

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di laurea *Magistrale* in Ingegneria Aerospaziale



ANALISI E RICOSTRUZIONE BIDIMENSIONALE DELLA NUBE DI
DETRITI GENERATA DA UNO SCUDO WHIPPLE SOGGETTO AD
IMPATTI IPERVELOCI

Relatore: Dr. LORENZO OLIVIERI

Correlatore: Prof. ALESSANDRO FRANCESCONI

Laureando: ALAIN DALLA VIA

Matricola N. 2053138

A.A. 2022/2023

A te, esteta di stelle.

Per Frodo, portatore dell'Anello.

INDICE

1. Introduzione	
2. Whipple Shield	10
2.1 Limite balistico	
2.2 Sperimentazione a terra	
2.3 Whipple alternativi	
3. Proiettile e frammentazione	21
3.1 Modello di frattura	
3.2 Modello di Piekutowski	
4. Diffusione della nube	32
4.1 Modelli numerici	
4.2 Modello di Schäfer	
4.3 Modelli per il diametro del foro nel bumper	
5. Ipotesi e procedure	39
5.1 Cinematica e dinamica	
5.2 Ricostruzione bidimensionale e software	
6. Analisi spari	46
6.1 Successi	50
6.1.1 Sparo 9245	
6.1.2 Sparo 9250	
6.1.3 Sparo 9263	
6.1.4 Sparo 9266	
6.1.5 Sparo 9264	
6.2 Sabot failure	85
6.2.1 Sparo 9252	
6.2.2 Sparo 9255	
6.2.3 Sparo 9259	
6.3 Pluri sabot failure 9261	106
6.4 Camera failure 9247	112
6.5 Camera delay 9243	116
7. Confronto spari	119

7.1 Bumper con spessore 1 mm	123
7.1.1 Velocità	
7.1.2 Angolo di apertura	
7.1.3 Crateri e diametro del foro	
7.2 Bumper con spessore 1.5 mm	131
7.2.1 Velocità	
7.2.2 Angolo di apertura	
7.2.3 Crateri e diametro del foro	
7.3 Bumper con spessore 2 mm	138
7.3.1 Velocità	
7.3.2 Angolo di apertura	
7.3.3 Crateri e diametro del foro	
7.4 Grafici cumulativi	143
8. Conclusione	147

Bibliografia

Ringraziamenti

ABSTRACT

L'eccessivo sovrappopolamento dell'ambiente spaziale ha portato, nel corso degli anni, ad una minaccia via via crescente verso le attività umane in orbita terrestre. La causa risiede nel sempre maggior numero di detriti spaziali ivi presenti; si tratta di frammenti di origine artificiale che, in caso di collisione, minacciano l'integrità delle strutture spaziali, così come l'incolumità delle eventuali persone a bordo. L'implementazione di scudi rientra tra i sistemi passivi per la protezione degli spacecraft dagli impatti. Lo Scudo Whipple è un tipico sistema di protezione e schermatura che consiste in due piastre tra di loro separate. I detriti spaziali impattano sulla piastra anteriore, vengono frammentati e si genera una nuvola di detriti, che si espande e impatta contro la piastra posteriore, causando un danno in genere inferiore rispetto a sistemi monolitici. Lo studio della forma e della propagazione della nuvola e la sua interazione con le strutture successive sono di fondamentale importanza per ideare sistemi di protezione sempre più efficaci. In questa tesi viene presentato uno studio relativo alla diffusione di 11 nubi di detriti all'interno di scudi Whipple, dalla perforazione della prima piastra all'impatto con la piastra retrostante. Per ogni sparo è stata anche ottenuta la ricostruzione bidimensionale della traiettoria e della dimensione dei principali frammenti.

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Lo spazio costituisce un immenso ambiente ricco di risorse, opportunità scientifiche e, soprattutto, economiche. Nonostante sia spesso percepito come un vasto vuoto desolato e oscuro, in realtà la Terra è circondata da una miriade di oggetti artificiali, principalmente satelliti, a fianco di elementi naturali come micrometeoriti e polvere. I satelliti, oltre alla loro importanza nella ricerca scientifica, sono diventati elementi indispensabili nella vita quotidiana umana, svolgendo un ruolo fondamentale nei settori delle comunicazioni, dell'intrattenimento, della navigazione, della meteorologia, del monitoraggio ambientale, del commercio e della sicurezza nazionale. Tuttavia, se questi manufatti artificiali non vengono attentamente controllati e monitorati in modo continuo, potrebbero involontariamente innescare eventi indesiderati che rappresenterebbero una minaccia significativa per la sopravvivenza nello spazio e per la sua colonizzazione.

La visione capitalistica dello spazio ha portato a un notevole aumento del numero di lanci di oggetti artificiali, tra cui satelliti, sonde e strumentazione, superando la cifra di 6000 unità fin dall'inizio dell'era spaziale e dell'esplorazione umana [4]. Attualmente, sono presenti in orbita oltre 36.000 oggetti di dimensioni superiori ai 10 cm. Questa categoria comprende una vasta gamma di elementi spaziali essenziali per l'esplorazione umana, tra cui satelliti operativi, satelliti defunti che non hanno eseguito manovre di "disposal", oggetti legati a missioni terminate, stadi secondari di vettori spaziali e, sfortunatamente, frammenti di satelliti e razzi causati da esplosioni e collisioni. Allo stesso modo, questa categoria comprende anche particelle create da propellenti rilasciati nell'ambiente spaziale, particelle risultanti da corrosioni delle superfici dovute all'esposizione ai raggi UV e particelle rilasciate a causa dell'outgassing e legate all'ossigeno atomico.

I tipici sistemi di lancio la cui missione è di posizionare satelliti o payload alternativi in orbite LEO (Low Earth Orbit) o più alte, presentano due o più stadi. Il primo stadio, ad esempio il booster, potrebbe essere riutilizzato ed è generalmente rilasciato all'interno dell'atmosfera. Il secondo e, eventualmente, terzo stadio, invece, sono rilasciati nello

spazio, senza possibilità di essere recuperati. A seguito del completamento del loro obiettivo, questi stadi più alti non contengono propellente e vengono classificati, generalmente, come “defunti”. Questi stadi, non più utili al proseguimento della missione, permangono nello spazio, orbitano attorno al pianeta e vanno ad ampliare quella classe di elementi che prende il nome di “detriti” spaziali.

I satelliti che hanno raggiunto il termine della loro vita operativa o che sono affetti da malfunzionamento potrebbero contenere ancora del propellente o altre fonti di energia, come batterie, in grado di causare esplosioni se sottoposte a specifiche condizioni. La luce solare e i micrometeoriti degradano continuamente i satelliti, e possono portare alla nascita di cricche, perdite di propellente e, eventualmente, nei casi di degrado più grave, esplosioni dell'intero sistema. I frammenti prodotti da un'esplosione si diffondono a macchia d'olio lungo l'orbita percorsa dal satellite, e possono essere protagonisti di collisioni con altri elementi artificiali.

Tra gli elementi di origine naturale presenti in orbita che possono avere un effetto diretto sulla formazione dei detriti spaziali, si trovano i micrometeoriti, che si configurano come dei piccoli frammenti di roccia. Tipicamente con masse inferiori a 1 g, sono i lasciti di rocce di dimensioni maggiori e polveri presenti durante la formazione del sistema solare e possono essere ampiamente rinvenuti in orbita attorno alla Terra oppure compresi tra le orbite di più pianeti.

L'eccessivo sovrappopolamento dello spazio e l'ostentazione della potenza missilistica di alcune nazioni come USA, Russia, Cina e India, seppure in misura minore ma comunque estremamente rilevante, hanno contribuito a rendere l'ambiente spaziale sempre più ostile per le nuove missioni spaziali [4]. La causa di ciò, e anche conseguenza, risiede principalmente, come già detto, nei detriti spaziali: sono tutti quei frammenti orbitanti di origine artificiale che possono portare a collisioni catastrofiche, minacciando l'integrità delle strutture spaziali, così come l'incolumità delle eventuali persone a bordo.

La dimensione è un aspetto essenziale per quanto riguarda la classificazione dei detriti spaziali. Generalmente, un detrito di dimensioni maggiori presenta una maggiore massa, quindi ha un più alto potenziale di danneggiare gli altri oggetti nello spazio. Ad esempio, un frammento di 80 g orbitante in LEO possiede un'energia cinetica equivalente all'energia chimica contenuta in un kg di Tritolo.

Ed è sempre la dimensione di un frammento il parametro chiave che ne determina la tracciabilità o meno. Il tracking visivo dei detriti non è possibile a causa della loro dimensione e taglia, e, per questo motivo, i sistemi RADAR sono di largo impiego. Un inconveniente dei RADAR è che la sensibilità diminuisce con il quadrato della distanza, e, inoltre, è la sezione trasversale del detrito che gioca un ruolo fondamentale per la sua tracciabilità: maggiore è la sezione trasversale, più alta è l'energia riflessa a terra dal detrito. Il NORAD (North American Aerospace Defense Command), l'SSN (Space Surveillance Network), e il SSS (Space Surveillance System) russo sono le agenzie che tracciano continuamente i detriti spaziali. Sia SSS che SSN possono tracciare quei detriti che hanno una sezione trasversale di 0.01 m^2 . Attualmente nello spazio si contano 36.500 detriti spaziali con dimensioni maggiori di 10 cm, 1.000.000 di dimensioni comprese tra 1 e 10 cm, e si stimano 130.000.000 di frammenti minori di 1 cm.

La maggior concentrazione di detriti spaziali si trova nelle orbite terrestri basse (LEO), aumentando così la probabilità di collisioni in questa regione. Eventi come il test missilistico antisatellite cinese del 2007 e una collisione tra satelliti avvenuta nel 2009 hanno ulteriormente peggiorato la situazione in questa fascia orbitale. Le collisioni con i detriti spaziali possono avvenire da qualsiasi direzione e a velocità superiori a 14 km/s. E' importante sottolineare comunque che il drag atmosferico, nelle orbite più basse, tende a ripulire l'ambiente dai detriti, rallentandoli e facendoli rientrare in atmosfera. Questo è il motivo per cui le missioni con equipaggio spesso operano a quote prossime ai 400 km, al fine di ridurre il rischio di collisioni [4].

A causa delle velocità ipersoniche estremamente elevate a cui viaggiano nel vuoto i detriti, anche un singolo impatto con una particella molto contenuta rappresenta un danno serio, se non catastrofico, alle strutture spaziali, come evidenziato in Fig. 1, e crea una nuvola di frammenti di materiale al seguito, che si configura come una vera e propria pioggia di proiettili. Questi si diffondono nell'orbita, aumentando il rischio di ulteriori collisioni e la conseguente formazione di altre nuvole di detriti. La collisione incontrollabile tra satelliti defunti o con altri detriti spaziali, che causa un incremento massivo della densità dei detriti, prende il nome di Sindrome di Kessler. Proposta dallo scienziato della NASA Donald J. Kessler nel 1978, questo effetto domino di eventi può essere innescato da un singolo satellite con sufficiente massa che collide con un altro grande satellite, o con la ISS. La teoria attesta che una continua operatività con

noncuranza nell'ambiente orbitale porta alla potenziale formazione di una "cintura di detriti" nell'atmosfera. I detriti continueranno a frammentarsi e collidere li uni con gli altri a cascata, creando così un campo di detriti non navigabile che circonda il pianeta e rendendo tutte le attività spaziali praticamente impossibili [8].



Fig. 1 Effetto dovuto ad un impatto iperveloce su una piastra bersaglio

Per tutelare l'ambiente spaziale dalla crescente minaccia dei detriti, molte nazioni, tra le quali le partecipanti più attive nell'esplorazione spaziale, hanno introdotto politiche, regolamentazioni e standard da rispettare al fine di mitigare l'accumulo e prevenire collisioni disastrose. Queste politiche di difesa, però, sono limitate da carenze sia economiche che tecnologiche relative alla capacità vera e propria di rimuovere attivamente i detriti. Come mai prima d'ora, nell'esplorazione spaziale e nel problema dei detriti spaziali sono state coinvolte così tante nazioni. La produzione di rifiuti spaziali è un interesse serio a causa delle gravi conseguenze che rischiano di ostacolare le ambizioni dell'esplorazione spaziale oltre la fascia LEO. Non a caso, la sindrome di Kessler viene comunemente citata in difesa di più rigide regolazioni nella prevenzione dei detriti spaziali. Sono state condotte numerose illustri ricerche sulla severità dei detriti spaziali, e tutte suggeriscono che sia indispensabile incentivare la rimozione dei detriti e minimizzare la probabilità di collisione, per rendere l'ambiente spaziale ancora vivibile.

Al di là dell'aspetto legislativo, a difesa dei velivoli spaziali sono state proposte dai ricercatori soluzioni sia attive che passive. Le soluzioni attive richiedono che il satellite

consumi energia, come può essere il propellente, per eseguire le cosiddette “avoidance manouvers”, ovvero manovre evasive. Queste sono attuabili solo per prevenire la collisione con quei detriti abbastanza grandi da poter essere tracciati, come quelli maggiori di 10 cm. Un impatto con detriti di tali dimensioni sarebbe, senza dubbio, catastrofico.

Per i detriti di dimensioni minori, e per quelli non tracciabili sotto il cm di diametro, l'adozione di manovre evasive potrebbe non rappresentare una soluzione conveniente. Questo perché tali manovre richiedono l'uso di propellente, che è prezioso per le operazioni di riposizionamento in orbita e per le manovre evasive rivolte ai detriti di dimensioni maggiori. Per questo, con i detriti più piccoli si può prevedere una difesa passiva, che consiste nell'implementazione di scudi per difendere la struttura del satellite; la protezione è rivolta anche ai micrometeoriti, e, più in generale, agli impatti iperveloci, ovvero quegli impatti a velocità maggiori di 3.0 km/s. La schermatura passiva prevede due soluzioni principali ben distinte: la prima è lo scudo monolitico, che consiste in una piastra alloggiata a fianco della parete del satellite, e che ha lo scopo di attutire il colpo prodotto dal detrito e frammentarsi al posto della parete retrostante. L'altra soluzione, più sofisticata, è lo scudo Whipple.

Lo Scudo Whipple è un tipico sistema di protezione e schermatura. Consiste in un sistema di due piastre tra di loro separate da un'intercapedine. I detriti spaziali impattano sulla piastra anteriore, subiscono rotture e cambiamenti di fase e si genera una nuvola di detriti, che si diffonde e impatta contro la piastra retrostante. Lo studio della diffusione dei detriti posteriori alla perforazione della prima piastra, chiamata bumper, e l'interazione con le strutture successive sono di fondamentale importanza per ideare protezioni sempre più efficaci.

L'obiettivo principale di questa tesi è la presentazione di uno studio relativo alla diffusione di 11 nubi di detriti, dalla perforazione con il bumper all'impatto con la piastra testimone retrostante. Gli spari sono stati eseguiti nel laboratorio di propulsione e ipervelocità del CISAS, in ambiente controllato e con strumentazione all'avanguardia. Per ogni sparo si presenta un'approssimata ricostruzione bidimensionale, in cui si traccia la traiettoria di molti frammenti catalogati sulla base della dimensione. Infine, si

raccogliono i dati all'interno di grafici con i quali si confrontano gli andamenti di varie proprietà, a seconda dello spessore dei bumper coinvolti nella sperimentazione.

Per comprendere appieno il fenomeno di formazione e diffusione di una nuvola di detriti, verranno presentate precedentemente alcune nozioni di base circa la strumentazione impiegata e i fenomeni che si verificano, sia a carattere macroscopico, sia microscopico. In particolare, si approfondisce la funzionalità di uno scudo Whipple, protagonista dei nostri test; si accenna alle modalità di frammentazione di una sfera, che ha lo scopo di simulare un detrito spaziale; e si discutono le principali teorie che trattano la diffusione della nuvola di detriti.

Questo studio si prefigge di apportare nuove conoscenze nel campo dell'analisi delle nuvole di detriti, enfatizzando il ruolo delle dinamiche cinematiche in questo contesto. L'analisi dei frammenti risultanti da impatti ipersonici è di grande rilevanza nel campo della protezione strutturale e per la valutazione del danno su elementi retrostanti, e contribuirà alla comprensione complessiva di tali eventi.

Capitolo 2

WHIPPLE SHIELD

Il Whipple Shield, denominato anche dual-wall a causa della sua particolare configurazione, è un sistema di protezione passiva ampiamente utilizzato nei velivoli spaziali per resistere all'impatto iperveloce dei detriti e dei micrometeoriti. Il sistema prende il nome dal suo inventore, Fred Whipple, che nel 1947, propose di posizionare una sottile piastra metallica all'esterno della parete di un veicolo spaziale per rompere un meteorite in arrivo e ridurre il successivo carico sulla parete strutturale [9]. Questo scudo si distingue dal classico scudo monolitico in quanto dispone di due piastre separate da un gap, detto stand-off, visibile in Fig. 2; la piastra anteriore è denominata “bumper”, mentre quella retrostante, che appartiene di fatto alla struttura del satellite, prende il nome di “rear plate”.

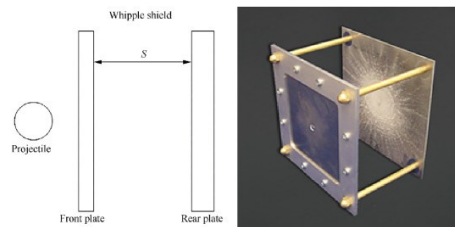


Fig. 2 Scudo Whipple

Il bumper ha la funzione di piastra sacrificale, ovvero deve interporre tra la minaccia impattante, che può essere il detrito, e la parete del satellite. Quando un proiettile impatta su una piastra a velocità ipersonica, sia il proiettile che la piastra si frammentano, generando posteriormente alla piastra una nuvola di detriti che continua ad espandersi nella direzione del moto. Il potenziale danno che tale nuvola può arrecare tramite la collisione con una struttura è decisamente meno critico se paragonato all'impatto diretto con il proiettile. È questo il principio di funzionamento su cui si basa lo scudo Whipple: il bumper, con l'impatto del proiettile su di esso, ha lo scopo di iniziare la frammentazione

del proiettile, caratterizzata dalla formazione e propagazione di onde d'urto e dal possibile cambiamento di fase dei materiali a contatto. La formazione della nube di detriti è un processo essenziale per questo sistema di schermatura: disperde la quantità di moto e riduce l'energia cinetica del proiettile. Ne consegue un minor pericolo per le strutture successive, in quanto il carico concentrato in un unico punto viene distribuito in un'area estesa.

Le nuvole di detriti sono prodotte dalla moltitudine di pezzi frantumati sia del proiettile, che del materiale della piastra bersaglio. Nel range dell'ipervelocità, il proiettile vaporizza, fonde, e si frammenta completamente oppure solo in parte. Subito dopo l'impatto, si verifica la propagazione di onde d'urto sia nel proiettile che nel materiale del bersaglio, e questo causa un riscaldamento adiabatico irreversibile; la pressione dell'urto è rilasciata isoentropicamente subito dopo che l'onda d'urto raggiunge la superficie libera. Il caricamento e successivo rilascio dell'energia interna accumulata nell'urto determina se lo stato di frammentazione del detrito sia solido, liquido o gassoso; infatti, per determinate velocità di impatto, la nuvola di detriti può contenere oltre che frammenti solidi, anche particelle liquide o di vapore. I frammenti solidi e le particelle liquide causano condizioni di carico concentrato in un punto che possono portare alla penetrazione della rear plate, alle spalle del bumper [5].

Il meccanismo di protezione dello scudo Whipple contro un proiettile iperveloce comprende tre fasi: la prima è l'interazione tra il detrito e il bumper, in cui avviene la frantumazione e il cambio di fase; la seconda, su cui si concentrerà questa tesi, è la formazione e la diffusione della nube di detriti generata dall'impatto; infine, l'ultima fase è l'interazione della nube con la piastra posteriore.

È importante assicurare che la forza dell'onda d'urto sia sufficientemente alta per ottenere una frammentazione, o ancora meglio una fusione, delle particelle pericolose su larga scala. I tre fattori chiave che determinano la buona riuscita della schermatura sono lo spessore del bumper rispetto alla dimensione della particella impattante, il contrasto tra densità e coesione del materiale del bumper in base al materiale del detrito, e la velocità con il quale avviene l'impatto. È altresì auspicabile ridurre al minimo la massa della piastra posteriore e della piastra sacrificale per i costi relativi al lancio.

2.1 LIMITE BALISTICO

Gli impatti in piastre sottili, dove si verifica facilmente perforazione completa, sono stati numericamente trattati da molti ricercatori. Dal punto di vista del design, probabilmente le più importanti condizioni di impatto iperveloce sono quelle vicino al limite balistico del bersaglio, ovvero l'evento limite in cui il bersaglio è appena perforato a causa dell'impatto con il proiettile. Le prestazioni di protezione di una struttura sono solitamente caratterizzate dalla curva del limite balistico o dall'equazione di limite balistico, che viene utilizzata per valutare le prestazioni dello scudo. La completa penetrazione (perforazione) e il distacco di materiale/frammentazione della piastra posteriore sono i due criteri di failure più comuni. I limiti balistici corrispondenti a diversi criteri di fallimento sono generalmente diversi. Il limite balistico può essere espresso sotto forma di valore di soglia per la velocità del proiettile, per la dimensione del proiettile, e per lo spessore della piastra. La creazione della curva del limite balistico e dell'equazione del limite balistico è il risultato di una combinazione di test e nozioni di scienza dei materiali, che porta grandi vantaggi per la progettazione ingegneristica della struttura di protezione.

Fondamentalmente, una curva di limite balistico potrebbe essere divisa in tre regimi: il regime a bassa velocità (balistico), il regime di frantumazione e il regime di ipervelocità. Nel regime balistico il proiettile si mantiene intatto, mentre nel regime di ipervelocità, o regime cinetico, il proiettile si rompe completamente o si verifica addirittura una transizione di fase [7].

La curva di limite balistico può rappresentare la curva dei punti relativa alla dimensione del frammento più piccolo che può perforare il bersaglio ad una data velocità, mentre lo spessore di limite balistico rappresenta lo spessore critico del bumper per il quale lo scudo cede se sottoposto all'impatto. La Fig. 3 mostra la tipica curva di limite balistico degli scudi Whipple metallici nel caso in cui il materiale del proiettile e del bumper sia, per entrambi, alluminio. La regione di piano individuata sopra la curva identifica gli spessori dei bumper che resistono all'impatto, mentre per le condizioni che individuano punti al di sotto della curva avviene perforazione del bumper. Nella zona antecedente al primo

picco il proiettile rimane intatto, quindi maggiore è la velocità di impatto, maggiore è la sua capacità di penetrazione, e di conseguenza, maggiore deve essere lo spessore del bumper per potergli resistere. Nel vertice della curva, il proiettile si frantuma (Shatter), genera una nuvola di detriti, e la sua capacità di penetrazione inizia a diminuire. Man mano che la velocità dell'impatto continua ad aumentare, però, a causa della completa frammentazione e dell'aumento dell'energia cinetica della nube di detriti, la capacità di penetrazione aumenta nuovamente. La curva raggiunge il nuovo picco quando il materiale della nube di detriti inizia a fondere (Incipient melt). Alla comparsa dei frammenti fusi, la capacità di penetrazione diminuisce nuovamente fino alla completa fusione della nuvola di detriti (Complete melt) [9].

