possibile ottenere massa e dimensioni di un proiettile utilizzando la comune strumentazione da laboratorio (bilance, calibri, sistemi ottici di misura), mentre i momenti d'inerzia possono essere calcolati o misurati. Fortunatamente i proiettili per armi leggere hanno una struttura molto semplice, costituita prevalentemente da un mantello e un nucleo (o monolitica) e sono assialsimmetrici. Per lo studioso avvezzo di meccanica dei corpi rigidi, il calcolo dei momenti d'inerzia è piuttosto facile. Misurare il momento d'inerzia di un proiettile piccolo non è invece sempre agevole e può fornire valori con una tolleranza troppo ampia per l'utilizzo pratico [3].

Per tutti coloro, meno inclini ai calcoli di meccanica, che avessero bisogno dei dati geometrici dei proiettili, abbiamo riassunto in tabella 3.4 i principali parametri per alcune tipologie di proiettile.

Tipo	m [g]	D [mm]	L [mm]	H [mm]	Dp [mm]	x_b [mm]	$J_a \cdot 10^8$ [kg·m^2]	$J_r \cdot 10^8$ [kg·m^2]
22 lr.	2,55	5,70	12,2	5,25	-	6,5	0,93	0,25
9x21 FMJ-RN	8,0	9,00	15,7	7,5	-	9,1	6,5	1,5
357 Mag FMJ-TC	10,3	9,03	19,5	7,5	2,2	11,9	8,5	3,1
38 Spl Fangschuss	7,5	9,03	13,0	-	-	6,7	10,6	1,1
38 Spl LRN	10,2	9,03	18,2	10,0	-	10,5	9,4	3,7
44 Rem Mag SJFP	15,5	11,20	17,5	9,0	8,0	9,7	18,3	4,4
5,56mm SS109	4,0	5,65	23,1	12,0	-	14,5	1,10	1,12
5,56mm SS92	3,56	5,65	19,0	11,0	-	11,3	1,17	0,76
5,56mm GP90	4,1	5,60	22,0	12,0	-	13,3	1,28	1,15
7mm Rem Mag KS	10,5	7,20	30,5	9,0	2,5	17,5	6,3	12,0
7x64 H-Mantel	11,2	7,25	34,0	16,5	-	19,7	7,4	15,2
7x64 KS	8,0	7,20	24,6	9,0	2,5	14,6	7,3	5,3
7,5mm GP11	11,3	7,75	35,2	19,0	-	14,7	7,91	7,32
7,62x39mm AK47	8,0	7,90	22,6	15,0	-	13,7	5,74	2,49
7,62x51mm NATO	9,5	7,85	28,4	17,5	-	17,4	5,96	4,10
243 Win FMJ	5,8	6,20	24,0	14,0	-	14,5	2,9	4,2
308 Win Sierra MK	10,9	7,85	31,2	15,5	-	19,0	6,6	5,7

m Massa del proiettile L Lunghezza del proiettile Dp Diametro della punta
D Diametro del proiettile H Lunghezza della punta x_b Distanza del baricentro dalla punta
J_a Momento d'inerzia assiale J_r Momento d'inerzia radiale

Tab. 3.4 Valori geometrici di alcuni proiettili, da [3]

3.5.4. L'impulso ribaltante generato dall'urto

3.5.4.1 Calcolo dell'impulso ribaltante

L'urto durante la fase di rimbalzo genera una forza agente sul proiettile e diretta lungo la normale d'urto. Il modulo dell'impulso si calcola applicando la formula (3.7):

(3.34) $$F_y \cdot t_c = -m \cdot (u_y - v_y) = m \cdot v_y \cdot (1+k) \cdot \sin\alpha \quad [N \cdot s]$$

La scomposizione vettoriale della forza fornisce una componente opposta alla direzione di moto del proiettile e una componente perpendicolare all'asse di simmetria del proiettile. La prima rallenta il proiettile, la seconda genera un impulso ribaltante, il cui centro di rotazione è il baricentro del proiettile.

La variazione dell'impulso ribaltante si ricava moltiplicando la (3.34) con la distanza b dei disegni riportati nel paragrafo 3.5.2:

(3.35) $\Delta L = F_y \cdot t_c \cdot b \cdot \cos\alpha = m \cdot v_y \cdot (1+k) \cdot b \cdot \cos\alpha = \frac{1}{2}\, m \cdot v \cdot (1+k) \cdot b \cdot \sin(2\alpha)$ [kg·m²/s]

3.5.4.2 Effetti dell'impulso ribaltante

I proiettili descritti nel paragrafo 3.4.2 sono corpi a simmetria assiale. Essi vengono solitamente sparati da un'arma dotata di canna rigata e la rigatura imprime al proiettile un moto rotatorio attorno al proprio asse di simmetria. In questa condizione dinamica il proiettile si comporta come un giroscopio pesante (vedi cap. 2.4).

L'azione di una forza F, agente per un breve istante Δt, in un punto diverso dal centro di rotazione di un giroscopio non soggetto ad altre forze, causa un cambiamento improvviso della direzione dell'asse dell'impulso rotatorio. In un primo momento l'asse di simmetria del proiettile segue questo movimento, comincia poi però a nutare attorno all'asse dell'impulso rotatorio.

La variazione dell'impulso rotatorio ha la stessa direzione del momento ribaltante e si lascia scomporre in una componente parallela e una ortogonale all'impulso rotatorio presente. La componente parallela modifica il valore ma non la direzione dell'impulso rotatorio e, a seconda del segno (positivo o negativo), genera un aumento o ad una diminuzione della velocità angolare. La componente ortogonale è invece la causa della variazione improvvisa della direzione dell'asse dell'impulso rotatorio accennato sopra. Subito dopo l'urto, l'asse del proiettile si sposta in direzione della forza e inizia poi a nutare, muovendosi lungo una superficie conica attorno alla nuova direzione dell'asse dell'impulso rotatorio.

L'angolo sotteso tra l'asse del proiettile e l'asse dell'impulso rotatorio è dato dal quoziente della variazione dell'impulso rotatorio e l'impulso rotatorio:

(3.36) $\tan\varepsilon = [m \cdot v \cdot (1+k) \cdot (x_b - x_n) \cdot \sin(2\alpha)] / (2 \cdot J_a \cdot \omega)$ [-]

Dopo l'urto, il proiettile viene investito dalla flusso d'aria (dato che riprende a volare) co la conseguenza che l'asse dell'impulso rotatorio si muove nuovamente con un movimento di precessione attorno alla tangente della traiettoria di volo.

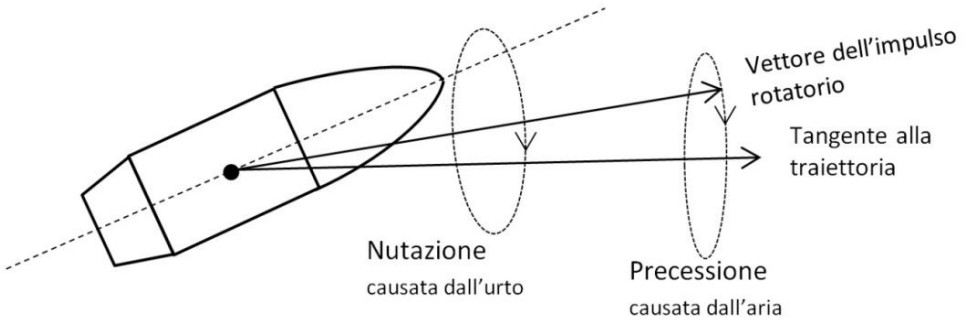


Fig. 3.13 Movimenti di un proiettile dopo l'urto

Tralasciando la forza esercitata dall'aria e considerando solo la nutazione è possibile calcolare una stima della velocità angolare della nutazione:

(3.37) $v_n = |J_a - J_t| / J_t \cdot \omega / 2\pi$ [1/s]

La formula della frequenza di nutazione v_n è utile per spiegare analiticamente il fenomeno delle doppie tracce di rimbalzo (vedi capitolo 4).

In letteratura sono stati descritti casi in cui un unico proiettile ha generato due tracce di rimbalzo, per esempio [2,3,8,14,49]. Il proiettile in volo è un corpo rigido non vincolato e quindi libero di muoversi attorno al proprio baricentro. Parlando dei movimenti di precessione e di nutazione, bisogna tenere a mente che, mentre la punta del proiettile segue i movimenti descritti, anche la base ruota rispetto al baricentro. Se la frequenza di rotazione è sufficientemente grande e l'angolo di rimbalzo abbastanza piccolo (come spesso accade per le superfici dure), è possibile che a pochi centimetri dalla prima traccia d'impatto la base venga nuovamente in contato con il corpo urtato, lasciando una seconda traccia.

Esempio: Stimiamo la frequenza di nutazione di un proiettile 22lr. con 500 giri al minuto. Una rotazione completa richiederebbe circa 0,6m di volo. Possiamo quindi asserire che una seconda traccia a 15cm di distanza dalla prima è possibile.

3.6 Cenni su altre teorie formulate e disponibili in letteratura

3.6.1 Teoria di K. Sellier

Nel testo "Schusswaffen und Schusswirkungen II" [14] Sellier scompone il moto di un proiettile in due componenti. Una tangenziale e una ortogonale al piano di rimbalzo. La componente tangenziale viene trattata con le leggi dell'urto centrale, frontale, inelastico (vedi 2.3.1) mentre quella tangenziale rimane inalterata.

Quest'ultima ipotesi permette di calcolare il coefficiente di restituzione k (Sellier lo indica con ε), usando solamente gli angoli d'incidenza e di rimbalzo:

(3.38) $k = \tan\beta/\tan\alpha$ [-]

L'ipotesi sulla costanza della componente tangenziale e la legge di conservazione dell'energia fanno si che, con questo modello, k non diventi mai più grande di 1. Ciò limita il modello a fenomeni in cui l'angolo di rimbalzo non è mai più grande di quello d'incidenza. I casi reali con k>1, per esempio alcuni rimbalzi da superfici di legno (vedi fig. 3.3), non rientrano in questa teoria [3].

3.6.2 Teoria di Jahuari

Nella teoria proposta in "Mathematical model for bullet ricochet" [67] Jauhari scompone la velocità d'incidenza e quella di rimbalzo in due componenti ciascuna (tangenziale e normale). Introduce inoltre due fattori di riduzione per entrambe le direzioni, che chiama α e β. Per non confondere la nomenclatura con quella definita in questo testo, faremo riferimento ai due coefficienti di Jauhari chiamandoli ψ e ϕ.

(3.39) $u_x = \psi \cdot v_x = \psi \cdot v \cdot \cos\alpha$ [m/s]

(3.40) $u_y = \phi \cdot v_y = \phi \cdot v \cdot \sin\alpha$ [m/s]

L'angolo di rimbalzo secondo Jahuari si calcola con

(3.41) $\tan\beta = \phi/\psi \cdot \tan\alpha$ [-]

ϕ e ψ sono indipendenti tra loro e, a differenza della teoria di Sellier, l'approccio di Jahuari contempla anche angoli di rimbalzo maggiori di quelli d'incidenza.

Per calcolare i due parametri ϕ e ψ l'autore si avvale di quattro parametri, misurati durante le prove sperimentali. L'angolo d'incidenza α, l'angolo di rimbalzo β, la lunghezza s_x e la profondità s_y della traccia lasciata sul corpo urtato.

(3.42) $\psi = -(\tan\alpha/2\tan\beta) - ½ \pm (\tan\alpha/2\tan\beta)\cdot[(1-\tan\beta/\tan\alpha)^2 + 4\cdot\tan\beta\cdot s_x/s_y]^{0,5}$ [-]

(3.43) $\phi = -(\tan\beta/2\tan\alpha) - ½ \pm ½ \cdot [(1-\tan\beta/\tan\alpha)^2 + 4\cdot\tan\beta\cdot s_x/s_y]^{0,5}$ [-]

Si fa presente che ϕ e ψ non sono costanti ma variano con l'angolo d'incidenza.
Kneubuehl [3] avanza due osservazioni alla teoria proposta:

- Non si spiega perché Jahuari abbia limitato l'intervallo di ϕ a (0,1). Per certi materiali è dimostrabile che la componente verticale della velocità di rimbalzo è maggiore di quella verticale della velocità d'incidenza (per esempio quando si hanno contemporaneamente rimbalzo e deviazione).
- Nelle equazioni (3.5.4) e (3.5.5) compare s_y. Ciò implica che la profondità della traccia lasciata dal proiettile sia maggiore di zero. In realtà questa condizione non è sempre valida. Corpi duri e spessi (piastre di acciaio, cemento ecc.) difficilmente cedono all'impatto con un proiettile, e se l'angolo d'incidenza è piccolo non si viene a creare nessun solco tra i punti d'impatto P_A e di rimbalzo P_B. In questo caso non è possibile calcolare i parametri proposti.

3.6.3 Teoria di Birkhoff per gli specchi d'acqua

Nel 1944 Birkhoff et al. pubblicò uno studio sul rimbalzo di proiettili sferici sull'acqua "Ricochet off Water, A.M.P. Memo. 42.2M (1944). Secondo Johnson, Reid l'opera originale non è accessibile al pubblico e le informazioni riportate sono tratte da [3,90].

La teoria di Birkhoff si basa su due assunzioni:

- Su di un elemento di superfice agisce la pressione $½\,\rho v^2\cos^2\zeta$. ζ è l'angolo formato dalla normale all'elemento e la direzione di moto (ζ corrisponde all'angolo d'incidenza).
- La pressione agisce solamente sulla superficie immersa sotto il livello d'acqua indisturbato.

Il testo non fornisce una spiegazione fisica delle assunzioni fatte. Secondo Kneubuehl [3] l'approccio assomiglia a una ipotesi formulata da Newton e applicata con successo all'aerodinamica ipersonica. Il fattore ½ non compare però nell'ipotesi di Newton e Birkhoff non ne giustifica la presenza. Johnson e Reid hanno modificato questo fattore adattandolo ai risultati misurati.

Le due assunzioni permettono di calcolare la pressione sulla superficie bagnata della sfera, da cui si ricava l'equazione del moto perpendicolare alla tangente della traiettoria. L'angolo limite,

per una sfera che riemerge dall'acqua, si trova quando la sfera è immersa completamente, si muove orizzontalmente e sparisce la forza trasversale. L'angolo critico risulta quindi:

(3.44) $\alpha_{crit} = 17{,}5 \cdot (\rho_a/\rho_s)^{0,5}$ [°]

dove ρ_a è la densità dell'acqua e ρ_s la densità della sfera. Notare che l'angolo critico non dipende ne dalla velocità d'impatto ne dal diametro della sfera.

4 La pratica dei rimbalzi – teoria e analisi

4.1 Introduzione

La previsione di un fenomeno e la ricostruzione di un evento sono spesso i motivi che inducono allo studio dei rimbalzi. A differenza della teoria analitica, presentata nei capitoli precedenti, l'interpretazione di una prova e l'analisi delle tracce non richiedono formule matematiche.
Per descrivere la traiettoria di rimbalzo e interpretarne i segni bastano poche definizioni e la capacità di analizzare e comprendere le tracce residue.

Il capitolo propone in veste semplificata le definizioni già introdotte in precedenza, tralasciando i coefficienti usati per l'analisi matematica e non strettamente necessari alla ricostruzione di un rimbalzo.

La pratica dei rimbalzi non prescinde dalle leggi naturali che ne governano il fenomeno, cela però alcuni aspetti che possono rendere difficile la ricostruzione di un evento. La reazione di un proiettile rimbalzato, o del substrato contro cui urta, dipende da tanti parametri e non sempre le informazioni necessarie per discriminare le incognite sono prontamente disponibili. Fortunatamente, diversi autori hanno descritto il fenomeno in modo qualitativo, fornendo una base discreta di dati utili per impostare un'indagine. Sfortunatamente, non tutti i testi sono prontamente accessibili e per questo motivo abbiamo riassunto, in questo e nel prossimo capitolo, i contenuti essenziali dei titoli che riteniamo i più importanti.

Lo scopo del quarto capitolo è fornire una comprensione qualitativa del rimbalzo. Gli esempi numerici riportati sono solo di supporto alle nozioni di teoria. Per approfondimenti quantitativi si rimanda alle tabelle del quinto capitolo.

Il capitolo si apre con alcune considerazioni di carattere generale, seguite da una sintesi dei parametri che influenzano il rimbalzo e la classificazione delle superfici contro cui può urtare un proiettile. Le superfici di rimbalzo sono poi descritte qualitativamente e suddivise per tipologia. Per ogni tipologia di superficie abbiamo inserito delle nozioni sulle tracce che si possono formare sul substrato e sul proiettile.

Negli ultimi paragrafi del capitolo riportiamo un fenomeno d'interesse forense (le doppie tracce di rimbalzo) e alcune considerazioni operative sugli scontri a fuoco in un ambiente urbanizzato.

4.2 Definizioni

Termini e simboli:

Definizione	Simbolo	Descrizione
Corpo urtato		Un corpo soldo o liquido che intercetta il proiettile lungo la sua traiettoria di volo.
Punto d'impatto	P_A	Il punto in cui il proiettile tocca la superficie del corpo urtato.
Piano d'impatto		Piano tangente al corpo urtato nel punto di impatto.
Piano d'incidenza		Piano normale al piano d'impatto e lungo la traiettoria indisturbata del proiettile (ovvero prima di impattare sul corpo urato).
Direzione d'incidenza		La traiettoria del proiettile subito prima di impattare contro il corpo urtato.
Angolo d'incidenza	α	Angolo tra il piano d'impatto e la direzione d'incidenza.
Velocità d'incidenza	v	Velocità con cui il proiettile colpisce il corpo urtato.

Punto di rimbalzo	P_B	Punto in cui il proiettile abbandona la superficie del corpo urtato.
Piano di rimbalzo		Piano normale al piano d'impatto e lungo la traiettoria del proiettile rimbalzato.
Direzione di rimbalzo		Vettore tangente alla traiettoria del proiettile rimbalzato dal punto di rimbalzo (parallelo al vettore velocità del proiettile rimbalzato).
Angolo di rimbalzo	β	Angolo tra il piano d'impatto e la tangente alla traiettoria del proiettile rimbalzato.
Velocità di rimbalzo	u	Velocità con cui il proiettile si allontana dal corpo urtato.
Deviazione laterale	γ	Angolo compreso tra il piano d'incidenza e il piano di rimbalzo.
Lunghezza della traccia	s_x	Distanza tra il punto d'impatto P_A e il punto di rimbalzo P_B.
Profondità della traccia	s_y	Profondità massima della traccia lasciata sul corpo urtato.
Substrato		Ogni tipo di superficie contro la quale il proiettile rimbalza.

Tab. 4.1 Definizioni e simboli

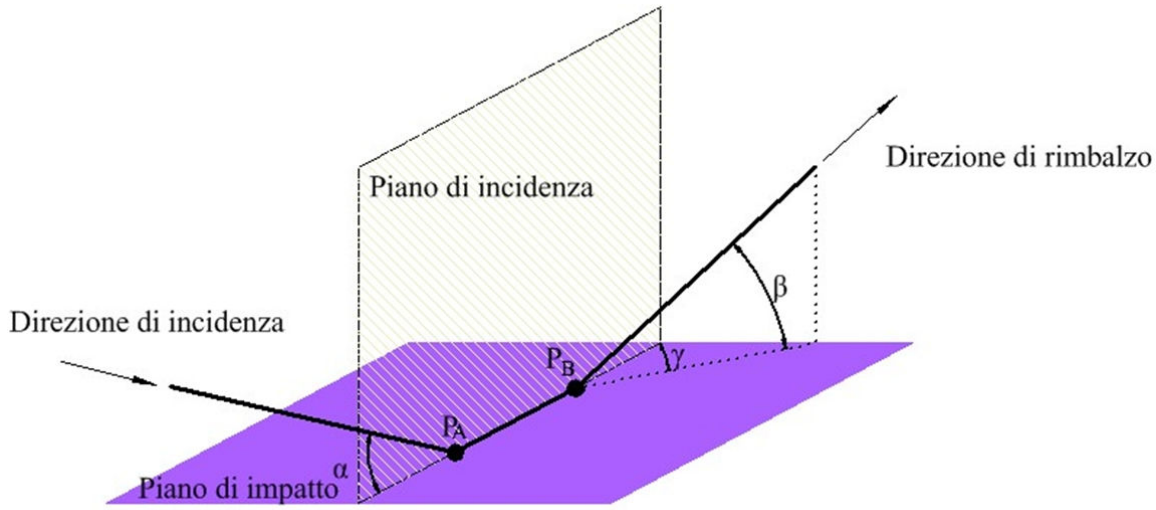


Fig 4.1 Definizione dei piani, degli angoli e dei punti di rimbalzo

Angolo critico — L'angolo d'incidenza oltre il quale il proiettile non rimbalza più. Per angoli maggiori dell'angolo critico il proiettile penetra il bersaglio o si frantuma.

Bollino di vernice (pinch point) — Una piccola chiazza di vernice residua che si forma in seguito a un impatto con un angolo d'incidenza piccolo. Il fenomeno si presenta su lamiere sottili di metallo verniciato (carrozzerie d'auto, ecc.) o legno verniciato. Il bollino indica il punto d'ingresso del proiettile sulla traccia lasciata durante il rimbalzo. Non si forma sempre.

Effetto onda (bow effect) — Striature visibili sulla superficie di un proiettile che ha attraversato ed è rimbalzato da un substrato di materiale abrasivo. Il fenomeno si può

	verificare quando un proiettile scava un solco e poi rimbalza da superfici sabbiose, terriccio, zolle erbose ecc.
Collarino d'ingresso (lead in mark)	Un segno scuro, ellittico di residui di sparo presenti sulla superficie del proiettile e trasferiti al corpo urtato nel primo istante di contatto. Si può formare per impatti a basso angolo d'incidenza. Il collarino d'ingresso è un indicatore di direzionalità del proiettile.
Baffo (chisum trail)	Un prolungamento del segno di rimbalzo lasciato dal proiettile su una superficie piatta, rigida e non frangibile. Il sego si forma nella zona in cui il proiettile "decolla" dal corpo urtato ed è un indicatore di direzionalità del rimbalzo. Non si forma sempre.
Alone d'impatto (lead splash)	L'alone di residui di piombo depositati attorno alla zona d'impatto. Il fenomeno si presenta principalmente con proiettili di piombo o semicamiciati. La geometria dell'alone può essere utile per determinare la direzione di sparo. La quantità di materiale depositato varia con la velocità d'impatto [8]. L'alone non è sempre visibile a occhio nudo.

4.3 Considerazioni generali

Discutendo di rimbalzi s'incontrano spesso persone che immaginano il comportamento di un proiettile simile a quello di una palla da biliardo. La realtà è, però, molto diversa. Agli occhi di un osservatore casuale un proiettile stabilizzato giroscopicamente rimbalza in modo anomalo e non sembra volere seguire le leggi della fisica. Il caso che forse più si avvicina al confronto con la palla da biliardo è il pallino sferico di acciaio, lanciato contro una superficie rigida e liscia. Tutti gli altri differiscono notevolmente.

La teoria analitica dei rimbalzi presentata nei capitoli precedenti è valida per qualsiasi tipo di proiettile, per ogni calibro e per qualsiasi velocità d'impatto. La pratica insegna però che, tra i casi analizzati per esigenze forensi, i rimbalzi di proiettili che volano a velocità relativamente basse sono più frequenti che con proiettili sparati ad alta velocità [3,8,9,14,17]. Oltre una certa soglia di velocità i proiettili tendono a frantumarsi piuttosto che rimbalzare. La struttura e il materiale del proiettile ne determinano la resistenza all'impatto e di conseguenza l'angolo critico e la velocità limite per un certo tipo di substrato. Proprio per questo motivo l'esecuzione di test di rimbalzo è il modo più affidabile per rispondere alla domanda, se un evento sia possibile o meno.

L'esperienza (e la fisica) permette di elencare alcuni fenomeni che ci possiamo aspettare da un proiettile rimbalzato [1,2,5,8,9,11,12,14,15,17,22,41,43,59,67,71,73]:

- I segni di rimbalzo possono formarsi su qualsiasi superficie.
- Un proiettile che urta una superficie e ne rimbalza perde velocità.
- L'angolo di rimbalzo è in genere diverso dall'angolo d'incidenza. Se la superficie è dura, l'angolo di rimbalzo è spesso minore di quello d'incidenza.
- Più dura è una superficie minore è l'angolo di rimbalzo.

- Il proiettile rimbalzato sarà (quasi sempre) deformato o danneggiato, eventualmente anche frammentato, fatta eccezione per i rimbalzi sull'acqua o con angoli d'incidenza molto piccoli. In questi ultimi due casi il proiettile sarà destabilizzato ma non deformato.
- La superficie d'impatto sarà deformata o danneggiata.
- Tra proiettile e superficie d'impatto avviene un mutuo scambio di materiale. Tracce del proiettile rimarranno sul corpo urtato e viceversa.
- Al diminuire dell'angolo d'incidenza aumenta la lunghezza della traccia lasciata.
- Al diminuire dell'angolo d'incidenza si riduce la probabilità che si formi un solco sul corpo urtato piuttosto che un segno superficiale.
- Esiste un angolo d'incidenza oltre il quale un proiettile non rimbalza più → l'angolo critico. Per angoli maggiori dell'angolo critico il proiettile penetra il bersaglio o si frantuma.

E' doveroso aggiungere che:

- Ad oggi nessun modello matematico ha fornito risultati tanto precisi da permettere di prevedere la traiettoria di un proiettile rimbalzato con una precisione pari a quella ottenibile tramite prove sperimentali.
- Le variabili che influenzano un rimbalzo (e la balistica) nel mondo reale sono tante. Ogni prova è un evento unico e irripetibile e per dare una sicurezza scientifica al test è necessario ripetere le prove più volte.

4.4 Parametri che influenzano il rimbalzo

Nel terzo capitolo sono elencati i parametri che influenzano il rimbalzo. I parametri riportati sono corretti e completi per lo scopo intrinseco di quel capitolo, ma li proponiamo qui in chiave più semplice, e in parte ridondate, per facilitarne la comprensione e l'uso in fase d'indagine. Il primo elenco è pensato per fornire uno specchietto di uso pratico, il secondo riporta per completezza i parametri mancanti o incompleti (per esempio, scrivere energia d'impatto o velocità d'impatto è equivalente all'atto pratico ma non la stessa cosa da un punto di vista fisico. Il lettore converrà che parlare di velocità è più facile che ragionare in termini energetici). I parametri sono:

- Angolo d'incidenza
- Velocità d'incidenza (d'impatto)
- Forma del proiettile
- Tipo di proiettile
- Peso del proiettile
- Durezza del proiettile
- Posizione del baricentro di massa del proiettile
- Durezza della superficie d'impatto
- Reazione della superficie d'impatto (cedevole o non cedevole)

Influenzano la deviazione verticale β

- Senso di rotazione della rigatura dell'arma
- Lunghezza e tipo di contatto tra proiettile e substrato

Influenzano la deviazione laterale γ

- Massa del corpo urtato
- Struttura e materiale del corpo urtato.
- Dimensione del corpo urtato.

Per una descrizione dettagliata dei parametri vedi 3.2.

- Struttura e materiale del proiettile.
- Comportamento del proiettile.
- Energia d'impatto.
- Condizioni di volo dopo il rimbalzo.

4.5 Classificazione delle superfici d'impatto

Per formulare delle previsioni valide in funzione del tipo di superficie, classifichiamo i substrati in base ad alcune proprietà intrinseche. In letteratura diversi autori hanno descritto gli stessi concetti proponendoli in chiave diversa, per esempio [3,8,14,17,59]. In questo libro suddividiamo le superfici da cui può rimbalzare un proiettile in quattro categorie:

- Superfici rigide (non cedevoli)
  Sono superfici che all'impatto con il proiettile non si deformano, non si piegano, non si frantumano e nessuna parte di esse è dislocata. Per esempio acciaio spesso, marmo, lastre di pietra, cemento (dipende dalla qualità).

- Superfici cedevoli
  Sono superfici che cedono al contatto con il proiettile. Il materiale può essere schiacciato, piegato o dislocato dalla posizione originale. Per esempio sabbia, legno, lamiere sottili di metallo.

- Superfici cedevoli frangibili
  Sono superfici che si frantumano localmente all'impatto con il proiettile. Per esempio mattoni (dipende dal tipo), blocchi di tufo, cemento (dipende dalla qualità).

- Superfici liquide

4.6 Risposta delle superfici d'impatto

La risposta delle superfici è uno dei parametri che maggiormente influenza l'angolo di rimbalzo. Il percorso di un proiettile lungo il substrato (ovvero il tragitto da P_A a P_B) varia in funzione del tipo di superficie urtato.

4.6.1 Superfici rigide (non cedevoli)

Il proiettile non penetra il substrato. Esso impatta nel punto P_A, scorre lungo la superficie fino al punto di rimbalzo P_B e si allontana dal corpo urtato. La traccia su questo tipo di substrato è esclusivamente superficiale. Le deformazioni sono tutte a carico del proiettile.

La figura 4.2 illustra qualitativamente il rimbalzo da una superficie rigida.

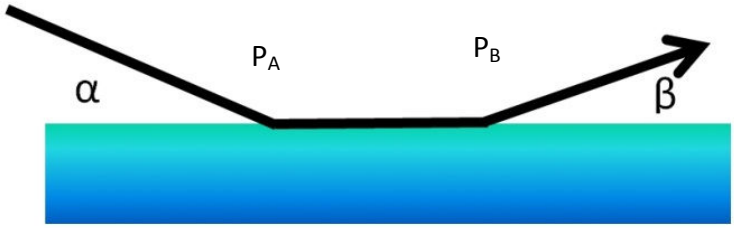


Fig. 4.2 Traccia P_A-P_B su una superficie rigida

4.6.2 Superfici cedevoli e cedevoli frangibili

L'urto tra proiettile e substrato rompe, scalza o deforma la superficie colpita. Il proiettile penetra parzialmente o completamente nel substrato, vi percorre un tratto, scava un cratere, un solco o un tunnel e si allontana dalla superfice urtata nel punto di rimbalzo P_B.

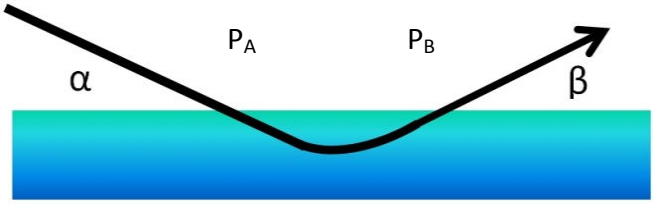


Fig. 4.3 Traccia P_A-P_B su una superficie cedevole generica

In figura 4.3 vediamo che, su un substrato cedevole, la traiettoria del proiettile penetra la superficie nel punto d'impatto P_A e ne esce nel punto di rimbalzo P_B.

Il tratto P_A- P_B si sviluppa in due modi [3,8,14,17,59]:

- Il proiettile si immerge nel substrato → il proiettile è avvolto su tutti i lati dal materiale del corpo urtato.
- Il proiettile scava un solco → lascia una traccia di una certa larghezza e profondità.

La traccia scavata assume a sua volta conformazioni diverse. Può essere una sorta di tunnel, a forma di solco (nettamente più lungo che largo) o di cratere (piuttosto largo rispetto alla lunghezza o addirittura circolare). Nel seguito non faremo distinzione tra solco o cratere e useremo indifferentemente entrambi i termini per indicare una traccia a cielo aperto.

Il modello di rimbalzo della superficie cedevole è difforme da quello della superficie cedevole e frangibile. Qualitativamente seguono entrambi lo schema della figura 4.3, cioè penetrazione del substrato e successiva fuoriuscita del proiettile, ma cambia la posizione del punto più profondo del solco e di conseguenza l'angolo di rimbalzo risultante. I segni di risulta sono qualitativamente diversi. Vediamo come:

Superficie cedevole frangibile:

La superficie frangibile è frantumata all'impatto con il proiettile. Il materiale è scalzato e vola via. Il solco lasciato ha la profondità massima verso l'inizio della traccia e l'angolo di rimbalzo è minore di quello d'incidenza.

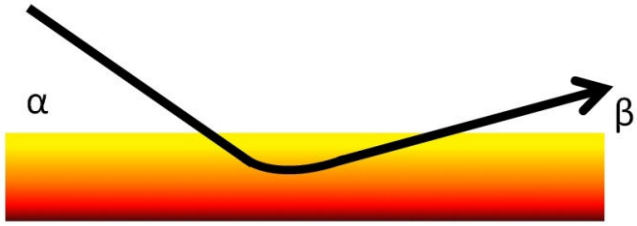


Fig. 4.4 Traccia su una superficie cedevole frangibile

Superficie cedevole non frangibile:

Il materiale di una superficie cedevole ma non frangibile è invece dislocato (spinto via) e non frantumato. La traccia formata ha spesso il punto più profondo verso la fine del solco. Il materiale dislocato è spinto di fronte al proiettile e tende a formare una rampa che devia il proiettile. Nei materiali cedevoli ma non frangibili l'angolo di rimbalzo può superare quello d'incidenza e raggiunge valori anche molto gradi.

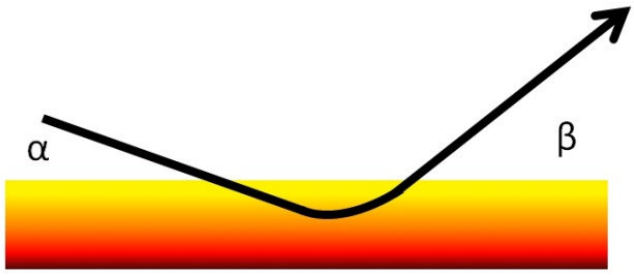


Fig. 4.5 Traccia su una superficie cedevole non frangibile

4.7 Impatti contro materiali rigidi, non cedevoli

Il modello qualitativo di questo evento è riportato in fig. 4.2. Il proiettile non penetra il corpo urtato ne vi scava un solco. La traccia residua si trova sulla superficie del substrato. L'angolo di rimbalzo è minore dell'angolo d'incidenza. L'angolo di rimbalzo si mantiene piccolo e varia con la durezza del substrato [3,8,9,14,59].

Facciamo presente che per l'angolo di rimbalzo da superfici rigide esistono alcuni casi particolari che esulano dalle considerazioni generali di seguito esposte. Queste eccezioni sono legate alla composizione del nucleo del proiettile (acciaio, perforanti) [77] e sono piuttosto rare in ambito civile. Il seguito del capitolo farà riferimento ai proiettili più comunemente in commercio, cioè con nucleo in lega di piombo o monolitici in lega di rame. La discussione e le implicazioni dei proiettili con nuclei in acciaio o altri materiali duri si trova nel quinto capitolo come esempio particolare.

Purtroppo non è possibile indicare a priori un unico valore di angolo limite, valido per ogni combinazione proiettile/velocità/substrato, benché la superficie non cedevole sia il substrato con il comportamento più regolare e riproducibile. Tutti gli studi disponibili in letteratura concordano comunque che l'angolo di rimbalzo da una superficie non cedevole è sempre molto piccolo, indipendentemente dall'angolo d'incidenza.
Per dare però un'idea dell'angolo di rimbalzo massimo la tabella 4.2 riporta i risultati di alcuni studi. L'angolo βmax è messo in relazione con l'angolo d'incidenza α, il tipo di proiettile e il tipo di substrato non cedevole.