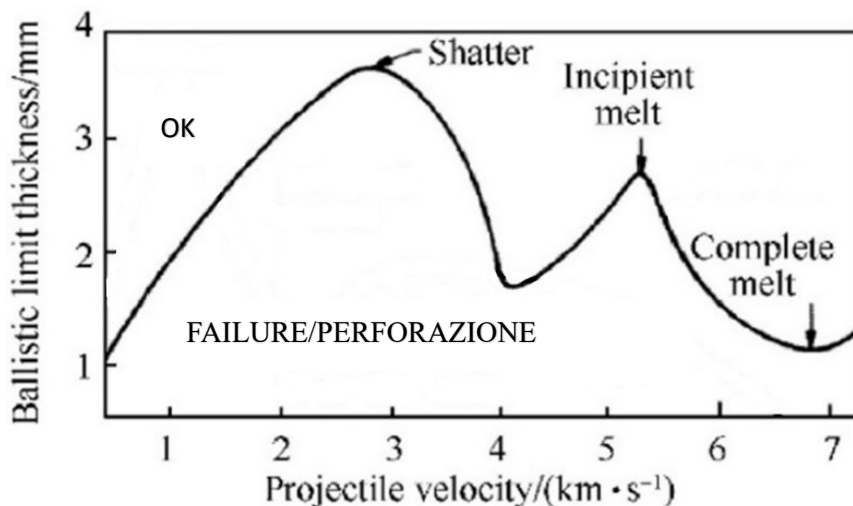


Fig. 3 Curva di limite balistico in funzione dello spessore del bumper

L'equazione di limite balistico è la trasposizione analitica della curva di limite balistico. Tale equazione per lo scudo Whipple in metallo fu originariamente proposta da Cour-Palais all'Hypervelocity Impact Symposium nel 1969, e Christiansen la modificò nel 2001.

Il modello di Christiansen rappresenta una versione alternativa dell'equazione di limite balistico appena trattata, in quanto vede non più lo spessore del bumper come parametro critico, bensì il diametro del più piccolo frammento che può penetrare il bersaglio (Fig.

4). Per avere un'idea più chiara, la vulnerabilità della parete aumenta al diminuire del parametro d . Nella zona in cui il proiettile rimane intatto, un aumento della velocità di impatto corrisponde ad una maggiore capacità penetrativa e quindi una diminuzione del diametro del frammento in grado di penetrare la struttura. Il diametro più piccolo si ha in corrispondenza dell'inizio della frammentazione del proiettile stesso. A quel punto, il proiettile perde capacità penetrativa in quanto, con la frammentazione, l'energia cinetica media dei frammenti diminuisce. Questo andamento, approssimato tramite interpolazione lineare, termina quando il proiettile è completamente frammentato. Dopo ciò, all'aumentare della velocità di impatto, la capacità penetrativa torna ad aumentare fino al punto di fusione incipiente, non rappresentato nel grafico [9].

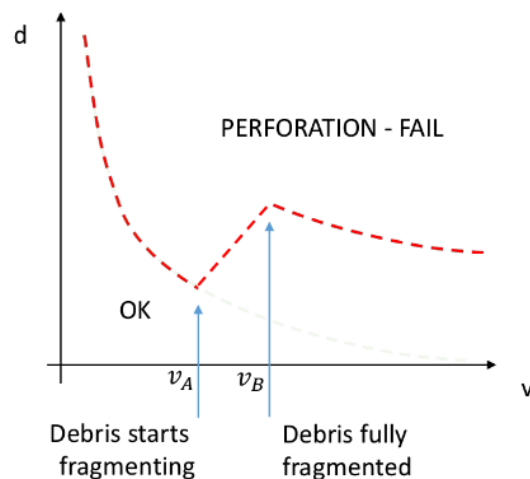


Fig. 4 Curva di limite balistico in funzione della dimensione del detrito

2.2 SPERIMENTAZIONE A TERRA

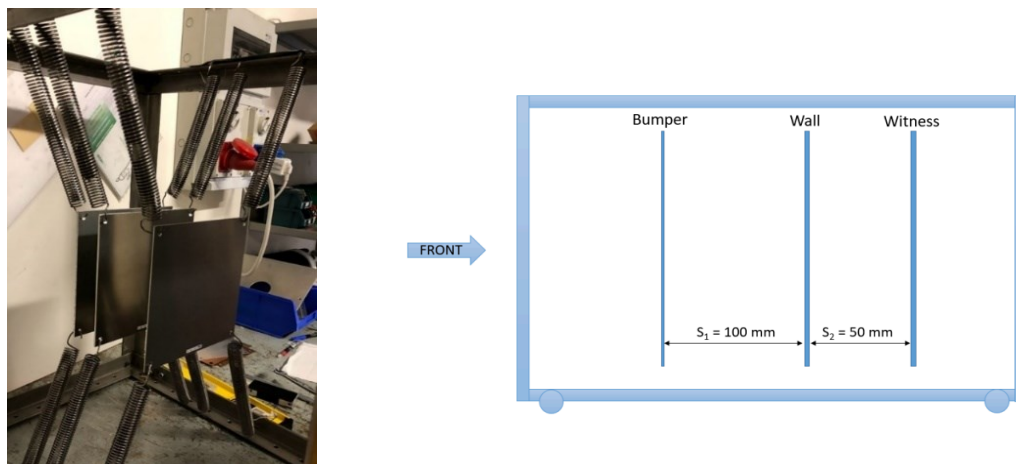


Fig. 5 Sistema di piastre usato nel laboratorio

Nell'esperimento a terra, effettuato nel laboratorio di propulsione e ipervelocità del CISAS, un proiettile sferico viene accelerato dall'attrezzatura di lancio, ovvero un cannone a gas bi-stadio, per colpire la struttura di protezione, schematizzata in Fig. 5, sotto la presenza di apparecchiature di monitoraggio. L'esperimento a terra è un metodo essenziale per valutare la capacità di protezione dello scudo, e permette di concentrare l'attenzione sull'interazione del proiettile con il bumper, sulla diffusione della nube e sull'interazione di quest'ultima con la parete posteriore, denominata "Wall". Quest'ultima è solitamente costituita da una piastra specializzata, utile per valutare il fenomeno dell'impatto. La terza piastra, che rappresenta idealmente la scatola di un componente sensibile, è indicata con "Witness".

Proiettili e piastre in alluminio sono comunemente utilizzati per esperimenti a terra, similmente all'ambiente dei detriti spaziali e al materiale del veicolo spaziale (di solito si presuppone che la densità dei detriti sia pari a $2,8 \text{ g/cm}^3$, ovvero costituiti anch'essi di alluminio). Inoltre, per i numerosi micrometeoriti presenti nello spazio, sono stati studiati, in laboratori specializzati, anche proiettili di altri materiali, come acciaio, ghiaccio e rocce [9].

La transizione di fase del proiettile e della piastra è uno dei fenomeni più importanti dell'impatto iperveloce, ed è anche uno dei meccanismi di protezione dello scudo Whipple. La capacità di penetrazione del frammento solido è molto superiore a quella del frammento fuso e del frammento vaporizzato. Una semplice spiegazione della ridotta capacità di penetrazione dei frammenti liquidi e gassosi è che l'“ammorbidimento” termico causato dall'onda d'urto riduce l'energia cinetica media della nuvola di detriti. Ma anche nel caso di frammenti vaporizzati, il carico impulsivo potrebbe causare la flessione e la scheggiatura delle strutture successive.

Per l'impatto di alluminio su alluminio, il materiale inizierebbe a fondere per una velocità di impatto pari a circa 5 km/s, e inizierebbe a vaporizzare a 10 km/s [9]. Per l'impatto in orbita tra i detriti spaziali e la struttura di protezione, che avviene a velocità molto maggiori di quelle ottenibili in laboratorio, la fusione e la vaporizzazione sono dominanti nella nube di detriti.

Per l'impatto dei detriti orbitali contro le pareti dei veicoli spaziali, il danno arrecato deve essere rilevato e valutato. Per fare ciò, attualmente esistono metodi di rilevamento basati sull'emissione acustica, sull'uso di sensori con film piezoelettrici in polivinilidenefluoruro (PVDF) e sensori a griglia resistiva, utili per consentire il rilevamento del danno, la sua posizione e la misurazione del grado di danneggiamento dei veicoli spaziali [9].

In generale, la formazione del foro di perforazione può essere divisa in due fasi: punzonatura nella fase iniziale e rimozione continua del materiale nella fase successiva. Il materiale sui bordi dei fori è il materiale rimanente dopo la rimozione. Piekutowski ha sviluppato qualitativamente una descrizione della sequenza di formazione dei fori secondo il sistema di onde d'urto agente nel bumper.

Lo studio di Piekutowski ha dimostrato che il diametro del foro dipende fortemente dalla resistenza del materiale del bumper, e che la velocità dell'impatto ha un effetto significativo sul diametro del foro quando il rapporto t/D (spessore bumper su diametro del detrito) è elevato. Myers, invece, ha scoperto che il diametro del foro nella piastra riscaldata è significativamente maggiore di quello della stessa piastra a temperatura ambiente [9].

Fondamentalmente, gli studi sulle prestazioni di perforazione in condizioni estreme sono relativamente limitati. L'analisi teorica del meccanismo di formazione dei fori e la previsione della loro dimensione sono importanti, e potrebbero fornire alcuni riferimenti

per il meccanismo di formazione delle nubi di detriti. Inoltre, la perforazione del bumper determina direttamente il contributo di massa dei frammenti del bumper alla nube di detriti, e lo studio della perforazione è utile anche per la previsione della distribuzione caratteristica della nube di detriti.

La nuvola di detriti generata dall'impatto ad ipervelocità con il bumper avrà conseguenze dirette e danneggerà la parete del veicolo spaziale o il componente situato oltre la piastra. Negli esperimenti a terra, il danno della nube di detriti sulla paratia viene valutato in base al danno apportato alla piastra posteriore. Sulla base di questo danno e del criterio di failure specifico, è possibile stabilire la curva del limite balistico e l'equazione del limite balistico per rappresentare quantitativamente la capacità di protezione dello scudo, che è un'importante area di ricerca dell'interazione tra la nuvola di detriti e la piastra posteriore. Inoltre, impostando piastre posteriori di diverso spessore e materiale diverso, le informazioni sull'interazione tra proiettile e bumper possono essere analizzate in modo inverso.

2.3 WHIPPLE ALTERNATIVI

La ricerca sull'interazione tra proiettile e bumper guida il miglioramento del materiale e della struttura del bumper. Allo stesso tempo, le strutture migliorate con bumper avanzati necessitano di ricerche e analisi più mirate. Per il bumper sono stati testati numerosi nuovi materiali e nuove strutture al fine di migliorare le prestazioni di protezione. Queste variazioni migliorano l'interazione tra il proiettile e il bumper, mentre altri miglioramenti delle strutture degli scudi si concentrano sul movimento e la diffusione delle nubi di detriti.

Il modo più semplice e diretto per aumentare l'efficacia dello scudo è aumentare la distanza tra le due piastre del whipple, espandendo il raggio di diffusione della nuvola di detriti. Infatti, dall'inizio dell'introduzione dello scudo Whipple come sistema di

protezione dei velivoli spaziali, la distanza tra le piastre è stata un parametro di progettazione importante.

In generale, il riempimento dello stand-off con altri materiali o strutture (Fig. 6) potrebbe essere considerato un miglioramento dello scudo. Il materiale supplementare di riempimento influenza il movimento e la diffusione della nuvola di detriti, incidendo così sulla sua capacità di danno.

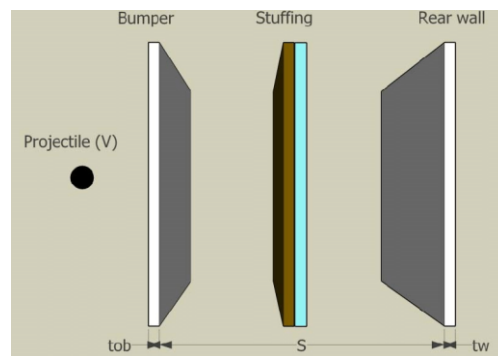


Fig. 6 Scudo Whipple imbottito

Queste strutture migliorate vengono chiamate “generalized filling-type protection structures”, e ne è un esempio la struttura con alcune piastre sottili extra nello stand-off, chiamata struttura di protezione multi-parete, e mostrata in Fig.7. In questa configurazione, le piastre, a partire dalla seconda, hanno l’obiettivo di ridurre il numero di frammenti anulari della nube, oltre che permetterne una maggiore diffusione anche grazie all’importante stand-off che caratterizza il sistema. Questo fa sì che la nube, nell’impatto con la piastra terminale, presenti una densità di detriti estremamente inferiore, se paragonata alla densità iniziale. Inoltre, l’area interessata dall’impatto è più ristretta [9].

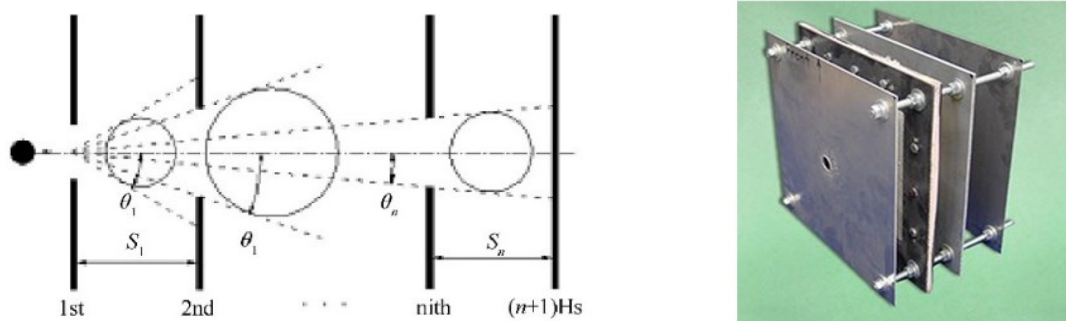


Fig. 7 Struttura di protezione multi-parete

Nel 1970, Richardson ha discusso il meccanismo di protezione della struttura multi-parete contro l'impatto iperveloce, e ha anche condotto esperimenti per studiarne la capacità protettiva. Wang ha combinato i risultati sperimentali e quelli delle simulazioni per stabilire un modello di nuvola di detriti derivante da una struttura multi-parete. Si è notato che aggiungendo legno e materiali leggeri tra le varie piastre, si migliorano con successo le prestazioni di protezione [9].

Nuove strutture protettive, come quelle riempite di schiuma o con materiali sandwich a nido d'ape interposto nello stand-off, producono un effetto più significativo sul movimento e sulla diffusione delle nubi di detriti. Allo stesso tempo, i materiali in schiuma e a nido d'ape hanno una densità inferiore rispetto ai materiali metallici, il che è più favorevole alle applicazioni ingegneristiche.

Anche un sistema di protezione con gas ad alta pressione rappresenta un'alternativa molto valida in questo campo [9]. Il gas ad alta pressione, se considerato materiale di riempimento, limita il movimento e la diffusione della nuvola di detriti, nonché le dimensioni del foro di perforazione sulla piastra anteriore dello scudo.

Inizialmente le strutture di protezione dagli impatti iperveloci erano per lo più in materiale interamente metallico. Il miglioramento del bumper si è concentrato principalmente sulla morfologia della piastra. Sulla base dell'analisi dinamica, sono state proposte varie forme geometriche per il bumper, come, ad esempio, la versione ondulata. Queste strutture modificano l'interazione geometrica tra proiettile e bumper durante l'impatto e, in una certa misura, migliorano la capacità di protezione dello scudo. Inoltre, sono stati proposti alcuni nuovi materiali per il bumper, come il Ti6Al4V, l'epossidico Nextel e il Kevlar, la

fibra aramidica e il suo composto con ceramica. Questi materiali hanno capacità di protezione più elevate. Inoltre, lo ionomero autoriparante presenta un foro di perforazione più piccolo rispetto al tradizionale bumper di alluminio, con conseguente danno minore dei frammenti del bumper alla struttura successiva. Wu e Ren hanno testato i materiali energetici come bumper per promuovere la decelerazione e la frammentazione del proiettile attraverso la reazione chimica indotta dall'impatto [9].

Negli ultimi anni, Klavzar ha aggiunto un rivestimento metallico di Nichel alla schiuma metallica di alluminio, che ha effettivamente migliorato le prestazioni dello scudo, ma allo stesso tempo ha aumentato la densità superficiale della struttura. Studi condotti sulle CFRP (plastiche rinforzate con fibra di carbonio) ha dimostrato che queste hanno prestazioni migliori rispetto alla lamiera di alluminio con la stessa densità superficiale per elevati spessori della lamiera, ma il miglioramento non è evidente nelle lamiere più sottili. Song ha proposto un bumper in composito e ne ha valutato le prestazioni attraverso esperimenti e simulazioni numeriche. Inoltre, Zhang ha proposto un bumper con struttura composita in Al e Mg, un bumper con struttura composita in Ti, Al e Nylon, e Huang ha analizzato una struttura amorfa rinforzata. Aleksandr e Igor hanno effettuato uno studio preliminare sperimentale e numerico riguardo il bumper con un rivestimento ceramico ad alta impedenza [9].

Queste nuove strutture dei bumper hanno migliorato significativamente la capacità di protezione degli scudi contro gli impatti iperveloci. Al fine di migliorare ulteriormente le prestazioni degli scudi, Destefanis ha condotto uno studio comparativo sulle prestazioni di varie forme di bumper, con il supporto dell'Agenzia spaziale europea.

Come appena discusso, le nuove strutture di protezione, che nascono a partire dalla versione base dello scudo Whipple, rappresentano la nuova frontiera nel campo della schermatura passiva per lo spazio, e hanno raccolto, nel corso degli anni, gli sforzi di decine di ricercatori che puntano a rendere l'ambiente spaziale sempre più sicuro per le strutture e gli equipaggi.

Capitolo 3

PROIETTILE E FRAMMENTAZIONE

La configurazione del proiettile gioca un ruolo di estrema importanza nella frammentazione sia del proiettile stesso che del bersaglio soggetto a impatti iperveloci. La maggior parte dei modelli analitici ed empirici impiegati per anticipare la frammentazione dovuta agli impatti iperveloci si basa su proiettili dalla forma sferica.

Al fine di proteggere i veicoli spaziali dagli impatti ad altissima velocità dei detriti spaziali, è stato cruciale sviluppare e testare sistemi di schermatura adeguati. Nelle simulazioni condotte a terra per valutare l'efficacia di queste strutture di protezione, i proiettili dalla forma sferica sono stati tradizionalmente utilizzati come rappresentanti standard dei detriti spaziali. Questa scelta è stata motivata da limitazioni legate alle modalità di lancio durante le simulazioni e alle risorse computazionali, nonché dalla relativa semplicità dovuta alla simmetria dei proiettili sferici [2].

Tuttavia, è importante notare che nello spazio, i detriti possono assumere una vasta gamma di forme, comunemente presentando frammenti non sferici con diverse dimensioni e orientamenti. Diversi studi hanno dimostrato che i proiettili non sferici comportano caratteristiche di frammentazione e impatto sulle piastre di protezione differenti rispetto ai proiettili sferici. Di conseguenza, questi proiettili non sferici presentano un potenziale di danneggiamento differente. Pertanto, nelle simulazioni, è essenziale considerare una diversificazione di forme dei proiettili al fine di valutare in modo accurato le prestazioni dei sistemi di schermatura.

Poiché i detriti spaziali di dimensioni millimetriche rappresentano la principale minaccia potenziale per gli scudi protettivi, negli esperimenti condotti a terra vengono ampiamente testati proiettili delle medesime dimensioni. La velocità dell'impatto è determinata dalla strumentazione di lancio e dalle caratteristiche del proiettile, come ad esempio la sua massa. Laboratori specializzati possono agevolmente raggiungere velocità comprese tra 2 km/s e 10 km/s per proiettili di dimensioni millimetriche, utilizzando a tale scopo una

varietà di tecniche di lancio, tra cui cannoni a gas leggero, acceleratori elettrostatici e rail gun elettromagnetici.

Nel corso delle simulazioni condotte presso l'Università di Padova, è stato impiegato un cannone a gas leggero a due stadi. Il primo stadio fungeva da propulsore, utilizzando l'elio come gas di spinta, mentre il secondo stadio impiegava l'idrogeno. Quando la camera contenente l'elio veniva scaricata, il gas compresso spingeva un pistone nella direzione della camera dell'idrogeno, comprimendo notevolmente il secondo gas. Una volta raggiunta la compressione adeguata, la camera veniva aperta, consentendo al gas di espandersi verso l'esterno e spingere un pacchetto, dove, tra quattro sabot, era posizionato il proiettile sferico. Quando il lancio avveniva in modo corretto, il proiettile sferico veniva rilasciato dai sabot in modo impeccabile, evitando qualsiasi impatto dei sabot con le piastre oggetto dell'esperimento.

In genere, l'efficacia di un cannone a gas aumenta con il numero di stadi, permettendo una maggiore velocità di lancio e richiedendo, però, una progettazione più complessa. Un cannone a gas leggero a due stadi può accelerare un proiettile di circa 1 g a una velocità di circa 8,5 km/s [9]. Queste tecniche sperimentali, capaci di raggiungere velocità di lancio estremamente elevate, rivestono una grande importanza nella ricerca nel campo della protezione durante i viaggi interplanetari. Consentono di simulare in modo accurato gli impatti iperveloci nello spazio, dove le velocità di impatto generalmente superano i 15 km/s.

Una simulazione numerica ampiamente impiegata per l'analisi della frammentazione dovuta a impatti iperveloci è basata sul metodo Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Questo metodo costituisce un approccio numerico privo di griglia (meshless) che fa uso di una distribuzione di particelle. La sua principale caratteristica è, appunto, l'assenza di una struttura di griglia predefinita, evitando qualsiasi distorsione della griglia stessa. Inoltre, il metodo presenta notevoli vantaggi nell'ambito della simulazione di impatti iperveloci caratterizzati da elevate velocità di deformazione e temperature elevate. Tuttavia, è importante notare che il sistema SPH richiede risorse computazionali considerevoli in quanto popola gli oggetti studiati con un grande numero di particelle [2].

Uno dei parametri fondamentali nei test che coinvolgono proiettili è il rapporto L/d , comunemente noto come "fattore di forma". Questo parametro varia a seconda della

configurazione del proiettile, e diverse forme di proiettili presentano sicuramente diversi valori del fattore di forma. Quando il fattore di forma è pari a 1, ciò indica che il proiettile ha una forma sferica.

Per quanto riguarda la propagazione della nube di detriti, si definisce "velocità di avanzamento" la velocità misurata sul bordo anteriore della nube di detriti, seguendo la direzione del moto, ossia parallelamente all'asse definito dalla traiettoria del proiettile. Al contrario, la "velocità di espansione" rappresenta la velocità dei frammenti all'interno della nube di detriti, ma in una direzione perpendicolare rispetto all'asse stabilito dalla direzione di avanzamento.

Quando il fattore di forma di un proiettile assume valori prossimi a uno, in particolare compresi tra 0.5 e 1.5, si osserva un comportamento specifico: la velocità di espansione della nube di detriti aumenta gradualmente, mentre la velocità del moto in avanzamento della nube diminuisce progressivamente. Questo comporta che la nube di detriti acquisisca una forma ovale o ellissoidale. Allo stesso tempo, la velocità dei frammenti distaccati dal proiettile aumenta gradualmente all'aumentare del valore del rapporto L/d [2].

Le simulazioni numeriche indicano che la disposizione dei frammenti del proiettile all'interno della nube evolve gradualmente nella direzione del moto, e la loro velocità, nel tratto iniziale, è approssimativamente uguale alla velocità del materiale della piastra bersaglio quando il rapporto L/d è pari a uno. In termini pratici, nel caso di un proiettile sferico, sia i frammenti del proiettile che quelli della piastra avanzano alla stessa velocità, nelle prime fasi di diffusione della nube. In Fig. 8 è mostrata una rappresentazione della dispersione della nube di detriti, che illustra la forma ellissoidale precedentemente descritta. Questa rappresentazione è stata ottenuta tramite il metodo Smooth Particle Hydrodynamics (SPH).

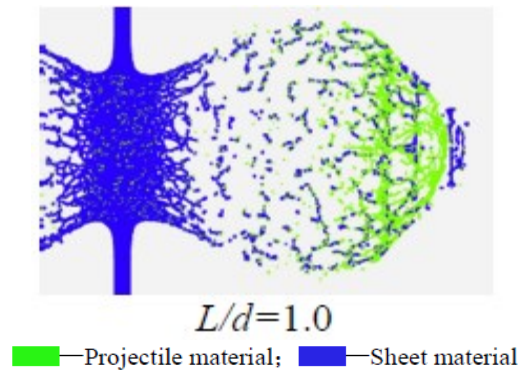


Fig. 8 Rappresentazione di una nuvola di detriti con metodo SPH

Quando il proiettile ha una forma sferica o è simile a un'asta lunga (rod-shaped), la nube di detriti si caratterizza per una velocità di espansione superiore rispetto a un proiettile che somiglia a un disco (disk-shaped). È evidente che, in generale, una collisione ad una maggiore velocità genera una nube di detriti con una maggiore velocità di espansione e una velocità di avanzamento superiore. Inoltre, provoca fori di perforazione più ampi nella piastra bersaglio. Le simulazioni idrodinamiche suggeriscono che i proiettili di forma sferica possiedano la massima capacità di penetrazione [2].

Il modello e la dinamica della frammentazione del proiettile, successivamente all'impatto con la piastra frontale, rivestono un'importanza cruciale nello studio del limite balistico nella fase di frantumazione, fornendo allo stesso tempo informazioni preziose sulla distribuzione dei frammenti all'interno della nube. Questo aspetto è di nostro particolare interesse. Diversi ricercatori hanno condotto indagini sulla frattura del proiettile e sulle caratteristiche e la disposizione dei frammenti all'interno della nube di detriti.

3.1 MODELLO DI FRATTURA

In seguito all'impatto tra il detrito e il bumper, si generano onde d'urto che si propagano sia nella sfera impattante, sia nella piastra frontale. Queste onde d'urto giocano un ruolo predominante nelle modalità di failure e nel cambiamento di fase dei materiali coinvolti. La superficie curva del proiettile sferico induce un'interazione d'onda altamente non lineare sia nel proiettile stesso che nella piastra bersaglio, rendendo così complessa l'analisi teorica della propagazione delle onde.

Gli studi di Schonberg ed Ebrahim, assieme a quelli condotti da Yew, hanno esplorato in modo qualitativo la propagazione delle onde d'urto nell'ambito dell'impatto iperveloce coinvolgendo sfere. Allo stesso modo, le ricerche di Wen e Chen hanno affrontato le caratteristiche geometriche della propagazione delle onde d'urto, sviluppando modelli teorici che descrivono la propagazione delle onde d'urto sia nella sfera che nella piastra bersaglio [7].

Si adotta un sistema di coordinate inerziali con simmetria assiale, posizionando il punto di origine sulla parte anteriore della sfera, al fine di dedurre il modello di propagazione della geometria delle onde d'urto. L'impatto avviene lungo l'asse X, che coincide con l'asse di simmetria. Il sistema di coordinate inerziali si sposta parallelamente alla direzione dell'impatto alla stessa velocità del proiettile. In altre parole, il sistema di coordinate è solidale alla sfera prima dell'impatto. L'asse Y è definito come perpendicolare all'asse X.

Fondandosi sull'assunto che le onde d'urto si propagano in modo simile, Wen e Chen hanno sviluppato due ellissoidi per descrivere la propagazione delle onde d'urto sia nella sfera che nella piastra. Dopo la collisione, le onde d'urto si propagano assialmente a partire dal punto di impatto. Sfruttando questi modelli di propagazione delle onde, è stato possibile condurre ulteriori analisi sul comportamento del materiale della sfera durante l'impatto, consentendo infine di spiegare il meccanismo di distribuzione e formazione dei frammenti nei vari stati della diffusione della nuvola.

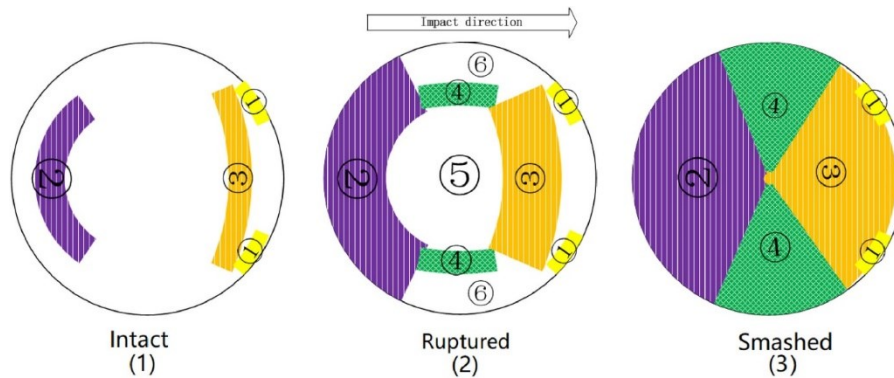


Fig. 9 Zone di frattura della sfera proiettile in funzione della velocità di impatto

Come illustrato nella Fig. 9 (1), quando la sfera collide con la piastra, si verifica una forte compressione nella zona anteriore a causa della propagazione dell'onda d'urto. Inizialmente, il materiale nella regione di contatto tra la sfera e la piastra subisce una notevole pressione e va incontro a failure, generando un "flusso inverso" noto come zona di rottura ①. Nel frattempo, il materiale al centro della sfera si trova in uno stato tensionale di compressione all'arrivo dell'onda d'urto. A causa dell'angolo di incidenza ridotto dell'onda d'urto sulla superficie centrale della sfera, lo stato tensionale di trazione, causato dalla riflessione dell'onda sulla superficie libera, è relativamente debole. Di conseguenza, la parte centrale della sfera rimane intatta.

Man mano che le onde d'urto si propagano nella parte posteriore della sfera, l'angolo di incidenza delle onde sulla superficie sferica aumenta gradualmente. In questo momento, la zona in cui le onde d'urto si scaricano provoca uno stress da trazione più intenso e fratture da scheggiatura. Per velocità d'impatto inferiori e/o spessori della piastra anteriore più sottili, la spallazione, ossia la separazione di frammenti superficiali nella parte posteriore della sfera, è relativamente debole e si verifica nella zona di rottura ②. Questa zona di rottura ② si distacca dalla sfera.

Con l'aumento della velocità di impatto e/o dello spessore della piastra, la zona di failure con spallazione ② si espande e diventa più critica, come illustrato nella Fig. 9 (2). In questa situazione, anche la zona di rottura ② si stacca dalla sfera. Con ulteriori incrementi della velocità di impatto e/o dello spessore della piastra, la zona di rottura da spallazione ② si espande significativamente, come mostrato nella Fig. 9 (3).

Per velocità di impatto inferiori e/o spessori della piastra anteriore più sottili, il cedimento da trazione nella parte anteriore della sfera è relativamente limitato, come evidenziato nella zona di rottura da trazione ③ nella Fig. 9 (1). Tuttavia, con l'incremento della velocità di impatto e/o dello spessore della piastra, la zona di rottura da trazione ③ diventa più significativa e cede, come illustrato nella Fig. 9 (2). Con ulteriori aumenti della velocità d'impatto e/o dello spessore della piastra, la zona di rottura ③ diventa notevolmente più grave, come mostrato nella Fig. 9 (3).

L'ordine in cui compaiono le zone di rottura ② e ③ è influenzato dalla condizione dell'urto: la zona di rottura ② si sviluppa dalla parte posteriore della sfera verso la parte anteriore, mentre la zona di rottura ③ si sviluppa in direzione opposta. La gravità del cedimento nelle zone ② e ③ diminuisce gradualmente con la propagazione verso il centro della sfera.

Quando la velocità dell'impatto e/o lo spessore della piastra anteriore sono minori, la gravità del cedimento nella parte posteriore e nella testa della sfera è modesta, e le zone di cedimento ② e ③ rimangono separate. In questo scenario, la sfera conserva la sua integrità, come rappresentato nella Fig. 9 (1).

Con l'aumento della velocità d'impatto e/o dello spessore della piastra anteriore, la gravità del cedimento nella parte posteriore e nella testa della sfera aumenta, portando alla fusione delle zone di cedimento ② e ③ in una zona di cedimento ④, come evidenziato nella Fig. 9 (2). Tuttavia, a causa dell'intensità relativamente bassa delle onde d'urto e del piccolo angolo di incidenza delle onde d'urto sulla superficie della sfera, non si verifica alcun tipo di rottura per trazione alla periferia della sfera. Inoltre, le zone di rottura ② e ③ nella parte centrale della sfera non causano rotture per trazione.

Con questo, la zona di cedimento ④ e le zone di cedimento ② e ③ dividono la sfera in una zona centrale ⑤ e una zona periferica ⑥. La zona centrale ⑤ costituirà un grande frammento centrale all'interno della nuvola di detriti, mentre la zona periferica ⑥ darà origine a frammenti anulari secondari.

Con un ulteriore aumento della velocità dell'impatto e/o dello spessore della piastra anteriore, la gravità del cedimento nella parte posteriore e nella testa della sfera aumenta ulteriormente, come mostrato nella Fig. 9 (3). A causa dell'ampiezza relativamente elevata delle onde d'urto, le zone di cedimento ② e ③ si unirebbero per formare la zona ④. La differenza è che, in questo caso, la sfera viene completamente distrutta. [7]

Dunque, è evidente come la velocità dell'impatto e lo spessore della piastra frontale, cioè il bumper, abbiano un'influenza diretta sulla frammentazione della sfera e sullo stato della nuvola di detriti, poiché controllano la propagazione delle onde d'urto e le fasi di rottura del materiale. La simulazione numerica rappresenta il metodo principale per studiare la diffusione e l'evoluzione delle onde causate dall'impatto di proiettili sferici.

La comprensione della dinamica della frattura e del cedimento dei materiali costituisce una base fondamentale per affrontare le sfide legate all'ipervelocità e per sviluppare strategie di protezione contro di essa. È impossibile analizzare l'impatto iperveloce e la protezione associata senza tener conto di tali fenomeni. Allo stesso tempo, i risultati sperimentali relativi all'impatto e alla protezione ad ipervelocità possono convalidare le teorie sulla frattura dinamica e il cedimento. Pionieri in questo campo includono Grady e i suoi collaboratori, i quali si sono concentrati sulla frammentazione dinamica dei materiali, basandosi sul principio energetico. Attraverso la ricerca dell'equilibrio energetico e dell'energia minima, è stato possibile determinare la resistenza alla frattura, il tempo di frattura e la dimensione dei frammenti [9].

In aggiunta, Grady ha sviluppato una relazione di equilibrio energetico basata su un criterio di tempo minimo. Questo sforzo ha portato all'ottenimento di un'equazione che concorda con i risultati sperimentali ottenuti per materiali duttili. In questa equazione, P_s rappresenta la resistenza alla frattura duttile, ρ indica la densità, c_0 denota la velocità di massa (cioè il rapporto tra la variazione di volume nel tempo e l'area della sezione trasversale), Y è il limite di snervamento, ϵ_c rappresenta la deformazione critica, t_s è il tempo di frattura, $\dot{\epsilon}$ è la velocità di deformazione, e s è la dimensione nominale del frammento.

$$\begin{cases} P_s = \sqrt{2\rho c_0^2 Y \epsilon_c} \\ t_s = \sqrt{\frac{2Y \epsilon_c}{\rho c_0^2 \dot{\epsilon}^2}} \\ s = \sqrt{\frac{8Y \epsilon_c}{\rho \dot{\epsilon}^2}} \end{cases}$$

Eq. 1 Equazioni di Grady

Basandosi su questa analisi, Grady ha delineato tre meccanismi di cedimento che si manifestano a diverse velocità di deformazione nei materiali soggetti a stati di frattura:

- Frattura fragile (sgretolabile): questo meccanismo prevale a basse velocità di deformazione ed è principalmente controllato dalla resistenza alla frattura del materiale.
- Frattura duttile: a velocità di deformazione medie, il cedimento è dominato dalla tensione di snervamento del materiale.
- Frattura liquida: per elevatissime velocità di deformazione, la tensione superficiale del materiale diventa il fattore determinante nel cedimento.

Questi studi hanno contribuito a sviluppare una teoria del criterio di frattura su scala macroscopica, offrendo una comprensione più approfondita dei processi di rottura e cedimento dei materiali soggetti a impatti iperveloci.

In riferimento all'impatto iperveloce e alla protezione del satellite tramite uno scudo Whipple, ci si aspetta che il livello di tensione di trazione generato dall'impatto superi notevolmente la resistenza teorica alla frattura del materiale. Dato che il tempo necessario per raggiungere la massima tensione nel materiale è estremamente breve, sembra plausibile supporre che la dimensione dei frammenti sia principalmente influenzata dall'intensità della massima tensione.

Yew e i suoi collaboratori hanno modificato le equazioni precedenti sostituendo la resistenza alla frattura P_s con la massima tensione P_m , ottenendo così una nuova espressione per il tempo di frattura e la dimensione dei frammenti, come segue.

$$\begin{cases} t_s = 6\rho c_0 \gamma / P_m^2 \\ s = 12\rho c_0^2 \gamma / P_m^2 \end{cases}$$

Eq. 2 Equazioni di Yew

Le formule precedentemente descritte per calcolare le dimensioni dei frammenti e la resistenza alla frattura, fondate sul criterio di frattura sviluppato da Grady, sono state ampiamente adoperate nella comunità scientifica per le indagini e le analisi relative agli impatti ad ipervelocità [9].

3.2 MODELLO DI PIEKUTOWSKI

Piekutowski ha introdotto un approccio per valutare il comportamento dei materiali nella nube di detriti composta interamente da alluminio, prodotta da proiettili sferici. Il calcolo della pressione massima generata durante l'impatto si basa sulla teoria delle onde d'urto. Piekutowski suppone una distribuzione lineare della pressione lungo l'asse della linea di tiro del proiettile. La distribuzione degli stati del materiale è derivata attraverso l'uso dell'equazione di stato e dell'interrelazione tra la velocità delle particelle e la pressione del materiale, come evidenziato nella Fig. 10 (a). Con riferimento alla Fig. 10 (b), il modello considera che gli stati normali del materiale lungo l'asse della linea di tiro siano uniformi, e si ipotizza che la composizione del materiale nella regione della fase mista vari linearmente tra i punti di inizio di fusione e di completa fusione. Questo approccio rappresenta un metodo pratico per calcolare la distribuzione degli stati e la posizione dei materiali nella nube di detriti.

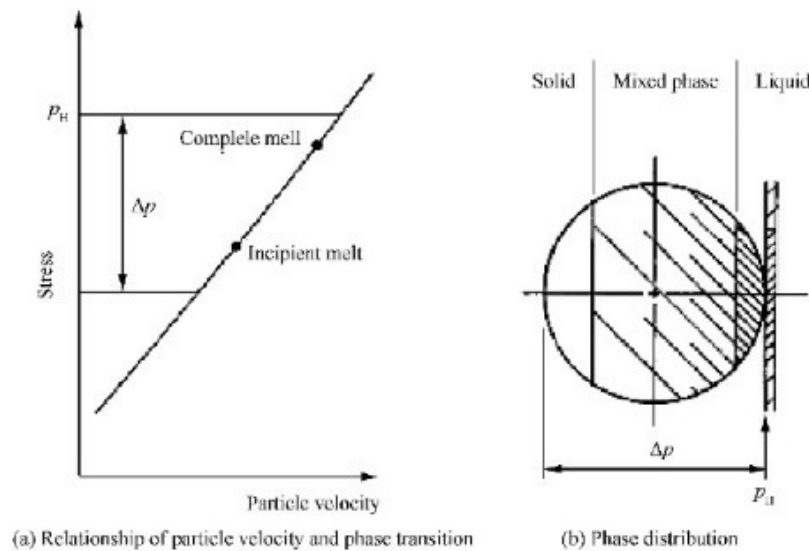


Fig. 10 Modello di Piekutowski

Il fenomeno di fusione del proiettile in alluminio, causato da impatti iperveloci, è attualmente facilmente riproducibile grazie alla tecnologia sperimentale disponibile. La fusione può essere confermata attraverso l'analisi metallografica dei frammenti presenti

sulla piastra di prova e osservando il cambiamento nella forma dei frammenti fusi durante la dispersione della nube di detriti. Tuttavia, la vaporizzazione di un proiettile di alluminio di dimensioni ragionevoli è più difficile da ottenere. L'espansione dei frammenti liquidi e di vapore avrebbe un impatto significativo sulla struttura e sulla distribuzione delle velocità all'interno della nube di detriti. Inoltre, quando i materiali vengono sottoposti a impatti iperveloci, oltre alla transizione di fase, potrebbe verificarsi anche la ionizzazione. Questo processo produce bande multiple di radiazione elettromagnetica, come l'emissione spettroscopica visibile, l'emissione infrarossa e l'emissione in radiofrequenza. È stato rilevato che l'interferenza elettromagnetica derivante dalla ionizzazione generata durante l'impatto ad alta velocità può causare danni elettrici ai sistemi a bordo dei veicoli spaziali [9].

Il modello proposto da Piekutowski rappresenta un utile strumento per introdurre il concetto di studio della distribuzione dei detriti all'interno di una nube; un argomento che verrà ulteriormente esplorato nel capitolo successivo.

Capitolo 4

DIFFUSIONE DELLA NUBE

Quando un proiettile impatta una piastra a velocità ipersonica, sia il proiettile che la piastra subiscono frammentazione a causa delle onde d'urto. Questo processo porta alla formazione di una dispersione di detriti che si propaga nella direzione del moto. L'analisi di questa dispersione, che fornisce dati riguardanti la cinematica e la distribuzione spaziale dei frammenti, nonché la concentrazione di frammenti solidi o di particelle liquide/gassose, riveste una notevole importanza per prevedere l'eventuale interazione della nuvola di detriti con gli elementi posteriori al bumper. Questi elementi possono essere costituiti da altre strutture progettate per la protezione o da componenti sensibili.

A causa delle differenti velocità di ciascuna porzione della nube di detriti, naturalmente, la sua configurazione assume forme variabili. Nel contesto di proiettili non sferici che colpiscono una piastra sottile, è diffuso l'utilizzo del modello di Piekutowski [2]. Conforme a questo modello, la nuvola di detriti si compone di due strutture coniche interne e una "bolla" esterna che le racchiude, originata dalla frammentazione dei materiali del proiettile e della piastra. In generale, il materiale del proiettile risulta contenuto all'interno delle strutture coniche, mentre il materiale della piastra bersaglio occupa la regione esterna della nuvola.

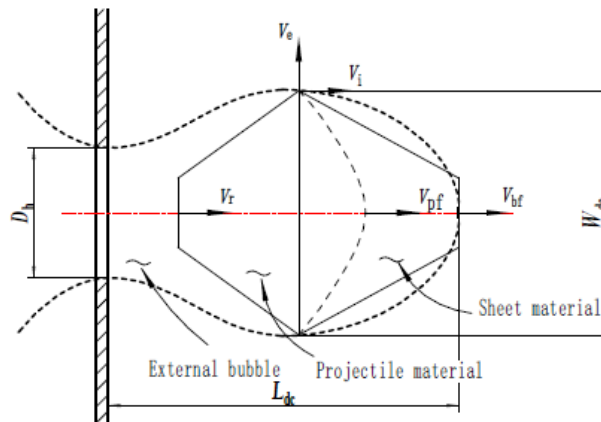


Fig. 11 Modello della nuvola di Piekutowski

Il modello di Piekutowski introduce anche cinque parametri di velocità per descrivere il movimento di avanzamento ed espansione della nuvola di detriti. Questi parametri includono quattro velocità assiali e una velocità radiale. Le quattro velocità assiali sono identificate come segue:

- V_{bf} , che rappresenta la velocità al “leading edge” dei frammenti del bersaglio.
- V_{pf} , la quale indica la velocità al “leading edge” dei frammenti del proiettile.
- V_i , che esprime la velocità del centroide.
- V_r , la quale corrisponde alla velocità dei frammenti del proiettile al “trailing edge”.

In aggiunta, c'è la velocità di espansione, denominata V_e , che rappresenta la velocità con cui la nuvola si espande in direzione perpendicolare al moto.

Nel nostro studio sull'effetto degli impatti iperveloci, forniremo stime specifiche per V_{pf} e V_e per ciascuno sparo. La prima rappresenta la velocità di avanzamento della nube nella direzione del moto del proiettile, mentre la seconda denota la velocità di espansione della nube in direzione perpendicolare al movimento.

4.1 MODELLI NUMERICI

Il frammento di maggiori dimensioni all'interno della nuvola è noto come "frammento primario", ed è situato sull'asse principale della dispersione. Questo frammento è caratterizzato da una massa superiore, poiché il proiettile non è completamente disintegrato in seguito all'impatto. Di solito, possiede un'energia cinetica significativa, conferendogli una maggiore capacità di causare danni alle superfici posteriori.

La piastra con uno spessore maggiore dimostra una maggiore resistenza alla frammentazione, il che significa che in presenza di un bumper più spesso, la massa del frammento più grande sarà inferiore, in quanto si verificherà una frammentazione più

profonda del proiettile. In generale, all'aumentare della velocità d'impatto, le dimensioni del frammento più grande prodotto tendono a diminuire.

Allo stesso modo, se consideriamo la velocità del frammento di maggiori dimensioni, indicata come " V_{LF} " (Largest Fragment Velocity), tale velocità sarà tanto più elevata quanto più sottile è lo spessore della piastra bersaglio.

Il modello Francesconi [2] fornisce una metodologia per calcolare la velocità del frammento di dimensioni maggiori, indicata come V_{LF} , basandosi sulla conoscenza della velocità iniziale del proiettile, V_0 , e sul rapporto tra la lunghezza del proiettile e il suo diametro, ovvero il fattore di forma, L/d . In aggiunta, il modello introduce una seconda equazione utile per determinare la massa del frammento di dimensioni maggiori, tenendo conto della massa iniziale del proiettile. Le equazioni associate a questo modello sono le seguenti.

$$\frac{V_{LF}}{V_0} = b_1 \cdot e^{-\frac{L/d}{b_2}} + C_2$$

$$\frac{M_{LF}}{M_0} = a_1 \cdot e^{-\frac{L/d}{a_2}} + C_1$$

Eq. 3 Modello Francesconi

I coefficienti a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 e c_2 , compresi nel modello empirico, possono essere stabiliti mediante l'impiego di dati sperimentali o attraverso simulazioni numeriche.

Dopo l'interazione tra il proiettile e il bumper, la frammentazione del proiettile è virtualmente completa, e di conseguenza i frammenti si diffondono inerzialmente, formando la tipica nuvola di detriti in espansione. Questa dispersione di detriti influisce direttamente sui danni inflitti alle strutture successive. La nuvola di detriti comprende frammenti solidi e, a seconda delle condizioni, può anche coinvolgere cambiamenti di fase. Le sue caratteristiche sono strettamente dipendenti da una serie di fattori, tra cui il materiale e la geometria del proiettile e della piastra, l'angolo e la velocità dell'impatto, la temperatura ambientale e dei materiali, e così via.