Angolo di rimbalzo massimo βmax in funzione di α

Calibro	Proiettile		α	βmax	Substrato	Autore
	Tipo	peso [g]	[°]	[°]		
9 mm	FMJ	8	24,1	2,5	Acciaio 10mm	Kneubuehl [3]
9 mm	Action 1	5,35	24	1,6	Acciaio 10mm	"
9 mm	Action 3	5,85	24	1,9	Acciaio 10mm	"
9mm	Silver Tip	9,5	23,9	3,2	Acciaio 10mm	"
.357 Mag.	SJHP	10,2	18,9	4,4	Acciaio 10mm	"
.44 Rem. Mag.	SJHP	11,7	18,9	4,4	Acciaio 10mm	"
.38 Spl	LRN	10,2	9,4	2,2	Acciaio 10mm	"
.22 lr	HV LRN	2,65	23,2	2,3	Acciaio 10mm	"
.22 lr	Pistol Match	2,65	23,2	1,9	Acciaio 10mm	"
9mm	Silver Tip	9,5	19,3	3	Calcestruzzo *	"
.44 Rem. Mag.	SJHP	11,7	13,6	4,9	Calcestruzzo *	"
.38 Spl	LRN	10,2	24,2	1	Calcestruzzo *	"
.22 lr	HV LRN	2,65	24,6	7,9	Calcestruzzo *	"
.22 lr	Pistol Match	2,65	24,5	5,1	Calcestruzzo *	"
9 mm	FMJ	8	50	5	Acciaio 6mm	Houlden [40]
45 ACP	FMJ	14,4	60	3,8	Acciaio 6mm	"
.357 mag.	FMJ	10,2	60	4	Acciaio 6mm	"
Buckshot	8mm		33	2	Acciaio 9,5mm	Hartline et al.[22]
Buckshot	8mm		26	6	Calcestruzzo *	McConnel et al. [12]

Tab 4.2 angoli di rimbalzo contro superfici dure, non cedevoli
* I valori inerenti il calcestruzzo si riferiscono ad un substrato compatto e senza fratture. Il calcestruzzo è un materiale con proprietà variabili (vedi cap.5).

L'impatto contro una superficie dura deforma il proiettile appiattendone una parte. La deformazione si estende lungo il fianco e fino alla punta. All'aumentare dell'angolo d'incidenza si riduce la parte schiacciata, spostandosi gradualmente verso la punta. Se il proiettile non subisce deformazioni conseguenti a quelle formate durante l'urto, è possibile ricavare un'indicazione approssimativa dell'angolo d'incidenza misurando l'inclinazione della parte appiattita [3,4,5,8,14].

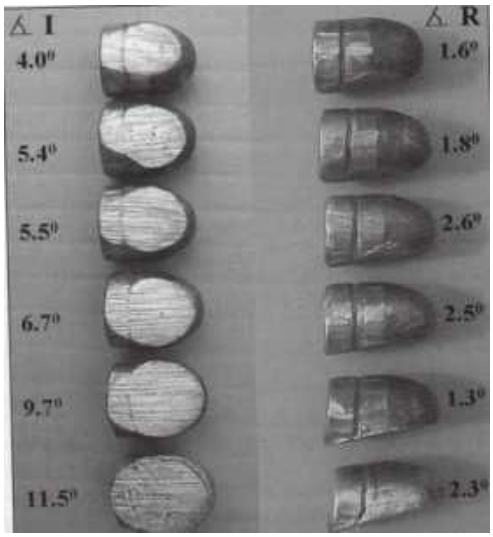


Fig. 4.6 Deformazione di un proiettile in funzione dell'angolo d'impatto contro una superfice non cedevole, da [8]

La superficie deformata del proiettile riporta in negativo i tratti del substrato urtato. Un proiettile rimbalzato contro una superficie levigata avrà una zona deformata levigata. Supefici più ruvide segneranno maggiormente il proiettile e ne abraderanno in parte il materiale. Il mutuo scambio di materiale, tra proiettile e corpo urtato, si manifesta spesso con delle inclusioni di substrato nel proiettile e con uno strato di metallo del proiettile depositato nella zona di contatto della superficie urtata. L'esame delle tracce sul proiettile fornisce indicazioni sulla direzione con cui sono stati inglobati i residui, sul tipo di materiale inglobato e sull'inclinazione di volo che aveva il proiettile prima di impattare. Le tracce presenti su un proiettile in volo stabile prima dell'impatto, ovvero con la punta in avanti, si sviluppano infatti lungo l'asse longitudinale del corpo. Se il volo non avviene in posizione stabile il segno riportato avrà una direzione e/o posizione diversa [8].

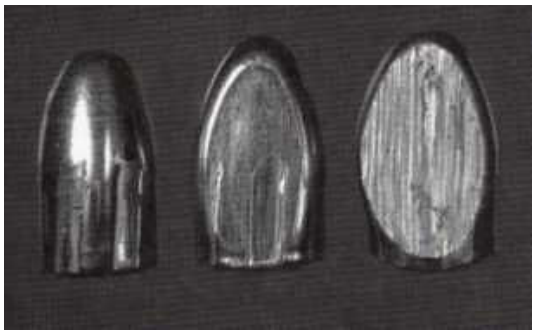


Fig. 4.7 Proiettile sparato in acqua, contro granito levigato e calcestruzzo (da sinistra a destra), da [8]

Il segno lasciato sul corpo urtato può essere un indicatore della direzione dello sparo. Proiettili di piombo, o con piombo esposto in punta, lasciano spesso un residuo a forma di V o di cometa. L'inizio del contatto è segnato dal vertice della V. Avanzando, il poriettile si schiaccia sempre più contro la suerficie e il segno si allarga. Nella fase di allontanamento il segno diventerà più leggero fino a scomparire [8,10,14,17].

Un altro fenomeno interessante è la formazione di un baffo al termine del segno lasciato. In seguito al rimbalzo contro una superfice dura, il proiettile, appiattito su un lato si allontana dal substrato con un angolo di rimbalzo molto piccolo. Poiché l'urto non azzera la rotazione impressa

dalla canna rigata dell'arma, il proiettile riprende a volare ruotando attorno al proprio asse lungitudinale. A volte succede che un fianco della parte schiacciata del proiettile rimanga più a lungo a contatto con il substrato, lasciando una traccia prolungata solo da un lato del segno di risulta. Questo "baffo" varia in funzione del senso di rotazione del proiettile. Poiché la rotazione è impressa dalla rigatura dell'arma, il baffo rispecchia il senso di rotazione che aveva la rigatura dell'arma da cui è stato sparato il proiettile [8, 17].

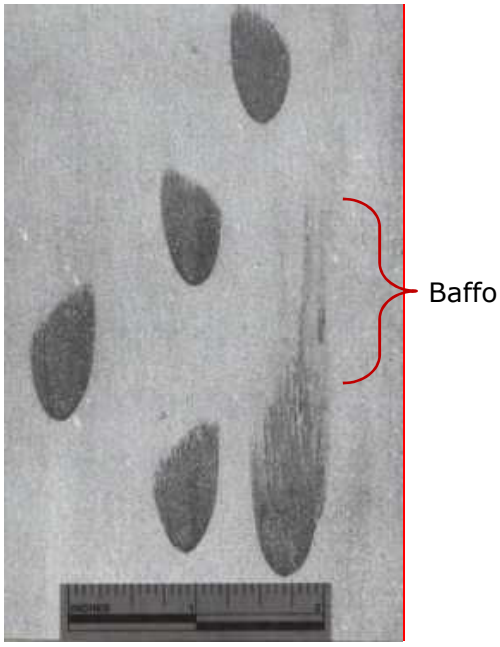


Fig. 4.8 Proiettili calibro 45 sparati dal basso verso l'alto. Angolo 'incidenza 15° circa. Sono visibili gli aloni a V allungata che indicano il senso di rotazione del proiettile. Pietra levigata, da [8].

Fig. 4.9 Proiettili da 9mm con palla Geco SJSP. Sparo dal basso verso l'alto. Si distinguono il baffo e l'alone dorato lasciato dalla blindatura parziale del proiettile attorno alla chiazza di piombo, piastra di acciaio spessa 40mm, foto Bettin.

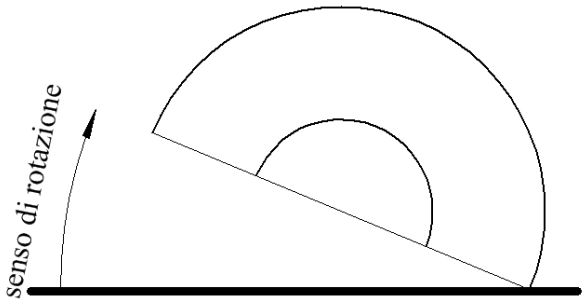


Fig. 4.10 Schema della formazione del baffo. Il proiettile vola verso il lettore (vista dalla punta).

La tabella 4.2 ci mostra chiaramente che l'angolo di rimbalzo da una superficie non cedevole è sempre piccolo, indipendentemente dall'angolo d'incidenza del proiettile. Quest'aspetto facilita la ricerca di un proiettile rimbalzato o una parte della ricostruzione di un evento, ma non permette di trarre conclusioni riguardo all'angolo con cui è stato sparato il colpo [8,14]. Dovendo escludere l'angolo di rimbalzo come indicatore per l'angolo d'incidenza, non rimane che esaminare la traccia di rimbalzo e la deformazione del proiettile. Questi due parametri variano in modo riproducibile al variare dell'angolo d'incidenza, ma sono unici per ogni combinazione proiettile-substrato e la verifica sperimentale è d'obbligo [8].

Per mostrare la riproducibilità del rimbalzo da superfici non cedevoli Haag [8] ha condotto una serie di prove con proiettili dello stesso calibro ma di peso e forma diversi, sparando contro una lastra di cemento e tenendo invariato l'angolo d'incidenza. I dati raccolti in tabella 4.3 mostrano i risultati delle prove eseguite. Una verifica di questo esperimento è stata condotta da Bettin sparando con il calibro 9x21 contro una lastra di acciaio spessa 20mm (dati non pubblicati).

Haag		
Tipo munizione	Angolo Incidenza = -5°	Angolo Incidenza = -10°
	β [°]	β[°]
Winchester 115gr. FMJ-RN	1,5/1,6/1,5 Media: 1,5°	1,6/1,2/1,4 Media: 1,4°
Federal 124gr. FMJ-RN	1,1/1,8/1,6 Media: 1,5°	2,4/1,6/1,2 Media: 1,7°
Winchester147gr. JHP	1,5/1,6/1,5 Media: 1,5°	1,6/1,2/1,4 Media: 1,4°

Tab. 4.3 Angoli di rimbalzo per 3 tipi di munizione da 9mm con angolo d'incidenza costante, contro una lastra di cemento, da [8].

Con lo stesso sistema Haag ha studiato la perdita di velocità causata da un rimbalzo contro una superficie non cedevole. In confronto ai substrati cedevoli (frangibili e non) la perdita di velocità è molto piccola.

Haag			
Tipo munizione	Angolo di rimbalzo medio [°]	N° colpi	Perdita di velocità [m/s] – [%]
Winchester 115gr. FMJ-RN	1,4° ±0,1	12	15,5 – 4,4%
Federal 124gr. FMJ-RN	1,4° ±0,1	10	24,1 – 6,3%
Winchester147gr. JHP	0,9° ±0,1	5	17,1 – 5,1%
Russo, 115gr, FMJ-RN Mantello in acciaio, nucleo in Pb	1,4° ±0,1	7	21,3 – 5,9%

Tab 4.4 Calibro 9x19 sparato su una lastra di acciaio spessa, con angolo d'incidenza di 10°. La perdita di velocità è espressa in m/s e in percentuale della velocita media d'impatto, da [8].

McConnel et al. [12] e Hartline at al. [22] hanno condotto delle prove simili sparando pallettoni (Buckshot 00) da un fucile a canna liscia calibro 12. McConnel ha sparato contro lastre di cemento,

Hartline contro piastre di acciaio. I risultati delle prove confermano le tendenze generali dedotte per i proiettili stabilizzati giroscopicamente (ovvero sparati da una canna rigata). La lastra di acciaio (più rigida di quella di cemento) ha fornito un angolo di rimbalzo massimo di 2°, quella di cemento di 6°.
I dettagli delle prove citate sono raccolti nel quinto capitolo.

4.8 Impatti contro materiali cedevoli e frangibili

I materiali frangibili presentano un comportamento variabile. Il substrato si comporta come una superficie non cedevole (duro e resistente all'impatto) solo fintantoché i proiettili non impattano con un angolo d'incidenza superiore a un certo valore [3,8,14,17,40]. Questo angolo demarca la transizione del substrato da un comportamento non cedevole ad uno cedevole.

Per angoli d'incidenza inferiori a questo limite si applicano le nozioni delle superfici non cedevoli. Nella zona dell'impatto rimane una traccia superficiale del rimbalzo, il proiettile è parzialmente abraso, è schiacciato e l'angolo di rimbalzo è piccolo. L'angolo di transizione dipende dal tipo di proiettile, dal tipo di substrato e dall'energia trasmessa dal proiettile alla superficie urtata. Esso si trova sperimentalmente.

Aumentando l'angolo d'incidenza cresce anche la forza esercita dal proiettile sulla superficie urtata. Superato un certo limite, il materiale del substrato cede e si frantuma. La forza massima sviluppata durante l'impatto agisce nel primissimo istante di contatto. Il danno maggiore della superficie urtata avviene quindi all'inizio della traccia. Se il materiale colpito è sufficientemente omogeneo, il cratere creato dall'urto sarà più profondo nel punto in cui agisce la forza massima, cioè all'inizio della traccia, vedi fig.4.4.

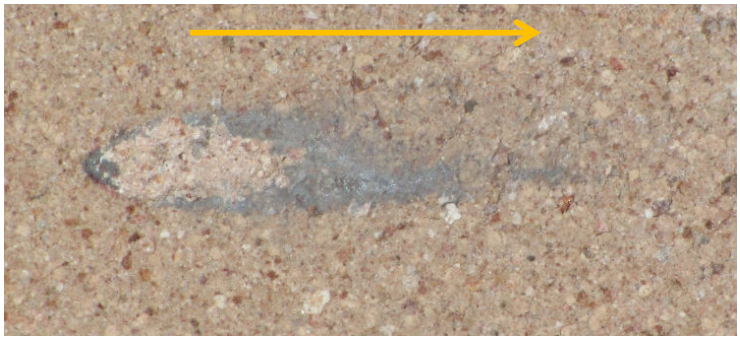


Fig. 4.12 Proiettile da 9mm, in piombo su mattone refrattario. Sparo proveniente da sinistra. Il proiettile ha frantumato ed espulso il materiale solo nella prima zona d'impatto. La zona più scavata non presenta piombo visibile a occhio nudo perché il materiale frantumato è stato scagliato via al momento dell'impatto. La zona più scavata si trova all'inizio della traccia, foto Bettin.

L'angolo di rimbalzo è generalmente minore dell'angolo d'incidenza ma superiore al valore che avrebbe se il materiale non si fosse frantumato.

Se il proiettile impatta ortogonalmente, il cratere formato sarà simmetrico e il punto più profondo si troverà al centro. In questo caso non si troveranno molti residui del proiettile dentro al cratere, dato che saranno stati espulsi con il substrato frantumato [8].

A causa della durezza del materiale e della decelerazione subita, il proiettile si deforma o si frantuma. In entrambi i casi numerosi residui del substrato saranno inglobati nel proiettile o nei suoi pezzi [8].

4.9 Impatti contro materiali cedevoli ma non frangibili

Il modello schematico per questo tipo di materiali è riportato in fig.4.5. Le tracce di rimbalzo lasciate su una superficie cedevole ma non frangibile sono molto diverse rispetto a quelle riscontrabili su una superficie rigida e su una superficie cedevole e frangibile.
L'angolo di rimbalzo è spesso più grande dell'angolo d'incidenza [3,8,9,11,14,17,24,59].

Su questo tipo di substrati il proiettile sposta il materiale lungo il tragitto P_A-P_B, spingendolo di lato e in parte sotto la propria punta. Il materiale dislocato si accumula di fronte all'ogiva, formando una piccola rampa di lancio che devia il proiettile. Il decollo in P_B avviene con un angolo maggiore rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare in un primo momento.

Il processo di dislocamento del materiale è meno costante e meno ripetibile, se paragonato ai fenomeni esaminati per le superfici non cedevoli. Gli angoli di rimbalzo che ne conseguono sono, a loro volta, meno costanti e meno prevedibili. Per illustrare la differenza, Haag [8] condusse un confronto tra una superficie di sabbia (substrato cedevole non frangibile) e una lastra di calcestruzzo (superficie rigida). Nell'esperimento usò un proiettile calibro 7,62NATO, sparato a 860m/s, con angolo d'incidenza di 4° contro la superficie di calcestruzzo compatto e contro della sabbia fine, asciutta e livellata. L'angolo di rimbalzo medio su 6 colpi fu di 1,9°±0,5° per la superficie di calcestruzzo e di 12,3°±1,3° per la sabbia. Jordan, Baratton, Donahue e Rowe [11] vollero indagare se fosse possibile ottenere dei rimbalzi dalle pareti in cartongesso. Tutti gli angoli di rimbalzo misurati furono più grandi degli angoli d'incidenza. In tab. 4.5 sono riportati i risultati dei loro esperimenti.

Jordan, Baratton, Donahue, Rowe			
Arma	Munizione Tipo - peso in grani	Angolo d'incidenza [°]	Angolo di rimbalzo [°]
Beretta 9mm	JHP - 115	5,0	Perforazione
	JHP - 115	3,4	6,3
Ruger (.357/.38)	SWC - 158	5,1	7,8
	SWC - 158	5,1	18,4
	SWC - 158	4,8	17,5
	SWC - 158	3,3	6,1
	SWC - 158	3,3	6,6
	SJHP - 110	3,7	6,1

Tab 4.5 Angoli di impatto e di rimbalzo da cartongesso, da [11]

La traccia P_A-P_B sul corpo urtato cedevole e non frangibile è più lunga di quella che si forma su un materiale rigido e anche il tempo di contatto è superiore. La decelerazione subita dal proiettile è maggiore e, di conseguenza, anche la perdita di velocità è più alta rispetto a un rimbalzo da una superficie rigida [4].

In un urto a basso angolo d'incidenza contro una superficie cedevole, il proiettile non si schiaccia tanto quanto contro una superficie rigida. In alcuni substrati, per esempio sabbia e terra, i proiettili quasi non si deformano (dipende ovviamente anche dal tipo di proiettile) e l'appiattimento descritto nel paragrafo 4.7 non avviene proprio. I proiettili tendono mantenere

intatta la propria geometria (sempre che non urtino contro oggetti presenti nel substrato, come per esempio sassi nel terreno) ma presentano spesso alcuni segni di strusciamento o di abrasione sulla superficie venuta a contatto con il substrato.

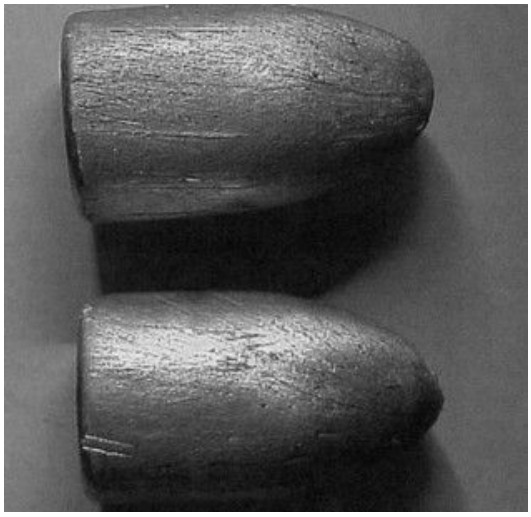


Fig. 4.13 Effetto onda, 9mm FMJ, da [8]

Fig. 4.14 Effetto onda, 45ACP, ramata , foto Bettin

L'estensione della zona abrasa dipende dalla profondità di "immersione" del proiettile. Se una pallottola scava un solco a cielo aperto, le striature saranno visibili solo su un lato. Se invece il proiettile penetra completamente nel substrato e ne esce dopo un certo tragitto, i segni saranno visibili su tutta la circonferenza [8].

Nei materiali cedevoli non frangibili la profondità massima del solco di rimbalzo è generalmente spostata verso il punto di rimbalzo P_B, schema di figura 4.5.

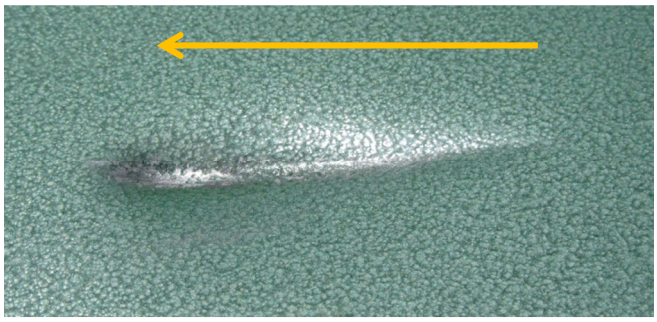


Fig. 4.15 Traccia su lamiera di ferro sottile. Il proiettile, 9mm LRN, proveniente da destra ha impresso un solco con la parte più fonda nel punto opposto a quello d'impatto, foto Bettin.

In alcuni materiali e per certi angoli d'incidenza il solco lasciato può essere talmente simmetrico da non permettere di stabilire la direzione d'impatto con la sola osservazione della geometria del solco[8].

Sui materiali cedevoli si possono formare alcuni segni, utili per determinare la direzione di sparo. Questi segni non si trovano sulle superfici più dure. Non tutti i tipi di materiale cedevole mostrano gli stessi segni e non è neppure detto che compaiano sempre ma, se presenti, aiutano a capire la direzione da cui è provenuto il colpo [3,8,9,14,17].

Per i proiettili sparati con angoli d'incidenza piccoli, è possibile vedere un segno ellittico allungato, chiamato collarino d'ingresso. Questa traccia è lasciata dal proiettile nel primo punto di contatto e, se presente, indica la direzione di volo. Il collarino d'ingresso è composto da residui di sparo, attaccati sulla superficie del proiettile durante il volo e depositati nella prima zona di contatto con il substrato di rimbalzo.

Fig. 4.16 Traccia su pannello di legno truciolare, rivestito da uno strato sintetico. Il proiettile, 9mm LRN, proveniente da sinistra ha scavato un solco di profondità variabile ma poco distinguibile (a causa della natura del legno), foto Bettin.

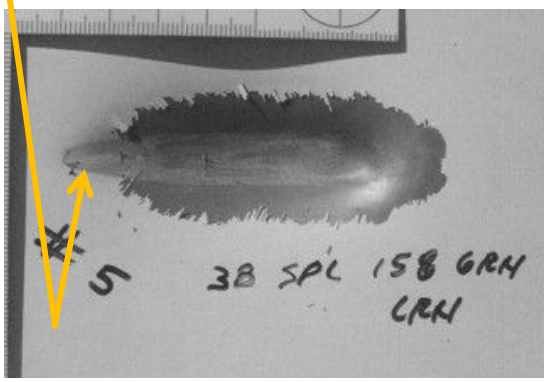


Fig. 4.17 Le frecce evidenziano il collarino d'ingresso, da [8].

Nel punto in cui il proiettile urta contro una lamiera verniciata, si può formare una piccola chiazza di vernice residua. Questo bollino di vernice indica la direzione d'impatto [8, 17]. Poiché la vernice viene "pizzicata" tra proiettile e substrato, in lingua inglese il bollino viene chiamato "pinch point". Il fenomeno si presenta maggiormente con i proiettili a punta tonda piuttosto che a punta troncoconica [8].

La quantità di vernice staccata dalla lamiera aumenta lungo la direzione di volo del proiettile. A volte l'aspetto ricorda vagamente una pera, al punto che i testi inglesi chiamano questo fenomeno "effetto pera" (pear effect). Non sempre la forma ricorda una pera ma la quantità di vernice rimossa è comunque maggiore verso la fine piuttosto che all'inizio della zona d'impatto [17].

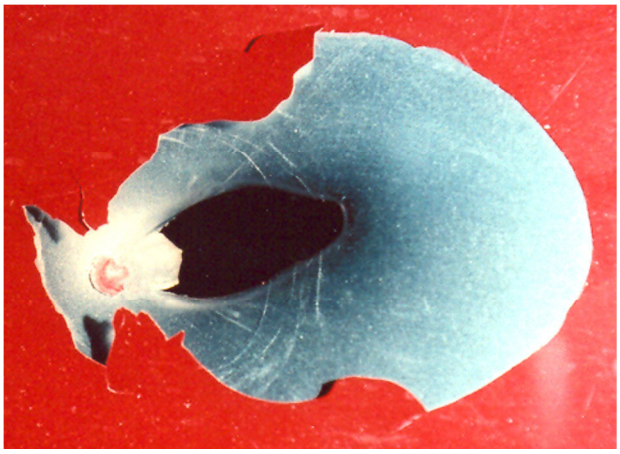


Fig.4.18 Bollino di vernice ed effetto pera.

Un altro fenomeno riscontrabile sulle superfici verniciate riguarda la direzione delle linee di frattura che si formano nella vernice sul bordo del solco [8,10,17,72]. Se il proiettile impatta sulla superficie verniciata, la direzione delle fratture che irradiano dal solco è indicativa per quella del proiettile [8,17,72].

Se un proiettile urta contro una lamiera verniciata, ma sul lato opposto a quello dove è applicata la tinta, si può verificare un fenomeno simile a quello appena descritto, ma con direzionalità opposta. Le fratture nella vernice assumeranno un aspetto “ad albero di natale”. La direzione di volo del proiettile sarà dalla punta dell’albero alla base [10,17].

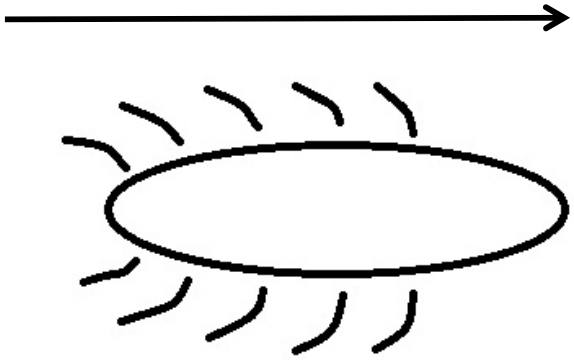


Fig. 4.19 Direzionalità tramite linee di frattura nella vernice. Il proiettile ha colpito il lato verniciato, per esempio la parte esterna di un tettuccio d’automobile.

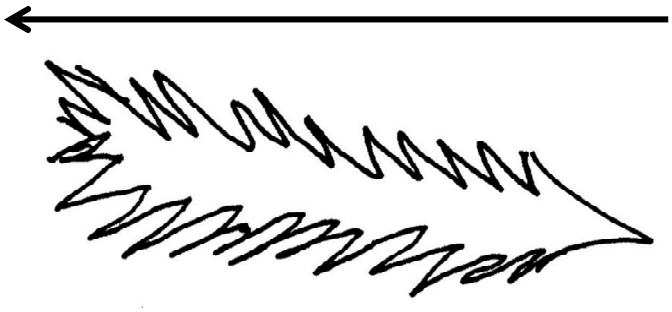


Fig. 4.20 Direzionalità tramite linee di frattura nella vernice. Il proiettile ha colpito la parte opposta a quella verniciata, per esempio un colo sparato contro il tettuccio di un’automobile da dentro l’abitacolo. Il segno sarà visibile sul lato verniciato.

4.9.1 L'acqua, un elemento particolare

Un proiettile che rimbalza da uno specchio d'acqua segue il modello rappresentato in fig. 4.5. Il proiettile penetra con un angolo d'incidenza relativamente basso e può fuoriuscire dall'acqua con un angolo più grande di quello d'incidenza. Il meccanismo per cui avviene il rimbalzo è diverso rispetto a quello descritto per gli altri substrati. L'acqua non viene dislocata per formare una sorta di rampa di lancio, benché la traiettoria del proiettile immerso, visibile in alcuni filmati, sembrerebbe proprio seguire questa logica. Una delle teorie più accreditate ascrive la causa del cambio di direzione del proiettile immerso, alla differenza di pressione che si crea tra la parte inferiore e quella superiore del proiettile.

In letteratura sono disponibili molti studi sulla deviazione e sul rimbalzo dei proiettili in acqua, ma bisogna prestare attenzione al contesto delle ricerche pubblicate. Pochi autori hanno analizzato il fenomeno riferendosi a proiettili sparati da una pistola o da una carabina. La dinamica di un corpo lanciato ad alta velocità in acqua è oggetto di molte conferenze scientifiche, ma i valori degli angoli limite e di rimbalzo, pubblicati in questi documenti, sono superiori a quelli ottenuti sparando il tipo di proiettili discussi in questo libro. Gli studi condotti con le sfere mostrano inoltre dei comportamenti molto variabili e imputabili alla presenza di rotazioni proprie, non presenti sui proiettili sparati da una pistola o una carabina.

Considerando solamente i proiettili sparati da un'arma da fuoco, possiamo affermare che:
Gli angoli critici per il rimbalzo sull'acqua sono piccoli e si attestano sui 7°. Gli angli di rimbalzo non sono tanto più grandi e possono raggiungere valori massimi di 6°-7° per i proiettili da pistola e fino a 10° per quelli ad alta velocità sparati da una carabina.

Il paragrafo 5.2.6 offre una trattazione più esaustiva del rimbalzo sull'acqua. Per approfondimenti e dati numerici si rimanda al quinto capitolo.

4.10 I doppi segni di rimbalzo

In letteratura [2,3,8,14,49] sono riportati casi in cui un proiettile ha impresso nella superficie urtata due segni di rimbalzo in successione → un colpo, due tracce!

Sellier [49] ricostruì in laboratorio le condizioni per studiare i doppi segni e diede una possibile spiegazione del fenomeno. Durante il suo studio sparò dapprima con munizioni nei calibri .38 special, 9x19, 7,65 Browning, 6,35 Browning, Z22, .22Short, .22l.r. e .22l.r. HV contro lastre di alluminio, con angoli d'incidenza compresi tra 0° e 5°. Con nessuno dei proiettili sparati ottenne le doppie tracce.

Nelle prove successive interpose delle piastre di Mipoplast, spesse 5cm e 10cm, tra l'arma e la lastra di alluminio e ottenne alcuni casi di tracce doppie.

Kneubuehl riscontrò anch'egli doppie tracce di rimbalzo durante le sue prove [3], ma a differenza di Sellier non interpose alcun oggetto bersaglio intermedio tra l'arma e la superficie di rimbalzo [92]. Anche il rapprorto di Rottenberger [2] mostra un esempio di doppia traccia di rimbalzo, formatasi senza che il proiettile venisse destabilizzato prima di urtare la superficie di rimbalzo.

Tutti gli autori concordano però sul fatto che le doppie tracce di rimbalzo furono ottenute solamente con angoli d'incidenza non più grandi di 5°. Le distanze tra una traccia e l'altra variarono tra due tracce a contatto, fino a 15cm di distanza tra i segni.

Una dimostrazione analitica della plausibilità delle doppie tracce è stata fornita nel paragrafo 3.5.4.2, al quale si rimanda per la spiegazione scientifica del fenomeno.

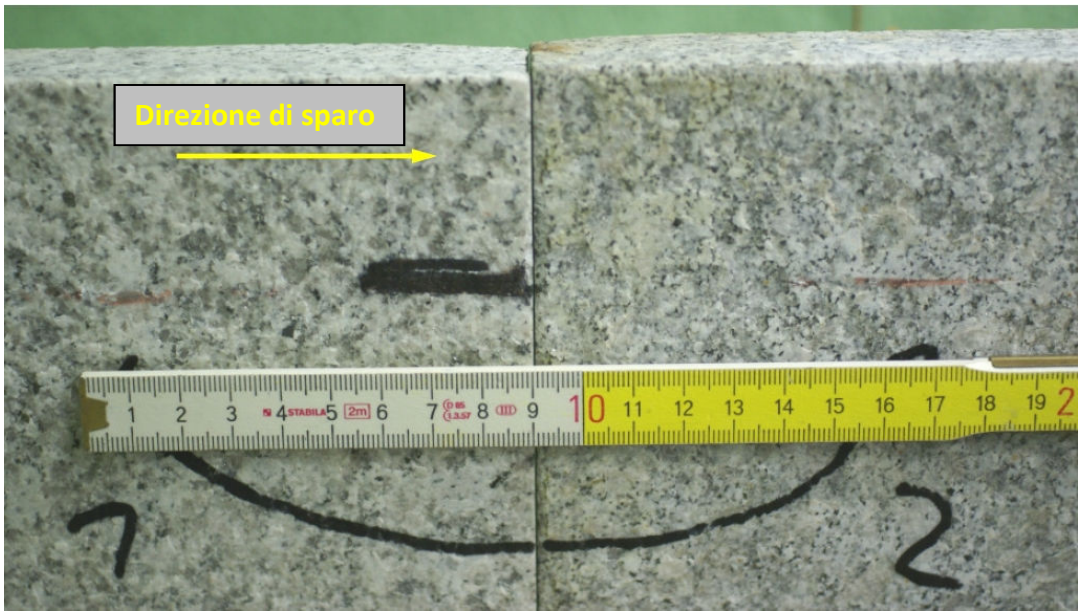


Fig.4.21 Doppio rimbalzo su pietra, generato da un proiettile monolitico, calibro .308, tipo Barnes TSX con angolo d'incidenza di 2,5° e velocità d'impatto di 800m/s, da [2].

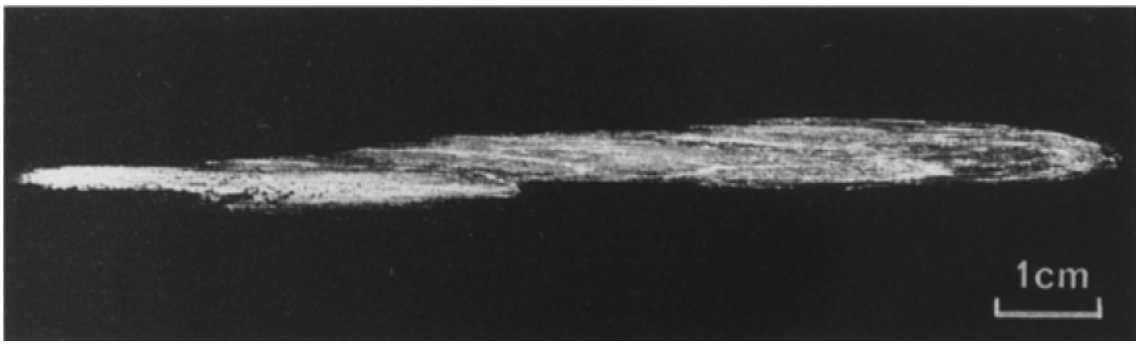


Fig. 4.22 Doppia traccia, sparo da destra verso sinistra, proiettile calibro .38 Special LRN, α=5°, da [49].

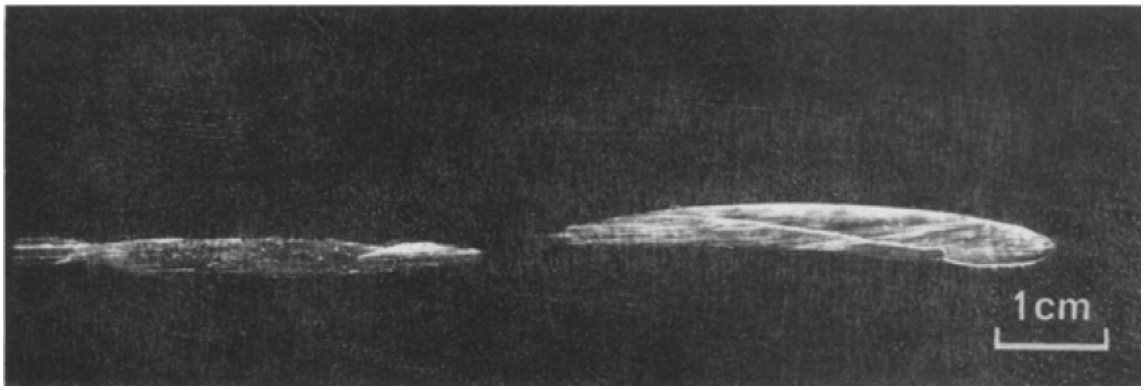


Fig. 4.22 Doppia traccia, sparo da destra verso sinistra, proiettile calibro .38 Special LRN, α=5°, da [49].