Negli anni '90, Piekutowski ha condotto una serie di esperimenti di impatto ad ipervelocità, fornendo dati accessibili e immagini sperimentali. Ha condotto un'analisi sistematica sulle caratteristiche strutturali della dispersione di detriti. Il suo lavoro rappresenta uno dei contributi più straordinari in questo campo di ricerca.

Negli esperimenti a terra condotti da Piekutowski e da altri studiosi che hanno proseguito la sua ricerca, la distribuzione tridimensionale spaziale della nube di detriti viene proiettata su un grafico bidimensionale mediante l'utilizzo della tecnica di fotografia a raggi X. Questo processo di proiezione inevitabilmente comporta una certa sovrapposizione delle informazioni, rendendo difficile una spiegazione accurata e completa della distribuzione nello spazio della dispersione stessa [9].

In seguito, Swift ha introdotto delle griglie lungo la traiettoria per suddividere i detriti e ha fornito una descrizione quantitativa delle velocità, delle masse e della distribuzione del materiale all'interno della dispersione. La sua ricerca ha rivelato che la dispersione di detriti assume la forma di un guscio vuoto, più precisamente di forma ellittica, e che la maggior parte del materiale è distribuita uniformemente sulla superficie. In altre parole, la dispersione di detriti prodotta da un proiettile sferico è identificabile come un ellissoide cavo.

Swift ha anche ipotizzato che il movimento della dispersione di detriti possa essere suddiviso in un movimento assiale del centro di massa e in un'espansione radiale. Da molteplici punti di vista, il modello proposto da Swift si distingue per la sua eccezionalità e relativa semplicità. Questo modello ha un'applicazione significativa nell'ambito dell'ingegneria e offre una spiegazione a molti problemi di base correlati all'argomento.

Anche la relazione tra la struttura interna della dispersione di detriti e le condizioni iniziali dell'impatto ha attratto notevole attenzione. Attraverso esperimenti condotti da Piekutowski, è stato scoperto che all'aumentare della velocità d'impatto, sia il diametro del frammento più grande lungo l'asse centrale che il diametro medio dei frammenti nell'elemento posteriore della struttura interna diminuiscono seguendo una legge di potenza in relazione alla velocità stessa. Le relazioni specifiche sono le seguenti:

$$d_f = \begin{cases} 204.8V_0^{-2.24}, & \frac{t}{D} = 0.049 \\ 147.1V_0^{-2.24}, & \frac{t}{D} = 0.084 \end{cases}$$

$$d_m = \begin{cases} 2.30V_0^{-0.68}, & \frac{t}{D} = 0.049 \\ 1.85V_0^{-0.68}, & \frac{t}{D} = 0.084 \end{cases}$$

Eq. 4 Relazioni di Piekutowski

Dove d_f rappresenta il diametro del frammento centrale, mentre d_m denota il diametro medio dei frammenti nell'elemento posteriore [9].

Per evidenziare le caratteristiche relative alla velocità della nuvola di detriti, Piekutowski ha misurato le velocità in diversi punti di riferimento. Modificando il rapporto tra t/D (spessore della piastra bersaglio/diametro del proiettile) e la velocità d'impatto, la direzione del vettore velocità dei frammenti presenti ai margini della nube subirebbe variazioni, insieme all'angolo di apertura della dispersione. L'angolo di apertura rappresenta l'angolo formato tra il vettore di velocità del frammento più esterno e la linea di impatto o direzione del colpo.

4.2 MODELLO DI SCHÄFER

In un breve lasso di tempo, la dispersione di detriti raggiunge uno stato stabile, e la sua struttura subisce poche modifiche significative. La dispersione si estende nello stand-off tra le piastre in modo autosimilare, ovvero presenta invarianza di scala [9]. Per sviluppare una descrizione teorica del movimento della nuvola, gli sforzi iniziali si sono concentrati sulla conservazione della quantità di moto e dell'energia, cercando di creare modelli di diffusione che incorporassero alcuni parametri artificiali.

Tenendo conto della perforazione sia del proiettile che della piastra bersaglio nella conservazione della quantità di moto, è stato possibile calcolare direttamente la velocità assiale e la velocità di espansione. Attraverso la conservazione dell'energia, l'energia cinetica iniziale del proiettile è stata suddivisa in energia cinetica assiale, energia cinetica di espansione e energia dissipata dovuta alla frammentazione e alla transizione di fase. In base al grado di danneggiamento, è stata determinata l'energia dissipata per unità di massa causata dalla frammentazione e dalla transizione di fase, permettendo di calcolare la velocità di espansione.

Tra le diverse teorie riguardo alla propagazione della dispersione di detriti e alla distribuzione dei frammenti, il modello proposto da Schäfer risulta particolarmente interessante, soprattutto perché trova corrispondenza con quanto osservato durante la campagna sperimentale. Schäfer ha suddiviso la diffusione in tre zone distinte: la prima corrisponde al Leading Edge (LE) della dispersione, all'interno del quale si trova un grande frammento centrale; la seconda zona comprende i frammenti disgregati provenienti dal proiettile; infine, la terza zona, la più estesa, comprende i frammenti del bumper.

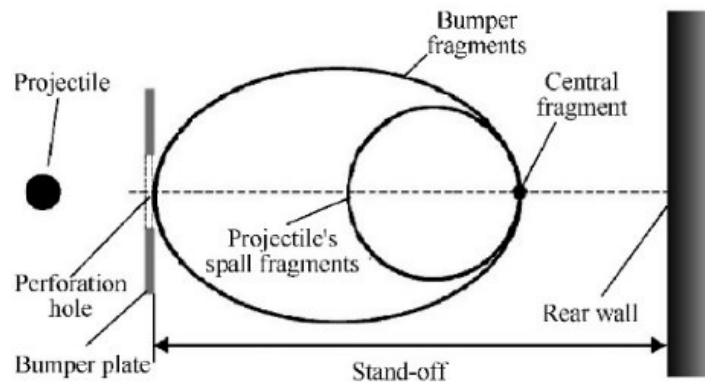


Fig. 12 Modello della nuvola di Schäfer

Sono stati adottati un guscio sferico e un guscio ellissoidale per rappresentare, rispettivamente, la distribuzione dei frammenti disgregati del proiettile e dei frammenti del bumper. Nel caso della distribuzione di massa dei frammenti del proiettile, è stata presa in considerazione una funzione di distribuzione esponenziale, mentre si è ipotizzato che i frammenti del bumper siano distribuiti in modo uniforme [9].

4.3 MODELLI PER IL DIAMETRO DEL FORO NEL BUMPER

Nel corso del tempo, diversi modelli empirici sono stati sviluppati per stimare il diametro di perforazione causato da proiettili sferici che colpiscono piastre sottili in condizioni di velocità ipersonica. Tra questi modelli, uno specifico per l'impatto di un proiettile di alluminio su una piastra completamente in alluminio (2024-T3) è stato presentato da Maiden [9]. Tale modello è rappresentato dalla seguente formula.

$$\frac{D_h}{d} = 2.4 \cdot \frac{V_0}{c} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{2/3} + 0.9$$

Eq. 5 Modello empirico di Maiden

La variabile D_h indica il diametro del foro nella piastra, d rappresenta il diametro del proiettile, V_0 denota la velocità del proiettile, c è la velocità del suono nel materiale (alluminio), e t_b è lo spessore della piastra (bumper).

Nonostante questa formula sia stata sviluppata appositamente per adattarsi al nostro caso, è emerso che essa presentava una precisione notevolmente limitata, con errori che raggiungevano addirittura il 31%. È per questo motivo che, oltre al modello di Maiden, che si è rivelato abbastanza impreciso, abbiamo fatto affidamento sui modelli di Hill, al fine di ottenere una valutazione più accurata in linea con la teoria [10]. Questi modelli prevedono l'uso potenziale di due diverse equazioni:

$$d_h = 3.309d_p \left(\frac{V}{c_p}\right)^{0.033} \left(\frac{V}{c_t}\right)^{0.298} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0.022} \left(\frac{t_t}{d_p}\right)^{0.359}$$
$$d_h = 2.947d_p \left(\frac{V}{c_p}\right)^{0.055} \left(\frac{V}{c_t}\right)^{0.339} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0.028} \left(\frac{t_t}{d_p}\right)^{0.414} + 0.342d_p$$

Eq. 6 Equazioni di Hill

I pedici p e t si riferiscono, rispettivamente, al proiettile e al target.

Capitolo 5

IPOTESI E PROCEDURE

L'obiettivo principale di questa tesi è quello di estrarre il massimo numero di informazioni possibili attraverso un'analisi cinematica delle nuvole di detriti. Inoltre, si mira a confrontare e convalidare i risultati ottenuti con modelli numerici esistenti, laddove sia possibile stabilire una correlazione. Il confronto con modelli numerici consentirà di valutare la validità e l'accuratezza di tali modelli, migliorando così la capacità di previsione e l'applicabilità pratica delle conoscenze ottenute.

Attraverso l'analisi di un numero significativo di impatti, questa tesi cerca di fornire una panoramica completa delle caratteristiche cinematiche delle dispersioni di detriti, inclusi fattori come la velocità di avanzamento ed espansione, l'angolo di apertura delle nubi, la distribuzione spaziale e di massa dei frammenti. Sarà inoltre fornita un'esaustiva rappresentazione bidimensionale di ciascuna nuvola di detriti. Questa rappresentazione metterà in evidenza le traiettorie di numerosi frammenti di particolare rilevanza, inclusi quelli di dimensioni maggiori. La ricostruzione bidimensionale avrà l'obiettivo di rendere visibili le caratteristiche principali delle dispersioni di detriti analizzate, offrendo un'immagine chiara e dettagliata delle loro traiettorie e del comportamento dei frammenti più significativi, della dinamica e della distribuzione spaziale dei frammenti.

La complessità di un argomento di ricerca come questo può rappresentare una sfida significativa, ma al contempo offre un'opportunità unica per una profonda esplorazione e un contributo originale alla conoscenza. Nella mia tesi, ho dovuto affrontare un argomento noto per la sua intricata complessità, che comprendeva una serie di aspetti e variabili da considerare. Questa complessità non doveva essere affrontata in modo superficiale, ma piuttosto richiedeva un approccio strutturato e meticoloso.

Per trattare efficacemente il tema della tesi, ho scelto di formulare diverse ipotesi come parte del mio processo di ricerca. Ognuna di queste ipotesi è stata progettata per

permettermi di concentrare su aspetti specifici dell'argomento, tralasciando invece quegli aspetti che richiederebbero più tempo e sforzi.

Le diverse ipotesi hanno guidato la progettazione della mia metodologia di ricerca e mi hanno aiutato a stabilire un piano di lavoro.

Questo ha fornito una visione più approfondita e articolata dell'intera questione di ricerca. In definitiva, il processo di formulazione e analisi delle ipotesi è stato cruciale per affrontare la complessità del mio argomento in modo sistematico e per contribuire a una comprensione più profonda e sfaccettata dell'argomento di studio. Ha anche evidenziato l'importanza dell'approccio multidimensionale quando si tratta di ricerche complesse.

5.1 CINEMATICA E DINAMICA

L'ipotesi centrale alla base di questo studio riguarda il comportamento dinamico della diffusione della nuvola di frammenti, in cui si presuppone che tali frammenti si spostino lungo una traiettoria rettilinea senza l'influenza di forze esterne, le quali vengono pertanto trascurate. Questa ipotesi è fondata su diverse considerazioni rilevanti, poiché il movimento dei frammenti all'interno della nube, dall'istante dell'impatto fino al contatto con la piastra retrostante, avviene in un intervallo di tempo estremamente breve, generalmente non superiore a 40 microsecondi. Per questo, è da tenere in considerazione che le forze esterne agenti sulle particelle, anche se presenti, non sono in grado di produrre effetti apprezzabili in una finestra temporale così ristretta, e l'effetto di queste forze risulterebbe quindi trascurabile rispetto al movimento inerziale dei frammenti stessi. Questo presupposto svolge un ruolo chiave nel contesto della ricerca, poiché semplifica notevolmente l'analisi della dinamica di diffusione dei frammenti e permette di concentrarsi in modo più accurato sull'evoluzione temporale e spaziale della nube.

L'ipotesi fornisce una base solida per l'analisi e la modellizzazione della dinamica dei frammenti, consentendo di ottenere risultati chiari e comprensibili in una finestra temporale così breve. Tuttavia, è importante sottolineare che l'accuratezza di questa

ipotesi dipende dalla corretta valutazione delle forze esterne e dal tempo di volo effettivo dei frammenti. La sua validità è quindi supportata da una combinazione di conoscenze scientifiche, dati sperimentali e considerazioni teoriche, e contribuisce in modo significativo al processo di ricerca, facilitando l'analisi e l'interpretazione dei risultati nell'ambito dello studio sulla dinamica della diffusione delle nuvole.

Nel contesto di questa ricerca, si adotta l'ipotesi che la diffusione dei detriti avvenga in modo isotropo, cioè che la velocità di espansione della nuvola di detriti nella direzione perpendicolare al moto rimanga costante indipendentemente dall'angolazione da cui viene osservata. Questa ipotesi è fondamentale e merita un'approfondita spiegazione poiché influenza in modo significativo l'interpretazione dei dati e i risultati dell'indagine, oltre che l'approccio seguito per effettuare le misurazioni.

L'assunzione di una diffusione isotropica è basata sull'idea che, in assenza di influenze esterne direzionali o asimmetrie significative all'interno del sistema, la nuvola di detriti si espanderà in modo uniforme in tutte le direzioni ortogonali alla direzione di avanzamento, a partire dal punto di impatto che l'ha generata. Questo significa che, se osservassimo la nuvola di detriti da angolazioni diverse, la sua espansione in una specifica direzione perpendicolare al suo movimento sarebbe la stessa, indipendentemente dalla prospettiva. Questo presupposto semplifica l'analisi dei dati e dei risultati poiché permette di trattare la diffusione in modo più uniforme, evitando complessità aggiuntive dovute a eventuali asimmetrie della distribuzione e anisotropie dei materiali.

Da un punto di vista pratico, l'adozione di questa assunzione ha semplificato notevolmente il calcolo della velocità di espansione della nube di detriti. Considerando che si dispone di riprese video da una telecamera posizionata lateralmente rispetto alla nuvola, l'espansione della nuvola avviene in un piano bidimensionale, coinvolgendo il movimento sia verso l'alto che verso il basso. Applicando l'ipotesi di isotropia, ci si è concentrati sul calcolo della velocità di espansione considerando solo uno dei lati della nuvola, accelerando notevolmente il processo.

Questa semplificazione è stata estremamente utile in termini di efficienza analitica, poiché ha permesso di ridurre al minimo la complessità dei calcoli e dei dati da elaborare. Concentrandosi su un solo lato della nuvola, è stato possibile stimare la velocità di

espansione con precisione sufficiente per gli scopi della ricerca, risparmiando tempo e risorse.

L'ultima assunzione di rilievo, per quanto riguarda la cinematica e dinamica, è che la frammentazione e la diffusione della nube di detriti abbiano inizio da un singolo punto. Pertanto, nella ricostruzione bidimensionale, possiamo osservare le traiettorie dei frammenti che condividono un punto di origine comune, anche se questa situazione non corrisponde completamente alla realtà.

Questa assunzione semplifica il processo di analisi e ricostruzione, consentendo di visualizzare le traiettorie dei frammenti in modo più agevole e comprensibile. Inoltre, è giustificata dal fatto che l'obiettivo principale di questa tesi non è indagare come i frammenti evolvano in prossimità del foro nel bumper, ma piuttosto comprendere il loro comportamento alle estremità della nuvola. Tuttavia, è importante sottolineare che questa semplificazione differisce dalla situazione reale, in cui la frammentazione e l'origine della nuvola seguono dinamiche più complesse. Per fornire una spiegazione più quantitativa, si prenda in considerazione uno sparo in cui il diametro del foro nel bumper sia pari a 8.3 mm, mentre l'estensione verticale della nube sia pari a 52.98 mm. In questo caso, il diametro del foro rappresenta una piccola percentuale della distribuzione verticale, corrispondente al 15.66 %. È per questa ragione che ha avuto senso introdurre l'assunzione di origine puntiforme delle traiettorie dei detriti, oltre al fatto che c'è un relativamente scarso interesse per la regione immediatamente posteriore al foro.

5.2 RICOSTRUZIONE BIDIMENSIONALE E SOFTWARE

Nel laboratorio di propulsione e ipervelocità del CISAS, sono stati esaminati gli spari utilizzando due telecamere Phantom specializzate per catturare movimenti ad altissima velocità: una di queste è stata fornita dalla NTNU (Norwegian University of Science and Technology) ed è identificata come V2511, mentre la seconda è stata fornita dal CISAS e prende il nome di MIRO M310. Queste telecamere hanno registrato le riprese da due prospettive: una laterale e una dall'alto. Sebbene da un punto di vista tecnico questo sia sufficiente per consentire il tracciamento tridimensionale dei frammenti e quindi la creazione di una ricostruzione 3D, le prestazioni della telecamera MIRO M310 non sono state ottimali per eseguire questo processo.

Questo è il motivo per cui la ricostruzione bidimensionale è stata inclusa come parte integrante dell'analisi per ogni sparo.

I campioni video raccolti sono stati analizzati frame per frame attraverso l'uso del software Phantom Camera Control Application (PCC). Questo software ha permesso di condurre un'analisi completa, coprendo sia le grandezze cinematiche, ovvero i parametri di movimento, sia la ricostruzione bidimensionale della diffusione dei frammenti.

La combinazione di queste due prospettive di ripresa e l'analisi frame per frame tramite il software PCC hanno consentito di ottenere risultati dettagliati e accurati sull'espansione e la dinamica dei frammenti in ciascun sparo, nonostante l'insormontabile sfida legata alla frequenza di acquisizione dei frame ridotta e alla limitata qualità di risoluzione della telecamera MIRO M310.

Per quanto riguarda il processo di ricostruzione bidimensionale, è stato necessario semplificare e approssimare determinati aspetti al fine di renderlo più comprensibile e agevole. La stima delle dimensioni dei frammenti è stata effettuata tramite l'identificazione del numero di pixel contenuti in ciascun frammento. Ogni pixel è stato convertito in una dimensione corrispondente in mm, considerando la scala relativa alla distanza tra le piastre. Questo approccio ha permesso di valutare in modo accurato la sezione trasversale di tutti i frammenti oggetto di studio.

La dimensione della sezione trasversale dei frammenti dovrebbe essere misurabile indipendentemente per ciascuna telecamera, con le relative difficoltà nel distinguere i frammenti dallo sfondo. Nonostante ciò, per questa fase di misurazione è stata utilizzata esclusivamente la telecamera Phantom V2511, in quanto ha dimostrato di offrire risultati più chiari e affidabili con l'obiettivo di misurare le dimensioni dei frammenti in modo accurato.

Per ciascun frammento, è stato introdotto un indicatore posizionato il più vicino possibile al centro della sua sezione trasversale. Questo indicatore è stato utilizzato per tracciare la traiettoria del frammento e per identificarlo nei frame successivi. Il posizionamento di tale indicatore non è stato un compito immediato, a causa delle condizioni di illuminazione sfavorevoli e delle sfide legate all'orientamento o all'oscuramento completo dei frammenti.

Infatti, non è insolito incontrare situazioni in cui un frammento è visibile in un frame ma diventa totalmente invisibile nel frame successivo. Allo stesso modo, le condizioni di illuminazione particolari, come il riflesso dovuto all'impatto della nube con la superficie retrostante, hanno messo in evidenza le parti dei frammenti che riflettevano la luce, ma hanno contemporaneamente oscurato le parti che non la riflettevano. Di conseguenza, le superfici in ombra non erano visibili, e pertanto l'indicatore è stato posizionato al centro della sezione del frammento che era illuminata.

Questa procedura è stata adottata per garantire un tracciamento accurato e coerente dei frammenti, nonostante le complicanze dovute alle variazioni di illuminazione e all'oscuramento parziale dei frammenti.

Un'altra approssimazione deriva dalla restrizione del software utilizzato, che impedisce di posizionare il puntatore esattamente al centro del pixel, consentendo solo di posizionarlo sui suoi bordi.

Nelle ricostruzioni bidimensionali delle traiettorie dei frammenti, è possibile osservare due tipi di linee: linee rette e linee spezzate. Questa differenza deriva dal modo in cui sono stati tracciati i frammenti durante le osservazioni. Inizialmente, i primi frammenti analizzati sono stati seguiti frame per frame, dal momento in cui hanno iniziato a

muoversi a partire dal punto di perforazione fino all'impatto della nuvola con la superficie retrostante. Questi frammenti iniziali sono rappresentati da linee spezzate.

Man mano che il processo di tracciamento dei frammenti avanzava, diventava sempre più evidente come la nuvola si stesse espandendo e quale forma stesse assumendo. A questo punto, i frammenti finali di ciascun sparo sono stati tracciati principalmente per completezza, al fine di riempire gli spazi vuoti nell'analisi e di fornire ulteriori informazioni sulla distribuzione di massa all'interno della nuvola. È per questa ragione che tali frammenti sono rappresentati da linee rette.

Capitolo 6

ANALISI SPARI

Di seguito, vengono presentate le analisi condotte sugli 11 spari, eseguiti presso il Laboratorio di Propulsione e Ipervelocità del CISAS. Ciascun evento è stato attentamente documentato mediante l'uso di due telecamere ad alta velocità, e dai registri digitali sono stati estratti i fotogrammi più rilevanti per condurre lo studio. Ogni singolo sparo è stato oggetto di un'approfondita analisi, includendo i seguenti aspetti:

- **Velocità di avanzamento ed espansione:** per ciascun evento di sparo, sono state misurate e registrate la velocità di avanzamento e di espansione della nube di detriti. Questi dati sono stati confrontati con i risultati teorici ottenuti mediante l'applicazione di modelli di analisi.
- **Angolo di apertura della nuvola:** è stata condotta un'analisi accurata dell'angolo di apertura della nube di detriti per ogni sparo. Questo parametro fornisce preziose informazioni sulla geometria e sulla dispersione dei frammenti.
- **Numero di frammenti e catalogazione:** per ogni evento, è stata effettuata una catalogazione dei frammenti sulla base delle dimensioni della loro sezione trasversale. I frammenti riconoscibili sono stati conteggiati e raggruppati in un istogramma, offrendo una chiara rappresentazione della distribuzione di massa all'interno della nube di detriti.
- **Ricostruzione bidimensionale:** utilizzando il software MATLAB, è stata condotta una ricostruzione bidimensionale delle traiettorie di numerosi frammenti. I frammenti sono stati distinti mediante l'uso di colori diversi in base alla loro sezione trasversale, offrendo così una visualizzazione chiara e dettagliata delle dinamiche di dispersione.

Gli eventi di sparo sono stati suddivisi in diverse categorie, tra cui "successi," "sabot failure," "pluri sabot failure" e gli errori di registrazione. Questo approccio dettagliato e sistematico ha permesso di acquisire una comprensione approfondita delle nuvole di

detriti generate da ciascun sparo, contribuendo così alla raccolta di dati fondamentali per la validazione di modelli teorici e l'analisi di errori e anomalie nei risultati sperimentali.