4.11 Considerazioni tattiche sui colpi di rimbalzo

Nel 1969 il Federal Bureau of Investigation (FBI) condusse uno studio per valutare le implicazioni del rimbalzo da superfici compatte [64]. Anche altri autori [13] eseguirono prove simili, confermando le conclusioni postulate dall'FBI.

I risultati esposti nel paragrafo sui materiali non cedevoli mostrano che l'angolo di rimbalzo dei proiettili sparati contro una superficie dura è piccolo e oscilla tra i 2° e i 6°.
Ciò significa che un colpo rimbalzato contro un muro solido procede radente lungo la parete per parecchi metri e un proiettile rimbalzato contro un pavimento duro (per esempio di marmo o alcuni tipi di pietra usati per i marciapiedi) vola per un lungo tratto a un'altezza sufficiente per colpire una persona.

Per simulare un uomo in posizione prona, l'FBI pose delle sagome da 50x100cm a contato con il suolo e sparò per terra dalle distanze di 22,5m e 45m rispettivamente. Il punto di mira era 6,5m di fronte al bersaglio. La stessa sagoma fu poi appoggiata con un lato a un muro e spararono contro il muro con angoli d'incidenza di 22,5° e 45°, da una distanza di 22,5m dalla sagoma (per i dettagli si rimanda alla fonte citata).
In tutti i casi, i proiettili attinsero le sagome.

I risultati offrono degli spunti operativi che si dovrebbero tenere a mente:

- Durante uno scontro a fuoco, accostarsi a una parete non offre riparo, anzi, aumenta la probabilità di essere colpiti.

- Se l'aggressore si trova a ridosso di un muro e il tiro è incerto, conviene mirare sul fianco a contatto con il muro.

- Se l'aggressore si mantiene basso su un fondo duro è consigliabile mirare basso sul bersaglio.

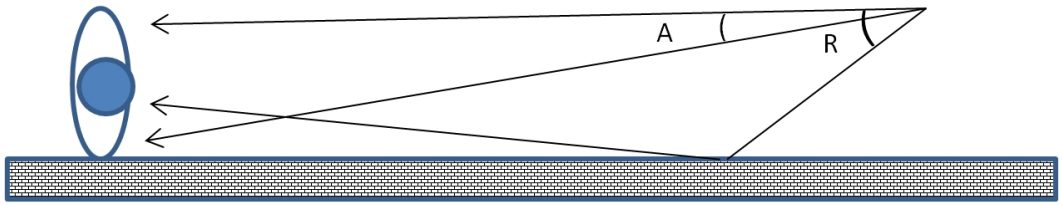


Fig.4.22 Rimbalzo contro un muro (vista dall'alto). L'angolo di tiro R (sfruttando il rimbalzo) è maggiore dell'angolo di tiro diretto A.

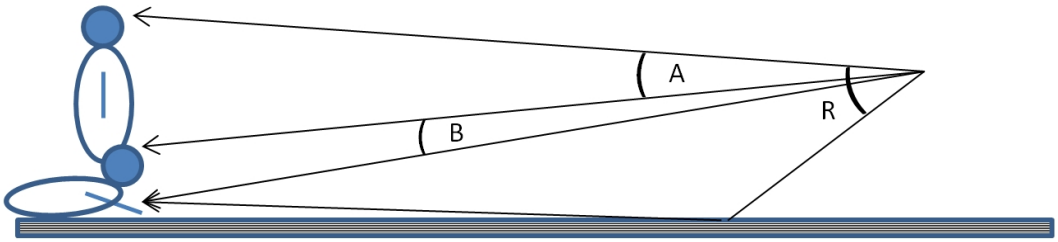


Fig.4.23 Rimbalzo su strada (vista di lato). Gli angoli di tiro A (diretto al bersaglio in piedi) e B (diretto al bersaglio sdraiato) sono minori dell'angolo R che sfrutta il rimbalzo.

5 La pratica dei rimbalzi – risultati sperimentali

Sono pochi i testi trattano i rimbalzi dei proiettili con valenza sia scientifica che pratica. Considerando poi che la letteratura disponibile è spesso difficile da reperire e tutta in lingua straniera, non stupisce che in Italia l'argomento sia quasi sconosciuto.

Per mettere a disposizione una base numerica di confronto, abbiamo riassunto i risultati ritenuti più significativi, tratti sia dalla letteratura che dalle prove dell'autore.

Poiché alcuni studi riportati in bibliografia sono accessibili solo presso le agenzie che li hanno condotti, i risultati numerici di talune prove sono stati gentilmente messi a disposizione per la stesura di questo libro e i testi originali rielaborati per preservare l'anonimato degli autori.

5.1 Considerazioni sulle prove di rimbalzo

Affinché una ricerca abbia valenza scientifica è necessario descrivere l'esperimento in modo appropriato. La descrizione dell'apparato sperimentale deve essere sufficientemente accurata da permettere a terzi di ripetere la prova descritta, ponendosi nelle stesse condizioni di partenza e di validarne o confutarne i risultati pubblicati.

Purtroppo non tutti gli autori hanno descritto i propri esperimenti in maniera appropriata, limitandosi spesso a indicazioni sommarie del materiale utilizzato. Altri hanno condotto prove concentrandosi su un campo d'analisi molto ristretto e tratto conclusioni di carattere generale che però sono valide soltanto per la prova condotta.

Nonostante i limiti e le imprecisioni formali di alcuni studi, trasponendo i risultati in un contesto più ampio e applicando la teoria esposta nei capitoli precedenti, è possibile costruirsi un quadro generale della realtà dei rimbalzi.

La fase sperimentale dello studio dei rimbalzi è sicuramente la parte più interessante, ma anche la più costosa. L'attrezzatura necessaria per eseguire un test spazia da un approccio economico (un'arma, un cavalletto e un cronografo amatoriale) all'utilizzo di banchi di prova, barriere laser e radar per un valore di centinaia di migliaia di euro.

La strumentazione da laboratorio permette di misurare la velocità di approccio e di rimbalzo del proiettile con una precisione inferiore allo 0,1%, mentre un cronografo amatoriale difficilmente arriva all'1-2% d'incertezza reale. D'altra parte l'attrezzatura professionale costa decine di volte il prezzo di uno strumento amatoriale e, visto il divario enorme di costo, l'investimento deve essere più che mai commisurato allo scopo. Non stupisce quindi, che i risultati degli autori che non dispongono di laboratori sofisticati difettino di precisione in confronto ad altri. D'altra parte, la ricostruzione di un evento delittuoso non richiede per forza un laboratorio balistico al pari di aziende che devono certificare il proprio operato. Data l'arma del delitto e lo stesso tipo di munizione usato, al perito non occorre molto altro per studiare l'ipotesi e gli effetti di un rimbalzo. Avendo usufruito sia di un laboratorio professionale attrezzato modernamente che di equipaggiamento portatile meno sofisticato, l'autore ritiene che, in molte occasioni, l'attrezzatura non influisce eccessivamente sul valore qualitativo della prova e con una buona pianificazione chiunque è in grado di eseguire dei test significativi.

Facciamo presente, che mentre i test su distanze brevi sono alla portata di tutti (lo spazio richiesto è minimo ed è possibile tenere basso l'errore di misura piazzando accuratamente l'attrezzatura di misurazione), le prove sulle distanze più lunghe richiedono necessariamente l'uso di strumentazione sofisticata (per esempio il radar) e non è più accettabile la premessa di alcune semplificazioni analitiche introdotte nel terzo capitolo. In particolare bisogna tenere conto che la

traiettoria reale di un proiettile è una parabola e l'angolo di volo del proiettile rispetto alla tangente alla traiettoria nel momento dell'impatto non è trascurabile.

Di seguito alcune considerazioni sulla strumentazione utilizzata dall'autore durante le prove svolte in proprio:

a) **Il sistema di sparo**: Il mezzo più economico e prontamente disponibile è sicuramente un'arma da fuoco. Il perito incaricato di esprimere un parere tecnico su un evento delittuoso spesso non ha scelta, deve usare l'arma del caso (o una simile), mentre in ambito industriale l'autore predilige l'uso delle canne manometriche montate su una culatta pesante alcune decine di kg. Le armi sono più facili da maneggiare, ma un sistema di collaudo balistico è nato per eseguire delle misurazioni (e non dei tiri) e assicura posizionamenti precisi e ripetibili, oltre a permettere lo sparo da una postazione riparata.

b) **L'impianto di regolazione dell'inclinazione**: Esistono due modi per impostare l'angolo d'incidenza. Si inclina l'arma rispetto al bersaglio fisso o si mantiene fissa l'arma e si sposta il bersaglio.
Per le armi da pugno (pistole, rivoltelle) il mercato offre delle morse apposite che bloccano l'arma come se fosse impugnata da una persona e permettono di comandare lo sparo da una distanza di sicurezza. Con le armi lunghe (carabine, fucili vari) l'operazione diventa più laboriosa. La lunghezza dell'arma impone un sostegno più ingombrante, dovendo fissare l'arma in almeno due punti (in genere canna e calcio).
Impugnare l'arma è una soluzione che l'autore considera valida solamente per scopi dimostrativi, non potendo garantire l'accuratezza e la ripetibilità dell'inclinazione al momento dello sparo.
I banchi di prova balistici sono in genere ancorati a terra e permettono un brandeggio minimo. Con questi sistemi è più facile regolare l'inclinazione del bersaglio, salvo montare il sistema di sparo su un piano inclinabile.

c) **Velocità prima dell'impatto:** Si misura facilmente con un cronografo, avendo l'accortezza di inclinare lo strumento per compensare l'anglo d'incidenza del proiettile. Disponendo di un radar è utile piazzare l'antenna in modo che possa seguire il proiettile sia prima che dopo il rimbalzo. Ovviamente non sarà possibile interporre testimoni lungo la traiettoria del proiettile senza oscurare lo strumento.

d) **Testimoni prima dell'impatto:** Quando non si può fare a meno di brandeggiare l'arma manualmente (riducendo la precisione di misurazione dell'angolo d'incidenza) è possibile piazzare due o più testimoni di cartoncino prima della zona d'impatto.
Nota la distanza dei testimoni e l'altezza dei fori lasciati dal proiettile si ricava l'angolo d'incidenza con cui il proiettile ha attraversato i testimoni (vedi fig. 5.1).

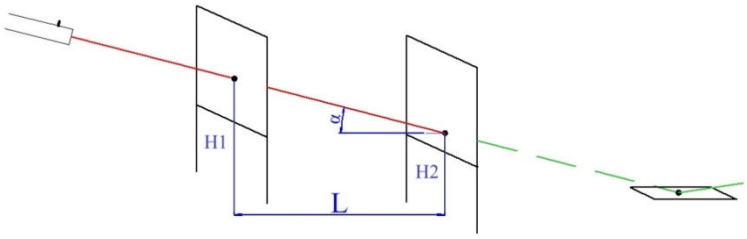


Fig. 5.1 Testimoni prima dell'impatto, per determinare l'angolo d'incidenza.

Per calcolare l'angolo d'incidenza si applica la formula:

(5.1) $\alpha = \tan^{-1} [(H1-H2)/L]$ [°]

Haag [44] afferma che la deviazione del proiettile causata dai fogli di carta è pressoché nulla, e qualora si volesse accertare l'effettiva influenza che essi hanno sulla traiettoria, basta aggiungere un terzo foglio e verificare l'allineamento dei fori rispetto all'asse della canna.

e) **Angolo d'incidenza:** Per misurare l'inclinazione dell'arma si consiglia l'uso di un inclinometro digitale.

f) **Distanze e lunghezze:** Un calibro, un metro e delle stecche sono sufficienti. Un misuratore laser è una soluzione più moderna.

g) **Angolo di rimbalzo e stabilità di volo:** Per conoscere l'angolo di rimbalzo si ricorre a uno o più testimoni posti dopo il punto di rimbalzo. Aumentando il numero di testimoni si ottiene anche una successione di fori che raffigurano l'instabilità del proiettile.

Fig 5.2 Visualizzazione su cartone dell'instabilità causata da un urto. I testimoni sono stati posti a 2, 4, 6, 8 metri dal punto di rimbalzo, da [4].

L'angolo di rimbalzo è calcolato applicando la formula 5.1, sostituendo le quote H3 e H4, oppure prendendo come primo punto di riferimento il punto d'impatto e la sola quota H3.

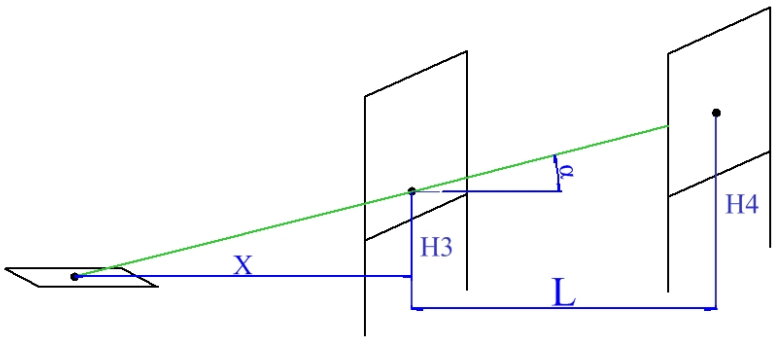


Fig. 5.3 Angolo di rimbalzo

h) **Velocità di rimbalzo:** Non è sempre facile misurare accuratamente la velocità di rimbalzo. I cronografi hobbistici non sono adatti. La finestra di misura è troppo piccola e l'incertezza sulla direzione di rimbalzo troppo grande per garantire una lettura. Le barriere professionali hanno un'area di lettura di un metro quadro e oltre, ma richiedono un investimento notevole. Qualora si usasse una barriera, è inoltre necessario calcolare la componente orizzontale della velocità rilevata, ovvero determinare l'angolo di rimbalzo per ogni misura e calcolare il coseno della velocità segnata dallo strumento.

Lo strumento principe per misurare la velocità di rimbalzo è il radar. Ha il vantaggio di seguire il proiettile in volo e indicare la velocità lungo tutta la traiettoria. Purtroppo il costo elevato lo rende uno strumento poco accessibile e, come tutti gli strumenti di misura, anche il radar ha i propri limiti. Per esempio, se il proiettile alza molta polvere al momento dell'impatto, la nuvola può offuscare lo strumento e l'eco dei proiettili con codolo molto rastremato (boat tail) cala già a distanze relativamente brevi (100-200m).

Un mezzo alternativo, per determinare la velocità del proiettile rimbalzato, è il sapone balistico. Kneubuehl [7] descrive un'applicazione usata in balistica lesionale per calcolare la velocità delle schegge. Riportiamo la teoria alla base del metodo e una descrizione pratica della procedura.
Il sapone chiamato "sapone balistico" è un sapone di glicerina, trasparente e con limite di snervamento molto basso (ca. 0,5N/mm^2). Il peso specifico del sapone fresco (vecchio di 1-3 settimane) varia tra 1060 e 1100 kg/m^3. I parametri che interessano per il suo utilizzo in balistica sono la velocità di trasmissione del suono e la viscosità del sapone, mentre quelli meccanici non sono particolarmente importanti. Il sapone è una sostanza isotropa che, a causa del limite di snervamento molto basso, reagisce al passaggio di un proiettile in modo totalmente plastico, ovvero il canale di tramite formato dal proiettile viene "congelato" nella condizione di massima espansione.
Secondo la teoria di Martel, la cavità permanente creata da un proiettile è proporzionale all'energia ceduta. Di conseguenza, per calcolare la cessione di energia all'interno del blocco di sapone, è sufficiente misurare il volume del canale formato dal passaggio del proiettile. Nota l'energia e il peso del proiettile (o della scheggia) che ha creato il canale, si calcola la velocità d'impatto contro il sapone.
La procedura descritta funziona solamente se il proiettile rimane conficcato nel sapone, cioè se l'energia cinetica posseduta al momento dell'impatto è ceduta completamente al sapone.

Prima di eseguire la prova di rimbalzo il sapone deve essere calibrato, cioè si determina il fattore di proporzionalità μ del blocco in uso. μ indica la quantità di deformazione del blocco in funzione dell'energia assorbita.
Per calibrare il blocco si lancia un pallino sferico di acciaio (indeformabile), di diametro e peso noto contro il sapone e si misura la velocità d'impatto.
Il pallino penetra nel blocco fino a rimanerci conficcato, cedendo tutta l'energia cinetica posseduta e formando un canale di tramite avente una geometria ben precisa.
La sezione retta del canale formato da un proiettile nel sapone è tonda (in realtà sufficientemente tonda per i nostri scopi) e la linea meridiana del canale formato da un pallino sferico ha un andamento approssimabile con una funzione esponenziale. Ciò permette di calcolare il volume del canale formato dal pallino con la formula:

(5.2) $$V = ¼ \cdot \pi \cdot l_c \cdot (d_1^2 - d_2^2)/(\ln(d_1^2) - \ln(d_2^2)) \quad [cm^3]$$

dove V- volume, l_c – lunghezza del canale, d_1 - diametro del canale all'ingresso e d_2- diametro alla fine del canale.

Nota l'energia cinetica E_{kin} posseduta dal pallino al momento dell'impatto (e ceduta interamente al blocco) si trova il coefficiente di proporzionalità μ del blocco di sapone.

(5.3) $1/\mu = E_{kin}/V$ $[J/cm^3]$

Kneubuehl [7] riferisce che il coefficiente di proporzionalità μ nel sapone è indipendente dal tipo di proiettile, fino a un limite di energia ceduta di circa 2500J. Il valore di 1/μ, per sapone fresco (con una penetrazione simile a quella in gelatina balistica al 10% a 4°C), oscilla solitamente tra 5,5-6 J/cm^3. Il metodo di calibrazione descritto permette di determinare con precisione il valore 1/μ per ogni blocco a disposizione. L'esperienza ha mostrato che i valori reali di 1/μ oscillano tra 5 e 6,25 (non sempre i blocchi di sapone sono veramente freschi).

Noto 1/μ si ricava l'energia ceduta dal proiettile rimbalzato, misurando il volume della cavità formata.

Per misurare il volume si può

- Tagliare il blocco lungo la cavità, fotografarne una metà, acquisire l'immagine con una scala appropriata in un computer e usare uno dei programmi gratuiti (per esempio k-analizer di Kneubuehl) per determinare il volume della cavità.

- Tagliare il blocco a fette sottili (perpendicolari alla cavità) e misurare il foro per ogni fetta. Minore è lo spessore delle fette, maggiore sarà la precisione (e il lavoro). Un protocollo in uso in Germania [74] indica fette spesse 2,5cm. Il volume V si calcola con:

(5.5) $V = \sum_i (A_i + A_{i+1})/2 \cdot d_i$ $[cm^3]$

A_i – area del foro nella fetta i (in cm^2), d_i spessore della fetta i (in cm).

- Per cavità molto ampie è accettabile misurare il volume versando e pesando dell'acqua.

Noto il volume V della cavità e il coefficiente di proporzionalità μ, si ricava l'energia E ceduta dal proiettile rimbalzato:

(5.6) $E = 1/\mu \cdot V$ [J]

Nota l'energia ceduta e il peso del proiettile recuperato si ottiene infine la velocità d'impatto contro il sapone:

(5.5) $v = (2E/m)^{-0,5}$ [m/s]

con v–velocità dopo il rimbalzo, E–energia ceduta al sapone, m–massa del proiettile recuperato.

i) **Il substrato di rimbalzo:** La scelta dei substrati e il modo di posizionarli rispetto alla traiettoria del proiettile sono limitati solamente dal budget e dalla fantasia degli operatori. Non daremo alcuna indicazione in merito ma suggeriamo di guardare le foto di alcuni studi

recenti, citati in bibliografia, per vedere cosa è stato fatto avendo tempo e denaro a disposizione.

- **La definizione dei substrati:** Un argomento molto importante è invece l'esatta definizione del tipo di substrato usato. Solo una descrizione dettagliata permette a terzi di ripetere la prova con gli stessi parametri di partenza. Una descrizione sommaria, tipo "tavolato di legno" non basta. Specificando il tipo di legno, lo spessore delle tavole, la direzione delle fibre, la presenza di nodi e se il legno era asciutto o bagnato facilita l'acquisto del materiale per una prova di confronto. Facciamo notare che in alcuni casi non è possibile descrivere sufficientemente il substrato, per esempio gli sterrati (vedi 5.2.7).

l) **Armi e munizioni:** Tipo di arma (marca, modello), calibro e tipo di cartuccia (marca, tipo e peso proiettile) sono informazioni che non devono mancare.

5.2 Risultati sperimentali pubblicati in letteratura

Ciò che rende lo studio dei rimbalzi un'attività sempre interessante è l'enorme quantità di combinazioni proiettile-velocità-substrato-angolo d'incidenza possibili. Se consideriamo che al mondo esistono parecchie centinaia di calibri di armi fa fuoco (di cui circa un centinaio sono di uso corrente), che per ogni calibro il mercato offre un'ampia scelta di tipologie di proiettili e che la varietà dei materiali presenti in un contesto di attività umane è anch'essa notevole, si intuisce che il numero di combinazioni possibili è troppo grande per essere studiate tutte.

Non c'è da stupirsi quindi, se le prove documentate riportano pochi casi specifici, spesso con non più di uno o due calibri e alcuni materiali rappresentativi. Nelle prove destinate allo studio delle leggi naturali si predilige inoltre l'uso delle sfere di materiale indeformabile, anziché i comuni proiettili, eliminando due variabili (la geometria e la deformazione del proiettile).

Per facilitare la ricerca abbiamo ordinato i risultati dei test secondo il tipo di substrato. Per ogni materiale abbiamo riassunto i dati delle prove ritenute più significative, volendo fornire un catalogo di informazioni su cui ripiegare, ma anche dei valori utili per capire la teoria esposta nei capitoli precedenti.

I materiali trattati sono:

1. Metallo
   - Superfici di metallo spesse (e superfici indeformabili in genere)
   - Lamiere sottili
2. Legno
   - Tavole di legno
   - Tronchi d'albero
   - Rami e cespugli
3. Calcestruzzo
   - Proiettili per arma corta (pistola rivoltella)
   - Proiettili per carabina
4. Asfalto
5. Sabbia
6. Acqua

7. Strade sterrate e terreni
8. Studi particolari
   - „Das Abprallen der Geschosse aus forensischer Sicht“ – Il rimbalzo dei proiettili da un punto di vista forense
   - Abprallverhalten von Jagdmunition – Il rimbalzo dei proiettili da caccia

5.2.1 Metallo

Il metallo è uno dei bersagli più comuni e documentati in quasi tutti gli studi che trattano i concetti generali del rimbalzo. Non è solamente un materiale molto diffuso, è anche facile da usare, omogeneo nella sua composizione e fornisce facilmente risultati precisi e ripetibili.

L’interazione tra un proiettile e una superficie di metallo è fondamentalmente di due tipi [3]:

- Sparando contro una superficie molto rigida si deforma solamente il proiettile. L’angolo di rimbalzo è piccolo. Dato che questo fenomeno si verifica con substrati di un certo spessore, chiamiamo questo tipo di superfice metallica “piastra spessa”. La teoria di questo fenomeno è stata descritta in 4.6.

➢ Per una piastra spessa l’angolo limite per il rimbalzo è definito dalla frantumazione del proiettile.

- Quando la superficie metallica si deforma, parliamo di “lamiere (sottili)”. Gli angoli di rimbalzo dalle lamiere possono raggiungere valori molto più grandi rispetto a quelli misurati con le piastre spesse. La teoria è descritta in 4.8.

➢ L’angolo limite per una lamiera sottile è dato dal trapasso del proiettile attraverso la lamiera (e non dalla sola formazione di un foro nella lamiera!).

Precisiamo che la deformazione di una superficie di metallo dipende dalla forza normale alla superficie esercitata dal proiettile sul substrato. La suddivisione tra lastra spessa e sottile non è quindi solamente geometrica e riferita all’effettivo spessore del materiale, ma dipende anche dall’angolo d’incidenza del proiettile.
Se l’angolo d’incidenza è molto piccolo, è possibile che una lamiera sottile di metallo non subisca alcuna deformazione e l’angolo di rimbalzo risultante segue le condizioni del rimbalzo da una superficie rigida anziché cedevole.

Inoltre, non solo le lamiere sottili possono assumere le caratteristiche di quelle spesse, ma è vero anche il contrario. In determinate situazioni accade che una piastra metallica spessa e rigida si comporti come una lamiera cedevole con un determinato tipo di proiettile, sparato con sufficiente velocità. Descriviamo brevemente il fenomeno:

Sparando un proiettile molto duro contro un bersaglio metallico spesso ma tenero, è possibile che il proiettile penetri il bersaglio e ne fuoriesca dallo stesso lato, dopo aver percorso un certo tratto all’interno del materiale (proprio come accade per il legno). Questo caso limite è stato documentato sparando nuclei perforanti e sfere temprate contro acciaio da costruzione e alluminio [36,45].

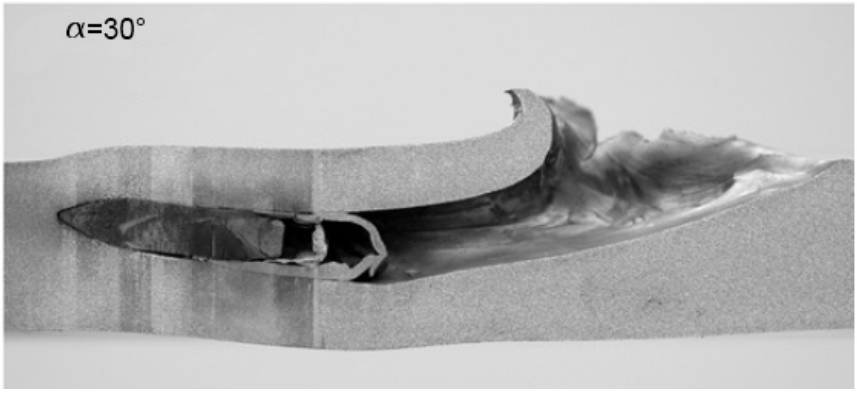


Fig. 5.3 Perforante APM2, calibro 7,62 mm contro una piastra di alluminio spessa 20mm e con angolo d'incidenza di 30°, da [45].

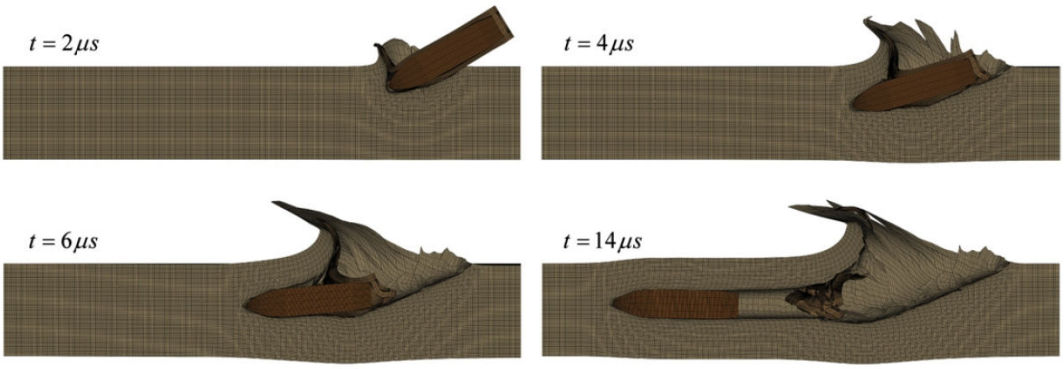


Fig. 5.4 Simulazione numerica dell'evento fotografato in fig. 5.3, da [45]

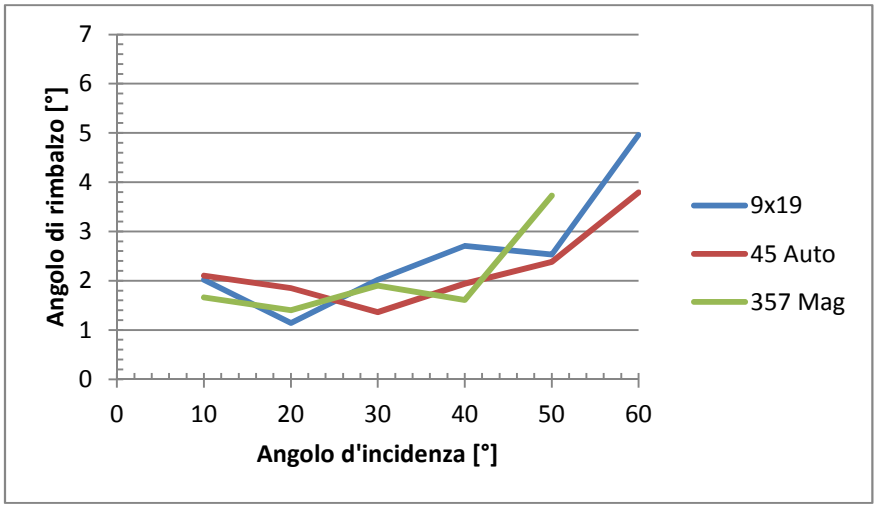
5.2.1.1 Superfici di metallo spesse (superfici indeformabili in genere)

HOULDEN [40] sparò proiettili blindati (FMJ) nei calibri 9x19, .45 Auto e .357 Mag. contro piastre d'acciaio spesse 6mm e si servì di un pendolo balistico per determinare l'energia residua dei proiettili e delle loro schegge.

In tabella 5.2 sono riportati i risultati dello studio, comprese le misurazioni dei frammenti di proiettile. Facciamo notare che il salto nei valori di β, per α maggiore di 40°-50°, è da ascriversi alla frammentazione dei proiettili e che gli angoli di rimbalzo dei proiettili sono tutti compresi tra 1° e 3°.

Houlden: piastra d'acciaio spessa 6mm						
Angolo incidenza α [°]	Angolo rimbalzo massimo β [°]			Calibro	Tipo-Peso [grani]	Velocità misurata [m/s]
	9x19	45 Auto	.357 Mag			
10	2,02	2,1	1,66	9x19	FMJ- 115	332±15
20	1,14	1,85	1,4			
30	2,02	1,36	1,9	.45 Auto	FMJ-230	263±4
40	2,71	1,94	1,61			
50	2,53	2,38	3,73	.357 Mag	FMJ-170	392±5
60	4,96	3,79	-			

Tab 5.1 Valori delle prove di Houlden – piastra d'acciaio



Tab 5.2 Angoli di rimbalzo misurati nelle prove di Houlden

KNEUBUEHL [3] ha elaborato e raccolto una serie di prove, condotte dalle istituzioni Svizzere, e pubblicate nella sua tesi di dottorato. L'approccio metodico e la documentazione meticolosa dei dati, rende la sua monografia sui rimbalzi uno dei testi principali sull'argomento (vedi 5.2.8).
Per la simulazione di una superficie rigida usarono una piastra di acciaio Fe 370, σ_s=290-410 N/mm^2 spessa 10mm. Gli angoli d'incidenza dei test variarono da un minimo di 2,5° ad un massimo di 25°.

I valori di Kneubuehl riportati nelle tabelle seguenti sono le medie di 5 misurazioni per ogni combinazione studiata.

Durante la prova condotta contro la lasta da 10mm fu anche analizzata l'influenza della velocità d'impatto per alcuni proiettili. Dai primi risultati raccolti risultò che (per le combinazioni testate) la variazione della velocità fu ininfluente sull'angolo di rimbalzo e si decise di rinunciare all'analisi dei dati.
Le velocità di tutte le prove studiate da Kneubuehl [3] sono elencate nella tabella 5.3.

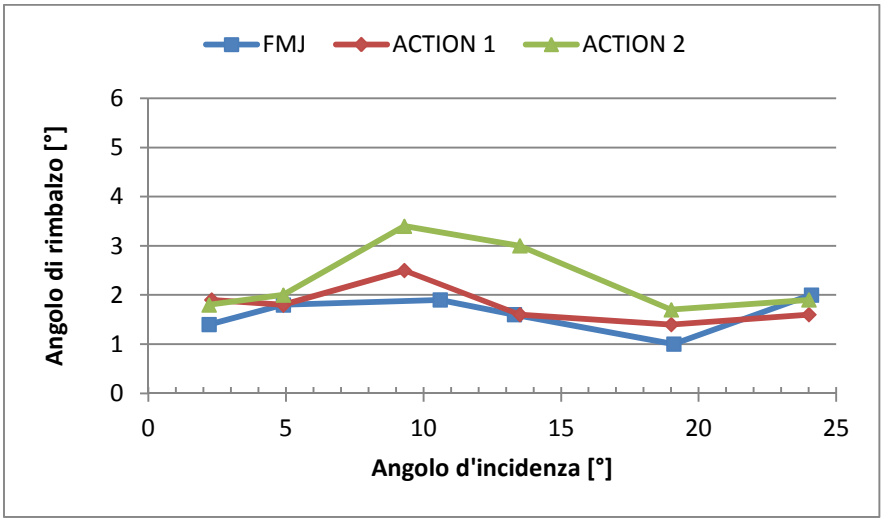
Kneubuehl [3]: Munizioni usate e velocità misurate							
m – massa del proiettile ; v - velocità media di prova							
Calibro	Tipo	m [g]	v [m/s]	Calibro	Tipo	m [g]	v [m/s]
9x19 Luger	FMJ	8	355 395 305	357 Mag.	SJHP	10,2	370
				44 Rem. Mag	SJHP	11,7	465
9x19 Luger	ACTION 1	5,35	430 470 250	38 Spl.	LRN	10,2	225
9x19 Luger	ACTION 3	5,85	430	22 lr. HV	LRN	2,65	340
9x19 Luger	FMJHP (Silver tip)	9,5	315 335 150	22 lr. Pistol Match	LRN	2,65	295

Tab 5.3 Munizioni usate e velocità misurate, Kneubuehl

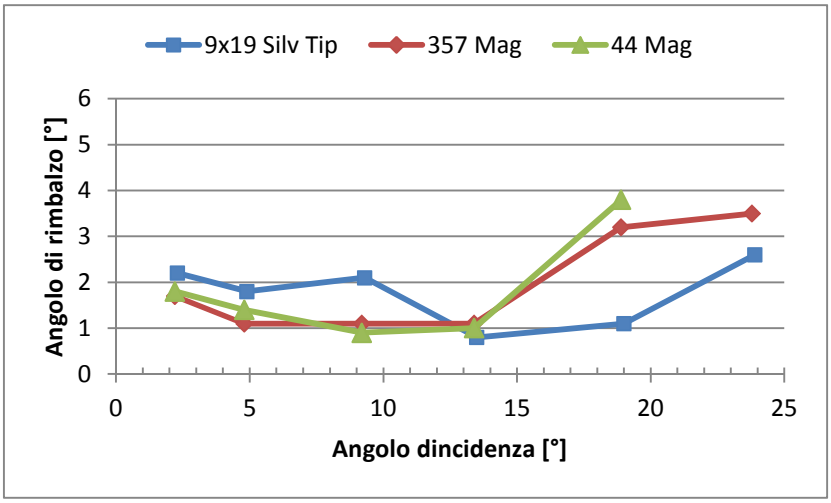
La tabella 5.4 mostra i risultati delle prove di Kneubuehl [3] contro una lastra spessa di acciaio.

Kneubuehl: Acciaio 10 mm											
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia											
9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	1,4	1,5	1,3	2,3	1,9	1,9	2,3	2,2	1,8	1,8	2,1
4,9	1,8	1,9	0,8	4,9	1,8	1,9	3,2	4,9	2,0	2,2	2,2
10,6	1,9	2,0	1,5	9,3	2,5	2,6	3,4	9,3	3,4	3,5	3,0
13,3	1,6	2,0	7,3	13,5	1,6	1,7	5,4	13,5	3,0	3,1	12,7
19,1	1,0	2,1	11,6	19,0	1,4	1,5	16,1	19,0	1,7	2,0	16,0
24,1	2,0	2,5	18,3	24,0	1,6	1,6	19,5	24,0	1,9	2,0	21,4
9x19 – Silver Tip				357 Mag. SJHP				44 Rem. Mag SJHP			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,3	2,2	2,3	2,5	2,2	1,7	2,0	2,7	2,2	1,8	1,9	3,0
4,9	1,8	1,9	4,5	4,8	1,1	1,2	2,0	4,8	1,4	1,5	4,1
9,3	2,1	2,2	6,2	9,2	1,1	1,7	4,8	9,2	0,9	1,0	2,2
13,5	0,8	1,0		13,4	1,1	1,2		13,4	1,0	1,2	
19,0	1,1	1,2		18,9	3,2	4,4		18,9	3,8	4,4	
23,9	2,6	3,2		23,8	3,5	4,2		-	-	-	
38 Spec. LRN				22 lr. HV LRN				22 lr. Pistol Match LRN			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,3	1,2	1,4	2,0	2,3	1,2	1,2	3,1	2,3	1,3	1,6	1,9
4,8	1,3	1,5	1,9	5,1	0,8	1,1	1,7	5,1	0,8	0,9	2,3
9,4	1,5	2,2	4,2	9,2	1,5	1,7	3,2	9,2	1,4	1,8	3,7
13,4	1,2	1,2		13,4	1,2	1,4		13,4	1,1	1,2	
19,0	1,4	1,4		19,0	1,9	2,0		18,9	1,6	1,7	
23,9	1,6	1,6		23,2	1,6	2,3		23,2	1,6	1,9	

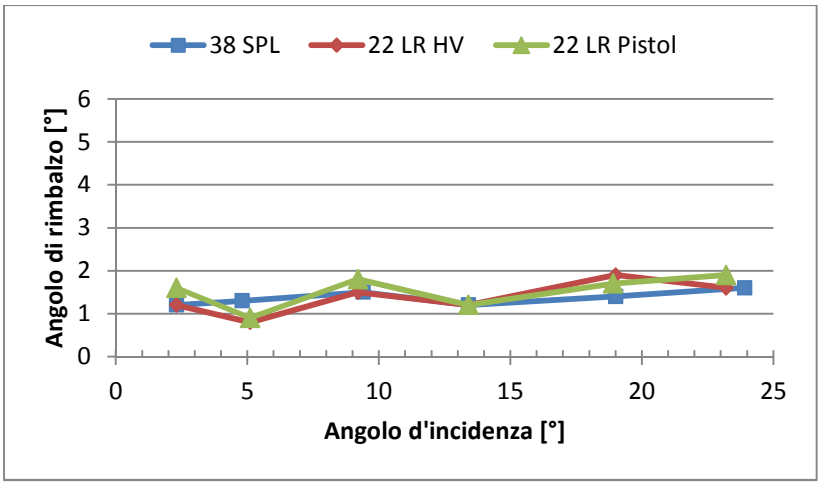
Tab 5.4 Acciaio 10mm, Kneubuehl



Tab 5.5 Piastra d'acciaio spessa 10mm – calibro 9x19, Kneubuehl



Tab 5.6 Piastra d'acciaio spessa 10mm – calibro 9x19, 357 Mag, 44Rem Mag, Kneubuehl



Tab 5.7 Piastra d'acciaio spessa 10mm – calibro 9x19, 357 Mag, 44Rem Mag, Kneubuehl

ANONIMO (dati rielaborati da Bettin): Per studiare se e quale influenza potesse avere la composizione del nucleo di un proiettile sparato contro una superficie indeformabile, furono sparate due diverse marche di proiettile calibro 7,65 Browning, con palla FMJ contro una lastra di granito levigato (benché non sia una superficie metallica, il granito levigato della prova presentava tutte le caratteristiche di una superficie rigida non frangibile). Un tipo di proiettile aveva il nucleo di piombo (marca Geco), l'altro di acciaio (marca Sellier & Bellot).

Confronto 7,65 Browning: nucleo di piombo e nucleo di acciaio			
Angolo incidenza α [°]	Angolo rimbalzo β [°]	Angolo incidenza α [°]	Angolo rimbalzo β [°]
	Nucleo di piombo - Geco		Nucleo di ferro – S&B
20	5,9	10	4,2
30	6,3	20	12
		30	15
		30	18
		40	24
$V_{impatto}$ = 275 m/s		$V_{impatto}$ = 260 m/s	

Tab 5.8 Valori delle prove rielaborate da Bettin – lastra di granito, nuclei del proiettile di materiale diverso

Dall'esperimento si deduce l'importanza della composizione del nucleo. Gli angoli di rimbalzo del proiettile con nucleo in ferro sono doppi rispetto a quello con nucleo di piombo. Il poiettile con nucleo di piombo rientra pienamente nella teoria esposta nel paragrafo 4.6 mentre quello con nucleo di ferro, pur avendo angoli di rimbalzo inferiori a quelli d'impatto, mostra una reazione molto elastica del nucleo, con conseguente aumento dell'angolo di rimbalzo β. Inoltre, per angoli d'incidenza superiori ai 30°, è lecito aspettarsi la frammentazione del proiettile ma, poiché il nucleo di ferro tende a schiacciarsi meno di quello in piombo, la probabilità che la palla della S&B si frantumi già a 30° è minore.

Riportiamo anche altri dati sui rimbalzi contenuti negli studi rielaborati da Bettin:

9x19 Luger, FMJ		Sfera di acciaio, 5,5mm, due velocità	
Angolo incidenza α [°]	Angolo rimbalzo β [°]	Angolo incidenza α [°]	Angolo rimbalzo β [°]
5	0,6	20	11
5	0,7	20	19
5	3,0	30	20
10	3,1	30	14
15	4,1	30	18
20	2,3	30	21
$V_{impatto}$ = 370 m/s		39	24
		39	24
		40	13
		40	21
		$V_{impatto}$ = 110 m/s	
		$V_{impatto}$ = 180 m/s	

Tab 5.9 Valori delle prove rielaborate da Bettin – granito levigato

Dalla tabella 5,9 vediamo che, mentre i dati del 9x19 confermano la teoria esposta nel quarto capitolo, i risultati della sfera di acciaio mostrano un'interessante proprietà dei materiali. Gli angoli di rimbalzo del pallino, lanciato a due velocità (110m/s e 180 m/s), aumentano all'aumentare della velocità, pur mantenendo costante l'angolo d'incidenza. Sia il pallino di acciaio che la superficie di granito sono due corpi indeformabili e l'urto che ne consegue mostra spiccate caratteristiche elastiche.

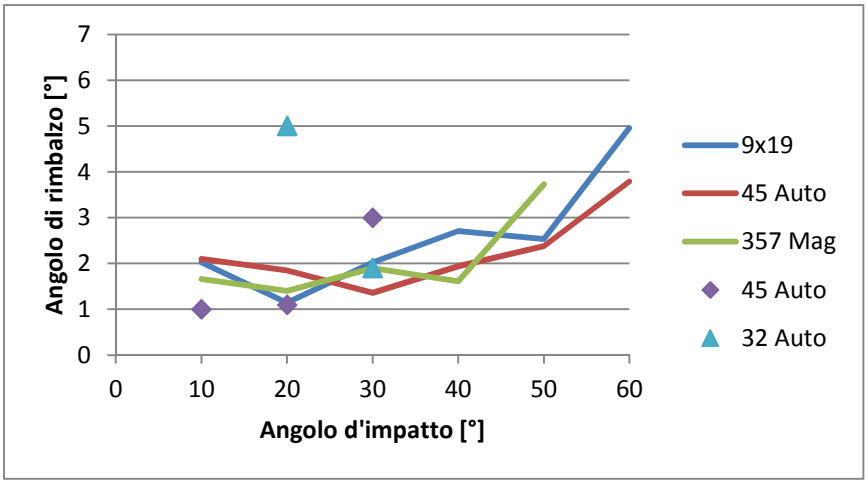
E' interessante confrontare i risultati riportati in tab. 5.8 e 5.9 con la prova di Kneubuehl e la lastra spessa 10 mm. Kneubuehl sparò tre tipi di proiettile calibro 9, tenendo un angolo d'incidenza costante ma variando la velocità (si veda tab. 5.3). Egli non misurò differenze apprezzabili dell'angolo di rimbalzo, tanto che rinunciò all'elaborazione dei dati raccolti. I proiettili usati da Kneubuehl erano con nucleo di piombo (FMJ) e monolitici, espansivi di ottone (ACTION 1 e 3). I proiettili utilizzati da Kneubuehl erano però molto meno rigidi del proiettile 7,65 Browning con nucleo in acciaio e il pallino sferico d'acciaio delle prove di Bettin. Traendo delle conclusioni possiamo affermare che:

➔ La composizione del nucleo di un proiettile è un parametro importante per l'angolo di rimbalzo contro le superfici rigide e i nuclei più duri (acciaio, carburi sinterizzati) mostrano un comportamento elastico maggiore rispetto a quelli che si deformano con più facilità (piombo, leghe di rame di una certa durezza).

Quasi tutti i proiettili disponibili sul mercato civile hanno un nucleo in lega di piombo, sono completamente di piombo o monolitici in lega di rame. Esistono però in commercio prodotti

con nucleo di acciaio dolce (non perforanti) e perforanti (destinati ai militari) con nucleo in acciaio temprato o carburo di tungsteno che rimbalzano diversamente. Benché i proiettili perforanti siano poco diffusi in ambito civile (e in molti paesi difficilmente accessibili ai privati) i proiettili con nucleo in acciaio dolce sono comuni per alcuni calibri e vengono venduti a poco prezzo. Ciò che per un ricercatore scientifico rappresenta un'interessante variazione da sperimentare è, invece, per coloro che si occupano della ricostruzione degli eventi una variabile indesiderata ma non trascurabile.

RATHMAN [42] sparò proiettili del tipo FMJ nei calibri 32 Auto (4,6g, 240m/s) e 45 Auto (14,9g, 230m/s) contro 8 tipi di bersaglio. Uno di questi era una piastra di acciaio indefinito, spessa 6,35mm.
I risultati di Rathman sono stati inseriti assieme a quelli di Houlden in un'unica tabella. Il valore di 5° riportato da Rathman per un colpo del 32 Auto, con α di 20°, è poco plausibile da un punto di vista fisico, ed è lecito supporre un errore di battitura.



Tab 5.10 Confronto tra i valori delle prove di Houlden (linee) e Rathman (punti) – piastra d'acciaio.

HARTLINE [22] condusse uno studio sparando pallettoni del tipo 00 Buck (8 pallettoni per cartuccia) contro una piastra spessa 9,5mm, anch'essa non meglio definita. Egli misurò l'angolo di rimbalzo arrotondando i valori al numero intero. Non riportiamo i dettagli numerici ma citiamo che l'angolo misurato, e riferito al baricentro della rosata, era sempre compreso tra 0° e 2°.

5.2.1.2 Lamiere sottili di metallo

Nell'introduzione sui metalli abbiamo riferito che, per angoli superiori a quello limite, il proiettile si frantuma se urta una piastra spessa, mentre perfora e passa attraverso il metallo se colpisce una lastra sottile. Con le lastre sottili l'angolo limite dipende prevalentemente dalla densità di energia agente sulla lamiera. La densità d'energia dipende a sua volta dalla componente verticale agente e dalla geometria della punta del proiettile. Quindi il fatto che una lamiera sottile venga perforata o meno dipende dalla velocità e dall'angolo d'incidenza del proiettile.

Parlando della formazione di fori sul metallo sottile, facciamo notare che esiste una fase intermedia in cui il proiettile crea un'apertura nella lamiera, ma non vi passa attraverso, bensì rimbalza, oppure ci passa solo un pezzo del proiettile (il proiettile è tranciato dallo spigolo del foro). La lamiera è strappata, o un pezzo è staccato localmente dall'azione del proiettile, e si crea

un buco. In un primo momento questi fori non si distinguono da quelli creati per perforazione [3]. Durante l'analisi della traccia di risulta, se si dimentica di considerare che un foro sulla superficie di una lamiera non implica necessariamente che il proiettile abbia trapassato l'oggetto, si rischia di cercare il proiettile dalla parte sbagliata del substrato. Inoltre bisogna prestare attenzione a non identificare un angolo limite sbagliato, ricordando che anche se il proiettile ha effettivamente bucato la lamiera, non vi è passato attraverso e quindi si tratta ancora di un rimbalzo (e non di una penetrazione della lamiera).

Nota: La perforazione di un substrato senza penetrazione del proiettile può verificarsi anche per il vetro. Sono stati documentati diversi casi (per esempio nelle pubblicazioni di Sellier) in cui un proiettile è rimbalzato contro una finestra o una vetrina, creando un foro, ma senza passare dall'altra parte del vetro. Anche qui, chi non dovesse prestare attenzione ad altri segni sulla scena rischia di cercare invano dalla parte sbagliata.

Dalle prove di KNEUBUEHL [3], condotte contro una lamiera di acciaio Fe 370, σ_s=290-410 N/mm^2, spessa 1mm, si evince che tra i proiettili studiati, quelli dotati di maggiore energia (9 Luger, 357 Mag. e 44 Rem. Mag.) raggiungono l'angolo limite molto prima dei proiettili con minore energia e in piombo nudo (38 Spl., 22 lr. HV, 22 lr. Pistol Match). I proiettili monolitici Action1 e Action3 (completamente in ottone) e i due calibri Magnum avevano forato la lamiera con angoli d'incidenza uguali o maggiori di 10°, ma per α=10° non erano ancora passati attraverso la lamiera (quindi rimbalzo con foro). Il proiettile FMJ da 9mm perforò la lamiera a partire da 15° mentre il proiettile Silver Tip, dello stesso calibro ma più deformabile, raggiunse il suo angolo limite non prima dei 20°. I proiettili in piombo nudo rimbalzarono tutti per α=25° (l'angolo massimo per cui furono condotte le prove) e non raggiunsero l'angolo limite.

Dalle prove si notò che a energia d'impatto maggiore corrispose una deformazione maggiore della lamiera e i solchi creati sulla lamiera si strapparono nella parte finale della traccia (la più deformata, vedi schema 4.4). Di conseguenza, i calibri 9mm, 357 Mag. e 44 Rem. Mag. (quelli che deformarono maggiormente la lamiera) subirono deviazioni più grandi rispetto ai calibri con minore energia.

In [3] sono documentate anche prove su una lamiera di alluminio Anticorodal Ac 110, σ_s > 260 N/mm^2, spessa 2mm.

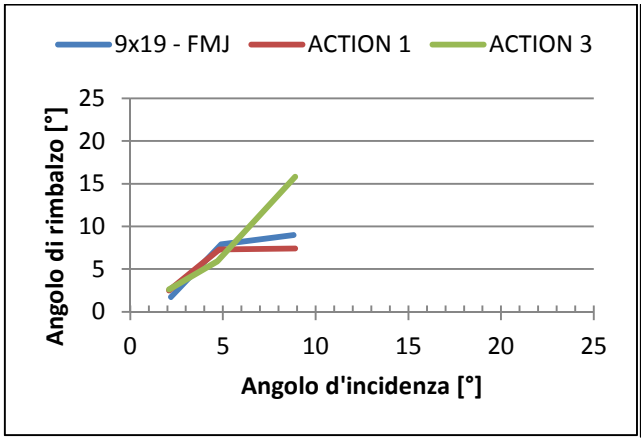
Per angoli d'incidenza piccoli (≤5°) la reazione del substrato fu simile a quella di una lastra spessa. Gli angoli di rimbalzo furono molto piccoli. Per angoli superiori la reazione fu invece simile a quella della lastra di acciaio spessa 1mm, ma con la differenza che gli angoli limite comparvero circa 5° più tardi.

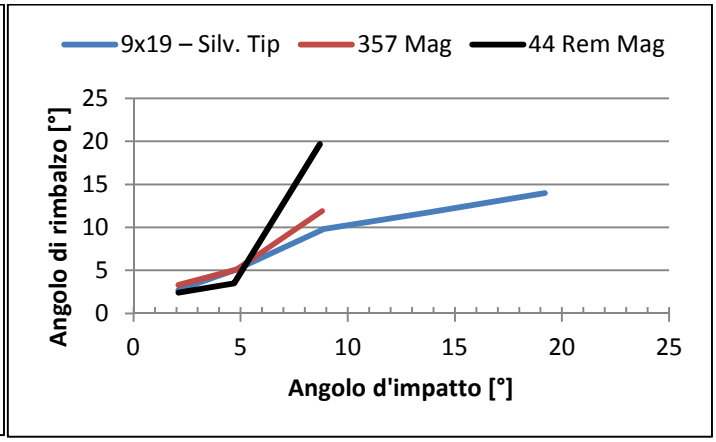
Benché il carico di rottura dell'alluminio sia solo la metà di quello dell'acciaio, Kneubuehl ascrive la causa della maggiore resistenza allo spessore doppio della lamiera.

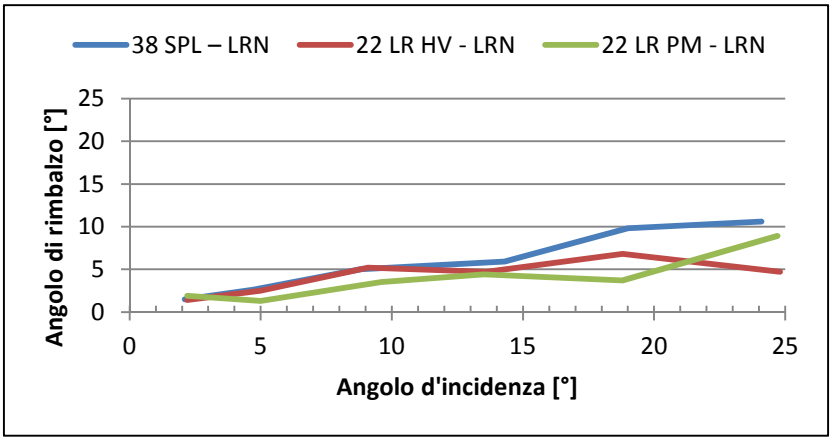
Riportiamo nelle tabelle 5.11-13 i risultati delle prove condotte contro lamiere sottili e i relativi grafici raffiguranti l'andamento dei valori medi.

Kneubuehl: lamiera acciaio, 1 mm											
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia											
9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	1,7	2,1	2,5	2,1	2,5	4,5	3,2	2,1	2,6	2,8	4,3
4,9	7,9	10,0	13,8	4,8	7,3	8,0	24,3	4,7	5,9	7,6	9,0
8,8	9,0	10,5	27,7	8,9	7,4	7,5	11,9	8,9	15,8	19,6	70,9
9x19 – Silver Tip				357 Mag. SJHP				44 Rem. Mag SJHP			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,1	2,7	3,0	2,8	2,1	3,3	6,1	3,1	2,1	2,4	3,5	4,2
4,8	5,1	6,7	10,9	4,8	5,1	7,4	11,0	4,7	3,5	4,1	7,5
8,9	9,8	11,4	23,0	8,8	11,9	22,5	29,8	8,7	19,7	27,8	17,3
13,7	11,7	14,3		-	-	-	-	-	-	-	-
19,2	14,0	18,1		-	-	-	-	-	-	-	-
38 Spec. LRN				22 lr. HV LRN				22 lr. Pistol Match LRN			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,1	1,5	2,2	3,6	2,2	1,4	1,9	5,3	2,2	1,9	2,6	5,3
4,7	2,6	3,5	2,2	5,0	2,5	2,8	3,7	5,0	1,3	1,4	2,1
8,8	5,0	5,7	8,2	9,1	5,2	6,7	6,5	9,6	3,5	4,1	3,8
14,3	5,9	7,7		13,6	4,7	5,7		13,5	4,4	5,6	
19,0	9,8	12,1		18,8	6,8	8,7		18,8	3,7	4,1	
24,1	10,6	12,1		24,8	4,7	6,0		24,7	8,9	12,2	

Tab 5.11 Kneubuehl: lamiera di acciaio, 1 mm







Tab 5.12 Kneubuehl: grafici per lamiera di acciaio, 1 mm

Kneubuehl: alluminio, 2mm											
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia											
9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,3	1,1	1,3	1,1	2,2	1,6	1,8	1,1	2,2	1,4	1,5	1,2
4,8	1,1	1,4	2,0	4,8	1,7	2,0	3,3	4,9	2,4	2,5	3,2
8,9	5,6	6,4	9,6	8,9	11,3	15,1	14,2	8,9	12,7	14,3	23,8
13,5	8,9	10,6		13,5	12,1	13,2		13,5	14,1	18,0	
9x19 – Silver Tip				357 Mag. SJHP				44 Rem. Mag SJHP			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,3	1,3	1,5	1,2	2,2	1,7	2,1	1,0	2,3	2,0	2,3	1,3
4,8	2,3	2,9	2,9	4,5	3,2	3,5	3,7	4,6	4,4	6,4	5,0
9,0	7,4	9,4	8,9	8.7	5,1	6,9	6,2	9,0	6,5	7,3	16,0
13,5	7,6	8,8		13,5	6,7	9,5		-	-	-	
19,2	11,6	14,2		-	-	-		-	-	-	
24,6	11,1	13,0		-	-	-		-	-	-	
38 Spec. LRN				22 lr. HV LRN				22 lr. Pistol Match LRN			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,3	1,0	1,4	0,6	2,4	0,7	0,9	1,1	2,3	1,0	1,5	1,3
4,6	2,0	2,7	0,2	4,9	0,9	1,0	1,5	4,8	2,2	3,2	1,5
8,8	1,4	1,6	3,2	9,5	1,4	1,9	5,0	9,5	0,5	0,6	4,2
13,4	10,2	11,5		14,1	6,5	8,6		14,2	4,9	6,2	
19,2	7,9	8,7		19,3	5,2	5,9		19,2	3,9	5,0	
24,2	5,4	6,3		24,3	5,1	5,8		24,2	5,7	6,4	

Tab 5.13 Kneubuehl: lamiera di alluminio, 2 mm

Nel 1969 JAUHARI [41] pubblicò uno studio in cui sparò con tre calibri diversi su lamiere di alluminio, ottone e acciaio, spesse 1,6mm e 3,2mm. Suddivise l'angolo d'incidenza in intervalli di

5° e 15° e aumentò l'angolo fino alla frantumazione (f) o la perforazione (p) del proiettile. L'angolo limite indicato in tabella ha quindi una precisione di 5°. La tabella 5.14 riporta i risultati delle prove:

Jauhari: lastre di metallo										
		.22 lr.			38 S&W			45 Auto		
Calibro	[mm]	5,6			9,0			11,4		
Massa	[g]	2,6			11,5			14,9		
Velocità	[m/s]	305			185			245		
Energia	[J]	121			197			447		
		α [°]	β [°]	α + 5°	α [°]	β [°]	α + 5°	α [°]	β [°]	α + 5°
Alluminio	1,6mm	10	6	f/p	20	10	f/p	10	7	p
	3,2mm	30	3	f	35	8	f	25	12	p
Ottone	1,6mm	25	6	f	60	37	f	25	19	p
	3,2mm	20	2	f	35	9	f	50	16	f
Acciaio	1,6mm	30	3	f	50	17	f	30	10	f
	3,2mm	30	1	f	50	9	f	30	3	f

Tab 5.14 Jauhari: lastre di metallo

5.2.2 Legno

Il legno è un materiale tanto diffuso quanto eterogeneo nella sua composizione. Diversificare tra pochi parametri quali essenza, stagionatura, direzione della venatura, contenuto di umidità e composizione delle tavole (prodotte industrialmente con vari materiali: truciolati, laminati ecc.) è un lavoro impegnativo e probabilmente il motivo per cui in letteratura quasi nessun autore abbia mai condotto studi sistematici usando il legno.
Per classificare un substrato di legno basterebbe indicare il tipo di legno (l'essenza), il tipo di lavorazione subito e la densità (comprende anche l'umidità) [3], ma pochissimi autori hanno avuto l'accortezza di documentare questi parametri.
Gli studi sistematici condotti con il legno (di cui è venuto a conoscenza l'autore) sono tutti di origine tedesca e riconducibili alla stessa scuola. Karl Sellier, professore all'università di Bonn, fu un acceso studioso della balistica forense e diede ampio spazio ai rimbalzi. Il suo dipartimento utilizzò il legno come sostituto di ossa, costole ecc. e analizzò parecchi incidenti venatori. Il suo lavoro trova oggi continuazione nelle opere di Kneubuehl, dell'università di Berna, e nelle ricerche finanziate dal governo tedesco. Mentre le ricerche di Sellier risalgono agli anni '70-'80 del secolo scorso e si concentrarono sulle armi coinvolte in delitti, il governo tedesco ha finanziato uno studio per confrontare la pericolosità dei proiettili per carabina contenenti piombo rispetto a quelli senza piombo usati in ambito venatorio (vedi anche 5.2.8). I principali risultati numerici e le conclusioni dello studio sono riassunti nei paragrafi di questo capitolo, ma si rimanda allo studio citato [2,4] per i dettagli numerici e le immagini.

5.2.2.1 Tavole di legno

Nella sua tesi, KNEUBUEHL [3] analizzò il rimbalzo dei proiettili elencati in tab. 5.3 sparandoli contro:

- Abete rosso, secco, senza rami, spesso 40mm, con ventura di traverso
- Abete rosso, secco, senza rami, spesso 40mm, lungo la venatura
- Truciolato, Novopan, spesso 40mm, senza rivestimento sintetico

Ricordiamo che il legno è un substrato cedevole ma non frangibile, infatti, il materiale non viene deformato bensì dislocato.

Nelle prove su abete con venatura di traverso, tutti i proiettili penetrarono il legno (per angoli d'incidenza molto piccoli la penetrazione era parziale) e gli angoli di rimbalzo raggiunsero rapidamente valori elevati. I calibri 9mm e 357 Mag. raggiunsero l'angolo limite a 10°, il 44 Rem. Mag. già a 5°. I calibri con palla di piombo raggiunsero l'angolo limite a 15° e il 38 Spl. addirittura a 20°. Alcuni angoli di rimbalzo furono talmente grandi che non fu possibile misurarli con l'attrezzatura a disposizione.

All'aumentare dell'angolo di rimbalzo tutti i proiettili mostrano un notevole calo di energia residua. La cessione di energia al substrato di legno fu superiore a quella di tutti gli altri materiali testati da Kneubuehl.

Ponendo le tavole di abete con venatura lungo la direzione di tiro si notarono alcune differenze. I due proiettili ACTION1 e 3 aumentarono l'angolo di rimbalzo, mentre i proiettili 22 lr. lo ridussero. Le differenze di angolo limite erano invece minime.

La dinamica con il truciolato fu la stessa del legno. Per angoli d'impatto fino a 5° non si ebbero differenze degne di nota, se non una riduzione di 1° dell'angolo di rimbalzo dei proiettili di piombo. Per angoli d'incidenza superiori ai 5° i proiettili del .22 lr. ridussero l'angolo di rimbalzo, tutti gli altri invece lo aumentarono. Gli angoli limite rimasero invariati, fatta eccezione per il proiettile ACTION 3, che penetrò completamente la tavola per un angolo d'incidenza di 10°.

Fig 5.5 Rimbalzo su truciolato, sparo da destra verso sinistra, 9mm palla di piombo, foto Bettin

Fig 5.6 Rimbalzo su tavola di abete spessore 40mm, sparo da destra verso sinistra, 9mm palla di piombo. Si distingue il solco di profondità variabile secondo lo schema di fig. 4.5, foto Bettin

Kneubuehl: Legno di abete rosso, venatura di traverso

α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia

9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	1,6	3,3	8,5	2,1	1,7	2,7	3,5	2,1	2,0	2,4	3,6
4,9	4,6	7,4	9,9	4,8	3,8	4,3	18,4	4,9	4,2	4,8	35,5
9,6	10,4	12,7	33,3	9,3	18,9	36,4	71,4	9,5	15,1	15,4	78,0
9x19 – Silver Tip				**357 Mag. SJHP**				**44 Rem. Mag SJHP**			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	1,4	2,8	3,1	2,2	1,6	2,5	3,9	2,2	2,1	2,9	6,4
4,8	4,4	4,9	8,6	4,9	6,0	6,9	33,2	4,9	4,5	5,8	38,3
9,1	10,9	11,8	26,8	9,7	20,6	28,1	34,0	-	-		
14,0	27,8	27,8		-	-			-	-		
38 Spec. LRN				**22 lr. HV LRN**				**22 lr. Pistol Match LRN**			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	2,7	3,5	2,7	2,3	2,0	3,1	5,5	2,3	2,0	2,7	2,7
4,9	4,3	4,8	5,1	5,2	5,9	6,6	11,3	5,1	4,3	4,6	5,1
9,6	12,4	15,3	29,4	10,6	10,4	11,5	44,6	10,6	11,8	14,3	43,1
14,2	15,9	18,5		-	-			14,2	28,2	33,4	
19,9	25,6	33,2		-	-			-	-		

Kneubuehl: Legno di abete rosso, lungo la venatura

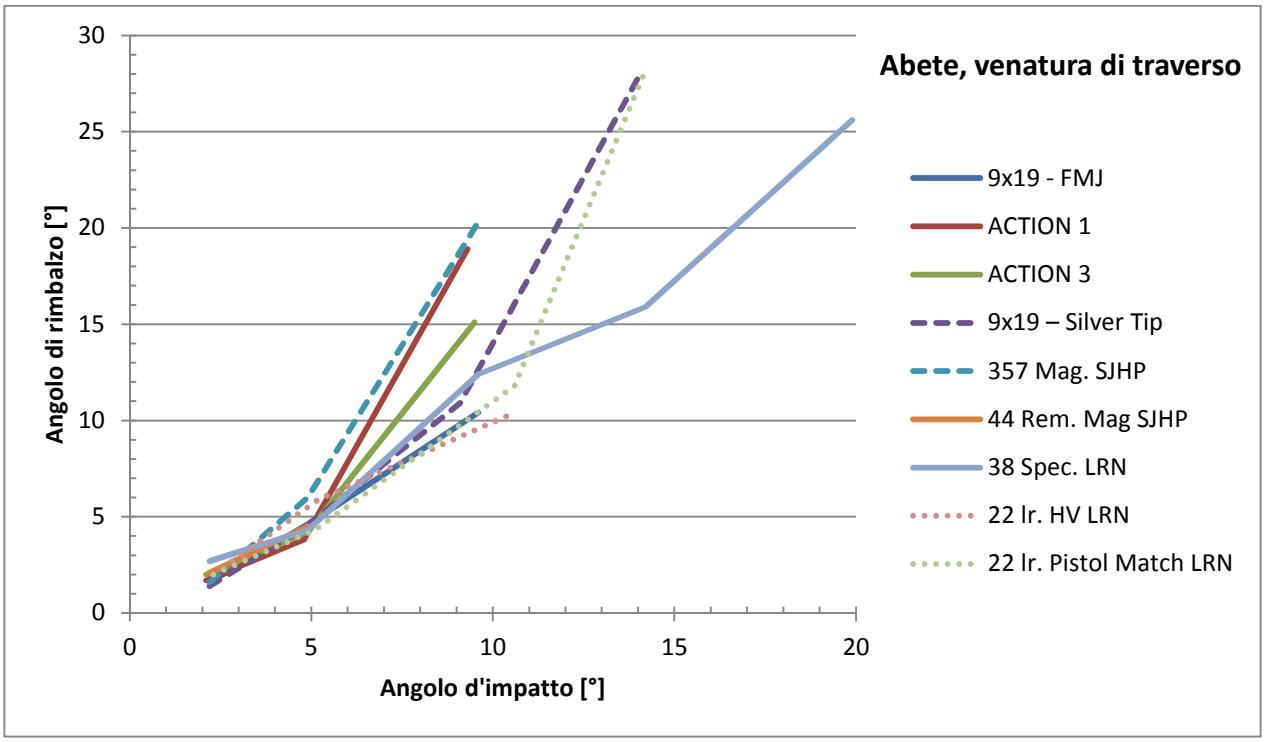
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia

9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	3,0	3,6	-	2,2	2,5	3,3	-	2,2	2,2	3,4	-
4,7	5,4	5,8	-	4,6	6,7	9,8	-	4,8	8,9	12,1	-
8,7	10,7	11,5	-	8,7	30,2	39,1	-	8,6	27,7	36,4	-
9x19 – Silver Tip				**357 Mag. SJHP**				**44 Rem. Mag SJHP**			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	1,6	2,6	-	2,2	1,7	2,5	-	2,2	4,0	9,5	-
4,8	5,5	6,3	-	4,8	6,0	8,4	-	4,7	15,9	22,3	-
8,7	25,9	34,8	-	8,2	19,6	27,7	-	9,0	18,2	23,6	-
38 Spec. LRN				**22 lr. HV LRN**				**22 lr. Pistol Match LRN**			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	2,4	3,6	-	2,3	2,8	3,2	-	2,3	2,7	4,2	-
4,7	5,1	5,8	-	4,9	5,7	6,5	-	4,7	4,8	5,2	-
7,8	6,7	7,3	-	8,8	15,7	21,6	-	8,7	9,7	11,8	-
14,2	14,0	15,0	-	-	-	-	-	15,4	20,6	29,9	-
20,1	25,2	28,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

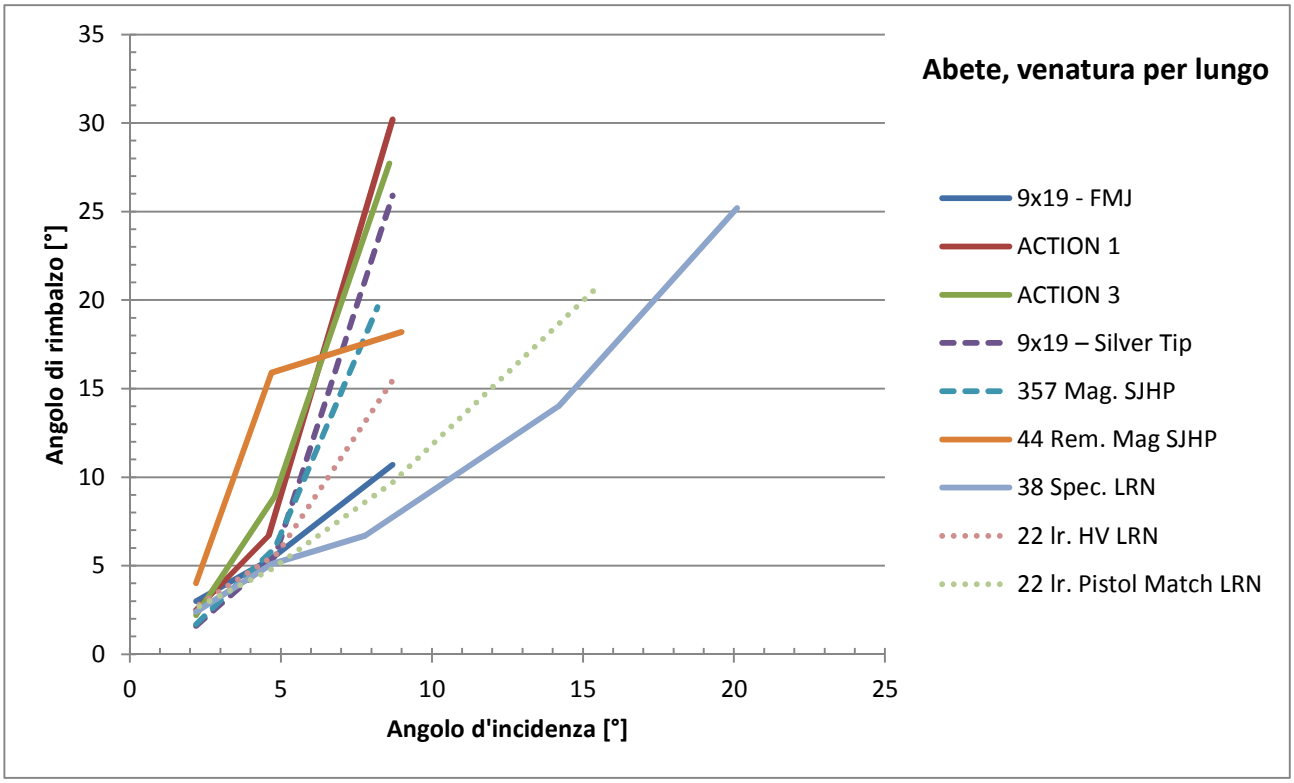
Tab 5.15 Kneubuehl: abete rosso, venatura per lungo e di traverso