Le immagini acquisite tramite la telecamera Phantom MIRO M310 si caratterizzano per una notevole differenza di qualità rispetto ai frame estratti dalla telecamera Phantom V2511. Di conseguenza, gran parte dell'analisi condotta in questo studio si è basata sulle immagini fornite dalla telecamera Phantom V2511, mentre solo alcuni aspetti specifici sono stati documentati utilizzando la telecamera Phantom MIRO M310. La limitata risoluzione e la ridotta frequenza di acquisizione dei frame di quest'ultima telecamera, in contrasto con la telecamera V2511, hanno reso impossibile l'esecuzione di una ricostruzione tridimensionale della nube di detriti. Pertanto, ci si è orientati verso una ricostruzione bidimensionale, un'opzione resa possibile unicamente grazie alla disponibilità della telecamera fornita dall'NTNU.

Il calcolo delle velocità di avanzamento ed espansione è stato condotto attraverso una procedura che prevede una media aritmetica su un numero specifico di campioni di velocità. Tali campioni sono ottenuti considerando il rapporto tra lo spazio percorso da un frammento di riferimento e il tempo impiegato da questo frammento per coprire la suddetta distanza.

La velocità della sfera all'uscita dal cannone a gas è stata determinata sperimentalmente con l'ausilio di rilevatori laser. Al fine di valutare l'affidabilità delle stime relative alle varie velocità della nube ottenute dall'analisi delle registrazioni, è stata effettuata una misurazione preliminare della velocità del proiettile. Questa procedura è stata adottata per confrontare la velocità stimata dalle registrazioni con quella misurata sperimentalmente e valutare l'eventuale errore nelle stime. Grazie a questo approccio, è stato possibile quantificare l'incertezza associata alle misure delle velocità di avanzamento ed espansione della nube.

Per quanto riguarda la determinazione dell'angolo di apertura, è stato adottato un approccio basato su una media calcolata sugli angoli di apertura rilevati per ciascun frame durante l'espansione della nube. Questa misura è stata eseguita dal momento della perforazione del bumper fino all'istante dell'impatto con il wall retrostante. Nello specifico, si è proceduto considerando la retta tangente all'elemento più esterno, quando

riconoscibile, oppure la tangente all'ipotetica curva che delimita la nuvola in situazioni dove il frammento più esterno non è chiaramente individuabile.

La precisione della stima dell'angolo di apertura è direttamente proporzionale al numero di frame utilizzati per il calcolo. Questo perché, nei dati raccolti frame per frame, possono emergere notevoli variazioni tra le diverse misurazioni, a causa della natura dinamica della nube di detriti. Eventuali errori nella stima dell'angolo di apertura derivano principalmente dalla non visibilità in alcuni frame di frammenti più esterni, sebbene la loro posizione sia significativa poiché influirebbe sull'ampiezza dell'angolo. Questa è la ragione per cui possono verificarsi differenze significative tra gli angoli misurati da un frame all'altro, con variazioni anche nell'ordine di una decina di gradi.

I modelli inclusi nel confronto dei risultati per ciascun sparo sono il modello Francesconi, il modello di Maiden e il modello di Hill.

Il modello Francesconi fornisce due relazioni fondamentali: una lega la velocità del frammento di dimensioni maggiori, V_{LF} , alla velocità di impatto V_0 , mentre l'altra collega la massa del frammento di dimensioni maggiori, M_{LF} , alla massa del proiettile. Questo modello presenta diverse versioni dell'equazione formulate per descrivere i sistemi con un bumper avente uno spessore di 1 mm e quelli con uno spessore di 2 mm. Nei casi in cui lo spessore del bumper sia intermedio, il risultato del modello è stato determinato calcolando una media tra i risultati ottenuti dai due scenari. Le equazioni, rispettivamente per lo spessore del bumper di 1 mm e di 2 mm, sono le seguenti:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{LF}}{M_0} = -1.2998 \cdot e^{-\frac{L/d}{0.6495}} + 0.9355 \\ \frac{V_{LF}}{V_0} = -0.9735 \cdot e^{-\frac{L/d}{0.8402}} + 0.9660 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{LF}}{M_0} = -0.9980 \cdot e^{-\frac{L/d}{0.9387}} + 0.8547 \\ \frac{V_{LF}}{V_0} = -0.9986 \cdot e^{-\frac{L/d}{0.4016}} + 0.9593 \end{array} \right.$$

Eq. 7 Equazioni del modello Francesconi per spessori del bumper di 1 mm e 2 mm

Il modello empirico di Maiden, menzionato precedentemente, fornisce una stima del diametro del foro nel bumper a partire da informazioni conosciute, specificamente per situazioni in cui proiettili sferici di alluminio impattano su piastre dello stesso materiale. L'equazione corrispondente è la seguente:

$$\frac{D_h}{d} = 2.4 \cdot \frac{V_0}{c} \cdot \left(\frac{t_b}{d}\right)^{2/3} + 0.9$$

Eq. 5 Equazione di Maiden

Considerando:

- D_h come il diametro del foro da determinare
- d come il diametro della sfera, che è pari a 2.9 mm
- V_0 come la velocità di impatto
- t_b come lo spessore del bumper
- c come la velocità del suono nel materiale, compresa tra 6200 e 6360 m/s

Infine, il modello di Hill offre sempre la possibilità di stimare il diametro del foro nel bumper, ma con una maggiore precisione. Per ottenere questa stima, si fa ricorso alla seconda delle due equazioni precedentemente illustrate.

$$d_h = 2.947d_p \left(\frac{V}{c_p}\right)^{0.055} \left(\frac{V}{c_t}\right)^{0.339} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0.028} \left(\frac{t_t}{d_p}\right)^{0.414} + 0.342d_p$$

Eq. 6 Seconda equazione di Hill

6.1 SUCCESSI

Gli "eventi di successo" sono contraddistinti da un impeccabile rilascio della sfera proiettile dai quattro sabot, risultando in un singolo foro d'ingresso chiaramente individuabile nel bumper. Inoltre, entrambe le telecamere hanno operato correttamente per l'intera durata del processo di sparo.

6.1.1 SPARO 9245

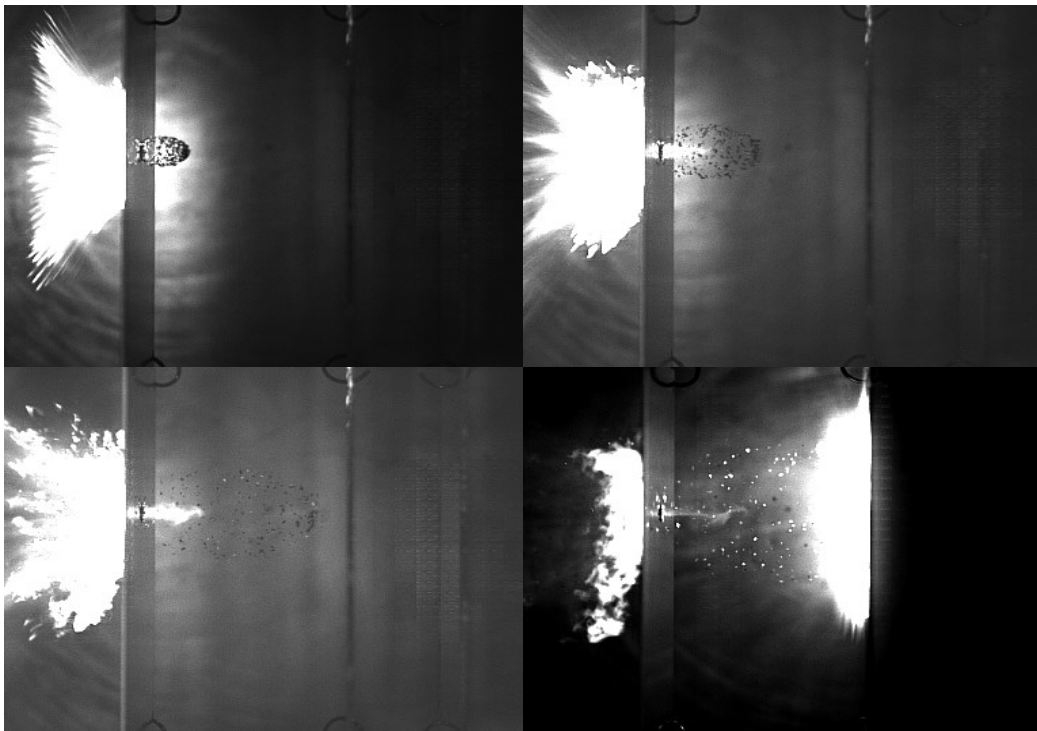


Fig. 13.1 Frame dello sparo #9245

La velocità iniziale del proiettile sferico al momento dell'impatto, misurata sperimentalmente tramite il sistema di rilevazione laser, è pari a $V_0 = 3.989$ km/s. Al fine di valutare eventuali errori nelle stime delle velocità ottenute mediante l'analisi dei video, si è proceduto a misurare la velocità del proiettile anche tramite le riprese video, ottenendo un valore di $V_0' = 3.8$ km/s. Questo confronto ha permesso di calcolare l'errore associato alle stime di velocità relative a questo test di sparo, che ammonta a $\varepsilon = \pm 0.189$ km/s.

La nube di detriti si espande con una velocità di avanzamento media pari a $V_a = 1.919$ km/s, corrispondente al 48.1% della velocità di impatto.

Con uno spessore del bumper di 2 mm, secondo il modello Francesconi, la velocità del frammento di dimensioni maggiori dovrebbe essere di $V_{LF} = 3.496$ km/s. Tuttavia, dalle osservazioni effettuate con le registrazioni, la velocità al leading edge, dove grosso modo si individua il frammento di dimensioni maggiori, è stata stimata pari a 1.919 km/s. Quindi, c'è un notevole scarto tra il dato sperimentale e quello teorico.

Utilizzando lo stesso modello empirico, è possibile stimare anche la massa del frammento di dimensioni maggiori, noto come "Largest Fragment." La stima suggerirebbe una $M_{LF} = 0.018$ g, che corrisponde al 51% della massa del proiettile.

Durante questo esperimento, è stato calcolato la velocità di espansione delle nuvole di detriti sia verticalmente, utilizzando la telecamera V2511, sia in profondità, con la telecamera MIRO M310. Le due velocità di espansione dovrebbero essere uguali, indipendentemente dall'angolo di visione dell'osservatore, poiché è stata ipotizzata una diffusione isotropa dei detriti. Di seguito sono riportati i dati relativi alla velocità media di espansione:

in profondità: $V_{EP} = 0.565$ km/s

verticale: $V_{EV} = 0.438$ km/s

L'errore tra le due velocità è del 22,39%. Questo disaccordo è molto probabilmente attribuibile a una stima poco accurata della velocità di espansione in profondità, poiché il numero di frame utili per il calcolo è stato solo di 2, rispetto ai 7 frame disponibili per la velocità di espansione verticale. Sulla base di queste considerazioni, è ragionevole considerare corretta una velocità di espansione pari a $V_{EV} = 0.438$ km/s.

È essenziale sottolineare che per la maggior parte dei successivi spari, la telecamera MIRO M310 ha fornito un solo frame utile. Questo fatto rende il calcolo della velocità di espansione estremamente impreciso. Nonostante ciò, verrà riportata ugualmente la stima effettuata, anche se lo scarto con la velocità ottenuta grazie a V2511 potrebbe essere non indifferente.

L'angolo medio di apertura della nube è stato misurato a 44.66° , con una deviazione standard $s = \pm 4.00^\circ$. Il grafico seguente mostra le stime degli angoli di apertura calcolati per ogni frame, e la linea verde rappresenta il valore medio.

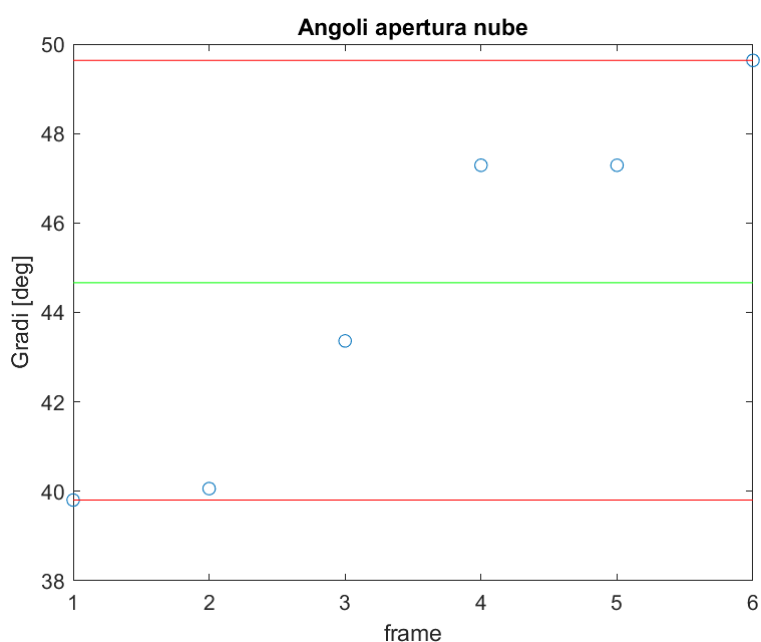


Fig. 13.2 Grafico degli angoli #9245

La ricostruzione bidimensionale è stata condotta prendendo in considerazione le traiettorie di 51 frammenti. Questa selezione è stata basata su criteri legati alle dimensioni dei frammenti e alla loro rilevanza nel fornire un'idea della forma della nuvola di detriti.

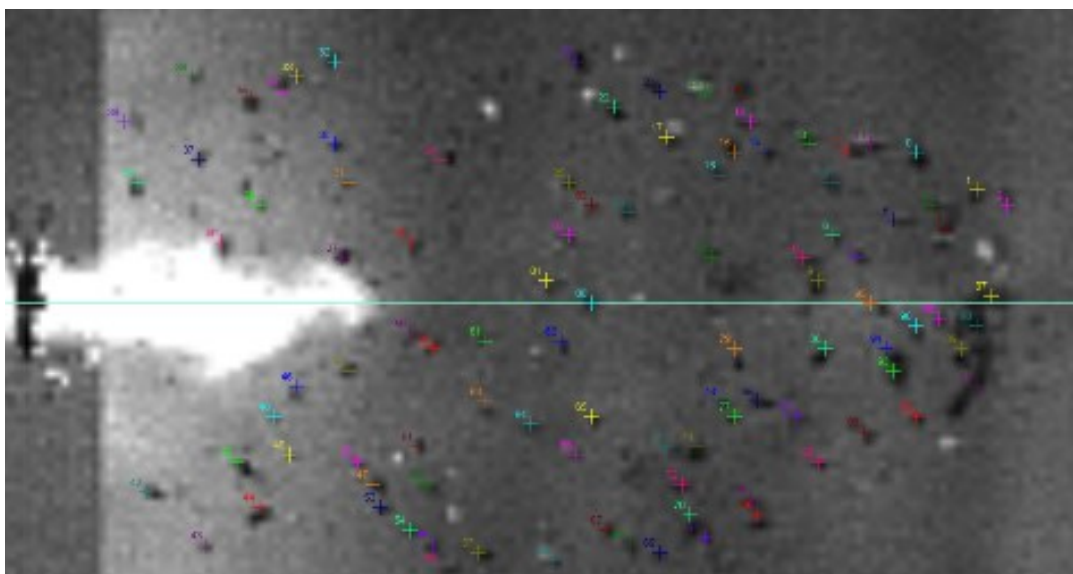


Fig. 13.3 Tracking dei frammenti #9245

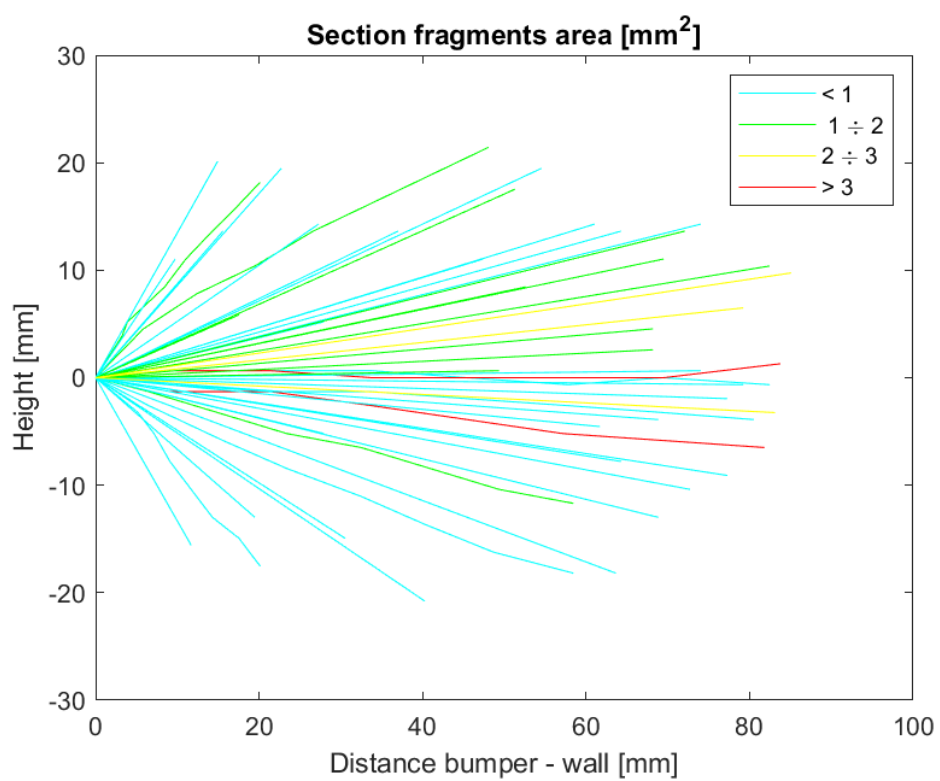


Fig. 13.4 Ricostruzione bidimensionale #9245

La tipica forma della nube di detriti generata da un proiettile sferico è quella di un'ellisse, come chiaramente evidenziato nella ricostruzione. I frammenti di dimensioni maggiori, che hanno anche una maggiore massa, tendono a posizionarsi lungo una linea centrale e derivano dalla frammentazione diretta del proiettile. Attorno a questi frammenti principali, si sviluppa un ventaglio di frammenti di dimensioni minori, che hanno origine sia dalla superficiale sfaldatura del proiettile in seguito all'urto, sia, in gran parte, dalla frammentazione del bumper.

La distribuzione delle dimensioni, e quindi delle masse, segue un andamento esponenziale decrescente all'aumentare dell'entità della sezione trasversale, come ci si potrebbe attendere. In dettaglio, si possono catalogare i frammenti come segue:

- 2 frammenti di dimensioni comprese tra 5 mm² e 6 mm²;
- 4 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm² e 3 mm²;
- 19 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm² e 2 mm²;
- 34 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm² e 1 mm²;

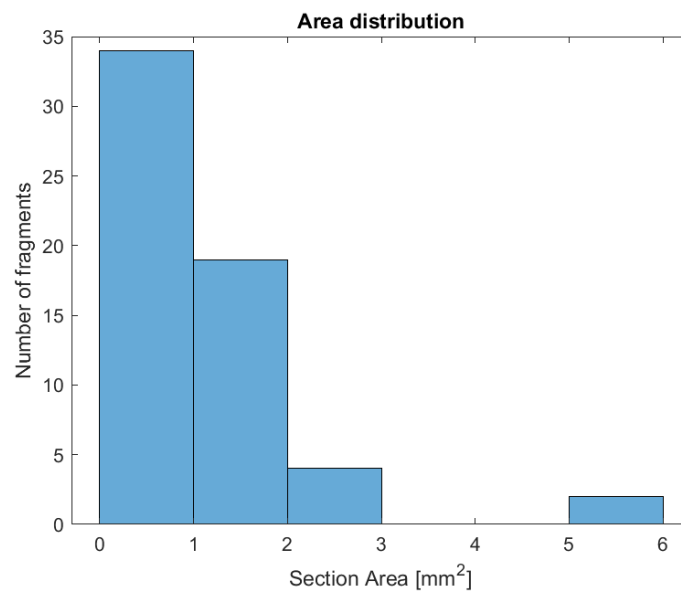


Fig. 13.5 Distribuzione delle sezioni #9245

La distribuzione esponenziale decrescente è un modello matematico che spiega la frequenza con cui si verificano gli eventi, in questo caso, le dimensioni dei frammenti. In

genere, ciò significa che ci sono molte particelle più piccole rispetto a frammenti di dimensioni più grandi, creando un andamento graduale. Questo modello è spesso osservato in situazioni di frammentazione o scomposizione, poiché i processi fisici tendono a generare una vasta gamma di dimensioni, con la prevalenza di frammenti più piccoli e una diminuzione progressiva del numero di frammenti più grandi.

I frammenti riportati in tabella rappresentano quelli individuati tramite l'osservazione delle registrazioni delle telecamere. È però indubbiamente certo che il numero effettivo di frammenti prodotti dall'impatto sia superiore, come indicato dal numero di crateri osservati sul wall retrostante, che ammonta a 709. Inoltre, non è escluso che più detriti possano impattare nello stesso punto del wall, creando un unico cratere.

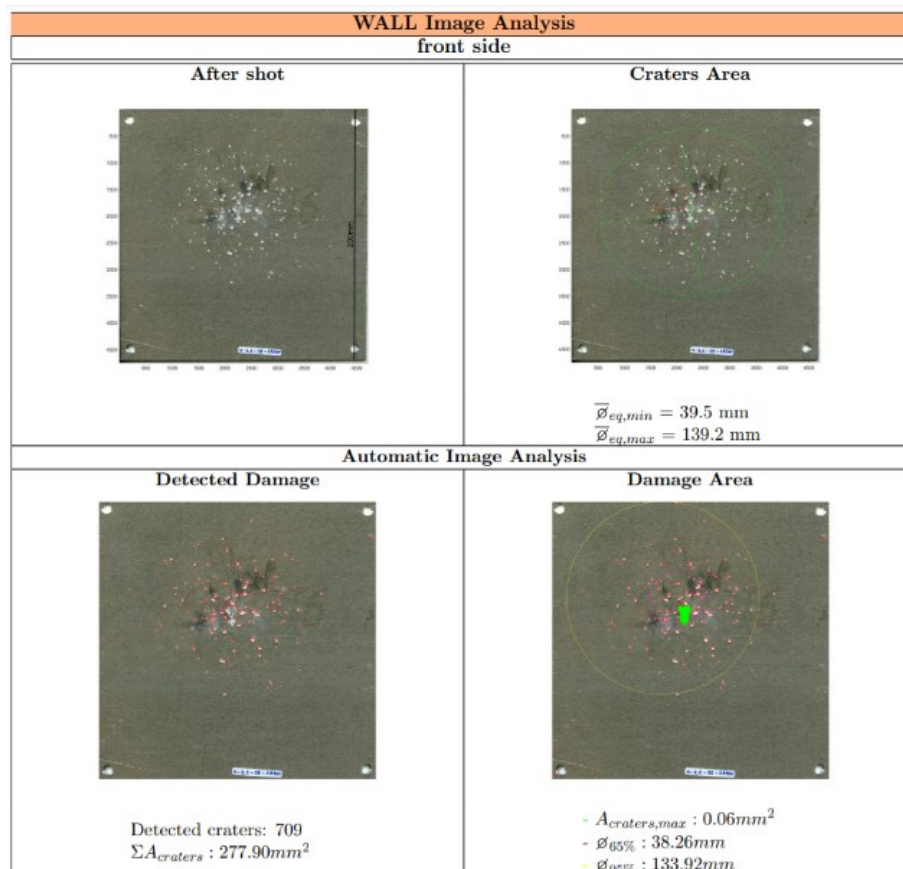


Fig. 13.6 Wall e crateri #9245

Per concludere, presentiamo le immagini relative all'analisi condotta sul foro del bumper.