Kneubuehl: Truciolato, 40mm											
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia											
9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,1	1,6	1,9	3,0	2,1	2,2	2,4	3,2	2,0	2,1	2,3	2,6
4,4	4,5	4,7	7,2	4,4	4,4	4,6	8,6	4,4	4,1	4,3	6,7
10,1	14,9	16,6	58,3	9,6	36,1	47,8		-	-	-	
9x19 – Silver Tip				357 Mag. SJHP				44 Rem. Mag SJHP			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,1	1,6	2,4	2,3	2,1	2,1	2,2	3,2	2,1	2,5	2,8	5,9
4,4	4,3	4,6	4,2	4,9	4,5	5,5	15,8	4,9	6,0	9,0	29,6
9,9	13,2	13,7	50,4	9,4	31,6	36,1		9,8	19,9	32,1	17,4
38 Spec. LRN				22 lr. HV LRN				22 lr. Pistol Match LRN			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,1	1,8	2,2	2,5	2,2	2,3	2,6	3,7	2,1	2,3	2,6	2,3
4,8	3,2	3,6	1,3	5,0	3,4	3,6	3,2	4,9	3,0	3,4	1,8
9,9	9,6	9,9	16,3	10,1	10,4	11,6	61,7	9,9	11,8	13,5	34,9
14,8	18,8	20,5		15,0	16,9	18,7		14,9	14,7	16,4	
20,0	32,5	32,5		-	-	-		-	-	-	

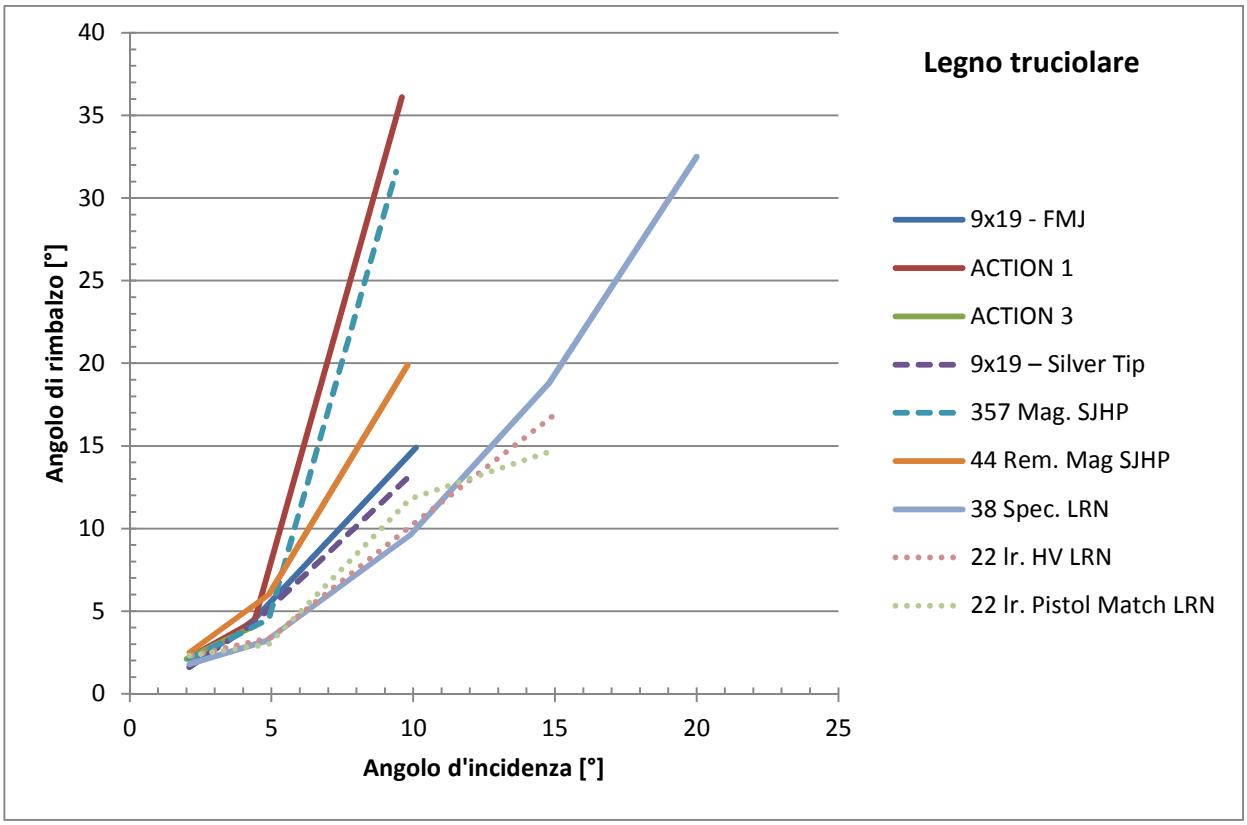
Tab 5.16 Kneubuehl: truciolato



Tab 5.17 Kneubuehl: abete, venatura di traverso



Tab 5.18 Kneubuehl: abete, venatura per lungo



Tab 5.19 Kneubuehl: truciolato

STIEFEL (citato in [3]) sparò 15 proiettili diversi (alcuni anche a velocità diverse) contro 3 tipi di legno (tenero, medio e duro): un legno tenero spesso 24mm (forse abete), del truciolato spesso 19mm rivestito con uno strato sintetico e listoni di parchè spesi 22mm.

Gli angoli d'incidenza variarono da 5° a 30°, con intervalli di 5°. Egli misurò gli angoli di rimbalzo e terminò una prova quando il proiettile rimaneva conficcato o trapassava il legno. Alcuni proiettili, dotati di poca energia, rimbalzarono senza mai rimanere conficcati o perforare il legno.
La varietà dei dati raccolti permette di valutare due aspetti: La variazione dell'angolo di rimbalzo su legno in funzione del tipo di proiettile e l'influenza del tipo di legno sull'angolo di rimbalzo a parità di proiettile.

Analizzando i dati del legno tenero (spesso 24mm) si ricava che sotto ai 10° l'andamento delle funzioni è sorprendentemente costante e parallelo, mentre sopra ai 10° l'andamento delle funzioni diverge.

La variazione del tipo di legno, a parità di proiettile, è visibile confrontando i valori di β riportati nelle tabelle seguenti. Prendendo, per esempio, il proiettile FMJ calibro 7,65 Browning si leggono angoli massimi di rimbalzo di 15°(legno tenero), 22°(truciolato) e 42° (parchè) .

Anche i risultati di Stiefel confermano che gli angoli di rimbalzo massimi dal legno sono spesso superiori all'angolo d'incidenza.

Nelle tabelle seguenti sono riportati gli angoli massimi di rimbalzo e l'angolo massimo d'incidenza delle prove di Stiefel. Per i dati completi si rimanda al testo originale.

Stiefel: Truciolato, 19 mm

α_{max} – angolo d'incidenza max.; α– angolo d'incidenza per β β – angolo di rimbalzo max.;
R – rimbalzo, senza penetrazione o perforazione; P – perforazione; C- conficcato

Munizione	Proiettile	Calibro [mm]	Massa [g]	v [m/s]	α_{max} [°]	α [°]	β [°]	Esito
9mm Flobert	RN	9,0	3,9	220	20	15	40	R
22 lr.	LRN	5,6	2,55	220	15	15	30	C
	LRN	5,6	2,55	345	10	10	7	C
22 lr. HV	LRN	5,6	2,55	400	5	5	4	C
6,35 Brown.	FMJ	6,35	3,2	140	20	20	30	P
7,65 Brown.	FMJ	7,65	4,7	240	15	5	22	P
	LRN	7,65	5,7	230	15	10	19	P
9x19	FMJ	9,0	8,0	343	10	10	16	P
	FMJ	9,0	8,0	410	10	10	14	P
45 auto	FMJTC	11,25	12,0	215	15	15	60	P
320 Short	LRN	7,65	8,1	160	25	25	33	R
38 Special	LRN	9,0	10,2	210	15	15	26	P
	LWC	9,0	9,6	175	15	15	35	C
357 Magnum	FMJTC	9,0	10,2	390	10	10	16	P
	SJTC	9,0	10,2	405	10	10	18	P
44 Rem. Mag.	LFN	11,2	15,5	420	5	5	3	P
7,62x51	FMJ	7,62	9,45	780	5	5	10	P
8x57 IS	FMJ-RN	8,0	14,7	630	5	5	11	P

Tab 5.20 Stiefel: truciolato, 19 mm

Stiefel: legno tenero ,24 mm, lungo la venatura

α_{max} – angolo d'incidenza max.; α– angolo d'incidenza per β β – angolo di rimbalzo max.;

R – rimbalzo, senza penetrazione o perforazione; P – perforazione; C- conficcato

Munizione	Proiettile	Calibro [mm]	Massa [g]	v [m/s]	α_{max} [°]	α [°]	β [°]	Esito
9mm Flobert	RN	9,0	3,9	220	15	15	35	R
22 lr.	LRN	5,6	2,55	220	15	15	20	P
	LRN	5,6	2,55	345	10	10	14	P
22 lr. HV	LRN	5,6	2,55	400	10	10	15	C
6,35 Brown.	FMJ	6,35	3,2	140	20	20	22	P
7,65 Brown.	FMJ	7,65	4,7	240	15	15	15	P
	LRN	7,65	5,7	230	15	10	19	P
9x19	FMJ	9,0	8,0	343	10	10	13	P
	FMJ	9,0	8,0	410	10	10	11	P
45 auto	FMJTC	11,25	12,0	215	15	15	14	P
320 Short	LRN	7,65	8,1	160	20	20	23	C
38 Special	LRN	9,0	10,2	210	15	15	16	P
	LWC	9,0	9,6	175	15	15	28	P
357 Magnum	FMJTC	9,0	10,2	390	10	10	13	P
	SJTC	9,0	10,2	405	10	10	11	P
44 Rem. Mag.	LFN	11,2	15,5	420	5	5	14	P
7,62x51	FMJ	7,62	9,45	780	5	5	10	P
8x57 IS	FMJ-RN	8,0	14,7	630	5	5	11	P

Tab 5.21 Stiefel: legno tenero, 24 mm

Stiefel: listoni di parchè, 22 mm

α_{max} – angolo d'incidenza max.; α– angolo d'incidenza per β β – angolo di rimbalzo max.;

R – rimbalzo, senza penetrazione o perforazione; P – perforazione; C- conficcato

Munizione	Proiettile	Calibro [mm]	Massa [g]	v [m/s]	α_{max} [°]	α [°]	β [°]	Esito
9mm Flobert	RN	9,0	3,9	220	25	25	33	R
22 lr.	LRN	5,6	2,55	220	25	20	31	R
	LRN	5,6	2,55	345	20	20	35	C
22 lr. HV	LRN	5,6	2,55	400	10	10	7	C
6,35 Brown.	FMJ	6,35	3,2	140	30	30	38	R
7,65 Brown.	FMJ	7,65	4,7	240	20	20	42	P
	LRN	7,65	5,7	230	20	20	40	P
9x19	FMJ	9,0	8,0	343	15	15	22	P
	FMJ	9,0	8,0	410	15	15	41	P
45 auto	FMJTC	11,25	12,0	215	15	15	17	P
320 Short	LRN	7,65	8,1	160	30	30	32	R
38 Special	LRN	9,0	10,2	210	25	25	43	P
	LWC	9,0	9,6	175	25	25	37	R
357 Magnum	FMJTC	9,0	10,2	390	10	10	14	P
	SJTC	9,0	10,2	405	10	10	20	P
44 Rem. Mag.	LFN	11,2	15,5	420	5	5	5	P
7,62x51	FMJ	7,62	9,45	780	5	5	10	P
8x57 IS	FMJ-RN	8,0	14,7	630	5	5	11	P

Tab 5.22 Stiefel: legno duro (listoni di parchè) 22 mm

Nella serie di prove eseguite da RATHMAN [42] uno dei substrati erano tavole di pino spesse 38mm. I due calibri usati (32 Auto e 45 Auto) furono sparati solamente con 10° e 15° d'incidenza. I risultati concordano con quelli di Stiefel, fatta eccezione per l'angolo limite, ovviamente più grande (20°-30°) perché lo spessore delle tavole di Rathman era maggiore di quelle di Stiefel.

5.2.2.2 Tronchi d'albero

Nel 2009 il governo tedesco commissionò alla DEVA di Berlino uno studio per valutare e confrontare la pericolosità dei proiettili da caccia contenenti piombo rispetto ai proiettili monolitici in lega di rame. Il rapporto [2] di Rottenberger descrive l'apparato sperimentale e riporta le immagini delle prove, dei materiali e dei proiettili di risulta. La consulenza scientifica fu assegnata a Kneubuehl [4] e contiene i valori numerici delle prove oltre alle valutazioni e le conclusioni dello studio (vedi anche 5.2.8).

Durante le prove furono sparati sei tipi di proiettili in tre calibri diversi. Tre tipi di proiettile contenevano piombo (A: Kegelspitz-KS della RUAG Ammotech, B: Nosler Partition della Nosler Inc., C: Torpedo-Optimal-Geschoss TOG della Brenneke GmbH) e tre erano in lega di rame (D: TSX della Barnes Bullets, E: HDBoH di Reichenberg e F: Naturlis della Nammo Lapua Oy). I calibri scelti erano 243 Win., 308Win. e 9,3x74R. Tra i vari substrati usati vi erano dei tronchi d'albero di faggio spessi 30-35cm. L'angolo massimo per le prove fu stabilito in 25°, le prove furono interrotte prima se il peso residuo del proiettile scendeva sotto al 50% della massa originale.

La figura 5.5 giustifica la scelta dei 25° massimali ricorrenti negli studi patrocinati da Kneubuehl e fa riferimento agli angoli di tiro tipici dell'attività venatoria.

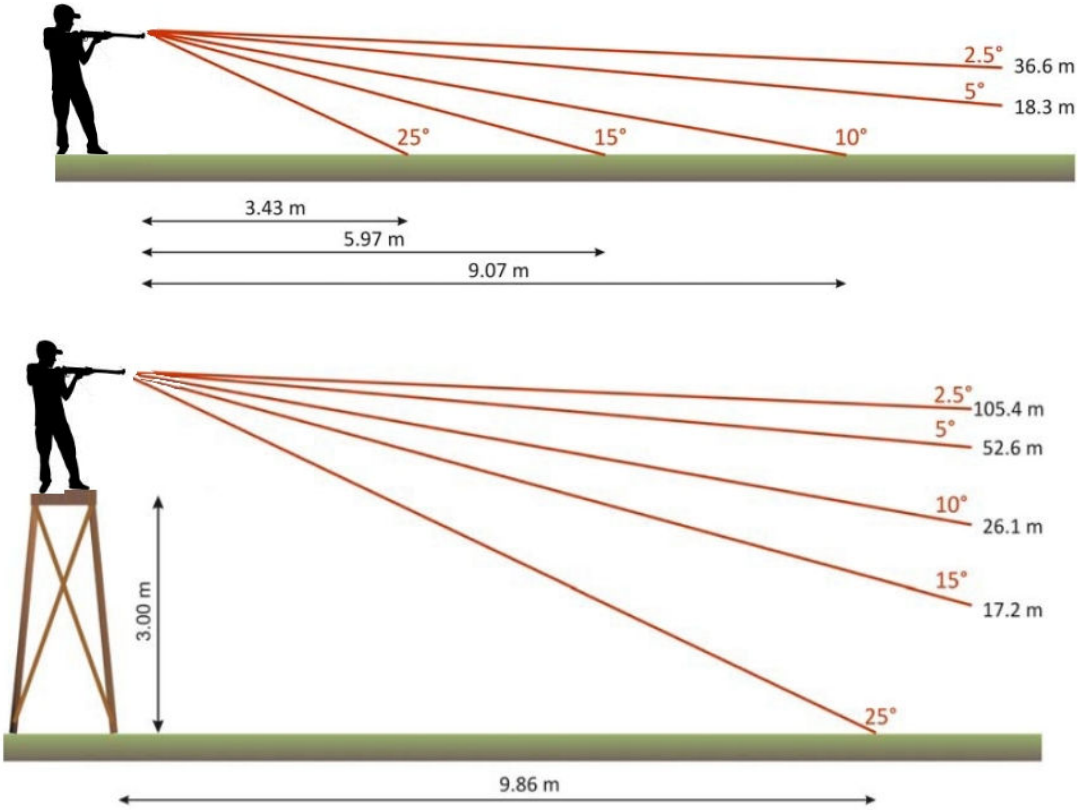


Fig. 5.5: Angoli di tiro tipici durante l'attività venatoria. Cacciatore a piedi e su altana.

Riportiamo a titolo esemplificativo i risultati numerici di alcune prove (da [4], allegato A). Le tabelle sono state tradotte in italiano per fornire ai lettori un mezzo con cui consultare gli originali in tedesco e accessibili su internet.

Tronco, 50m
Confronto proiettili con e senza piombo

Energia residua [%]				
	Media		Massimo	
	m-Pb	o-Pb	m-Pb	o-Pb
10	81.8	86.5	99.1	99.4
15	57.1	52.0	97.6	95.1
25	29.3	38.1	88.1	71.8
45	11.3	10.3	31.2	32.7
90	4.1	6.1	13.4	26.3

Angolo di rimbalzo [°]					Angolo di rimbalzo [Prom]			
	Media		Massimo		Media		Massimo	
	m-Pb	o-Pb	m-Pb	o-Pb	m-Pb	o-Pb	m-Pb	o-Pb
10	-0.14	-0.18	0.29	0.58	-2.4	-3.3	5.2	10.3
15	-0.07	-0.10	0.89	0.60	-1.2	-1.8	15.8	10.7
25	0.45	-0.02	5.60	4.56	8.0	-0.3	99.5	81.0
45	1.48	0.26	10.18	6.35	26.3	4.7	181.1	112.9
90	1.19	0.55	5.56	3.55	21.2	9.8	98.9	63.2

Deviazione laterale [°]					Deviazione laterale [Prom]			
	Minimo		Massimo		Minimo		Massimo	
	m-Pb	o-Pb	m-Pb	o-Pb	m-Pb	o-Pb	m-Pb	o-Pb
10	0.12	-0.13	2.48	3.73	2.0	-2.4	44.1	66.2
15	0.00	0.66	9.25	4.65	0.0	11.8	164.5	82.7
25	-0.74	-0.23	6.45	8.34	-13.2	-4.2	114.6	148.2
45	-4.71	-4.66	15.55	10.65	-83.7	-82.8	276.4	189.3
90	-7.16	-6.52	21.85	5.22	-127.2	-115.9	388.4	92.8

Tab 5.23: A-72

Tronco d'albero
distanza 25m

10°

Calibro	Proiettile	n colpi	Energia residua %			Angolo di rimbalzo [Prom]			Deviazione laterale [Prom]			Media			Massimo		
			Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Energia	β	γ	Energia	β	γ
243 Win	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
308 Win	A	6	46.8	86.3	98.1	-9.2	-4.2	0.0	2.7	14.5	31.7						
	B	7	51.4	86.6	96.0	-5.8	-1.8	16.2	4.5	6.2	16.8						
	C	6	92.9	96.5	98.4	-7.9	-1.9	5.8	3.1	6.2	15.5	89.8	-2.6	9.0	98.4	16.2	31.7
	D	6	83.2	95.4	99.2	-9.6	-6.7	-4.1	5.1	14.6	34.4						
	E	6	89.1	95.4	97.5	-1.7	-0.3	1.0	5.8	10.1	26.0						
	F	6	69.0	84.0	97.7	-8.2	-2.4	1.0	2.7	16.6	36.0	91.6	-3.2	13.8	99.2	1.0	36.0
9.3 x 74	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
									Totale		con piombo	89.8	-2.6	9.0	98.4	16.2	31.7
											senza piombo	91.6	-3.2	13.8	99.2	1.0	36.0

Tab 5.24: A-52

Tronco d'abero
distanza 25m

15°

Calibro	Proiettile	n colpi	Energia residua %			Angolo di rimbalzo [Prom]			Deviazione laterale [Prom]			Media			Massimo		
			Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Energia	β	γ	Energia	β	γ
243 Win	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
308 Win	A	8	3.6	35.5	58.8	-19.0	-0.5	27.9	22.4	38.9	100.1						
	B	6	29.4	47.4	88.7	-6.5	4.0	9.3	11.8	31.0	73.8						
	C	6	80.8	87.5	95.3	-6.8	-1.5	4.5	15.3	17.1	49.6	56.8	0.7	29.0	95.3	27.9	100.1
	D	6	48.9	67.2	96.2	-8.6	-4.9	-1.4	18.6	15.1	48.9						
	E	6	46.6	64.4	91.3	-5.5	-1.0	6.2	9.6	18.4	46.4						
	F	8	38.8	43.6	52.2	-5.2	2.6	8.6	6.9	15.6	38.0	58.4	-1.1	16.4	96.2	8.6	48.9
9.3 x 74	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
									Totale	con piombo		56.8	0.7	29.0	95.3	27.9	100.1
										senza piombo		58.4	-1.1	16.4	96.2	8.6	48.9

Tab 5.25: A-53

Tronco d'albero
distanza 25m

25°

Calibro	Proiettile	n colpi	Energia residua %			Angolo di rimbalzo [Prom]			Deviazione laterale [Prom]			Media			Massimo		
			Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Energia	β	γ	Energia	β	γ
243 Win	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
308 Win	A	1	14.2	14.2	14.2												
	B	6	16.0	22.6	36.1	5.2	12.1	19.1	30.1	13.0	56.2						
	C	9	30.9	46.6	85.0	-14.7	8.7	49.8	17.5	51.2	119.9	27.8	10.4	32.1	85.0	49.8	119.9
	D	6	42.4	53.3	66.1	-8.7	-3.3	5.6	25.8	13.5	52.7						
	E	6	28.1	35.2	50.4	-31.4	-8.3	0.0	18.2	21.1	60.3						
	F	8	38.8	43.6	52.2	-5.2	2.6	8.6	6.9	15.6	38.0	44.1	-3.0	16.7	66.1	8.6	60.3
9.3 x 74	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
									Totale	con piombo		27.8	10.4	32.1	85.0	49.8	119.9
										senza piombo		44.1	-3.0	16.7	66.1	8.6	60.3

Tab 5.26: A-54

Tronco d'albero
distanza 25m

45°

Calibro	Proiettile	n colpi	Energia residua % Min	Mean	Max	Angolo di rimbalzo [Prom] Min	Mean	Max	Deviazione laterale [Prom] Min	Mean	Max	Media Energia	β	γ	Massimo Energia	β	γ
243 Win	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
308 Win	A																
	B	6	3.9	8.2	12.5	-66.8	-17.6	81.0	-36.9	50.9	64.8						
	C	5	1.8	8.6	17.0	-130.4	-52.8	29.9	-133.3	66.7	0.0	8.4	-35.2	58.8	17.0	81.0	64.8
	D	3	17.9	23.9	31.0	8.0	16.0	22.0	2.5	10.6	23.8						
	E	3	17.6	20.0	21.7	-25.9	12.2	44.9	5.6	1.2	8.1						
	F	3	4.4	9.9	20.8	7.0	33.3	62.6	-20.6	38.2	55.8	18.0	20.5	16.7	31.0	62.6	55.8
9.3 x 74	A																
	B																
	C																
	D																
	E																
	F																
									Totale		con piombo	8.4	-35.2	58.8	17.0	81.0	64.8
											senza piombo	18.0	20.5	16.7	31.0	62.6	55.8

Tab 5.27: A-55

Tronco d'albero
distanza 50m

90°

Calibro	Proiettile	n colpi	Energia residua % Min	Mean	Max	Angolo di rimbalzo [Prom] Min	Mean	Max	Deviazione laterale [Prom] Min	Mean	Max	Media Energia	β	γ	Massimo Energia	β	γ
243 Win	A																
	B	3	1.6	2.9	4.6	-7.4	7.2	26.5	-52.9	18.7	-15.5						
	C											2.9	7.2	18.7	4.6	26.5	-15.5
	D																
	E	1	4.1	4.1	4.1	19.8	19.8	19.8	-84.4	84.4	-84.4						
	F											4.1	19.8	84.4	4.1	19.8	-84.4
308 Win	A																
	B		0.3	5.2	13.4	-113.8	-68.5	-33.1	-29.9	15.0	0.0						
	C	3	2.7	5.7	10.6	-50.4	24.4	83.0	-28.0	41.3	54.7	5.5	-22.0	28.1	13.4	83.0	54.7
	D	3	4.8	12.2	26.3	-22.1	2.3	16.4	-19.3	26.1	32.9						
	E	3	13.8	14.7	15.9	-3.5	7.8	26.8	24.0	34.4	92.8						
	F	3	0.7	1.6	2.1	-24.1	19.1	63.2	-115.9	84.1	52.3	9.5	9.7	48.2	26.3	63.2	92.8
9.3 x 74	A																
	B	3	1.7	4.0	6.4	56.3	78.3	98.9	-127.2	257.8	388.4						
	C											4.0	78.3	257.8	6.4	98.9	388.4
	D																
	E																
	F	3	1.4	4.7	10.7	-4.2	-0.1	3.9	-24.9	6.3	-12.3	4.7	-0.1	6.3	10.7	3.9	-12.3
									Totale		con piombo	4.1	21.2	101.6	13.4	98.9	388.4
											senza piombo	6.1	9.8	46.3	26.3	63.2	92.8

Tab 5.28: A-61

Tronco d'albero
distanza 50m

10°

Calibro	Proiettile	n colpi	Energia residua % Min	Mean	Max	Angolo di rimbalzo [Prom] Min	Mean	Max	Deviazione laterale [Prom] Min	Mean	Max	Media Energia	β	γ	Massimo Energia	β	γ
243 Win	A	6	58.1	77.5	94.6	-6.8	-5.0	-3.4	2.0	7.3	16.7						
	B	6	19.2	54.9	93.6	-3.1	-1.3	0.0	11.6	16.3	44.1						
	C	6	60.1	86.7	99.0	-7.9	-2.4	5.2	3.7	17.1	37.9	73.1	-2.9	13.6	99.0	5.2	44.1
	D	6	68.3	89.3	98.1	-14.7	-2.7	10.3	9.9	16.2	42.4						
	E	7	63.2	85.1	96.9	-9.2	-2.8	4.1	0.0	19.9	39.7						
	F	6	13.2	49.5	95.2	-17.4	-5.1	7.3	12.6	26.8	66.2	74.6	-3.5	21.0	98.1	10.3	66.2
308 Win	A	6	83.8	89.6	96.5	-5.1	-1.3	5.1	2.4	9.4	21.1						
	B	6	33.9	65.3	94.5	-5.5	-2.4	4.1	7.5	18.1	43.8						
	C	7	88.0	94.5	99.1	-9.5	-5.3	1.4	8.2	17.5	43.1	83.1	-3.0	15.0	99.1	5.1	43.8
	D	6	95.0	97.9	99.4	-6.1	-3.5	0.0	-2.4	14.8	27.3						
	E	6	44.5	85.6	96.9	-5.8	-4.1	-2.7	5.1	3.9	12.9						
	F	6	93.8	96.4	97.9	-5.1	-1.9	3.4	10.5	7.1	24.6	93.3	-3.2	8.6	99.4	3.4	27.3
9.3 x 74	A																
	B	6	52.9	89.3	97.9	-3.4	-1.4	1.7	7.1	15.6	38.4						
	C											89.3	-1.4	15.6	97.9	1.7	38.4
	D																
	E																
	F	6	72.3	91.5	97.9	-6.9	-3.1	1.7	5.4	16.6	38.7	91.5	-3.1	16.6	97.9	1.7	38.7
									Totale		con piombo	81.8	-2.4	14.7	99.1	5.2	44.1
											senza piombo	86.5	-3.3	15.4	99.4	10.3	66.2

Tab 5.29: A-57

Tronco d'albero
distanza 50m

25°

Calibro	Proiettile	n colpi	Energia residua % Min	Mean	Max	Angolo di rimbalzo [Prom] Min	Mean	Max	Deviazione laterale [Prom] Min	Mean	Max	Media Energia	β	γ	Massimo Energia	β	γ
243 Win	A	5	4.8	10.0	17.7	1.4	45.3	99.5	1.7	35.4	72.5						
	B	6	13.7	19.9	26.2	-9.0	12.6	31.5	-13.2	31.9	50.6						
	C	7	0.7	25.1	56.4	-29.8	-0.9	28.2	0.0	32.8	65.7	18.3	19.0	33.4	56.4	99.5	72.5
	D	6	32.6	48.4	68.7	-5.2	3.8	18.6	14.1	27.5	69.1						
	E	7	27.2	34.6	47.2	-16.6	2.5	34.3	28.4	25.4	79.2						
	F	6	7.7	24.5	41.3	-20.8	2.5	21.4	14.2	27.8	69.7	35.9	2.9	26.9	68.7	34.3	79.2
308 Win	A	3	11.7	13.4	14.8	-10.3	3.8	24.9	35.6	39.5	114.6						
	B	6	26.4	35.2	43.3	-8.3	3.5	9.1	13.8	15.4	44.5						
	C	9	26.7	53.4	88.1	-12.0	8.7	18.0	20.7	46.4	113.5	34.0	5.3	33.8	88.1	24.9	114.6
	D	6	30.2	46.6	71.8	-8.2	-2.4	8.8	-4.2	42.6	81.0						
	E	6	25.4	32.4	38.2	-136.2	-0.4	81.0	46.7	50.8	148.2						
	F	6	27.6	38.3	54.5	-8.6	0.7	16.3	26.7	25.8	78.4	39.1	-0.7	39.7	71.8	81.0	148.2
9.3 x 74	A																
	B	6	22.9	35.4	43.8	-14.8	-0.5	17.5	8.8	42.7	94.1						
	C											35.4	-0.5	42.7	43.8	17.5	94.1
	D																
	E																
	F	7	33.4	39.4	45.3	-21.8	-3.1	15.9	25.3	10.7	46.8	39.4	-3.1	10.7	45.3	15.9	46.8
									Totale		con piombo	29.3	8.0	36.6	88.1	99.5	114.6
											senza piombo	38.1	-0.3	25.8	71.8	81.0	148.2

Tab 5.29: A-59

Una valutazione complessiva dello studio [2] sarà data al paragrafo 5.2.8. Per i dettagli dei valori numerici rimandiamo a [4].

Le prove evidenziarono che le tracce lasciate sui tronchi non sono indicatori certi dell'angolo d'incidenza [2]. Inoltre la struttura del proiettile è piuttosto ininfluente sulla traccia lasciata, e nessun tronco con diametro superiore a 300mm fu perforato completamente.

D'altra parte, la deformazione subita dai proiettili è stata sufficientemente riproducibile per fungere da indicatore sommario dell'angolo d'incidenza [2]. Lo studio dimostra anche che forma e struttura del proiettile influiscono molto sul rimbalzo dai tronchi d'albero.

5.2.2.3 Rami e cespugli

La deviazione dei proiettili causata da rami e cespugli è un argomento sempre attuale tra i cacciatori e purtroppo di cronaca quando si verificano incidenti in ambito venatorio. Probabilmente è per questo motivo anche l'unico aspetto dei rimbalzi che trova saltuariamente spazio nelle riviste di caccia o di armi.

A differenza delle prove descritte nei paragrafi precedenti, quando il corpo urtato è un rametto, non è più corretto parlare di rimbalzi, bensì di deviazioni. La teoria in merito è stata trattata nel terzo capitolo, qui rammentiamo solamente che quando un proiettile urta un rametto, un filo d'erba ecc., il rapporto delle masse tra proiettile e corpo urato è a favore del proiettile. Ciò significa che la massa del corpo urtato è minore di quella del proiettile o, al massimo dello stesso ordine di grandezza. Ne consegue che dopo l'urto si muovono sia il proiettile che il corpo urtato. In tutti i casi di rimbalzo esposti in precedenza l'angolo di rimbalzo β è stato indicato in riferimento al substrato urtato. Il substrato era fisso (muro, parete, tronchi d'albero ecc.) oppure talmente pesante da poterne trascurare eventuali spostamenti. In questo paragrafo non possiamo più trascurare il movimento del corpo urtato, quindi l'angolo di rimbalzo β è un indice che non ci aiuta. Per questo motivo indicheremo il moto del proiettile seguente all'urto riferendoci alla sua traiettoria originale.

Per descrivere la deviazione del proiettile utilizziamo quindi un solo parametro: l'angolo di deviazione dalla traiettoria originale, cioè la traiettoria che avrebbe avuto il proiettile se non avesse urtato un corpo estraneo.

ERICHSEN (citato da Sellier in [14]) scrisse la sua tesi di dottorato studiando la deviazione dei proiettili calibro 22 e dei pallini da 4 mm sparandoli contro assicelle, costole e tavole di legno. Benché il suo interesse fosse principalmente medico-legale e rivolto alle costole, i risultati sono trasponibili ai rametti.

Egli misurò il grado di contatto tra proiettile e assicella attribuendo un valore percentuale al segno lasciato sul legno. 0% indicava nessun contatto e 100% descriveva un proiettile che penetrava completamente il bastoncino.

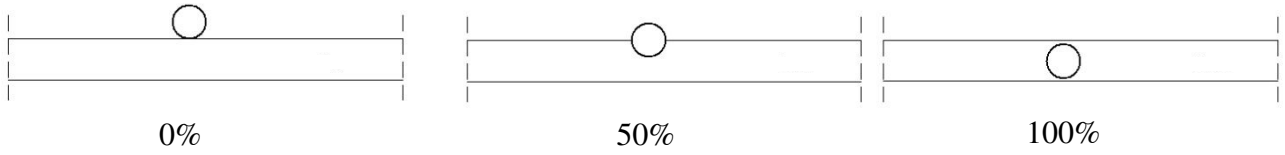


Fig. 5.6: Grado di contatto tra proiettile e stecco

Il grado di contatto fu poi messo in relazione con la deviazione subita dal proiettile. La deviazione massima fu rilevata per un contatto del 50% circa. Un proiettile del 22 lr., pesante 2,6g, sparato contro un bastoncino di 5mm di diametro, deviò di 0,7° massimo, mentre un proiettile del Z 22, pesante 1,8g deviò di circa 1,8°. Si fa notare che il contatto tra un proiettile calibro 22 e

un'assicella di 5mm di diametro non può mai raggiungere il 100%, essendo il diametro dell'assicella minore di quello del proiettile. Un urto leggermente eccentrico, con perforazione completa dell'assicella, dovrebbe fornire una deviazione conforme alla formula 3.17. Effettivamente Erichsen misurò un angolo di 1,1° in tale condizione, in accordo con la formula citata.

KRÜPER (citato da [3]) descrisse nello studio "Die Ablenkung und Zerlegung von Büchsengeschossen an Hindernissen (1982)" la deviazione di 13 proiettili da caccia per 9 calibri da carabina. Scelse tre tipi di bersaglio: una cannetta, un bastoncino di 5mm di diametro e un bastoncino di 12mm di diametro. Sparò 12 tipi di proiettile da una carabina alla distanza di 70m e una palla Brenneke, calibro 12, da 30m di distanza. Egli non misurò la velocità dei proiettili. Per misurare la deviazione pose tre testimoni alla distanza di 10m, 20m e 30m dopo il punto di contatto tra proiettile e bastoncino.

La deviazione subita calò all'aumentare della massa del proiettile. La media si attestò su 1° e il valore massimo non superò mai i 2°. Riportiamo gli angoli di deviazione media e massima riportati nel suo studio.

Krüper

Munizione	Proiettile	Massa [g]	Cannetta		Stecco 5mm		Stecco 12mm	
			Media [°]	Massimo [°]	Media [°]	Massimo [°]	Media [°]	Massimo [°]
22 lr.	LRN	2,60	0,06	0,13	0,7	1,30		
22 lr. HV	LRN-HP	2,60	0,03	0,07	0,47	1,90		
222 Rem.	SJSP	3,24	0,03	0,04	0,23	0,60	0,27	0,90
222 Rem.	FMJ	3,24	0,03	0,06	0,23	0,60	0,27	0,80
6,5x57	SJSP	6,00	0,01	0,05	0,10	0,50	0,20	0,50
6,5x57	Nosler	6,80			0,20	0,40	0,27	0,60
7x64	ABC	10,00			0,17	050	0,60	1,80
7x64	H-Mantel	11,20			0,13	0,30	0,43	1,10
308 Win	Torpedo	9,70			0,13	0,40	0,37	0,90
8x68S	KS	14,50			0,13	0,40	0,37	1,00
9,3x62	SJRN	18,50			0,07	0,20	0,37	1,00
12/70	Brenneke	31,50			0,20	0,40	0,40	1,00
458 Win.	SJRN	33,00					0,30	0,70

Tab. 5.30: Deviazione dalla traiettoria originale dei proiettili nei test di Krüper.

Nello studio della DEVA, sul confronto tra proiettili da carabina contenenti piombo e in lega di rame [2,4], è stata misurata anche la deviazione dei proiettili causata da bastoncini di faggio spessi 6mm. Analogamente ad altri studi condotti in Germania, fu definito un grado di contatto misurando la percentuale del diametro di bastoncino asportato dal proiettile. Definirono tre categorie: cat 1 = 0%-25% del diametro, cat 2 = 25%-50% del diametro, cat 3 per valori oltre il 50% del diametro. Riassumiamo i risultati di massima dello studio senza riportare i valori numerici, per i quali si rimanda a [2] e [4].

- Aumentando la massa del proiettile diminuì la deviazione angolare.
- Con il diminuire della velocità residua del proiettile, aumentò la deviazione angolare.

- A seguito del contatto con lo stecco, la deviazione verticale fu spesso maggiore di quella orizzontale.
- Si notò che i proiettili che toccavano lo stecco sul lato sinistro, deviavano in gran parte verso destra e verso l'alto, mentre molti dei proiettili che toccavano lo stecco sul lato destro deviavano verso sinistra e in basso.

L'entità della deviazione dipese dal calibro e i valori massimi per le categorie 1 e 2, ad una distanza di tiro di 50m, furono di:

- 243 Win : 1,15°
- 308 Win : 0,58°
- 9,3x74R : 0,41°

La categoria 3 non fece registrare deviazioni degne di nota.

Conclusioni

Dalle prove documentate si evince che:

- Il contatto tra proiettile e rametti (o simili) causa una deviazione.
- La deviazione cresce all'aumentare dello spessore del corpo urtato.
- Il valore della deviazione non supera i pochi gradi angolari.
- L'urto rende il proiettile instabile, il proiettile inizia a nutare (per una definizione della nutazione vedi cap. 3).
- Il proiettile non si frantuma.
- Se il proiettile ha in punta del piombo esposto, è possibile riscontrare tracce di piombo nel punto di contatto [3].

5.2.3 Calcestruzzo

Il calcestruzzo è un materiale con caratteristiche di rimbalzo molto eterogenee. In parecchi studi sono stati usati lastroni, muri o strade di calcestruzzo quali bersagli tipici dell'ambiente urbanizzato, ma quasi nessun autore ha descritto sufficientemente le caratteristiche e la composizione del materiale usato. Il calcestruzzo è un composto di ghiaia, sabbia e cemento in proporzioni variabili. La durezza e la levigatezza della superficie sono fortemente variabili e influenzano molto il rimbalzo di un proiettile.

Il calcestruzzo assume sia le caratteristiche di una superficie rigida non cedevole che quelle di una superficie frangibile, dipendentemente dalla sua composizione e dall'energia trasmessa dal proiettile durante l'urto. La caratteristica interessante del calcestruzzo è l'attitudine di frantumarsi all'impatto oppure di non subire alcun danno. Premesso che tutti i tipi di calcestruzzo si possono frantumare (dato uno scambio di energia sufficiente) la questione da definire è quella di trovare il limite del substrato in esame in relazione al tipo di proiettile usato.

In una miscela strutturalmente debole è possibile che si formino dei crateri per un impatto con proiettili a bassa velocità, mentre per scalfire una lastra più dura con la stessa munizione potrebbe essere necessario aumentare l'angolo d'incidenza. E' addirittura possibile che la stessa munizione non intacchi proprio una superficie di cemento molto compatto.

La questione se il materiale cede è quindi importante per comprendere la risposta del substrato in esame.

Nel paragrafo 4.5 sono stati presentati tre tipi di risposta. Il cemento presenta una risposta variabile tra le due figure 4.2 e 4.4. Se il substrato non viene danneggiato, la risposta corrisponde al modello della superficie rigida (fig 4.2). Se invece il proiettile scalza del materiale, il modello rientra nel tipo frangibile (fig. 4.4).

5.2.3.1 Proiettili per arma corta (pistola, rivoltella)

SCHMIDT "Geschossablenkung durch Beton und Sand" (i risultati sono pubblicati in [14]) studiò per la sua tesi il rimbalzo di quattro calibri d'arma corta, 9x19, 38 Special, 357 Magnum e .22 lr HV. Gli angoli d'incidenza variarono tra 5° e 50°. Gli unici risultati di validità generale, deducibili dai suoi studi, sono che per $\alpha < 20°$ i proiettili rimasero integri e per $\alpha > 30°$ si frantumarono quasi tutti. Gli angoli di rimbalzo aumentarono gradualmente, senza mai superare gli 8°. I proiettili con palla in piombo e dotati di sufficiente energia (38 Special e 22 lr. HV) non superarono i 4°.

Uno studio di KNEUBUEHL del 1980 "Rikoschettversuche mit Colt Kal. 38 Spezial" (citato in [3]-documento riservato dell'amministrazione svizzera) conferma l'angolo per il 38 Special con palla di piombo. Per 215m/s e $\alpha=45°$ egli misurò $\beta = 3,5°$.

Nell'articolo di HOULDEN [40] sono riportati i risultati di prove condotte con il 9x19, 357 Mag e 45 Auto, contro una lastra di cemento spessa 5mm. Lo spessore esiguo fa supporre che nel composto non fosse stata usata ghiaia ma solamente sabbia. I risultati di Houlden sono meno dispersivi di quelli di Schmidt, probabilmente a causa della struttura più omogenea del substrato. Per $\alpha < 30°$ i proiettili rimasero intatti e rimbalzarono con angoli minori di 4°. Aumentando α tutti i proiettili si frantumarono.

HAAG [70] sparò cilindri di piombo dotati di punta conica, pesanti 1g e diametro 5mm con un fucile ad aria compressa. L'angolo d'impatto α variò tra 10° e 60°. Alla velocità di 100m/s ottenne un rapporto tra α e β sorprendentemente lineare. Per velocità comprese tra 140-165m/s l'angolo di rimbalzo β rimase costante sui 2°, per α fino a 45°, e aumentò poi a 5°-6°.

Anche gli studi di Rathman [42], (32 Auto - 4,6g - 240m/s e 45 Auto – 14,9g – 230m/s) trattano il calcestruzzo. Egli scelse due substrati, una lastra di marciapiede spessa 7,5cm e una di pavimento levigato e compatto. I risultati del substrato levigato coincidono con quelli degli altri autori, mentre il pezzo di marciapiede fece registrare valori massimi di 16°. Quest'ultima superficie era probabilmente meno resistente e si formarono dei crateri all'impatto con conseguente deviazione dei proiettili.

KNEUBUEHL è uno dei pochi che descrive accuratamente il calcestruzzo usato nelle prove: lastra spesa 50mm, sabbia 0-4mm, CEM 52.5, W/Z 0.35. I proiettili utilizzati sono elencati in tab. 5.3. I suoi risultati confermano la teoria esposta sul calcestruzzo.
L'angolo di rimbalzo dei proiettili da 9mm (FMJ e ACTION 1 e 3) aumentò quasi linearmente con l'angolo d'incidenza e, a causa della loro durezza, i proiettili ACTION raggiunsero limiti superiori alla palla FMJ. Tutti i proiettili in piombo rimbalzarono invece con β di circa 1° per α inferiore a 20°. I proiettili 22 lr. aumentarono l'angolo di rimbalzo per $\alpha > 25°$, mentre i proiettili del 357 Mag. e 44 Mag. si frantumarono per angoli d'incidenza superiori ai 15°.

Angoli di rimbalzo da calcestruzzo: pistola					
Autore	Munizione	Massa [g]	v [m/s]	α (range) [°]	β_{max} [°]
FBI	9x19 - FMJ	?	?	ca. 2	3,4
	38 Spl - LRN	10,2	?	ca. 2	2,9
	357 Mag. - ?	?	?	ca. 2	1,7
	45 Auto - ?	14,9	?	ca. 2	1,4
Schmidt	9x19 - FMJ	9,0	350	5-45	7,3
			200	5-55	7,3
	38 Spl - LRN	10,2	250	5-45	6
	357 Mag SJHP	10,2	395	5-55	2,8
	22 lr. LRN	2,55	360	2-40	3,5
			245	5-40	5
Kneubuehl	38 Spl - LRN	10,2	215	45	3,5
Haag	Pallino TC	1,0	99	10-60	6
			142	10-60	4,9
			168	10-60	6
Rathmann	32 Auto - FMJ	4,6	243	10-30	3
	45 Auto - FMJ	14,9	228	10-30	2
	32 Auto - FMJ	4,6	243	10-30	16 (superficie ruvida)
	45 Auto - FMJ	14,9	228	10-30	16 (superficie ruvida)
Houlden	9x19 - FMJ	7,0	332	10-60	4
	357 Mag - FMJ	11,0	392	10-40	2,5
	45 ACP - FMJ	14,9	263	10-50	2

Tab. 5.31: Angoli di rimbalzo da calcestruzzo (pistola), risultati di AA.VV.

Kneubuehl: calcestruzzo, 50mm, sabbia 0-4mm, CEM 52.5, W/Z 0.35											
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia											
9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,2	1,4	1,6	2,1	2,1	1,4	2,0	4,7	2,1	1,1	1,4	3,3
4,8	3,2	3,5	3,0	4,8	4,5	4,8	5,5	4,7	4,9	5,3	3,7
10,1	6,5	7,8	10,1	9,8	8,8	9,8	22,4	9,9	9,6	10,0	14,1
13,4	7,5	7,8		13,6	10,5	12,0		13,5	12,5	13,1	
19,4	11,6	12,9		19,3	18,3	18,9		19,3	17,1	17,9	
24,2	14,1	15,4		24,3	20,5	21,2		24,3	20,1	21,2	
9x19 – Silver Tip				357 Mag. SJHP				44 Rem. Mag SJHP			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,1	1,5	1,7	3,0	2,1	1,2	1.6	4,1	2,1	1,2	1,8	4,1
4,8	1,9	2,2	7,5	4,7	1,3	1.6	5,5	4,8	1,5	1,6	5,0
9,9	1,5	1,7	9,2	9,9	0,9	1.2	9,8	10,0	1,0	1,1	8,1
13,6	1,0	1,1		13,5	6,6	14,9		13,6	4,0	4,9	
19,3	2,4	3,0									
24,3	8,5	10,0									

38 Spec. LRN				22 lr. HV LRN				22 lr. Pistol Match LRN			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,0	0,7	1,1	1,8	2,3	0,9	1,2	3,5	2,3	0,8	1,4	2,8
4,8	1,2	1,4	1,7	5,2	0,5	0,7	3,0	4,9	0,8	1,1	3,4
9,7	0,9	1,1	5,1	10,5	1,1	1,4	7,8	10,5	1,3	1,4	8,1
13,5	1,6	1,7		13,6	1,8	2,9		13,6	0,5	0,9	
19,2	1,0	1,0		19,5	1,4	2,1		19,5	1,1	1,5	
24,2	0,8	1,0		24,6	5,9	7,9		24,5	3,3	5,1	

Tab. 5.32: Angoli di rimbalzo da calcestruzzo (pistola), risultati di Kneubuehl [3].

5.2.3.2 Proiettili per carabina

Non sono molti gli studi pubblicati sul rimbalzo di proiettili da carabina contro il cemento. Il motivo è semplice, per angoli d'incidenza superiori ai 10° i proiettili che volano a velocità superiori ai 700m/s circa si frantumano tutti (in pezzi più meno grandi). In qualcuna delle prove riportate alcuni proiettili da caccia non hanno superato neppure i 5° d'incidenza.

La tesi di SCHMIDT, citata nel paragrafo precedente, tratta anche alcuni calibri d'arma lunga (5,6x50R, 7x64, 7,62x51 e 16/67,5 ad anima liscia). Tra tutti i proiettili sparati solo la palla FMJ ordinaria del 7,62x51 NATO e la palla slug del calibro 16 non si frantumarono per angoli d'incidenza superiori ai 10°. Due proiettili da caccia si frantumarono con $\alpha = 5°$. In alcuni casi le schegge dei proiettili raggiunsero angoli di rimbalzo oltre i 50°, con un'energia residua tale da risultare ancora pericolose per l'incolumità delle persone. Gli angoli di rimbalzo dei proiettili integri ($\alpha < 10°$) erano compresi tra 1° e 4° (il risultato è analogo ai proiettili da pistola).

McCONNELL e TRIPLETT [12] condussero uno studio sparando pallettoni del tipo 00 Buck (palle di piombo, 8mm) con un calibro 12/70 contro due superfici di cemento. Una superficie era liscia e compatta e diede angoli di rimbalzo inferiori ai 6° per angoli d'incidenza fino a 25°. L'altra superficie era ruvida e fragile (piastrelle da giardino) e registrarono rimbalzi con angoli fino a 16°, nonostante gli angoli d'incidenza fossero gli stessi della superficie più resistente.

KNEUBUEHL condusse uno studio legato a un evento criminoso (citato in [3]-documento riservato dell'amministrazione svizzera) in cui studiò il rimbalzo per due tipi di cartucce calibro 7,62x39. Una con proiettile Ball ordinario e l'altra con proiettile perforante, sparati contro due tipi di calcestruzzo. Lo studio fu limitato a 6° d'incidenza, ma l'utilizzo di un substrato tenero e di uno duro, assieme ai due proiettili teneri e duri, permettono un confronto interessante delle combinazioni studiate.

I risultati delle prove citate sono riassunti nella tabella 5.33.

Angoli di rimbalzo da calcestruzzo: carabina					
Autore	Munizione	Massa [g]	v [m/s]	α (range) [°]	β_{max} [°]
Schmidt	5,6x50R - FMJ	3,25	1015	2-20	2
	5,6x50R - JSP	3,25	1015	2-20	1
	7x64 - Nosler	11,3	805	2-20	3,8
			495	2-30	4
	7x64 - H-Mantel	11,2	795	2-15	1
			495	5-30	2,8
	7x64 - JSP	8,4	745	2-15	4,5
			510	2-30	2,7
	308 Win - FMJ	9,5	765	5-20	3
			470	5-45	5
	16/67,5	27,2	385	5-45	4
Kneubuehl	7,62x39 -FMJ	8,0	675	6,3	5,9
	7,62x39 -AP	8,0	710	6,2	12,9
	7,62x39 -FMJ	8,0	675	6,5	5,7
	7,62x39 -AP	8,0	710	6,0	7,2

Tab. 5.33: Angoli di rimbalzo da calcestruzzo (carabina), AA.VV.

Conclusioni

La qualità del calcestruzzo e la ruvidità superficiale influenzano molto la dinamica del rimbalzo. Fintantoché il proiettile rimane integro, una superficie dura e levigata avrà sempre una risposta con angoli di rimbalzo piccoli (< 10°). Se il calcestruzzo è tenero e ruvido, sono possibili angoli di rimbalzo superiori, specialmente se la superficie si frantuma in seguito all'urto con il proiettile.

I proiettili che impattano a velocità inferiori ai 500m/s si frantumano, in genere, per angoli d'incidenza attorno ai 30°. I proiettili sparati ad alta velocità (> 700m/s) si frantumano per angoli d'incidenza sui 10° (i proiettili FMJ resistono di solito un pochino oltre i 10° mentre quelli da caccia raramente sopravvivono fino a 10°).

5.2.4 Asfalto

La struttura dell'asfalto ricorda quella del calcestruzzo. Entrambi sono materiali composti da una carica inerte (pietre, sabbia, ecc.,) agglomerata con un legante. Nel calcestruzzo il legante è il cemento, nell'asfalto il bitume. Le tipologie d'asfalto variano notevolmente, sia per ingredienti che per proprietà meccaniche. Riteniamo sia esperienza comune l'aver notato differenze di colore e composizione nel manto stradale, nelle buche riparate ecc. Alcune strade sono più silenziose, altre meno scivolose e quando il sole picchia sulla strada, può capitare di rimanere incollati. Il bitume "solido" non è propriamente un corpo rigido ma rientra tra i materiali amorfi, cioè che sembrano rigidi, ma non hanno legami tali da mantenerne la forma nel tempo. In più, il bitume usato nelle strade è molto sensibile alla temperatura. Il bitume si trova come tale in natura o si ricava distillando il petrolio. La sua densità è di circa 1050 kg/m^3. Aggiungendo sabbia e pietrisco si produce l'asfalto, che ha densità indicativa variabile tra 1100 e 2800 kg/m^3.

La reazione di un proiettile sparato contro l'asfalto è simile a quella su calcestruzzo di scarsa resistenza [3]. Da un certo angolo d'incidenza in poi il substrato forma dei crateri e gli angoli di rimbalzo possono diventare piuttosto grandi.

Da un punto di vista forense l'asfalto presenta alcune caratteristiche peculiari. La citata sensibilità alla temperatura è una di queste. Inoltre, i fori sulle strade sono molto sensibili, nel senso che i bordi di un buco "fresco" si sbriciolano facilmente (specialmente se ci passano sopra le macchine). D'altra parte, proprio la consistenza granulosa dell'asfalto può fungere da indicatore della direzione di sparo, in quanto la "scia" di materiale espulso dal cratere può essere utile per valutare la direzione del tiro. Il mutuo scambio tra asfalto e proiettile è spesso molto evidente, soprattutto per le tracce rilevabili sul proiettile [8].

L'apporto logistico per la ricostruzione degli eventi sull'asfalto può essere imponente. Dato che le prove andrebbero fatte con lo stesso substrato presente sulla scena dell'evento che si vuole riscostruire, si pone il problema di come e dove svolgere le prove. In alcuni studi è stato scelto di tagliare un pezzo di strada e trasportarlo in laboratorio, altri hanno messo in sicurezza un perimetro ed eseguito le prove in loco.

I risultati degli studi dell'FBI [64], di RATHMAN [42], di KNEUBUEHL [3 e documenti interni] e uno studio rielaborato da BETTIN sono riassunti nelle tabelle seguenti.

Angoli di rimbalzo da asfalto

Autore	Munizione	Massa	Calibro	v	α	β_{max}	β_{med}
		[g]	[mm]	[m/s]	[°]	[°]	(n° colpi): media
FBI	.45 AUTO	14,9	11,43		2	3,7	(10) : 2,5°
	00 Buckshot				1	3,5	(10) : 1,9°
					2	5,0	(10) : 2,9°
	SLUG				1	1,5	(10) : 1,0°
Kneubuehl	38 Special	10,2	9,0	215	17	5,5	(3) : 4,7°
					32	17	(3) : 15,2°
					44	29,5	(3) : 28,8°
	7,62x39 Ball	8	7,62	665	6,25	8,8	(5) : 7,1°
Rathmann	32 Auto FMJ	4,6	7,65	243	10	10	Solo media (3)
					20	15	Solo media (3)
					30	8	Solo media (3)
	45 Auto FMJ	14,9	11,43	228	10	5	Solo media (3)
					20	11	Solo media (3)
					30	14	Solo media (3)
Anonimo (Bettin)	9x19 FMJ Asfalto freddo	8,0	9,0	372	8	3,5	(2) precisione ±1°
					10	5	(1) precisione ±1°
					13	7,5	(2) precisione ±1°
					18	12	(2) precisione ±1°
					23	17,5	(2) precisione ±1°
	9x19 FMJ Asfalto caldo	8,0	9,0	372	2	2	(2) precisione ±1°
					10	10	(2) precisione ±1°
					15	17,5	(2) precisione ±1°
					20	22	(1) precisione ±1°
					25	19,5	(1) precisione ±1°
	9x19 – Action4	5,85	9,0	439	10	11	(1) precisione ±1°
					15	18	(1) precisione ±1°

					20	14	(1) precisione ±1°
					25	47	(1) precisione ±1°
					30	20	(2) precisione ±1°
	6,35 Brown. FMJ	3,2	6,35	286	5	3	(1) precisione ±1°
					10	8	(2) precisione ±1°
					15	7	(2) precisione ±1°
					20	14	(1) precisione ±1°
					25	15	(1) precisione ±1°

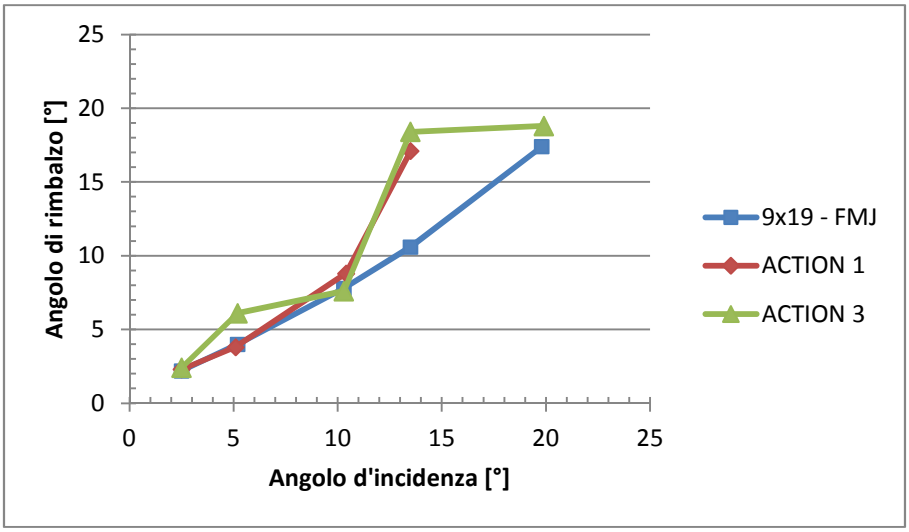
Tab. 5.34: Angoli di rimbalzo da asfalto, AA.VV.

Kneubuehl: asfalto [3]

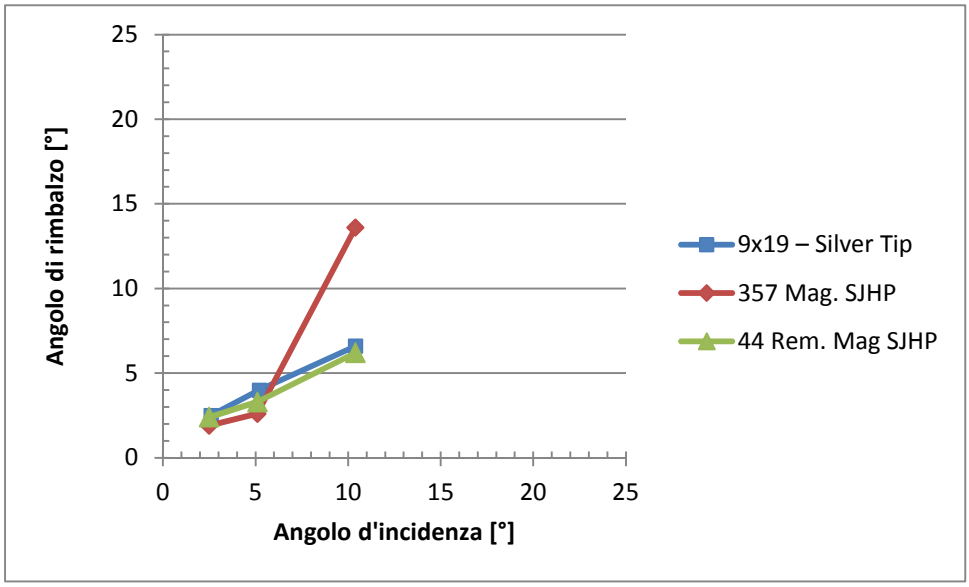
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.;
ΔE – perdita di energia

9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,5	2,2	3,0	4,4	2,5	2,3	2,7	7,0	2,5	2,4	3,0	5,4
5,2	4,0	5,0	7,9	5,1	3,8	4,3	9,5	5,2	6,1	7,1	10,2
10,3	7,8	10,2	21,6	10,4	8,8	9,4	39,8	10,3	7,6	9,5	22,2
13,5	10,6	19,3		13,5	17,1	23,7		13,5	18,4	25,7	
19,8	17,4	26,2						19,9	18,8	19,3	
9x19 – Silver Tip				**357 Mag. SJHP**				**44 Rem. Mag SJHP**			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,6	2,5	2,9	9,2	2,5	1,9	2,3	8,2	2,5	2,4	2,9	8,8
5,2	4,0	4,6	15,2	5,1	2,6	3,4	13,9	5,1	3,3	5,7	12,9
10,4	6,6	11,1	25,5	10,4	13,6	25,6	16,6	10,4	6,2	8,1	21,7
38 Spec. LRN				**22 lr. HV LRN**				**22 lr. Pistol Match LRN**			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,5	1,8	2,3	5,3	2,6	1,4	1,6	8,9	2,6	3,0	8,8	6,3
5,2	1,9	2,4	4,4	5,6	1,4	2,0	8,6	5,5	1,6	1,9	7,1
10,4	3,1	4,2	16,8	10,7	4,7	6,4	17,2	10,7	2,3	2,6	21,6
13,8	3,2	4,9		14,1	7,2	12,7		14,1	6,4	10,4	
20,0	4,5	8,7									

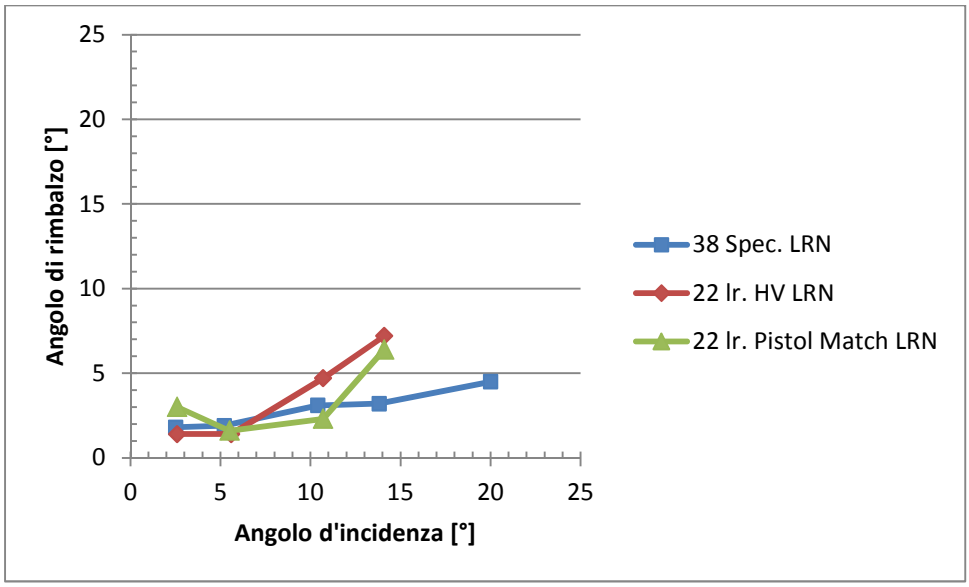
Tab. 5.35: Angoli di rimbalzo da asfalto, Kneubuehl [3]



Tab.36: Angoli di rimbalzo da asfalto, Kneubuehl [3]



Tab.37: Angoli di rimbalzo da asfalto, Kneubuehl [3]



Tab.38: Angoli di rimbalzo da asfalto, Kneubuehl [3]

I valori di molte prove mostrano una notevole dispersione (in tabella sono riportate solo le medie, per i dettagli si rimanda ai testi citati). I risultati di almeno tre studi (Kneubuehl, Haag (non riportato) e Bettin) differiscono quantitativamente ma non qualitativamente. E' quindi corretto assumere che il comportamento generale del substrato "asfalto" segua le regole descritte e che le differenze di composizione tra i substrati utilizzati conducono a risultati numerici diversi. Nello studio rielaborato da Bettin è stato inoltre riscaldato il piano di asfalto per simulare l'effetto dell'insolazione. Tracciando una curva di regressione tra i valori indicati, si osserva che gli angoli di rimbalzo dall'asfalto riscaldato aumentano di circa 5° (il valore è da ritenere valido solo per la prova condotta).

5.2.5 Sabbia

Il modello di rimbalzo applicabile alla sabbia è la superficie cedevole e non frangibile (fig. 4.4). Il proiettile penetra nella sabbia, vi scava un solco (o vi s'immerge completamente) e può subire una deviazione che ne aumenta l'angolo di rimbalzo al punto da superare quello d'incidenza. Alcuni approcci teorici accomunano la sabbia con l'acqua. I proiettili che rimbalzano sulla sabbia mostrano sulla superfice delle striature tipiche (vedi cap.4).

L'angolo limite di un proiettile d'arma da fuoco stabilizzato giroscopicamente e sparato contro una superficie di sabbia è piuttosto piccolo e si attesta sui 10°-12° circa. Gli esperimenti svolti utilizzando sfere di acciaio hanno fornito angoli limite più grandi.

SOLIMAN, REID, JOHNSON [29] e DANESHI, JOHNSON [24] hanno pubblicato due studi adoperando sfere di acciaio di 9,5mm di diametro [29] e 12,7mm e 25,4mm [24]. I testi sono interessanti da un punto di vista accademico ma offrono pochi spunti pratici per un utilizzo con i proiettili delle armi da fuoco.

La già citata tesi di SCHMIDT "Geschossablenkung durch Beton und Sand" (i risultati sono pubblicati in [14]) tratta il rimbalzo di alcuni calibri d'arma corta (9x19, 38 Special, 357 Magnum e .22 lr HV) e da carabina (5,6x50R, 7x64, 7,62x51 e 16/67,5 ad anima liscia) anche dalla sabbia, oltre che dal calcestruzzo. Schmidt misurò l'angolo d'incidenza, l'angolo di rimbalzo (con precisione di ¼°) e la lunghezza della traccia nella sabbia. Per i calibri da pistola l'angolo limite si attestò tra 10°-11°, mentre i proiettili espansivi ad alta velocità si frantumarono già a 2° circa. Solamente per velocità inferiori ai 500 m/s (corrisponde a circa 500m di distanza) i proiettile espansivi da caccia non si frantumarono più (ad eccezione del 7x64 SJSP). I proiettili da carabina tipo FMJ si mostrarono leggermente più resistenti e si frantumarono tra 2° e 5°.

Riportiamo i risultati di alcune prove:

Angoli di rimbalzo dalla sabbia						
Autore	Munizione	Calibro [mm]	Massa [g]	v [m/s]	Note	α_{lim} [°]
Soliman et al.	Sfera acciaio	9,5	3,5	fino a180		
Daneshi et al.	Sfera acciaio	12,7 25,4	8,4 67,0	fino a 375 fino a 160		18 18-20
Schmidt	9x19 - FMJ	9,0	8,0	350 200	Proiettile integro Proiettile integro	ca. 11 ca. 11
	38 Spl - LRN 357 Mag SJHP	10,2 10,2	10,2 10,2	250 395	Proiettile integro Frammento 6-9g	ca. 11 ca. 11
	22 lr. LRN	2,55	2,55	360 245	Proiettile integro Proiettile integro	ca. 11 ca. 9
	5,6x50R - FMJ 5,6x50R - JSP	5,6	3,25 3,25	1015 1015	Frantumi a 5° Frantumi a 2°	ca. 9 ca. 7
	7x64 - Nosler 7x64 - H-Mantel 7x64 - JSP	7,0	11,3 11,2 8,4	805 495 795 495 745 510	Frantumi a 2° Integro Frantumi a 2° Solo punta deformata Frantumi a 2° Frantumi a 2°	ca. 10 ca. 4 ca. 10 ca. 7 >10 ca.6
	308 Win - FMJ	7,62	9,5	765 470	Frantumi a 5° Integro	>10 ca. 12
	16/67,5		27,2	385	Frammento 8-24g	>16

Tab.5.39: Angoli di rimbalzo dalla sabbia, AA.VV.

5.2.6 Acqua

I primi studi di rimbalzi sull'acqua risalgono al 1800 e trattano di palle da cannone. L'importanza tattica offerta da un colpo di rimbalzo in marina era notevole. La probabilità di colpire una nave con un proiettile che viaggiava a livello del bersaglio era superiore rispetto a un colpo proveniente dal cielo. Cranz [73] cita un lavoro di Jonquirères del 1883 in cui una palla di cannone, sparata a 455 m/s rimbalzò 22 volte, coprendo una distanza di 2470m. Nel 1904 Chrismar, sempre citato da Cranz[73], indicò un angolo limite di 25° per i proiettili d'artiglieria della marina e portate massime che raggiungevano gli 11km.

Per quanto interessanti da un punto di vista storico, questi studi non ebbero applicazioni utili per le armi di piccolo calibro ma furono i primi a dimostrare che un proiettile può effettivamente rimbalzare su uno specchio d'acqua.

L'angolo di rimbalzo di un proiettile sparato contro una superficie d'acqua, varia in funzione del tipo di proiettile [3,79], ma sia l'angolo critico che l'angolo di rimbalzo sono di solito piccoli, riducendo il campo d'analisi in sede sperimentale.
Diversi autori hanno studiato il fenomeno (vedi bibliografia), utilizzando proiettili sferici o ogivali sparati da pistola e carabina. Riportiamo brevemente i punti salienti degli studi, per fornire un sunto qualitativo del rimbalzo sull'acqua. I dettagli delle prove sono riassunti in tabella 5.40.

- Esiste un angolo limite oltre il quale un proiettile non rimbalza più, ma affonda nell'acqua. Ad eccezione dei dati riportati in uno studio recente [92], gli angoli d'incidenza limite

riportati in letteratura non superano mai i 7°-8° e gli angoli di rimbalzo massimi documentati sono sempre inferiori ai 10°.

- L'angolo massimo di rimbalzo per i proiettili da arma corta (pistola) studiati non si ha in concomitanza con l'angolo d'incidenza limite, ma prima. L'angolo massimo di rimbalzo documentato non supera i 6°-7°.