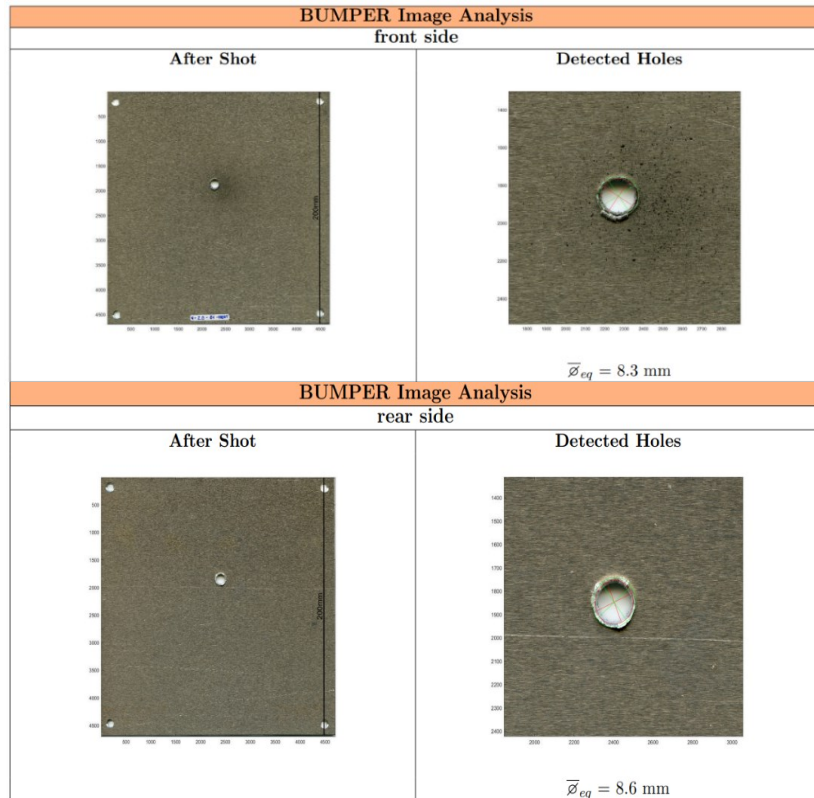


Fig. 13.7 Foro nel bumper #9245

In base al modello empirico di Maiden, otteniamo una dimensione teorica del foro, D_h , pari a 6.11 mm. Questo valore teorico, confrontato con il risultato empirico misurato di $D_h = 8.3 \text{ mm}$, presenta una discrepanza del 26.38%.

Nel caso della seconda equazione del modello di Hill, il diametro del foro previsto è di $D_h = 7.15 \text{ mm}$. La differenza tra questa stima teorica e il valore empirico misurato è del 13.85%. Si nota che il modello di Hill fornisce una stima più accurata rispetto al modello di Maiden.

6.1.2 Sparo 9250

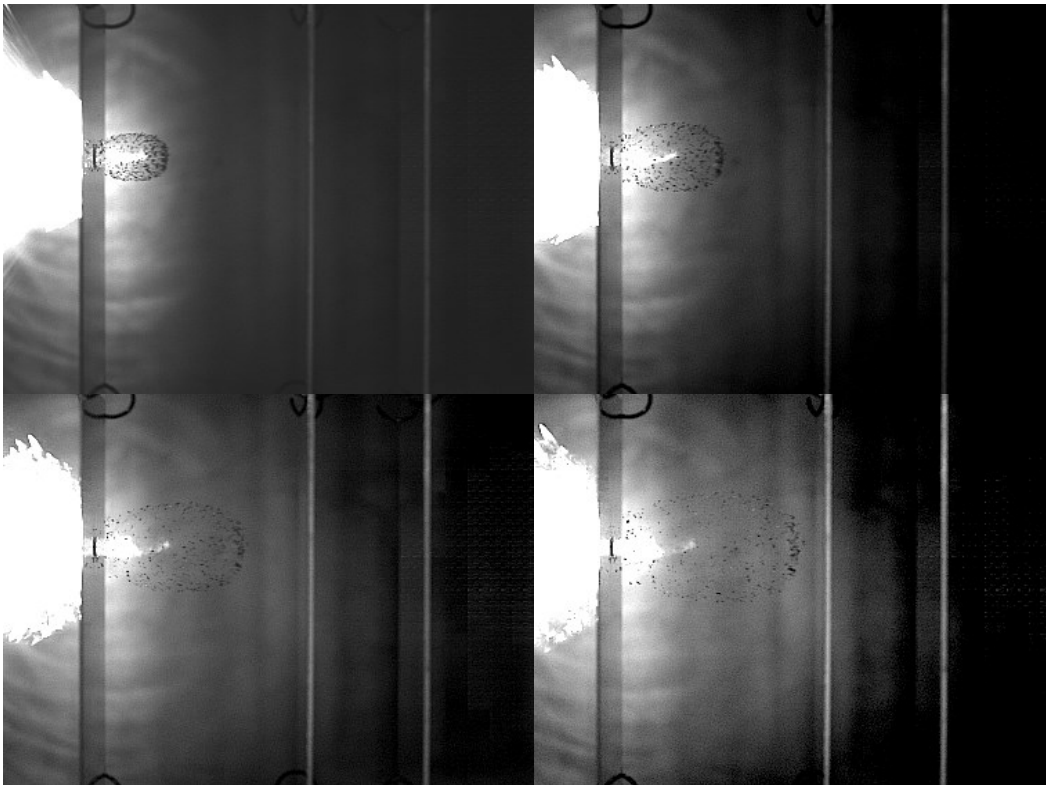


Fig. 14.1 Frame dello sparo #9250

La velocità del proiettile misurata sperimentalmente è $V_0 = 4.654$ km/s, notevolmente superiore rispetto alla velocità del precedente sparo. Tuttavia, tramite lo studio dei primi frame dello sparo, non è stato possibile determinare la velocità del proiettile mediante il software di analisi. Ciò è dovuto al fatto che vi sono solamente due frame utili disponibili prima dell'impatto, ma nel secondo frame il proiettile risulta nascosto dalla piastra, rendendo impossibile una stima accurata della sua posizione e, di conseguenza, della sua velocità.

A seguito dell'impatto, si genera una nuvola di detriti che avanza con una velocità media pari a $V_a = 2.76$ km/s, equivalente al 59.3% della velocità del proiettile. Da un'osservazione dettagliata di questi fotogrammi, è evidente la chiara forma ellittica della nuvola.

Secondo i modelli empirici, la velocità del frammento di dimensione maggiore dovrebbe essere $V_{LF} = 3.598$ km/s, mentre la massa del frammento più grande ammonterebbe a $M_{LF} = 0.02$ g. Tuttavia, è importante notare che il valore misurato di V_{LF} differisce da quello ottenuto tramite le registrazioni delle telecamere.

Le velocità medie di espansione del nube, rispettivamente in verticale e in profondità, sono state stimate pari a:

- $V_{EV} = 0.788$ km/s
- $V_{EP} = 0.847$ km/s

Va tenuto presente che, per calcolare la velocità di espansione in profondità, che fa affidamento sull'utilizzo della telecamera MIRO M310, è stato possibile utilizzare un solo frame a causa del frame rate inadeguato. Lo scarto tra le due è pari al 6.9 %, e la migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} .

L'angolo medio di apertura della nube è pari a 58.82° , con una deviazione standard pari a $s = \pm 3.33^\circ$, come rappresentato nel seguente grafico.

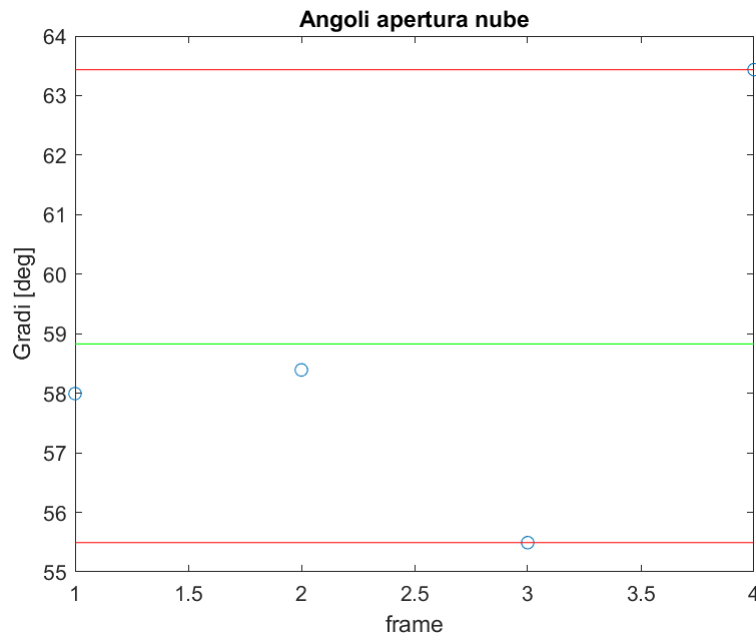


Fig. 14.2 Grafico degli angoli #9250

La ricostruzione bidimensionale è stata effettuata considerando le traiettorie di 60 frammenti.

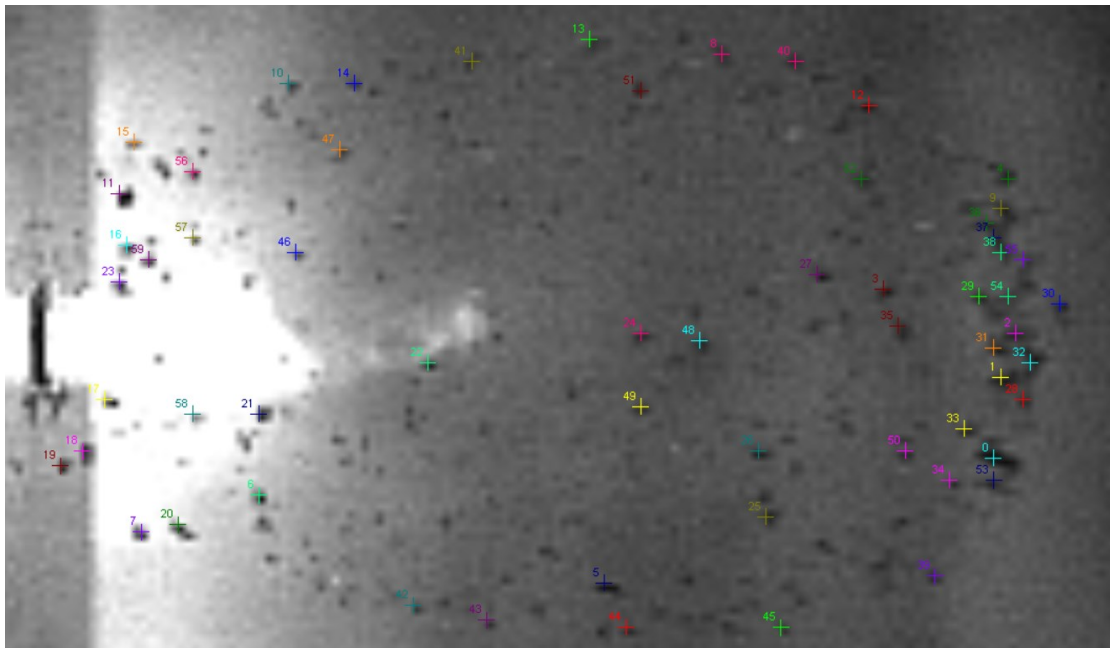


Fig. 14.3 Tracking dei frammenti #9250

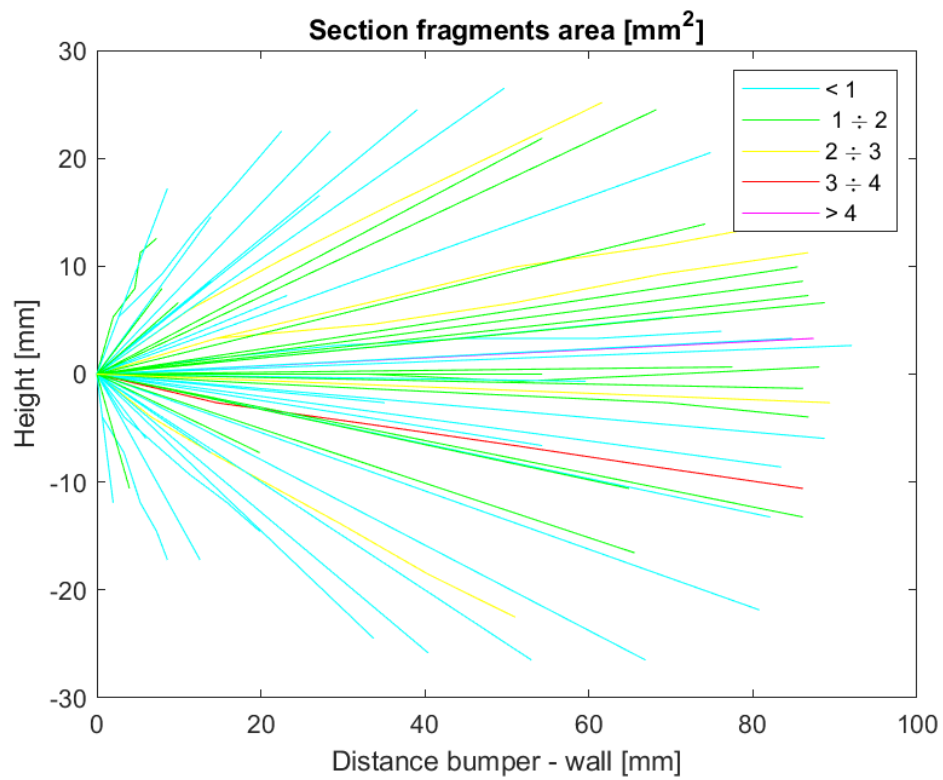


Fig. 14.4 Ricostruzione bidimensionale #9250

Da una prima osservazione, emerge chiaramente che il semiasse minore dell'ellisse, cioè l'estensione verticale della nuvola di detriti, è notevolmente più grande rispetto al caso precedente. In questo sparo, i frammenti durante il loro movimento verticale raggiungono quote di +27 mm rispetto all'altezza del punto di origine, mentre nel caso precedente solo pochi frammenti superavano appena i +20 mm. Di conseguenza, in questo secondo caso, la nuvola appare più estesa nel piano, con una migliore distribuzione, assumendo una forma a ventaglio. La distanza tra i frammenti che si estende dal punto più basso al punto più alto misura 5.3 cm.

È evidente che i frammenti di dimensione maggiore mostrino una tendenza a distribuirsi prevalentemente lungo l'asse orizzontale dell'ellisse. In particolare, il frammento di maggiori dimensioni, con una sezione trasversale di 5.2629 mm², segue una traiettoria quasi parallela alla direzione di sparo del proiettile. Questa osservazione suggerisce la possibilità che tale frammento derivi da una frammentazione incompleta del proiettile stesso.

Si riporta la distribuzione dei frammenti in funzione della dimensione. Anche in questo caso, si individua un andamento esponenziale decrescente, all'aumentare delle dimensioni.

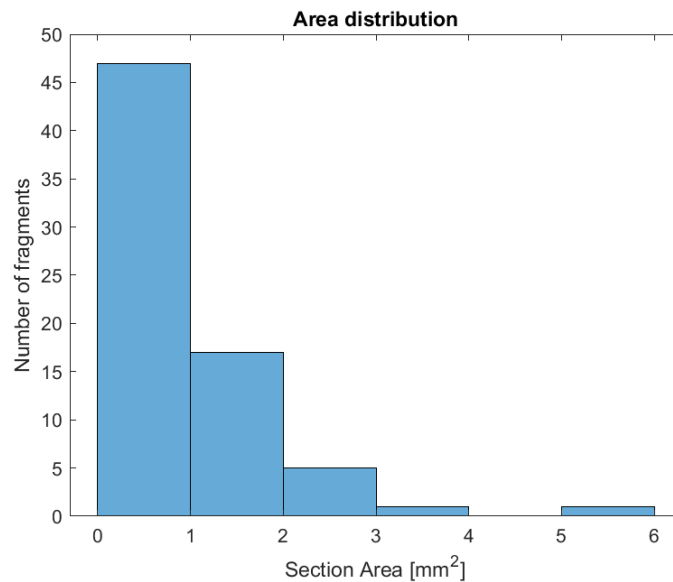


Fig. 14.5 Distribuzione delle sezioni #9250

Si catalogano:

- 1 frammento di dimensione compresa tra 5 mm² e 6 mm²;
- 1 frammento di dimensione compresa tra 3 mm² e 4 mm²;
- 5 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm² e 3 mm²;
- 17 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm² e 2 mm²;
- 47 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm² e 1 mm²;

Il numero di crateri osservati sulla piastra posteriore è di 1686. Questo dato indica che la frammentazione sia della sfera sia del bumper è avvenuta in modo significativamente più completo. Ciò è in linea con il fatto che la velocità del proiettile è notevolmente superiore rispetto al caso precedente. Infatti, una maggiore velocità di impatto del proiettile è associata a una frammentazione più completa degli elementi coinvolti.

L'osservazione di 1686 crateri sulla piastra posteriore fornisce una chiara evidenza della profondità della frammentazione, sia della sfera che del bumper, nel corso dell'evento. Questo numero notevole di crateri riflette il fatto che gli elementi coinvolti sono stati suddivisi in numerosi frammenti più piccoli durante la collisione. Questa osservazione è in perfetta coerenza con l'incremento significativo della velocità del proiettile rispetto al caso precedente. Quando un proiettile colpisce un oggetto a una velocità notevolmente elevata, l'energia cinetica trasferita durante l'impatto è sufficiente a frammentare i materiali coinvolti in molti elementi più piccoli. Questo è il motivo per cui, in casi di velocità d'impatto elevate, si verifica una frammentazione più completa degli elementi in gioco, dando luogo a un numero maggiore di crateri osservati sulla piastra posteriore.

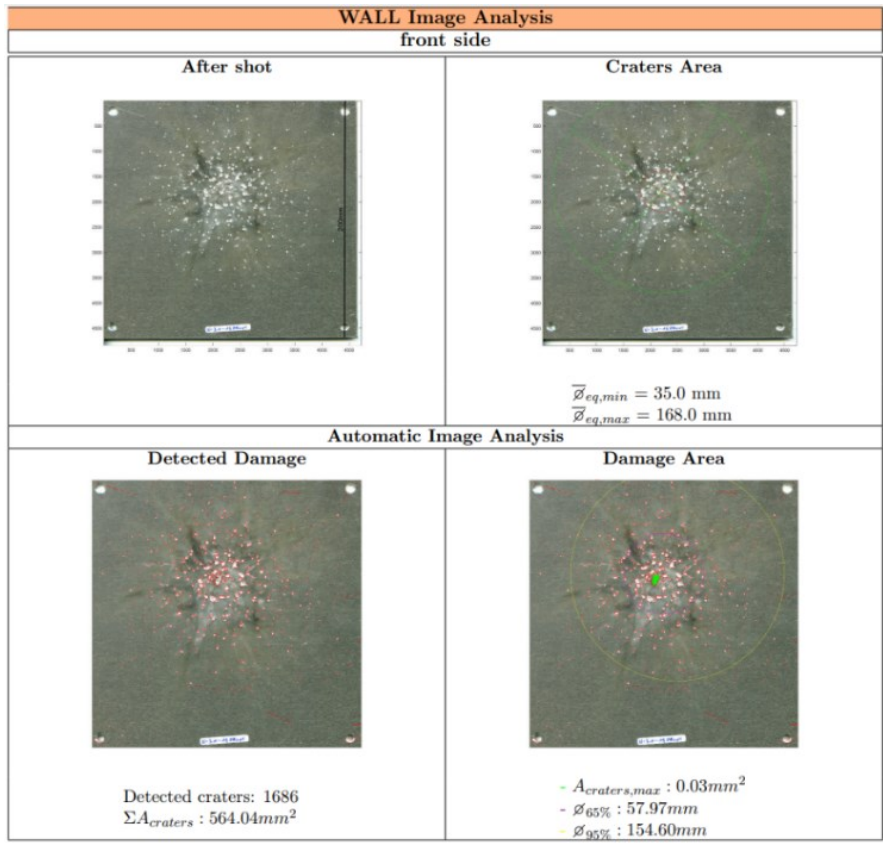


Fig. 14.6 Wall e crateri #9250

Si riporta infine l'analisi dell'estensione del foro nel bumper.

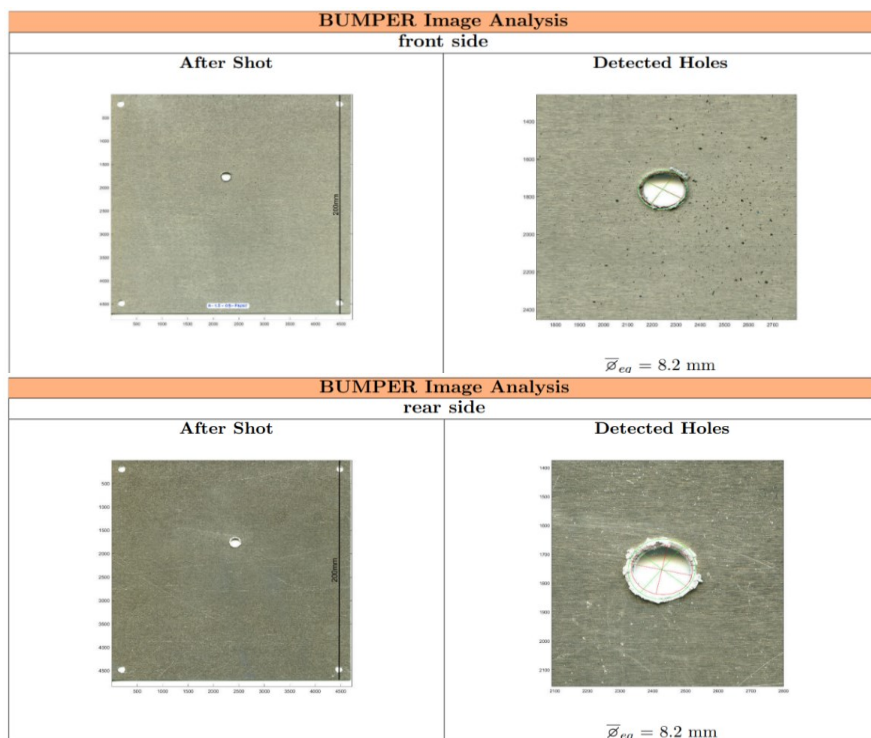


Fig. 14.7 Foro nel bumper #9250

Secondo il modello empirico di Maiden, il diametro del foro nel bumper è stimato pari a $D_h = 5.98 \text{ mm}$. Dai dati sperimentali per lo sparo 9250, però, risulta un diametro del foro pari a $D_h = 8.2 \text{ mm}$, quindi il modello di Maiden presenta un errore del 27 %. Secondo il modello di Hill, invece, il diametro del foro è pari a $D_h = 6.8 \text{ mm}$, più prossimo al valore sperimentale.