- L'angolo massimo di rimbalzo per i proiettili da arma lunga (carabine) studiati non si ha in concomitanza con l'angolo d'incidenza limite, ma prima (come per le pistole). L'angolo massimo di rimbalzo è poco più grande di quello delle pistole e si attesta sui 9°-10° in tutti lgi studi pubblicati con l'eccezione del [92].

- I proiettili sferici sparati da una canna liscia (senza rotazione propria) hanno un angolo di rimbalzo minore dell'angolo d'incidenza. Dagli sudi di Schöntag e Schöntag del 1971 (citati in [3]) l'angolo limite per il rimbalzo è di circa 5,4°.

- I proiettili sferici lanciati da una canna rigata (con rotazione propria) hanno un angolo di rimbalzo maggiore dell'angolo d'incidenza finché l'angolo d'impatto è inferiore a 4°. Per angoli d'incidenza superiori ai 4° l'angolo di rimbalzo cala. Dagli studi di Schöntag e Schöntag l'angolo limite per il rimbalzo è di circa 5,2°

- La teoria di Birkhoff per calcolare l'angolo limite, presentata nel capitolo 3.5.3, applicata ai proiettili sferici fornisce dei valori con un errore massimo del 10% rispetto ai dati sperimentali [3]. Per molti problemi forensi la precisione è più che sufficiente.

- Da un lavoro di Haag [79] si ricava che in un campo di velocità compreso tra 200-700m/s la velocità non influenza in maniera significativa il rimbalzo sull'acqua. Soliman [29] ottenne risultati simili utilizzando delle sfere.

Il lavoro di Haag [79] evidenzia delle notevoli differenze in funzione della geometria e della costruzione del proiettile. I proiettili semicamiciati a punta tonda si sono frantumati per angoli d'incidenza di appena 2°. I proiettili con ogiva più acuminata sono rimbalzati, indipendentemente dal fatto che la punta fosse di piombo o in altro materiale. Un confronto tra un proiettile con nucleo in acciaio, un tracciante e un proiettile con nucleo in piombo sparati con lo stesso angolo d'incidenza diede angoli di rimbalzo molto diversi.

Angoli di rimbalzo dall'acqua						
Autore	Munizione	Calibro [mm]	Massa [g]	v [m/s]	Misura effettuata	α_{lim} [°]
Ramsauer	Sfera d'ottone	11,0	5,85	625	β e velocità di rimbalzo	6,8
Schöntag et al.	Sfera di piombo	4,5	0,54	200	β con rotazione	5,2
		4,5	0,54	220	β senza rotazione	5,4
Soliman et al.	Sfera d'acciaio	25,4	67,4	64	β e velocità di rimbalzo	
				10-80	α_{lim}	6,6
		9,5	3,55	10-130	dipendenza dalla rotaz.	
Gold et al.	9x19 FMJ	9,0	7,4	410	α_{lim}	6,5
Haag	22 short LRN	5,6	1,9		α_{lim}	8
	22 short LHP	5,6	1,75		α_{lim}	5
	22 lr. LRN	5,6	2,6		α_{lim}	7
	22 lr. HV LRN	5,6	2,6		α_{lim}	7
	22 lr. HV LHP	5,6	2,4		β	7
	22 lr. HV LHP	5,6	2,4	320-640	β	5
	22 lr. HV LHP	5,6	2,4		β	4
	32 Auto	7,65	4,8		dipendenza da v	
	38 Spl. LRN	9,0	10,2		α_{lim}	6
	38 Spl. SJHP	9,0	8,1		α_{lim}	6
	380 Auto FMJ	9,0	5,8		α_{lim}	7
	.222 Rem SJSP	5,56	3,25		α_{lim}	3
	30 M1 Carb. FMJ	7,62	7,1		α_{lim}	5
	7,62x39 FMJ	7,62	8,1	700	β	
	30-06 FMJ	7,62	9,7	195-760	dipendenza da v	
	30-06 FMJ	7,62	9,7	700	dipendenza dalla lunghezza del proiettile	
	30-06 FMJ	7,62	9,7	760	dipendenza dalla forma dell'ogiva	
	30-06 FMJ	7,62	9,7	760	α_{lim}	7

Tab. 5.40: Angoli di rimbalzo dall'acqua, AA.VV.

Proiettili militari

Negli ultimi anni, determinate attività militari marittime hanno dato impulso a uno studio dei rimbalzi di proiettili militari sull'acqua. Nel 2012 è stato pubblicato un lavoro di BAILLARGEON, ENG, BERGERON [92] che contrasta con i dati pubblicati in precedenza. Durate lo studio furono sparati proiettili K50 BMG, .50 M2, .50 AP-T C44, 7,62 Ball e 5,56 Ball in una vasca d'acqua distante 5m dall'arma. Gli angoli d'impatto furono 2,5°, 10°, 15°, 20° e 30° a velocità variabili per simulare distanze di 0 m, 300 m e 600 m a seconda dell'arma (per i dettagli si rimanda allo studio citato). I risultati mostrano angoli limite compresi tra 15° e 30° e angoli di rimbalzo fino a 50° in funzione del proiettile.

5.2.7 Strade sterrate e terreni

E' impossibile descrivere una strada sterrata o un terreno con un dettaglio sufficiente da permettere a terzi di ricostruire fedelmente il substrato di una strada sterrata.

Con questo non vogliamo dire che non esistono studi sui rimbalzi da strade sterrate o terra, anzi, per asserire che un substrato non è riproducibile bisogna almeno averci provato. I risultati numerici proposti hanno, però, solamente carattere informativo. Le superfici di "terra" sono troppo eterogene e composte da innumerevoli elementi quali sabbia, fango, pietrisco, pezzi di legno, argilla ecc. sparsi irregolarmente e con quantità d'acqua variabili (secche, umide, bagnate). Sui terreni la dispersione dei proiettili rimbalzati è spesso molto grande, non potendo prevedere quale componente del terreno incontrerà lungo la sua traiettoria[3].

Riportiamo di seguito i risultati di quattro studi, tre dei quali sono riconducibili ad un gruppo scientifico comune. I dati della tesi di Kneubuehl [3], i dati di Wiedmer (dello stesso istituto di Kneubuehl, è un testo riservato ma citato in [3]) e lo studio [2,4], condotto in Germania sotto la supervisione tecnica di Kneubuehl.

Kneubuehl: strada sterrata, vecchia di oltre 20 anni, senza brecciolino [3]											
α – angolo d'incidenza; β – angolo di rimbalzo medio; β_{max} – angolo di rimbalzo max.; ΔE – perdita di energia											
9x19 - FMJ				ACTION 1				ACTION 3			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,6	3,0	4,9	5,0	2,5	5,8	7,3	19,4	2,6	2,9	4,4	62,0
5,1	6,4	10,7	22,1	5,2	6,1	7,5	25,1	5,1	9,2	16,2	39,6
9,4	12.0	16,9	43,7	9,3	14,9	19,5	65,7	9,2	13,3	17,6	67,1
9x19 – Silver Tip				357 Mag. SJHP				44 Rem. Mag SJHP			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,4	4,5	8,0	16,7	2,6	5,7	12,1	31,2	2,6	4,3	6,4	13,5
5,0	9,6	14,7	30,4	5,1	7,4	10,8	33,7	5,1	4,7	6,9	22,0
9,1	9,4	13,4	48,3	10,2	25,0	27,7	50,2	8,8	11,7	18,6	34,6
38 Spec. LRN				22 lr. HV LRN				22 lr. Pistol Match LRN			
α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]	α [°]	β [°]	β_{max} [°]	ΔE [%]
2,6	3,2	5,7	20,5	2,7	4,5	6,6	12,1	2,7	2,8	3,2	9,7
5,1	7,5	17,4	29,7	5,6	9,3	15,7	36,6	5,5	8,4	10,3	34,0
10,2	13,4	19,6	55,1	9,8	10,4	12,9	45,5	9,9	9,9	16,5	36,9

Tab. 5.41: Angoli di rimbalzo da strada sterrata, Kneubuehl [3]

Wiedmer: terreni vari [3]												
α - angolo d'incidenza; β - angolo di rimbalzo medio; n - numero di rimbalzi su 10 colpi												
Calibro	massa [g]	velocità [m/s]	α [°]	Terriccio		Terra compatta		Prato		Ciottoli 5-10mm		Brecciolino 7-20mm	
				β [°]	n	β [°]	n	β [°]	n	β [°]	n	β [°]	n
9x19 FMJ	8	350	10	21	2	4	10	-	0	10	7	23	7
			15	-	0	-	0	-	0	24	5	18	5
			20	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0
7,65 Para	6	375	10	32	3	12	9	14	4	22	4	22	5
			15	-	0	-	0	-	0	-	0	26	3
			20	-	0	-	0	-	0	-	0	26	3
22 lr LRN	2,6	290	10	24	3	5	7	-	0	21	10	13	4
			15	-	0	-	0	-	0	10	1	18	1
			20	-	0	13	1	-	0	8	1	28	3
7,55 GP11	11,3	750	10	25	6	17	10	15	5	13	5	-	0
			15	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0
			20	-	0	-	0	-	0	15	1	-	0
5,6 GP90	4,1	905	10	19	5	17	10	17	4	-	0	10	1
			15	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0
			20	-	0	31	1	31	1	-	0	-	0

Tab. 5.42: Angoli di rimbalzo da terreni vari, Weidmer [3]

L'FBI [64] condusse alla fine degli anni sessanta delle prove di carattere qualitativo, sparando proiettili calibro 45 Auto e 00 Buckshot contro un prato. Per un angolo d'impatto di 2° i proiettili calibro 45 rimbalzarono di circa 7°, mentre per angoli d'impatto di 1°-2° i pallettoni rimbalzarono di circa 14°.

Nello studio sponsorizzato dal governo tedesco [2,4] furono eseguiti dei tiri contro due pezzi di strada sterrata, coltivata artificialmente. La fig. 5.7 mostra l'impianto allestito nel tunnel balistico, lungo 600m, dell'esercito tedesco (WTD 91) [2].

Fig 5.7: Un pezzo di strada sterrata trasportata in laboratorio e allestita per le prove, da [2]

Lo studio definì due tipi di substrato, una strada sterrata soffice e una dura. Pero ottenere la variante dura furono versati più strati di brecciolino (quello comunemente usato per i fondi stradali) e impaccati con acqua. Gli strati erano spessi ca. 25cm e la granulometria degli inerti diventava progressivamente più fine. Nel terreno soffice, per lo strato superiore non fu utilizzato il brecciolino fine ma 5cm di humus prelevato da un bosco.

Le prove prevedevano una serie di 6-10 colpi per calibro e proiettile. Se il peso residuo del frammento più grande era inferiore al 50% della massa totale, la prova veniva interrotta prima. Dopo ogni colpo la zona di substrato colpita era ripristinata.

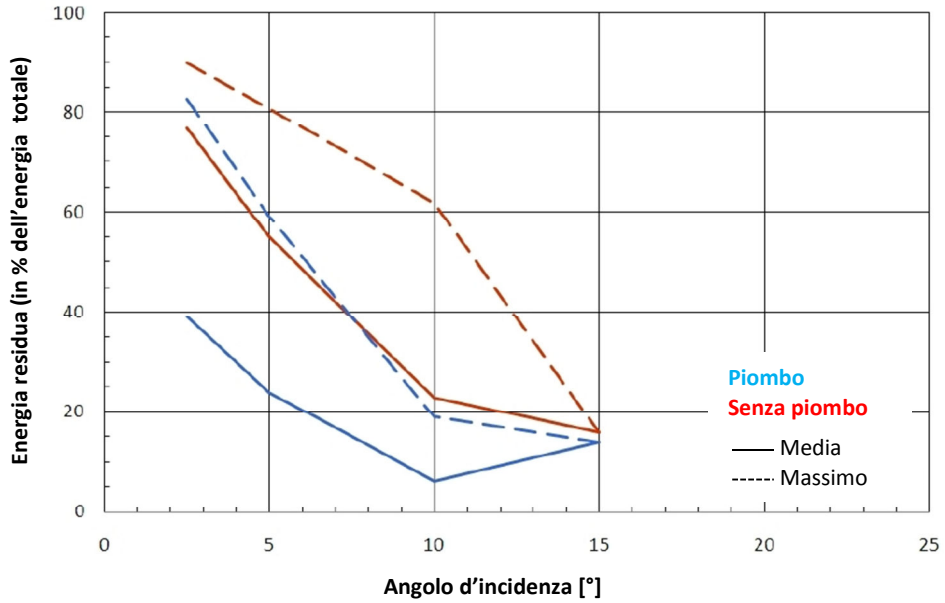
Durante i test furono sparati sei tipi di proiettili in tre calibri diversi. Tre tipi di proiettile contenevano piombo (A: Kegelspitz-KS della RUAG Ammotech, B: Nosler Partition della Nosler Inc., C: Torpedo-Optimal-Geschoss TOG della Brenneke GmbH) e tre erano in lega di rame (D: TSX della Barnes Bullets, E: HDBoH di Reichenberg e F: Naturlis della Nammo Lapua Oy). I calibri scelti erano 243 Winchester., 308Winchester. e 9,3x74R.

Scopo dello studio era di valutare la pericolosità dei proiettili da caccia contenenti piombo rispetto a quelli totalmente in lega di rame. I risultati numerici sono pubblicati in [4], a cui rimandiamo per tutti i dettagli dei singoli tiri. In questo paragrafo riportiamo solamente un sunto del confronto tra lo sterrato compatto e quello soffice, ulteriori dettagli sullo studio in generale sono riportati in 5.2.8.

La differenza sostanziale riscontrata tra i due terreni è che su quello duro alcuni proiettili contenenti piombo si sono frantumati per un angolo d'incidenza di soli 2,5°, perdendo oltre il 50% della massa, mentre tra quelli monolitici la perdita di massa è stata minore e le prove furono proseguite fino al massimo angolo d'incidenza previsto. Nel terreno soffice tutti i proiettili, indipendentemente dal tipo e calibro, penetrarono il substrato per $\alpha > 10°$ e per angoli d'incidenza maggiori non si ebbero più rimbalzi.

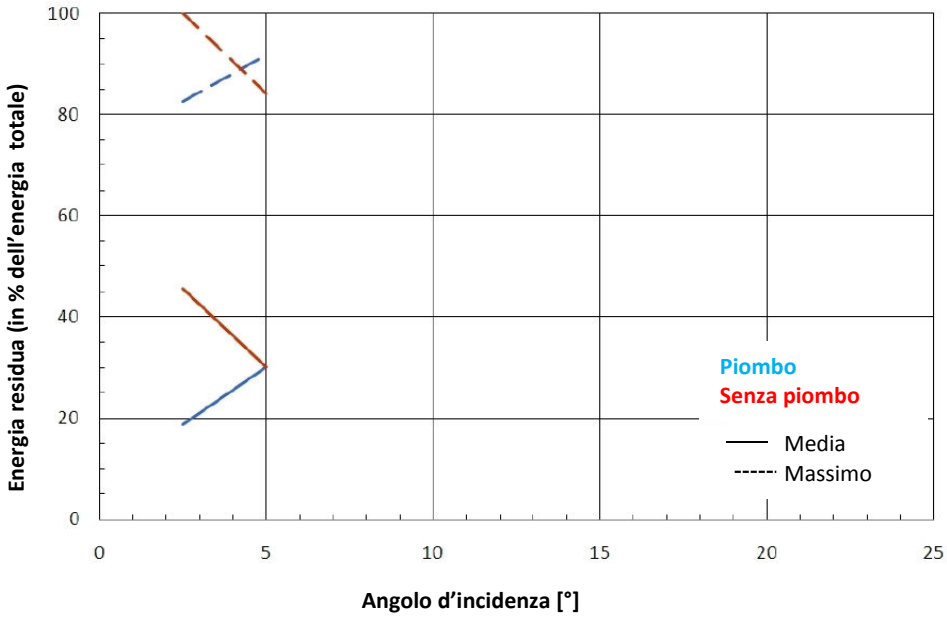
Dovendo presentare un confronto tra i proiettili, lo studio propone tre grafici per ogni combinazione cartuccia-substrato studiata. Un grafico raffigura la quantità di energia residua del proiettile rimbalzato (Energieerhalt - utile per valutare il potenziale lesivo residuo dopo i rimbalzi), un grafico riporta gli angoli di rimbalzo (Abgangswinkel) e uno indica la deviazione angolare (Seitenwinkelbereich). Di seguito proponiamo i tre grafici, mettendo a confronto lo sterrato duro con quello più soffice.

Energia residua

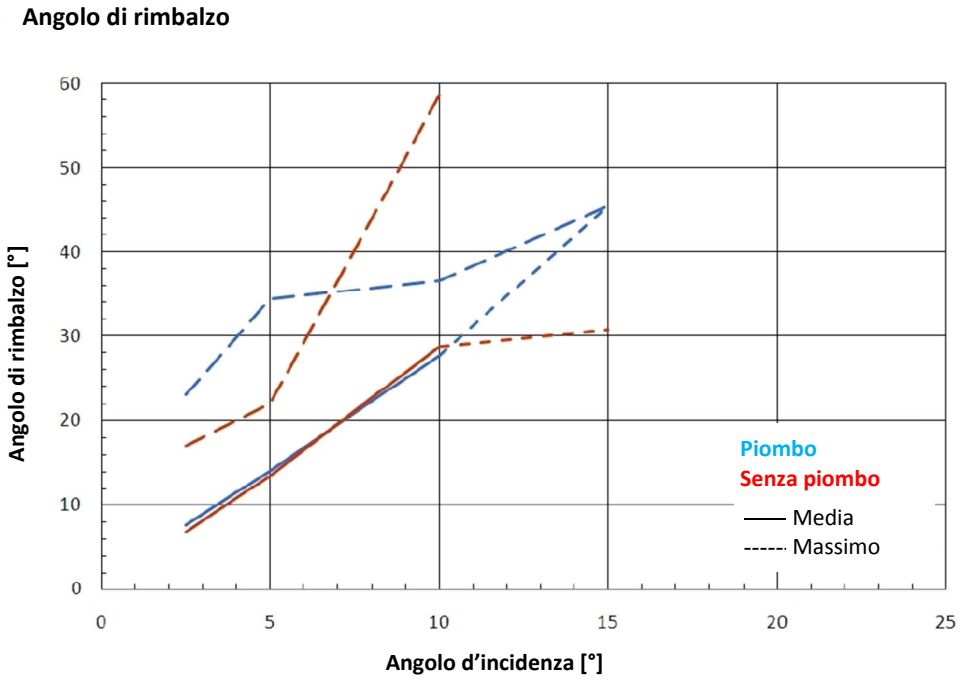


Sterrato duro

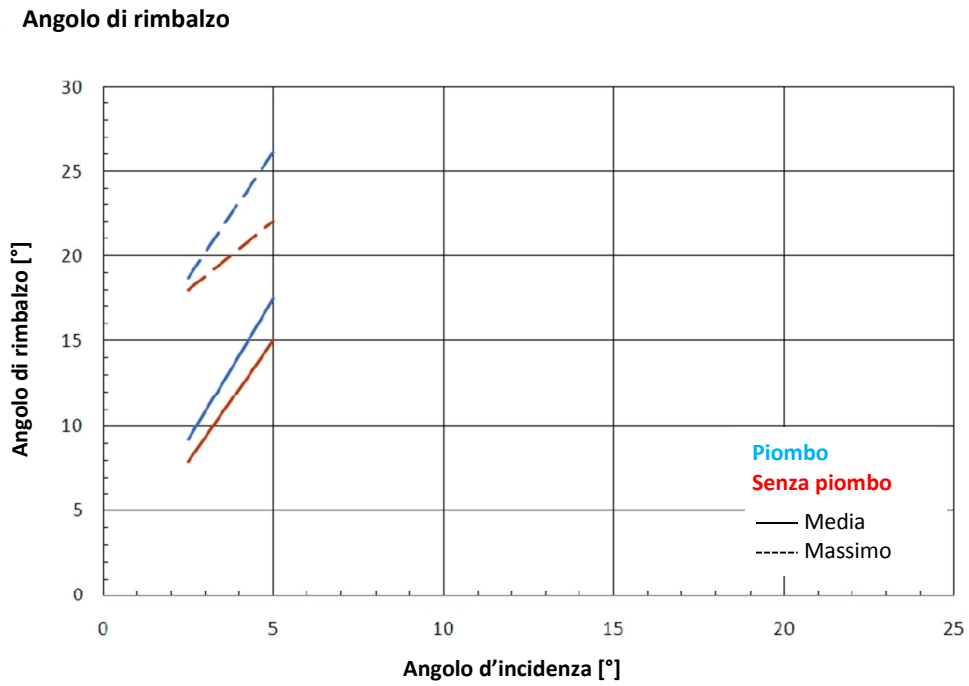
Energia residua



Sterrato soffice

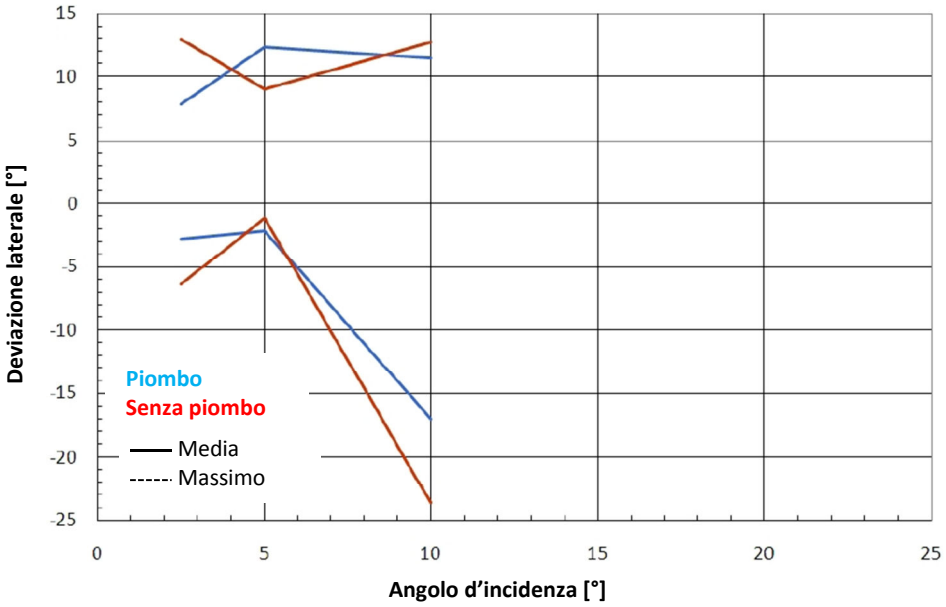


Sterrato duro



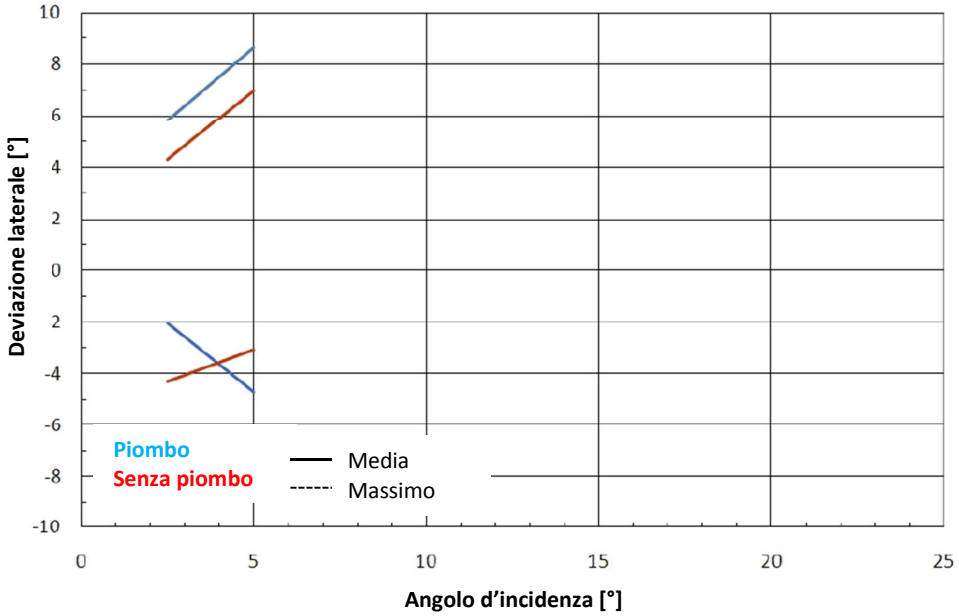
Sterrato soffice

Deviazione laterale



Sterrato duro

Deviazione laterale



Sterrato soffice

5.2.8 Studi particolari

5.2.8.1. Das Abprallen der Geschosse aus forensischer Sicht

Il Dr. Beat P. Kneubuehl, professore dell'università di Berna, ha scritto una tesi dedicata ai rimbalzi dal titolo "Das Abprallen der Geschosse aus forensischer Sicht" [3] (il rimbalzo dei proiettili dal punto di vista forense).

Il metodo con cui affronta la problematica e le valutazioni che offre per applicare i risultati di una prova, fanno del suo testo una risorsa estremamente valida per la comunità forense. Poiché l'impostazione molto matematica e la stesura in sola lingua tedesca non lo rendono facilmente comprensibile, la parte di teoria dei rimbalzi e i risultati sperimentali degli angoli di rimbalzo sono stati riassunti (e in parte semplificati) in questo libro. Le parti contenenti implicazioni di carattere forense sono, invece, state trattate solo marginalmente. La parte scientifica delle ricostruzioni è certamente comune a tutti i paesi, ma non le implicazioni forensi-legali, le quali esulano dallo scopo di questo libro. Essendo il Dr. B.P. Kneubuehl uno dei maggiori esperti mondiali di balistica lesionale, il suo testo contiene anche una valutazione sull'energia residua dei proiettili rimbalzati, al fine di valutarne il potenziale lesivo.

Reputiamo il lavoro di Kneubuehl un documento estremamente valido per tutti colo che abbiano necessità di eseguire o di valutare prove di rimbalzo con finalità forensi.

5.2.8.2. Abprallverhalten von Jagdmunition – Il rimbalzo dei proiettili da caccia

Nel 2009 il governo tedesco commissionò uno studio per valutare i rimbalzi dei proiettili utilizzati a caccia (Abprallverhalten von Jagdmunition) e di confrontare quelli contenenti piombo con quelli in lega di rame. Il contratto per l'esecuzione delle prove fu affidato alla DEVA di Berlino, la consulenza tecnica e la valutazione dei risultati al Dr. Kneubuehl dell'università di Berna. Alcuni risultati numerici di questo studio sono riportati nei paragrafi precedenti (5.2.2.2, 5.2.2.3 e 5.2.7).

Lo studio mise a confronto tre calibri diversi, scelti in base all'energia cinetica indicativa del proiettile:

- .243 Win. con E0 di ca. 2.500 J
- .308 Win. con E0 di ca. 3.600 J
- 9,4x74 R con E0 di ca. 4.500 J

e sei tipi di proiettile, tre contenenti piombo e tre senza piombo:

A: Kegelspitz-KS, della RUAG Ammotech
B: Nosler Partition, della Nosler Inc.
C: Torpedo-Optimal-Geschoss TOG, della Brenneke GmbH } con piombo

D: TSX, della Barnes Bullets
E: HDBoH, di Reichenberg
F: Naturlis, della Nammo Lapua Oy } senza piombo

I tiri di prova furono eseguiti a 25m, 50m e 100m. Gli angoli d'incidenza furono di 2,5°, 5°, 10°, 15°, 25°. Per ogni combinazione furono sparati 5-6 colpi, in totale circa 10.000 colpi.
I valori misurati furono: la massa residua, l'angolo di rimbalzo β, la deviazione laterale γ e l'energia (velocità) residua. I proiettili rimbalzati furono raccolti e documentati.

Le prove furono condotte contro sei tipi di substrato:

1. Il cespuglio, simulato da una serie di bastoncini di faggio spessi 6mm
2. I tronchi d'albero, spessi 30-35cm
3. I rimbalzi da tronco o pietra dopo avere perforato un bersaglio intermedio
4. Il terreno duro
5. La pietra
6. Il terreno soffice

I risultati qualitativi di alcune delle prove (1,2,4,6) sono integrati in questo libro. I risultati numerici sono stati pubblicati nella valutazione [4] e comprendono 160 pagine circa. Trattandosi di uno studio finanziato con soldi pubblici, la descrizione dello studio [2] e i risultati [4] sono disponibili gratuitamente.

Le combinazioni studiate erano 58, 46 delle quali fornirono risultati utili. I risultati permisero di confrontare direttamente i proiettili contenenti piombo con quelli in lega di rame.
Ritenendo l'argomento d'interesse anche per la comunità italiana, riportiamo una sintesi qualitativa dei risultati dello studio:

Angolo di rimbalzo:

- In 28 casi (61%) l'angolo di rimbalzo dei proiettili contenenti piombo era più grande.
- In 18 casi (39%) furono i proiettili senza piombo ad avere un angolo di rimbalzo maggiore.

Deviazione laterale:

- In 24 casi (52%) la deviazione laterale dei proiettili contenenti piombo era più grande.
- In 22 casi (48%) furono i proiettili senza piombo ad avere una deviazione laterale maggiore.
- La deviazione laterale media era di:
  - 1,71° per i proiettili contenenti piombo
  - 1,85° per i proiettili senza piombo

➔ Il test di Wilcoxon decretò che, tra i proiettili da caccia contenenti piombo e quelli senza piombo non esistono differenze significative, riguardo all'angolo di rimbalzo e la deviazione laterale.

Massa ed energia residua:

- In tutti i 46 casi, la massa residua dei proiettili senza piombo era maggiore di quella dei proiettili contenenti piombo.
- In 12 casi (26%) l'energia residua nei proiettili contenenti piombo era più grande.
- In 34 casi (74%) furono i proiettili senza piombo ad avere maggiore energia residua.

➔ Il test di Wilcoxon decretò che, i proiettili senza piombo mantengono più peso e maggiore energia residua dopo l'urto.

Distanza di volo dopo l'impatto:

- In 15 casi (33%) la distanza di volo dopo il rimbalzo dei proiettili contenenti piombo era più grande.

- In 31 casi (67%) furono i proiettili senza piombo a volare per distanze maggiori dopo il rimbalzo.

➔ Il test di Wilcoxon decretò che, dopo un rimbalzo, i proiettili senza piombo volano molto più lontano dei proiettili contenenti piombo.

Kneubuehl espresse anche una valutazione sulla pericolosità intrinseca dei proiettili:

- Poiché l'angolo di rimbalzo e la deviazione laterale sono circa uguali e le densità di energia residue sono superiori alla soglia di pericolo, a distanze brevi la zona di pericolo è indipendente dal tipo di proiettile.
- Poiché i proiettili di rimbalzo senza piombo raggiungono distanze maggiori di quelli contenenti piombo, il pericolo aumenta se esiste la possibilità che il proiettile raggiunga delle zone abitate. Se il proiettile rimbalzato vola in zone disabitate, la pericolosità relativa dei due tipi di proiettile è uguale, dato che l'aumento dell'area di pericolo è proporzionale alla diminuzione della probabilità di ferire qualcuno.

Influenza della costruzione del proiettile e del calibro:

- Se nella valutazione della distanza di rimbalzo si omettesse il proiettile C (con nucleo in piombo saldato), la differenza tra le due tipologie sarebbe maggiore. Il proiettile C si comporta, infatti, come un proiettile in lega di rame.
- La distanza coperta dal proiettile rimbalzato risente del calibro. Riportiamo il numero di casi in cui i proiettili con piombo sono volati più lontani:
  - 243 Win. 2 su 14 (0.14)
  - 308 Win. 7 su 17 (0.41)
  - 9.3 x 74 R 8 su 15 (0.53)

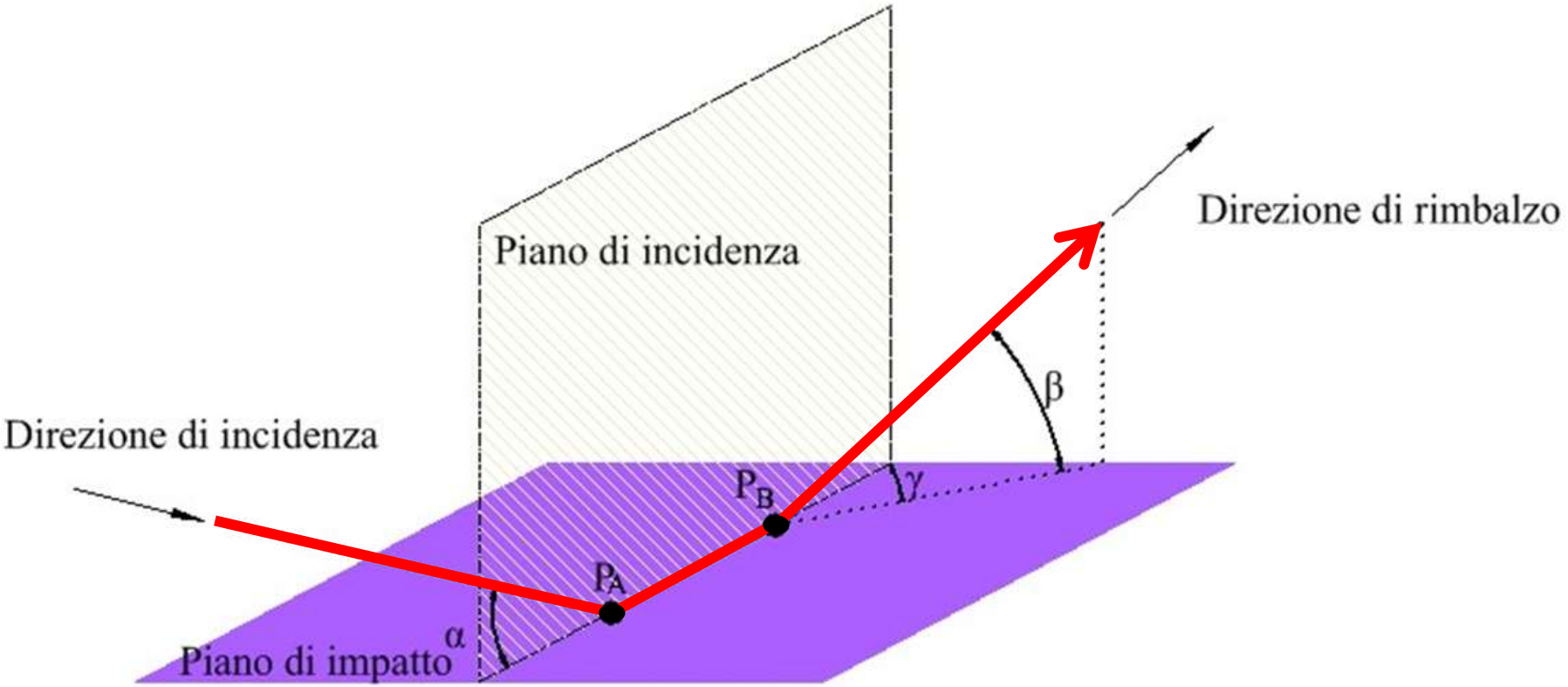
Sintesi dei risultati:

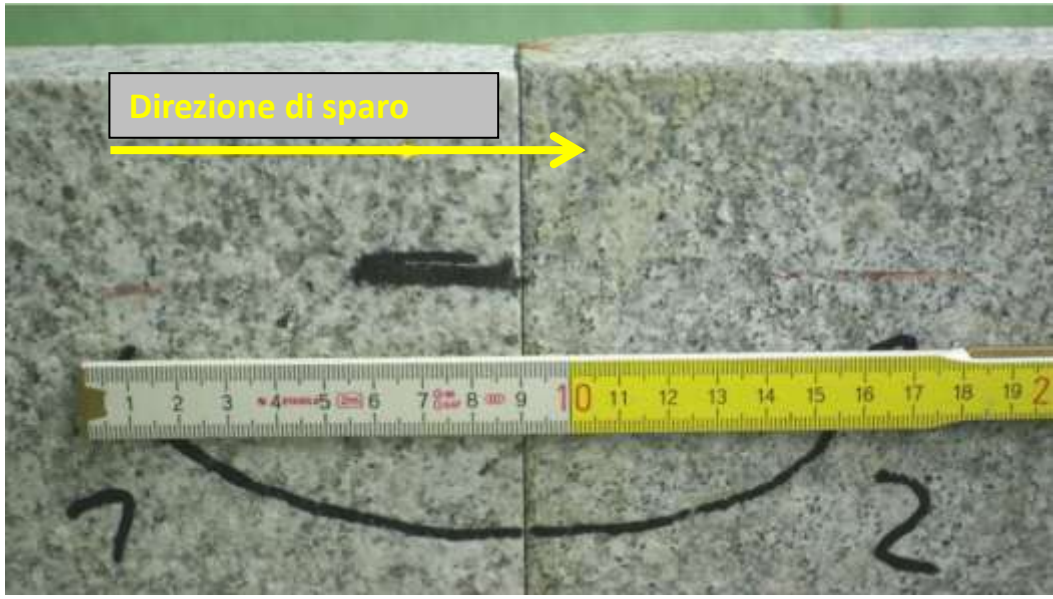
- Il tipo di proiettile influisce poco sugli angoli di rimbalzo e sulla deviazione laterale.
- La deviazione laterale media è piccola (< 2°).
- I proiettili rimbalzati senza piombo hanno massa ed energia residua superiore.
- La distanza massima media dei proiettili rimbalzati è maggiore per quelli senza piombo.
- La differenza della distanza massima tra proiettili con e senza piombo risente del calibro.
- I proiettili contenenti piombo e con un mantello molto spesso hanno un comportamento simile ai proiettili in lega di rame.
- Il substrato contro cui rimbalzano i proiettili influisce molto differenza di "pericolosità" tra proiettili con e senza piombo.