6.1.3 Sparo 9263

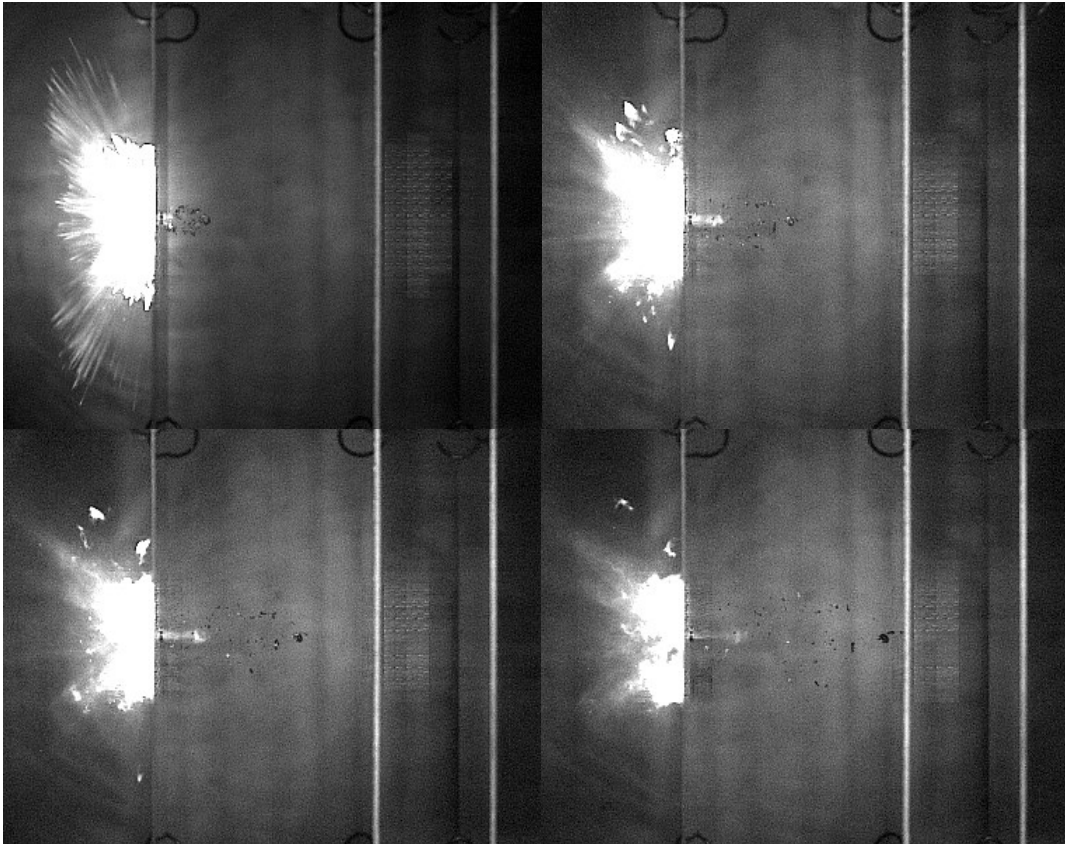


Fig. 15.1 Frame dello sparo #9263

La velocità del proiettile in laboratorio è pari a $V_0 = 2.587$ km/s. Questo è lo sparo con la velocità del proiettile più bassa osservata finora. Pertanto, è ragionevole attendersi un numero notevolmente inferiore di frammenti generati dall'impatto, con dimensioni medie maggiori e velocità di avanzamento ed espansione ridotte. La velocità del proiettile stimata con il video della telecamera V2511 è pari a $V_0' = 2.57$ km/s. Perciò, l'errore nella stima delle velocità della nube è pari a $\varepsilon = \pm 0.017$ km/s.

A seguito dell'impatto si genera una nuvola di detriti che avanza con una velocità media di avanzamento $V_a = 1.454$ km/s, che corrisponde al 56.2 % della velocità del proiettile.

Secondo i modelli scelti per il confronto, la velocità del frammento di dimensione maggiore dovrebbe essere $V_{LF} = 2.267$ km/s, e la massa del frammento più esteso è M_{LF}

= 0.018 g. Anche in questo caso non vi è riscontro dei nostri risultati sperimentali con il modello empirico.

Le velocità medie di espansione del nube, rispettivamente in verticale e in profondità, sono:

- $V_{EV} = 0.284$ km/s
- $V_{EP} = 0.313$ km/s

Si ricorda che, per la stima della velocità di espansione in profondità, ovvero quella che si basa sull'utilizzo della telecamera MIRO M310, è stato utilizzato un solo frame a causa dell'inadeguato frame rate della suddetta telecamera. Lo scarto tra le due è pari al 9.08 %. La migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} .

L'angolo medio di apertura della nube è pari a 36.51° , e lo scarto quadratico medio è $s = \pm 1.81^\circ$. Il grafico evidenzia l'andamento del valore dell'angolo di espansione stimato nei sette frame considerati. È interessante notare che, nei quattro frame più recenti, l'angolo stimato rimane costante. Questo aspetto può essere interpretato come un'indicazione di stabilità nell'espansione della nuvola di detriti durante quel periodo, suggerendo che i frammenti all'interno della nuvola si stiano muovendo in modo uniforme o che il processo di espansione stia raggiungendo una sorta di equilibrio.

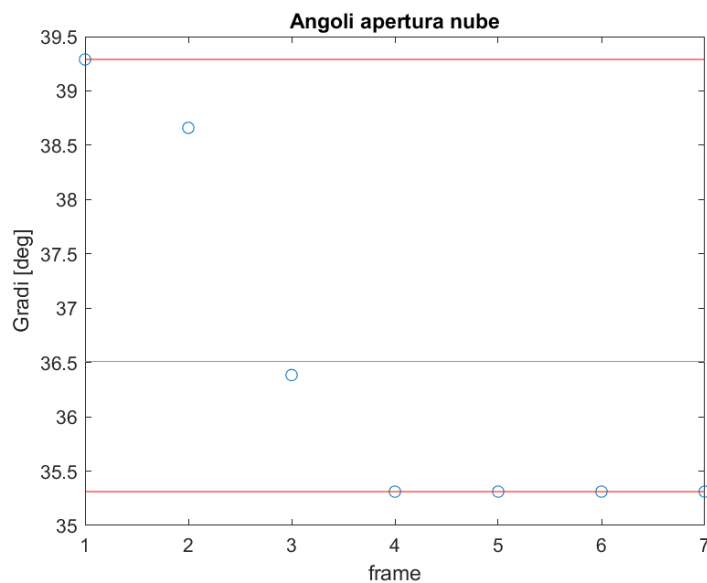


Fig. 15.2 Grafico degli angoli #9263

La ricostruzione bidimensionale è stata effettuata considerando le traiettorie di 42 frammenti.

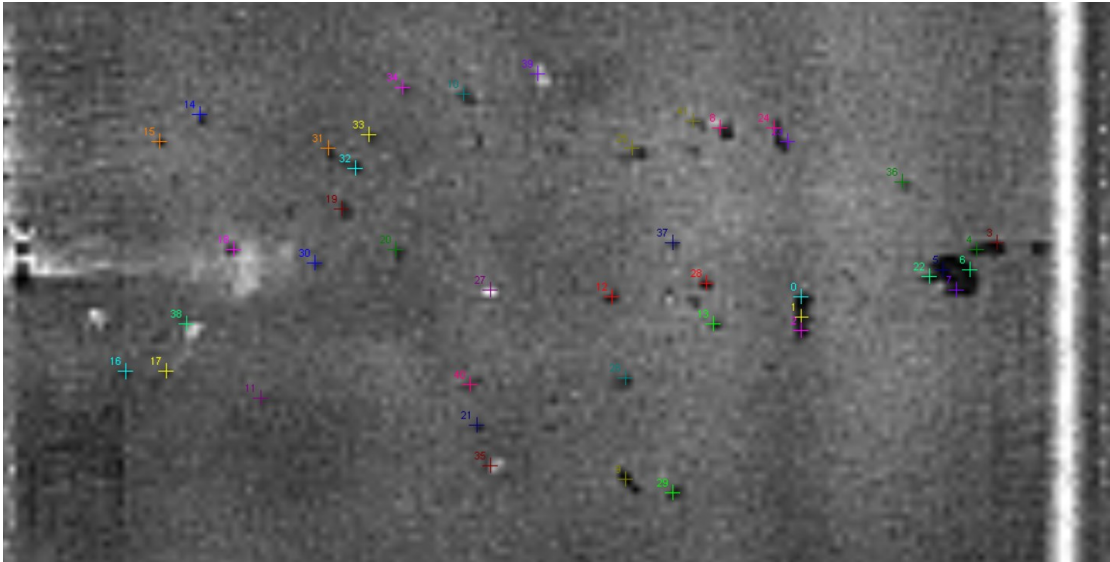


Fig. 15.3 Tracking dei frammenti #9263

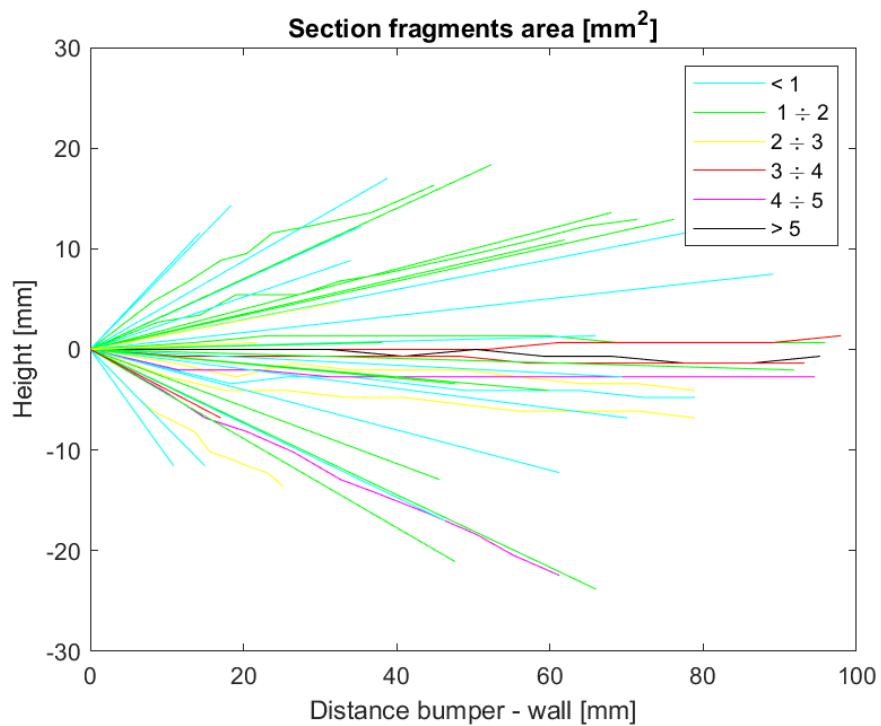


Fig. 15.4 Ricostruzione bidimensionale #9263

L'osservazione rivela un'interessante distribuzione dei frammenti di dimensione maggiore all'interno della scena dell'impatto. Questi frammenti sembrano tendere a distribuirsi prevalentemente lungo l'asse orizzontale dell'ellisse. Il frammento di dimensioni maggiori, con una sezione trasversale pari a 5.553 mm², segue una traiettoria quasi parallela con la direzione di avanzamento del proiettile.

Questo sparo mette in evidenza un aspetto importante: come già menzionato, vi è una marcata presenza di frammenti di dimensioni elevate, tutti posizionati attorno alla direzione del colpo. La velocità del proiettile in questo caso è relativamente bassa rispetto ai colpi precedenti, e questo aspetto è significativo. La bassa velocità del proiettile suggerisce che la frammentazione della sfera proiettile sia avvenuta in modo incompleto e superficiale. Si potrebbe ipotizzare che la maggior parte dei frammenti del proiettile derivi dalla sua sfaldatura superficiale, indicando che il processo di frammentazione si sia concentrato principalmente sugli strati più esterni della sfera proiettile, mentre il nucleo potrebbe essere rimasto relativamente intatto.

Viene presentata la distribuzione dei frammenti in base alle loro dimensioni. È interessante notare che questa distribuzione segue un andamento esponenziale decrescente, un modello tipico in situazioni simili.

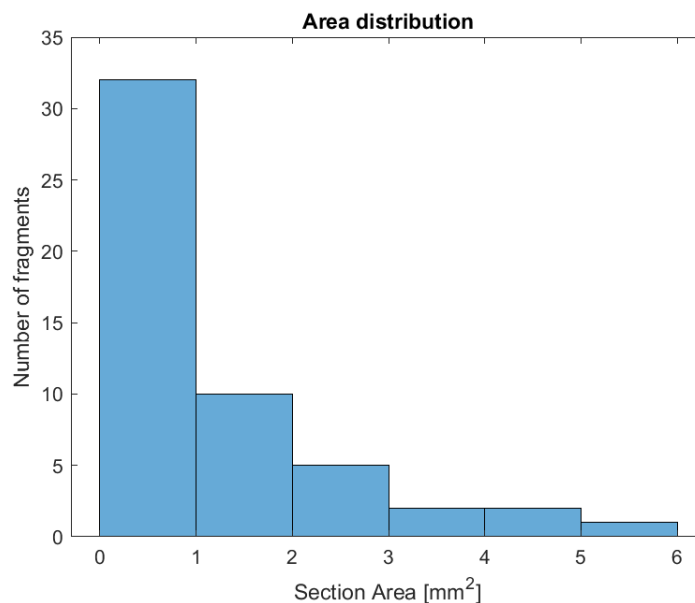


Fig. 15.5 Distribuzione delle sezioni #9263

Secondo questa distribuzione si individuano:

- 1 frammento di dimensione compresa tra 5 mm^2 e 6 mm^2 ;
- 2 frammenti di dimensioni comprese tra 4 mm^2 e 5 mm^2 ;
- 2 frammenti di dimensioni comprese tra 3 mm^2 e 4 mm^2 ;
- 5 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm^2 e 3 mm^2 ;
- 10 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm^2 e 2 mm^2 ;
- 32 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm^2 e 1 mm^2 ;

Il numero dei crateri che si individuano sulla piastra testimone retrostante è pari a 935.

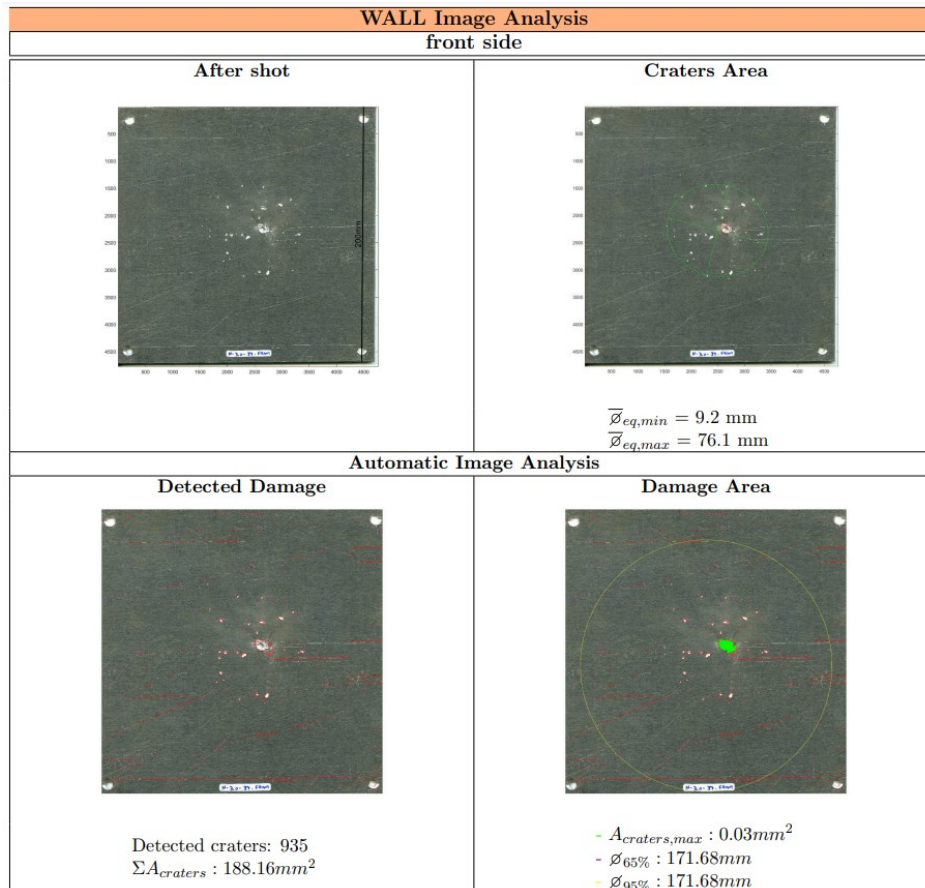


Fig. 15.6 Wall e crateri #9263

Si riporta infine l'analisi dell'estensione del foro nel bumper, e una fotografia della parete posteriore del witness, dove si individua un piccolo cratere.

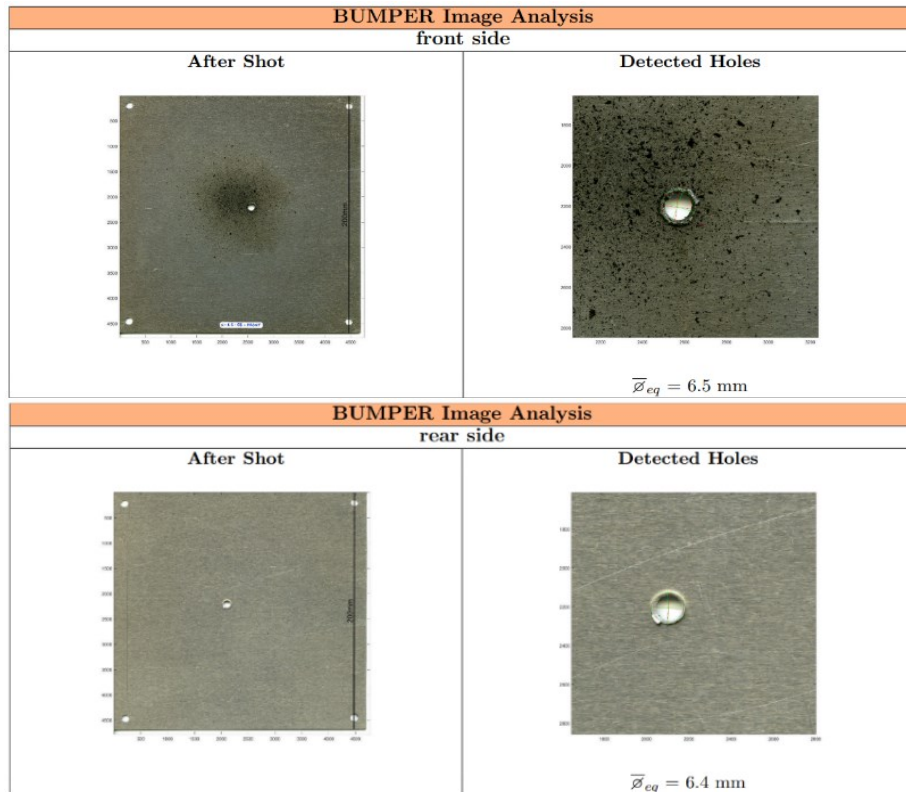


Fig. 15.7 Foro nel bumper #9263

Secondo il modello empirico di Maiden, il diametro del foro nel bumper è stimato pari a $D_h = 4.48 \text{ mm}$. Dai dati sperimentali per lo sparo 9263 però risulta un diametro del foro pari a $D_h = 6.5 \text{ mm}$, con un errore del 31 %. Il modello di Hill, più accurato, prevede un foro del bumper di diametro $D_h = 5.6 \text{ mm}$.

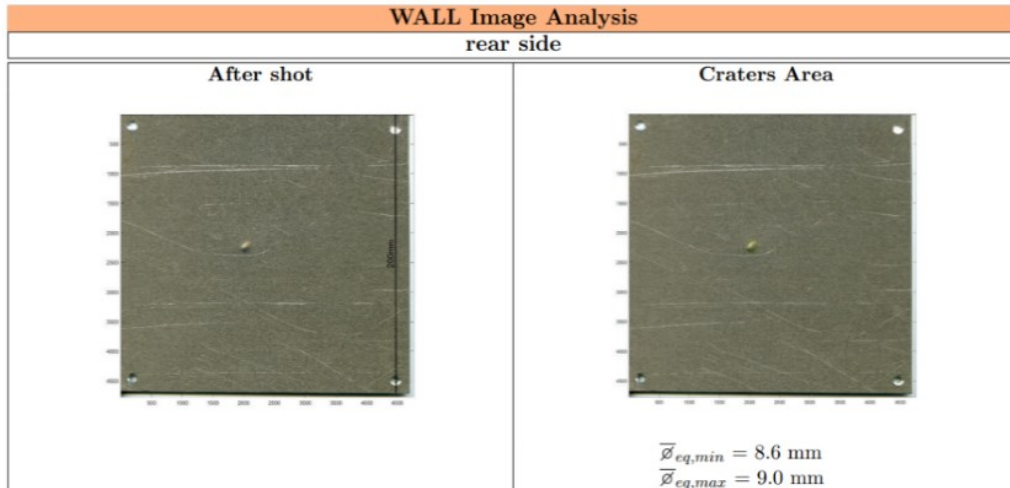


Fig. 15.8 Faccia posteriore del wall #9263

6.1.4 Sparo 9266

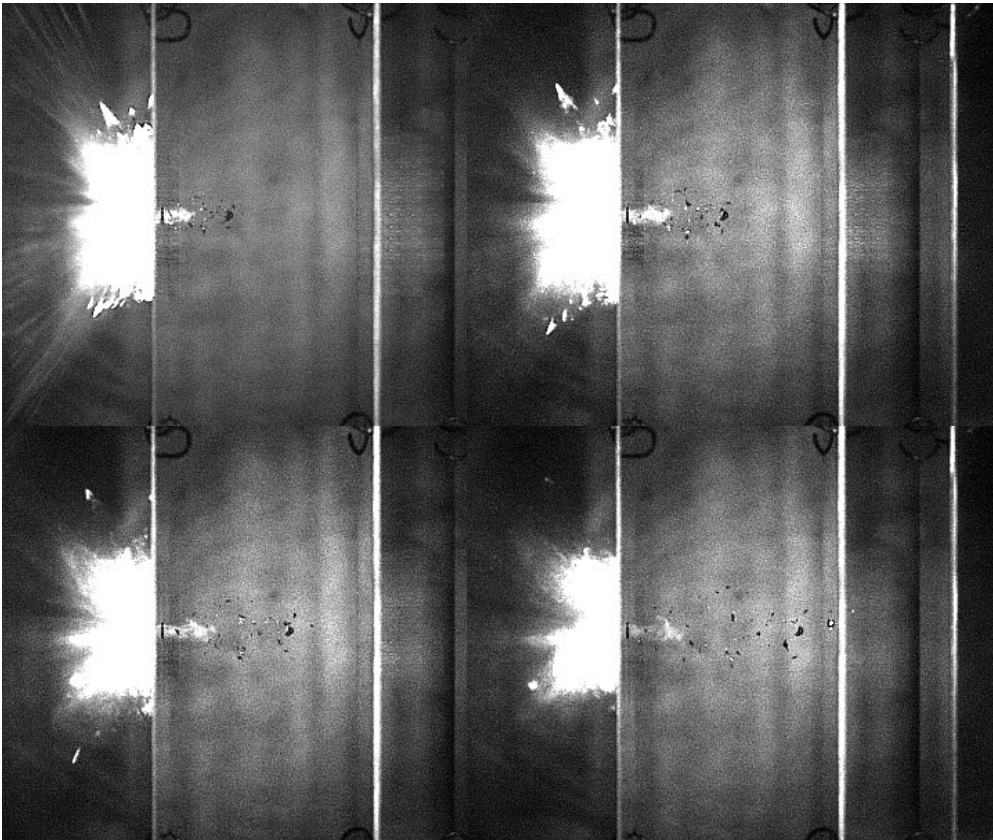


Fig. 16.1 Frame dello sparo #9266

La velocità del proiettile misurata sperimentalmente è pari a $V_0 = 2.619$ km/s. La velocità del proiettile stimata è $V_0' = 2.647$ km/s. Perciò, l'errore nella stima delle velocità della nube è pari a $\varepsilon = \pm 0.028$ km/s.