I Rimbalzi dei Proiettili a Caccia

Ing. Cristian Bettin
24 marzo 2018

Come rimbalzano i proiettili?




Direzione di sparo

Da dove rimbalzano i proiettili?

I proiettili da caccia possono rimbalzare da qualsiasi superficie!!

Alberi – rami rovi

Acqua

Strade - terreni

Pietre

Superfici morbide - rimbalzi grandi

Terreni
Sabbia
Legno
Strade bianche

Angolo di impatto
α = 9°

Superfici dure - rimbalzi piccoli

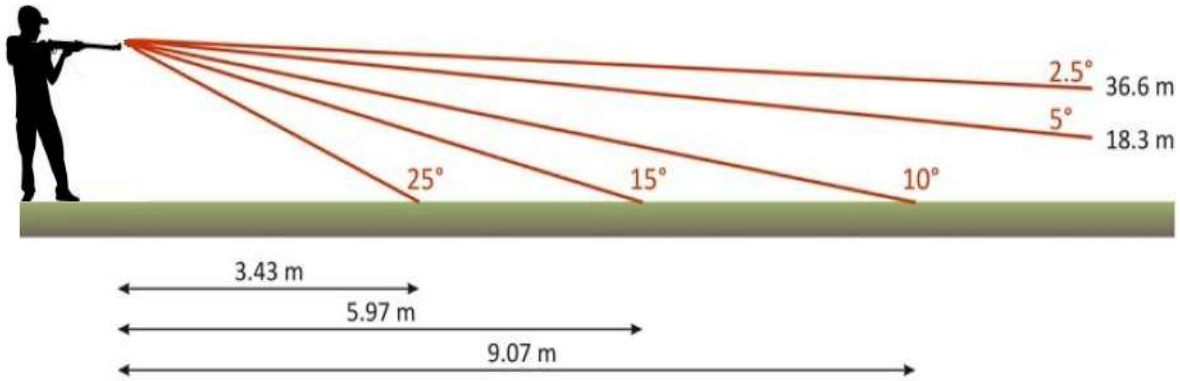
Pietre
Metalli spessi

Angolo di impatto
α = 10°

Quando rimbalzano i proiettili?

Tutti i proiettili possono rimbalzare, ma:

- **Dipende dall'angolo di impatto**
- **Dipende dal tipo di proiettile**
- **Dipende dalla superficie urtata**



L’angolo d’impatto e la superficie

Terreno morbido:

I proiettili d’arma rigata si piantano nel terreno per:

α > 5°

Le slug si piantano nel terreno per:

α > 15°

L'angolo d'impatto e la superficie

Terreno duro:

I proiettili d'arma rigata si piantano nel terreno per:

$\alpha > 15°$

Le slug si piantano nel terreno per:

$\alpha > 15°$

L’angolo d’impatto e la superficie

Acqua:

I proiettili rimbalzano dall’acqua per **$\alpha \leq 8\text{-}10°$**

Il tipo di proiettile

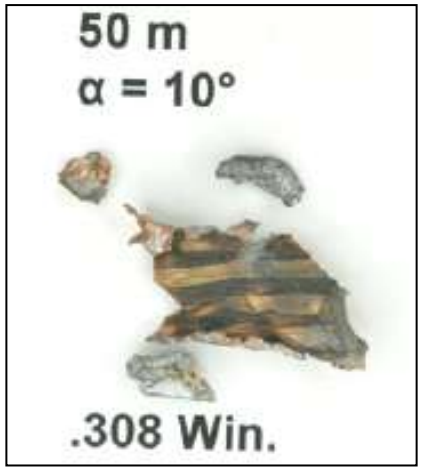
Con piombo

Senza piombo

Slug

Proiettili con nucleo di piombo

- Si frantumano più facilmente dei proiettili monolitici.
- La massa residua dei frammenti è mediamente più piccola rispetto ai monolitici.
- La distanza di volo e l'energia residua dei frammenti è minore rispetto ai monolitici.



Proiettili monolitici

- Si frantumano <u>meno</u> rispetto a quelli di piombo.
- La massa residua è mediamente più alta.
- La distanza di volo e l'energia residua dei frammenti è mediamente più grande rispetto a quelli di piombo.

Quale rimbalza di più?

Con piombo **Monolitici**

Rimbalzano uguale, sia in altezza che in derivazione laterale

Attenzione:

La massa e l'energia residua dei monolitici è mediamente maggiore, i frammenti volano più lontano!

PERICOLOSITA’

Tutti i rimbalzi a caccia sono pericolosi!

I proiettili monolitici hanno massa ed energia residua mediamente superiori, ma la zona di pericolo dei rimbalzi con proiettili di piombo si estende fino a **5-600 metri**.

La zona di pericolo è sempre molto profonda, indipendentemente dal tipo di proiettile rimbalzato!

PERICOLOSITA’

- Gli angoli di rimbalzo verticali e laterali sono circa uguali per entrambi i tipi di proiettile.

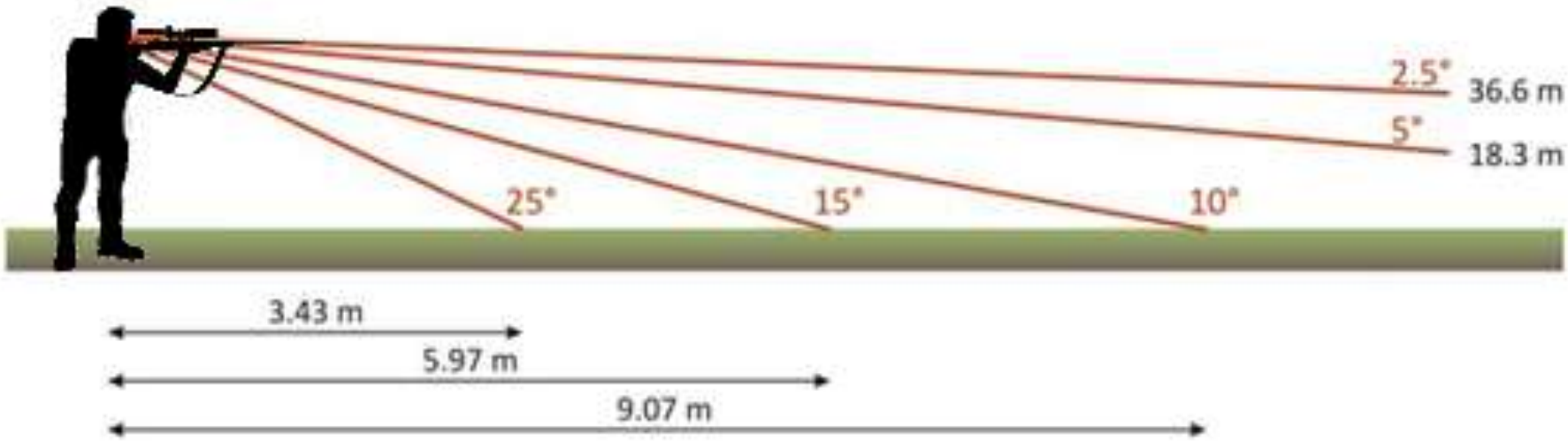
- Gli angoli di rimbalzo laterali sono mediamente molto piccoli per entrambi i tipi di proiettile.

- **L’energia e la densità di energia dei rimbalzi sono notevolmente sopra la soglia di pericolosità per entrambi i tipi di proiettile!**

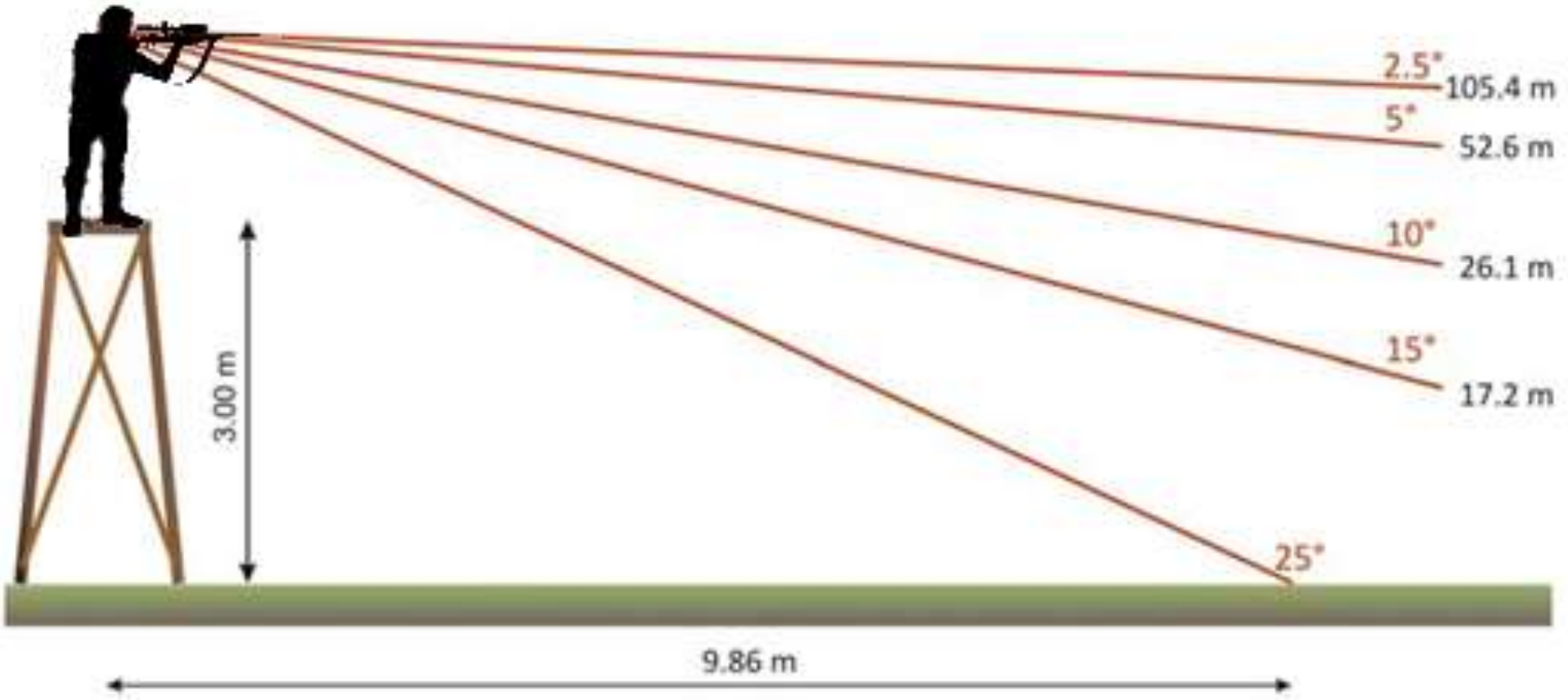
Proiettili slug

- Angolo limite di 15°, indipendente dal terreno
- La massa residua è alta

Sicurezza nel tiro a caccia

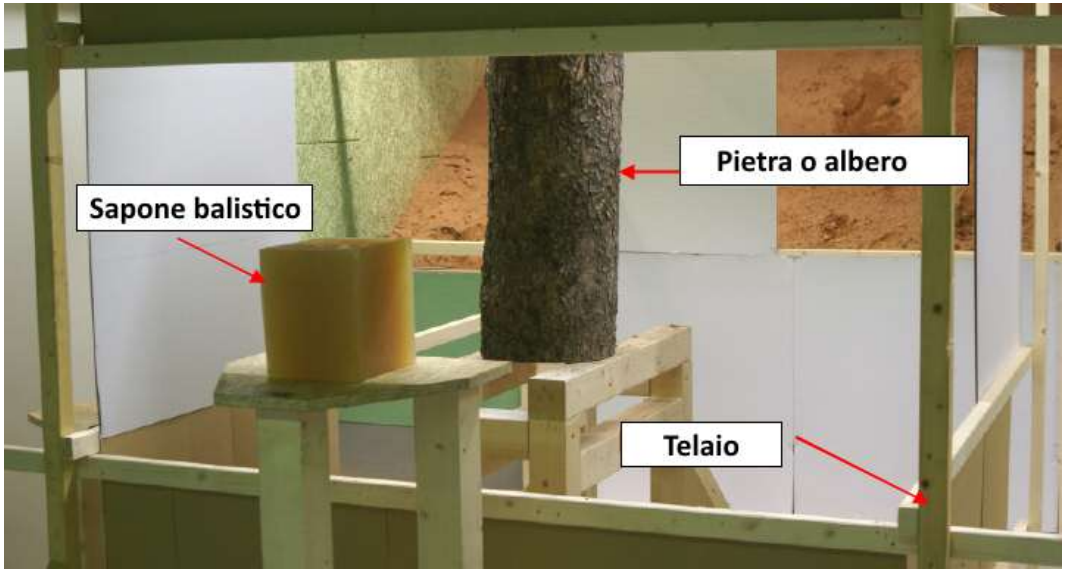


Sicurezza nel tiro a caccia



Cosa succede dietro l'animale colpito?

Canna rigata:
Simulazioni su
tronco d'albero e pietra



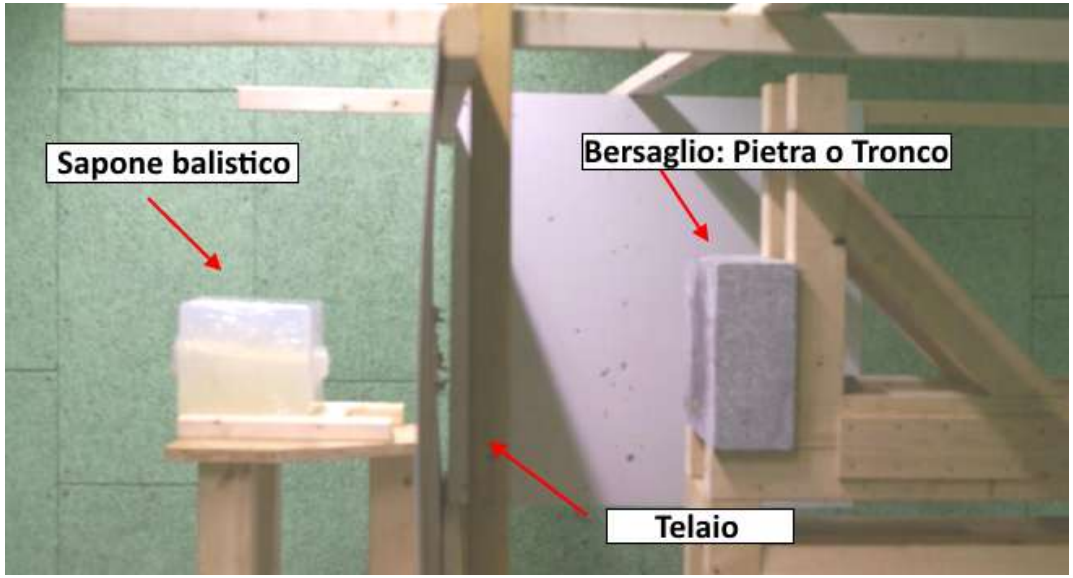
Albero: tutti i proiettili si sono piantati.

Pietra:
I proiettili di **piombo** si frantumano, i pezzi cadono entro **1-2** metri dalla pietra.
I proiettili di **ottone** si rompono, i pezzi cadono entro **1-13** metri dalla pietra.

Simulazioni su
tronco d'albero e pietra
<u>dietro</u> al selvatico colpito

Cosa succede dietro l'animale colpito?

Slug:
Simulazioni su
tronco d'albero e pietra

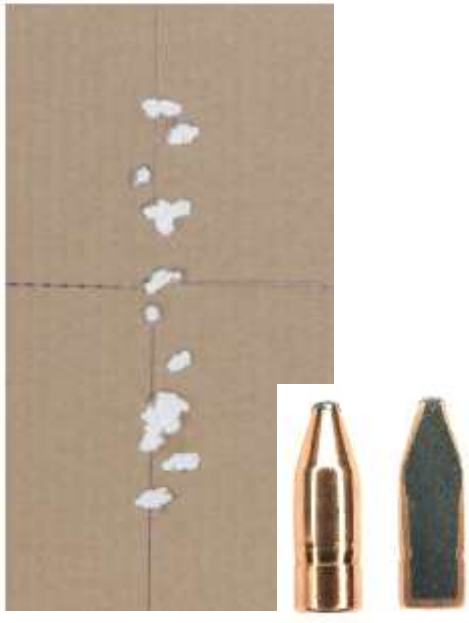


Albero: tutte le slug si sono piantate.

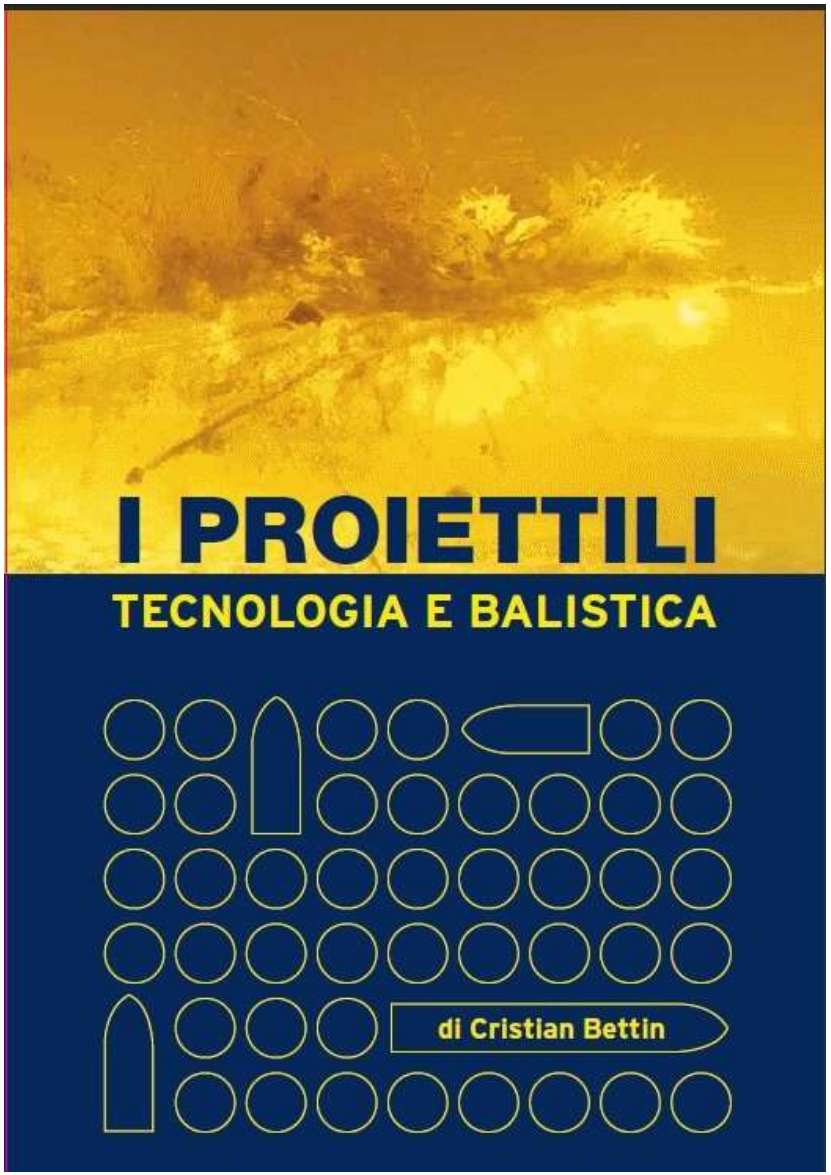
Pietra: tutte le slug di piombo si sono schiacciate e cadute entro 1-2 metri dalla pietra.

Cespugli…

- Maggiore sono massa e calibro del proiettile, minori sono le deviazioni.
- Proiettili lenti deviano maggiormente rispetto a quelli veloci.
- Le deviazioni sono più verticali che orizzontali



Per maggiori informazioni



I Proiettili –
Tecnologia e Balistica

Disponibile su richiesta
crisbettin@libero.it

Bibliografia in ordine numerico

	Autore	Titolo	Edizione	Anno
1	Backman M., Goldsmith W.	The mechanics of penetration of projectiles into targets	Int. J. Enging. Sci., 16, 1-A, 1-99	1978
2	Rottenberger I.	Abschlussbericht vom 15. Februar 2011 zum Forschungsvorhaben „Abprallverhalten von Jagdmunition“,	DEVA, Altenbeken	2011
3	Kneubuehl B.P.	Das abprallen von Geschossen aus forensischer Sicht	I.D. Universität Lausanne, Ecole des Sciences Criminelles	1999
4	Kneubuehl B.P.	Vergleich der Gefährdung durch abgeprallte bleihaltige und bleifreie Jagdgeschosse	Uni Bern	2011
5	Kneubuehl B.P.	Geschosse Bd. 1, Ballistik, Treffsicherheit, Wirkungsweise	Stocker-Schmid, Dietikon	1998
6	Kneubuehl B.P.	Geschosse Bd. 2, Ballistik, Wirksamkeit, Messtechnik	Stocker-Schmid, Dietikon	2004
7	Kneubuehl B.P., Coupland R.M., Rothschild M.A., Thali M.J	Wundballistik, Grundlagen und Anwendungen, 3. ed.	Springer-Verlag, Berlin	2008
8	Haag L.C.	Shooting incident reconstruction	Academic Press	2006
9	Burke T.W., Rowe W.F.	Bullet ricochet: A comprehensive Review	J.For.Sci 37:5, 1254-1260	1992
10	Jansen D.W., Levine R.T.	Bullet ricochet in automobile ceilings	J.For.Sci 27:1, 209-212	1982
11	Jordan G.E., Baratton D.D., Donahue H.C.H, Rowe W.F.	Bullet ricochet from gypsum wallboard	J.For.Sci 33:6, 1477-1482	1998
12	McConnel M.P., Triplet G.M., Rowe W.F.	A study of shotgun pellet ricochet	J.For.Sci 26:4, 699-709	1981
13	Rowe W.F., Burke T.W., Griffin R.	Bullet ricochet from concrete surfaces: Implications for Offier survival	J. Of pol. Sci. And Admin. Vol 16	1988
14	Sellier K.	Schusswaffen und Schusswirkungen II, 1.ed	Max Schmidt-Romhild	1977
15	Gold R.E., Schecter B.	Ricochet Dynamics for the Nine-Millimitre Parabellum Bullet	J.For.Sci 37:1, 90-98	1992
16	Donoghue E.R., Kalelkar M.B., Richmond J.M., Shakuntala S.T.	Atypical gunshot wounds of entrance: An empirical study	J.For.Sci 29:2, 379-388	1984
17	Hueske E.E.	Practical analysis and reconstruction of shooting incidents	CRC Press	2006
18	Thornton J.I., Crim D., Cashman P.J., Crim D.	The effect of tempered glass on bullet trajectory	J.For.Sci 31:2, 743-746	1986
19	Grey T.C.	The incredible bouncing bullet: Projectile exit through the entrance wound	J.For.Sci 38:5, 1222-1226	1993
20	DiMaio V.J.M.	Gunshot wounds, practical aspect of firearms, mallistics and forensic techniques	Elsevier	1985
21	Stahl C.J., Jones S.R., Johnson F.B., Luke J.L.	The effect of glass as an intermediate target on bullets: Experimental studies and report of a case	J.For.Sci 24:1	1979
22	Hartline P.C., Abraham G., Rowe W.F.	A study of shotgun ricochet from steel surfaces	J.For.Sci 27:3, 506-512	1982
23	Haag L.C.	The measurement of bullet deflection by intervening objects and the study of bullet behaviour after impact	CAC Newsletter	1988
24	Daneshi G.H., Johnson W.,	The ricochet of spherical projectiles off sand	Int. J.of mech. Sciences, 19, 491-497	1977
25	Hutchings I.M.	The ricochet of spheres andcylinders from the surface of water	Int. J.of mech. Sciences, 18, 243-247	1976

26	Kneubuehl B.P.	Physical and mathematical backgrounds of the stability theory of a spinning shell	J. Of Ballistics, 6, 1385-1398	1982
27	Sellier K.	Schusswaffen und Schusswirkungen I, 2.ed	Max Schmidt-Romhild	1982
28	Sellier K., Kneubuehl B.P.	Wundballistik und ihre ballistischen Grundlagen	Springer-Verlag, Berlin	1992
29	Soliman A.S., Reid S.R., Johnson W.	The effect of spherical projectile speed in ricochet off water and sand	Int. J.of mech. Sciences, 18, 279-284	1976
30	BIR C.A., STEWART S.J., WILHELM M.	Skin penetration assessment of less lethal kinetic energy munitions	J. Forens. Sci., Vol. 50 No. 6	2005
31	Hershey A. V.	The theory of projectile ricochet	NPG REPORT NO. 1041	1955
32	ZUKAS J.A, GASKILL B.	Ricochet of deforming projectiles from deforming plates	Int. J. Impact Eng. Vol. 18, No. 6, pp. 601-610	1996
33	Miloh T.	Oblique water entry of spherical shapes with special reference to the ricocheting phenomen	University of Tel Aviv	1990
34	Dorogoy A., Rittel D. and Brill A.	A study of inclined impact in polymethylmethacrylate plates	Int. J. Impact Engineering	2009
35	Z. Rosenberg, Z. Surujon, Y. Yeshurun, Y. Ashuach, E. Dekel	Ricochet of 0.3 AP projectile from inclined polymeric plates	Int. J. Impact Engineering, 31, 3, p.221-233	2005
36	Gupta N.K., Madhu V.	Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates	Int. J. Impact Engineering, 12, 3, 333-343	1992
37	Baillargeon Y. , Bergeron Y. , Corriveau D.	Ricochet behaviour prediction for military projectiles after impact with water	DRDC Valcartier Technical Report	
38	Mirshak R.	Assessing the risk of bullet ricochet from waves	Journal of Defense Modeling and Simulation	2011
39	Park M., Jung Y., Park W.	Numerical study of impact force and ricochet behavior of high speed water-entry bodies	Computers and Fluids, 32, 939-951,	2003
40	Houlden M.A.	The distribution of energy among bullet fragments of ricocheting pistol bullets	J Forensic Sci Soc, 34, 29–35	1994
41	Jauhari M.	Bullet ricochet from metal plates	J Crim Law Crim Police Sci, 60, 387–394	1969
42	Rathman G.A.	Bullet ricochet and associated phenomena	AFTE J., 19, 374–381	1987
43	De Kinder J., Lory S., Van Laere W., Demuynck E.	The deviation of bullets passing through window panes	Forensic Science International, 125, 8–11	2002
44	Haag L.C.	The measurement of bullet deflection by intervening objects and the study of bullet behaviour after impact	AFTE J., 19, 382–387	1987
45	Børvik T., Olovsson L., Dey S., Langseth M.	Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates	Int. J. Impact Engineering, 38, 577-589	2011
46	Johnson W.	Ricochet of non-spining projectiles, mainly from water, part 1: some historical contributions	Int. J. Impact Engineering, 21, 15-24	1998
47	Johnson W.	Ricochet of non-spining projectiles, mainly from water, part 2: an outline of theory and warlike applications	Int. J. Impact Engineering, 21, 25-34	1998
48	Mazzoldi, Nigro, Voci	Fisica, meccanica - termodinamica, vol.1	EdisES, Napoli	1995
49	Sellier K.	Doppelte Rikochettier-Marken	Z Rechtsmed 98 • 241-244	1987
50	Karger B., Joosten U.	A case of “boomerang” bullet ricochet	Int J Legal Med 115 :70–71	2001
51	M. H. Pol, A. Bidi, A.V. Hoseini, G.H. Liaghat	Analysis of Normal Penetration of Ogive - Nose Projectiles into Thin Metallic Plates	World Academy of Science, Engineering and Technology 50	2009
52	R. Mirshak	Collateral Damage Risk: Quantifying the Water Surface Bullet Ricochet Problem	Centre for Operationsl Research and Analysis Defence	2010

			Research and Development Canada	
53	Peter J. T. Knudsen • J0rgen Svender	Doppler radar velocity measurements for wound ballistics experiments	Int J Leg Med (1994) 107:1-6	1994
54	J. Dean, C.S. Dunleavy, P.M. Brown, T.W. Clyne	Energy absorption during projectile perforation of thin steel plates and the kinetic energy of ejected fragments	Int. J. Impact Engineering, 36	2009
55	Burnett B.	Nose or Base Strike: Analysis of bullet orientation in a ricochet	International Association for Microanalysis 2003. 4(3):14-15.	2003
56	Paul J. Cashman, D. Crim.	Projectile Entry Angle Determination	Journal of Forensic Sciences,JFSCA, Vol. 31, No. 1, Jan. 1986, pp. 86-91.	1986
57	Spitz W.	Rikoschett- oder Kontaktschussverletzung	Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med. 66, 153--160	1970
58	Tadd T. Truscott, David N. Beal, Alexandra H. Techet	Shallow angle water entry of balistic projectiles	Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation	2009
59	Sellier K.	Uber Geschossablenkung und Geschossdeformation	Z Rechtsmed 69 • 217-251	1971
60	Shlien D. J.	Unexpected ricochet of spheres off water	Experiments in Fluids 17 (1994) 267-271	1994
61	Sellier K.	Verletzungsmoglichkeiten von Geschossen, die an Sand oder Beton abgeprallt sind	Z. Rechtsmedizin 78, 149-158 (1976)	1976
62	Kampmann H., Kijewski H.	Untypische Einschußverletzungen -Ein kasuistischer und experimenteller Beitrag	Z Rechtsmed (1986) 97 : 185-193	1986
63	Schwarzacher W.	Analyse einer Schussverletzung	Dt. Z. gerichtl. Med. 21, 186-189	1933
64	Federal Bureau of Investigation	Bouncing Bullets	FBI Law Enforcement Bulletin, Oct. 1969, pp. 2-6 et 20-23.	1969
65	Ipson T., Recht R., Schmeling W.	Effect of priojectile nose shape on ballistic limit velocity, residual velocity and ricochet obliquity	Denver Research Institute	1973
66	Zook J., Slack W., Izdebski B.	Ricochet and penetration of steel spheres impacting aliminum targets	ARBRL-MR-03243	1983
67	Jauhari M.	Mathematical model for bullet ricochet	J. Crim. Law, Criminol., Pol. Sci., 61	1971
68	Xiao J.-H	Hard flying objector contact with surface of fluid as a ricochet	Mathematical and Computational applications, Vol 15, No 5	2010
69	Garrison, D.H.	Crown & Bank: Road Structure as it Affects Bullet Path Angles in Vehicle Shootings	AFTE J., Vol 30, No. 1, pp. 89–93.	1998
70	Haag L.C.	Bullet Ricochet: An Imperical Study and a Device for Measuring Ricochet Angle	AFTE J., Vol. 7, No. 3, pp. 44–51	1975
71	Jauhari, M.	Approximate Relationship Between the Angles of Incident and Ricochet for Practical Application in the Field of Forensic Science	J. of Criminal Law, Criminology and Police Science, Vol. 62, pp. 122-125	1970
72	Mitosinka, G.T.	A technique for determining and illustrating the trajectory of bullets	J Forensic Sci Soc, 11:1, 55-61	1971
73	Cranz, K. J.	Lehrbuch der Ballistik, vol. 1	Ristampa anastatica	1910
74	PTI	Technische Richtlinie (TR) - Patrone 9 mm x 19, schadstoffreduziert -Stand: September 2009	Polizeitechnisches Institut (PTI) der Deutschen Hochschule der Polizei (DHPol)	2009
75	Nennstiel R.	Study of bullet ricochet on a water surface	AFTE J., 16:3	1984
76	Anonimo	Beschuss von PKW Frontscheiben	Documento riservato	1997
77	Anonimo	Geschossreflektion an harten Oberflächen	Documento riservato	1997
78	Anonimo	Reflektion von .22lr. Geschossen anharten Oberflächen	Documento riservato	1997
79	Anonimo	Das abprallen von Geschossen auf Asphalt	Documento riservato	2012

79	Haag L.C.	Bullet ricochet from water	AFTE J., Vol. 11, No. 3, pp. 26–34	1979
80	Haag L.C.	Bullet impact spals in frangible surfaces	AFTE J., Vol. 12, No. 4	1980
81	Haag L.C.	Bullet penetration and perforation onf sheet metal	AFTE J., Vol. 29, No. 4, p 431-459	1977
82	Bialonski H.	Geschossablenkung in Homogenen Medien	I.D. Bonn	1974
83	Haag L.C.	An inexpensive Method to assess bullet stability in flight	AFTE J., 23,3, 831–835	1991
84	Heusgen-Schlotter C., Schlotter K.	Untersuchungen über die Winkelabhängigkeit von Restgeschwindigkeit und Schusskanallänge bei Schrägschüssen durch Glasscheiben	I.D. Heidelberg	1983
85	Reichert K.H.	Geschoßablenkung durch Glasscheiben	I.D. Bonn	1974
86	Patty J., McJunkins S., Murdock J.	Associating recovered bullets with ricochet sites	AFTE J., 2, 28-32	1975
87	Anonimo	Schuss auf Fensterglas: Experiment und Simulation	Documento riservato	
88	Stiefel D.	Geschossablenkung bei Holz	PVT, 9, 288-291	1985
89	Löcher T.	Der Büchsenschuß durch Hindernisse	F.H. Weihenstephan	1996
90	Johnson W., Reid S.R.	Ricochet off spheres off water	J.of mech. Eng. Sciences 17, 2, 71-81	1975
91	Mirshak R.	Collateral Damage Risk: Quantifying the Water Surface Bullet Ricochet Problem	DRDC Valcartier Technical Report	2010
92	Baillargeon Y., Eng M., Bergeron G.	Prediction of projectile ricochet behavior after water impact	J Forensic Sci, vol. 57, no.6, p.1556-1561	2012