A seguito dell'impatto si genera una nuvola di detriti che procede con una velocità media di avanzamento $V_a = 1.183$ km/s, che corrisponde al 45.15 % della velocità del proiettile.

Secondo il modello Francesconi, la velocità del frammento di dimensione maggiore è $V_{LF} = 2.296$ km/s, e la massa del frammento più esteso è $M_{LF} = 0.018$ g.

Le velocità medie di espansione del nube, rispettivamente in verticale e in profondità, sono:

- $V_{EV} = 0.209$ km/s

- $V_{EP} = 0.22 \text{ km/s}$

È importante tenere presente che, al fine di stimare la velocità di espansione in profondità, che dipende dall'utilizzo della telecamera MIRO M310, è stato possibile utilizzare soltanto un singolo fotogramma. Questa limitazione è stata determinata dalla frequenza di acquisizione dei fotogrammi della telecamera MIRO M310, che è risultata inadeguata per una stima più precisa della velocità di espansione. Lo scarto tra le due è pari al 4.69 %, e la migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} .

L'angolo medio di apertura della nube è pari a 34.6° , con una deviazione standard $s = \pm 6.6^\circ$.

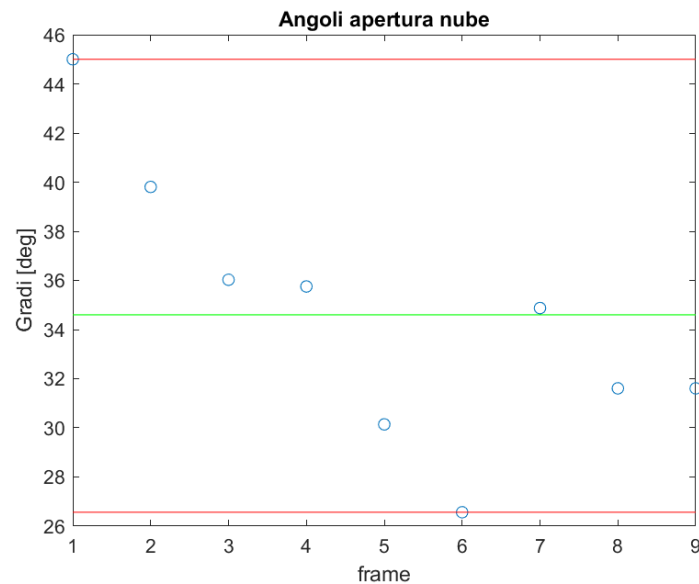


Fig. 16.2 Grafico degli angoli #9266

La ricostruzione bidimensionale è stata effettuata considerando le traiettorie di 41 frammenti.

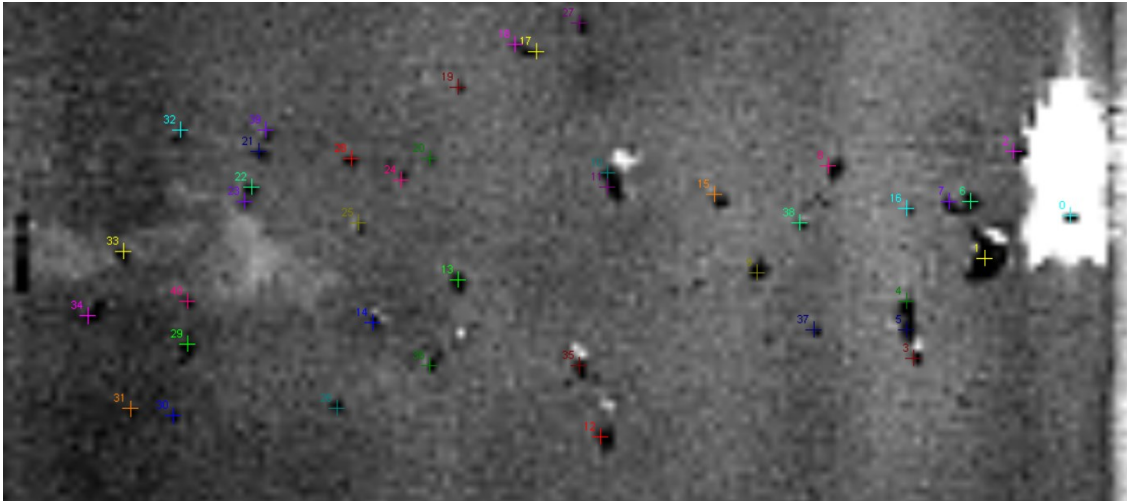


Fig. 16.3 Tracking dei frammenti #9266

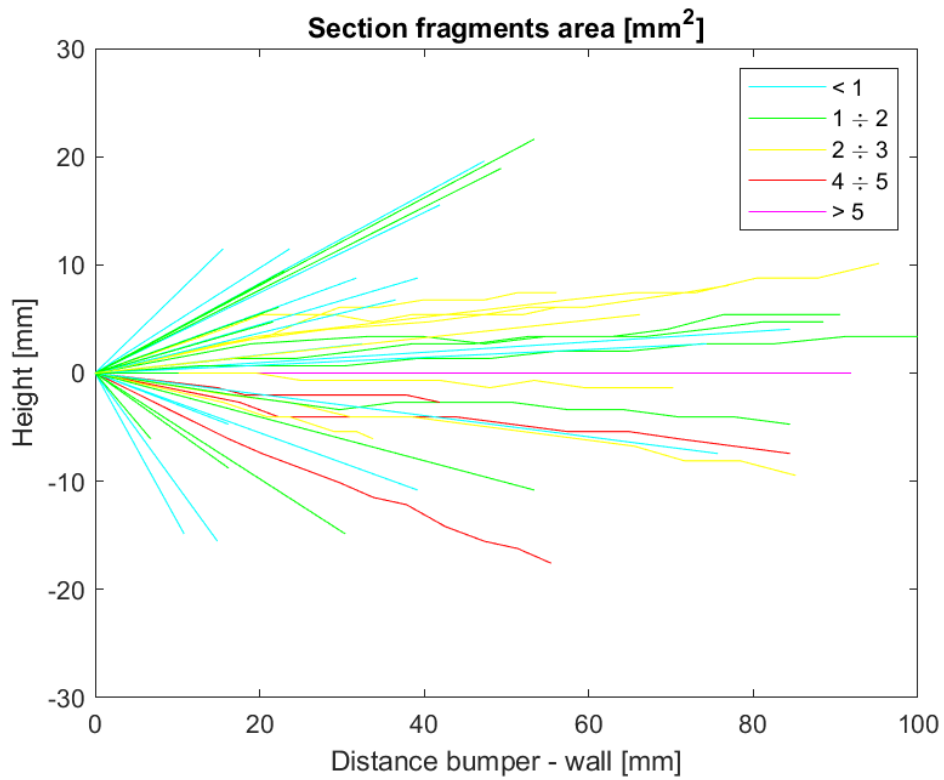


Fig. 16.4 Ricostruzione bidimensionale #9266

Si nota come i frammenti di dimensione maggiore siano distribuiti maggiormente lungo la direttrice orizzontale dell'ellisse, con il frammento maggiore, di sezione trasversale

pari a 10.957 mm^2 , che presenta una traiettoria parallela con la direzione del moto del proiettile. Il frammento di dimensioni maggiori rappresenta una parte significativa della massa complessiva del proiettile. Questo è evidente dalla traiettoria del frammento, che appare come il prolungamento naturale della traiettoria che il proiettile stesso avrebbe seguito se non fosse stato ostacolato dal bumper. Inoltre, è uno dei frammenti di maggiori dimensioni registrati finora.

Si riporta la distribuzione dei frammenti in base alle dimensioni.

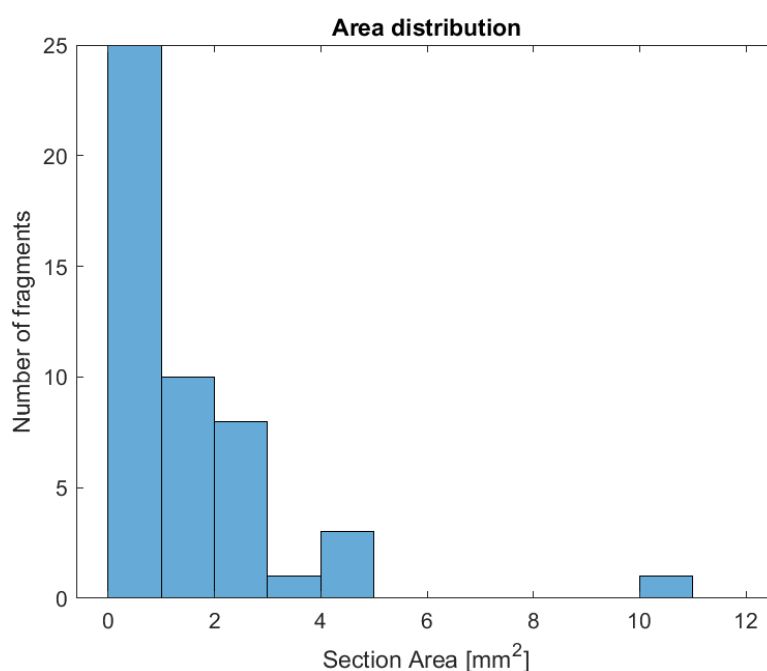


Fig. 16.5 Distribuzione delle sezioni #9266

Si registrano:

- 1 frammento di dimensione compresa tra 10 mm^2 e 11 mm^2
- 3 frammenti di dimensioni comprese tra 4 mm^2 e 5 mm^2
- 1 frammenti di dimensioni comprese tra 3 mm^2 e 4 mm^2
- 8 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm^2 e 3 mm^2
- 10 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm^2 e 2 mm^2
- 25 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm^2 e 1 mm^2

Il fatto che il numero di frammenti con una sezione compresa tra 3 e 4 mm² non segua l'andamento esponenziale decrescente è un aspetto insolito e merita una spiegazione aggiuntiva. Questa anomalia potrebbe essere attribuita alla possibilità che altri frammenti delle stesse dimensioni non siano stati rilevati durante l'analisi. Per comprendere meglio questa situazione, è fondamentale considerare le variabili coinvolte nell'osservazione e nella raccolta dei dati. L'efficacia del rilevamento dei frammenti dipende da diversi fattori, tra cui la sensibilità degli strumenti utilizzati e le condizioni sperimentali. Potrebbe esserci la possibilità che alcuni frammenti di dimensioni comprese tra 3 e 4 mm² siano sfuggiti al rilevamento a causa di limitazioni strumentali o di condizioni ambientali specifiche, in particolare l'illuminazione.

Il numero di crateri individuati sulla piastra testimone retrostante ammonta a 218. La spiegazione di questo basso numero di crateri risiede nella limitata velocità dell'impatto. Questa velocità ridotta non favorisce il processo di frammentazione, il che comporta la generazione di un numero minore di particelle che possono successivamente impattare il muro retrostante.

È importante notare che la velocità d'impatto è un fattore chiave nel processo di frammentazione. A velocità più elevate, la forza dell'impatto è sufficiente a frammentare il corpo impattante in molte più particelle, generando una maggiore quantità di crateri sulla superficie del muro retrostante. Tuttavia, quando l'impulso è limitato, come nel caso in questione, la capacità di frammentazione è compromessa, portando a una minor quantità di frammenti generati.

Oltre alla velocità di impatto relativamente modesta, è importante considerare che il numero limitato di frammenti è certamente influenzato anche dallo spessore maggiore della piastra frontale, che è pari a $t_b = 2$ mm. L'incremento dello spessore della piastra frontale ha un impatto significativo sulla frammentazione degli oggetti che la colpiscono. Quando l'oggetto impattante raggiunge la piastra, potrebbe non frammentarsi completamente a causa della maggiore resistenza e del potenziale effetto di assorbimento di energia generato dallo spessore superiore. Questo porterebbe a una minore generazione di frammenti e, quindi, al numero limitato osservato nella ricostruzione dell'evento.

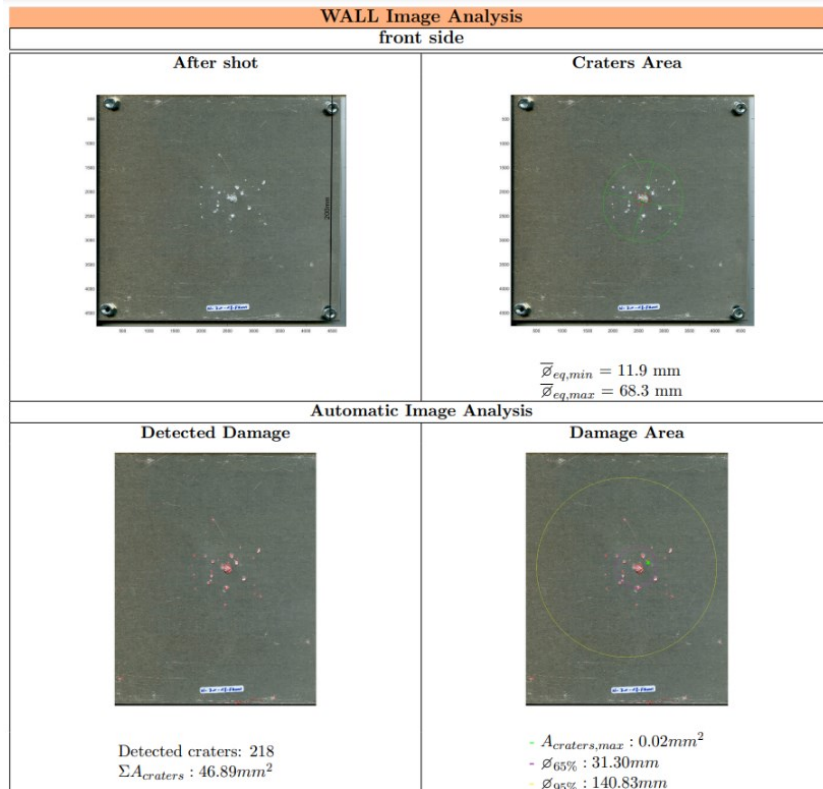


Fig. 16.6 Wall e crateri #9266

Si riporta infine l'analisi dell'estensione del foro nel bumper.

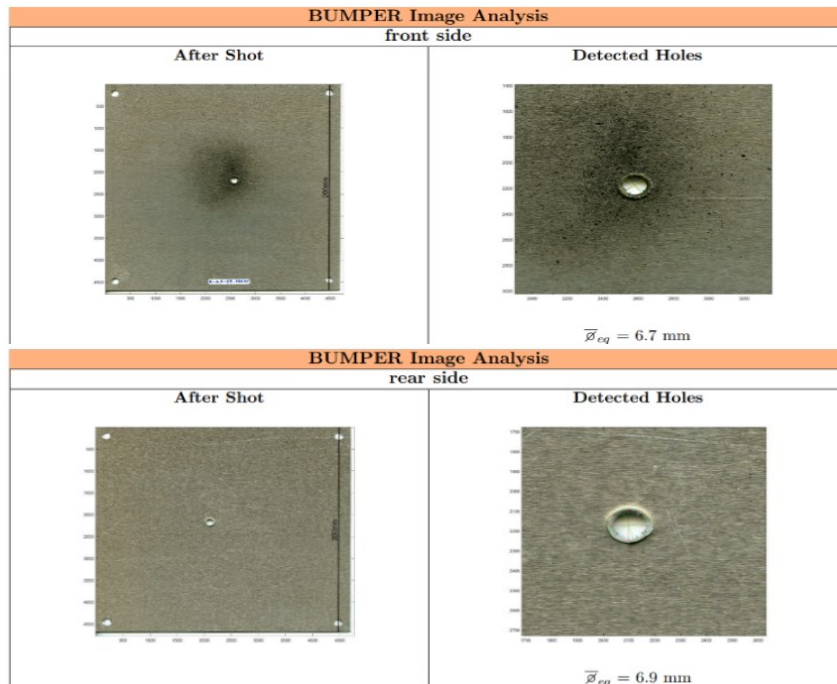


Fig. 16.7 Foro nel bumper #9266

Secondo il modello empirico di Maiden, il diametro del foro nel bumper è stimato pari a $D_h = 4.91$ mm. Dai dati sperimentali per lo sparo 9266 però risulta un diametro del foro pari a $D_h = 6.7$ mm, con un errore del 26.71 %. Secondo il modello di Hill, invece, il diametro del foro si attesta a $D_h = 6.21$ mm, e si discosta solo del 7.3 %.

6.1.5 Sparo 9264

Questo sparo, anche se proceduralmente fa parte dei successi, è stato catalogato come “wrong shot”, o tiro sbagliato, in quanto si voleva testare una piastra di spessore diverso rispetto a quella effettivamente presa in esame.

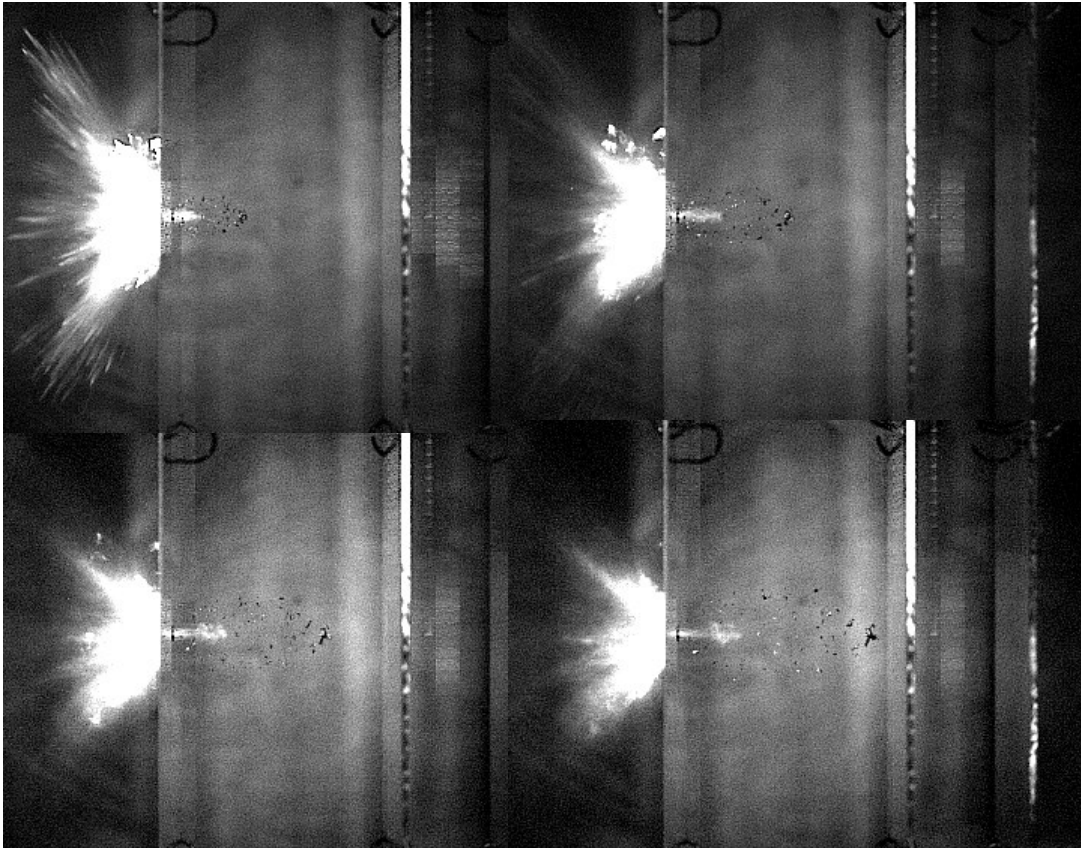


Fig. 17.1 Frame dello sparo #9264

La velocità del proiettile misurata con il sistema di rilevamento laser è pari a $V_0 = 2.643$ km/s, mentre la velocità stimata con il software è $V_0' = 2.589$ km/s. Quindi, l'errore nella stima delle velocità della nube si attesta a $\varepsilon = \pm 0.054$ km/s.

A seguito dell'impatto si genera una nuvola di detriti che avanza con una velocità media di avanzamento $V_a = 1.509$ km/s, che corrisponde al 57.09 % della velocità del proiettile.

Secondo i modelli empirici, la velocità del frammento di dimensione maggiore sarebbe pari a $V_{LF} = 2.041$ km/s, e la massa del frammento più esteso è $M_{LF} = 0.02$ g.

Le velocità medie di espansione del nube, rispettivamente in verticale e in profondità, sono:

- $V_{EV} = 0.298$ km/s
- $V_{EP} = 0.327$ km/s

Si ricorda che, per la stima della velocità di espansione in profondità, ovvero quella basata sull'utilizzo della telecamera MIRO M310, è stato utilizzato un solo frame. Lo scarto tra le due è pari al 9.87 %, e la migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} .

L'angolo medio di apertura della nube è pari a 38.66° , con deviazione standard $s = \pm 3.92^\circ$.

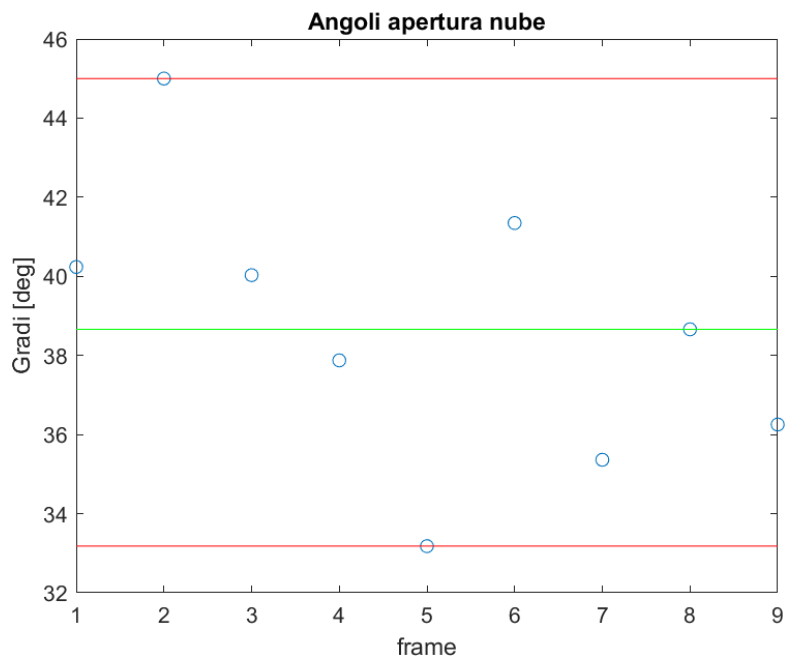


Fig. 17.2 Grafico degli angoli #9264

La ricostruzione bidimensionale è stata effettuata considerando le traiettorie di 38 frammenti.

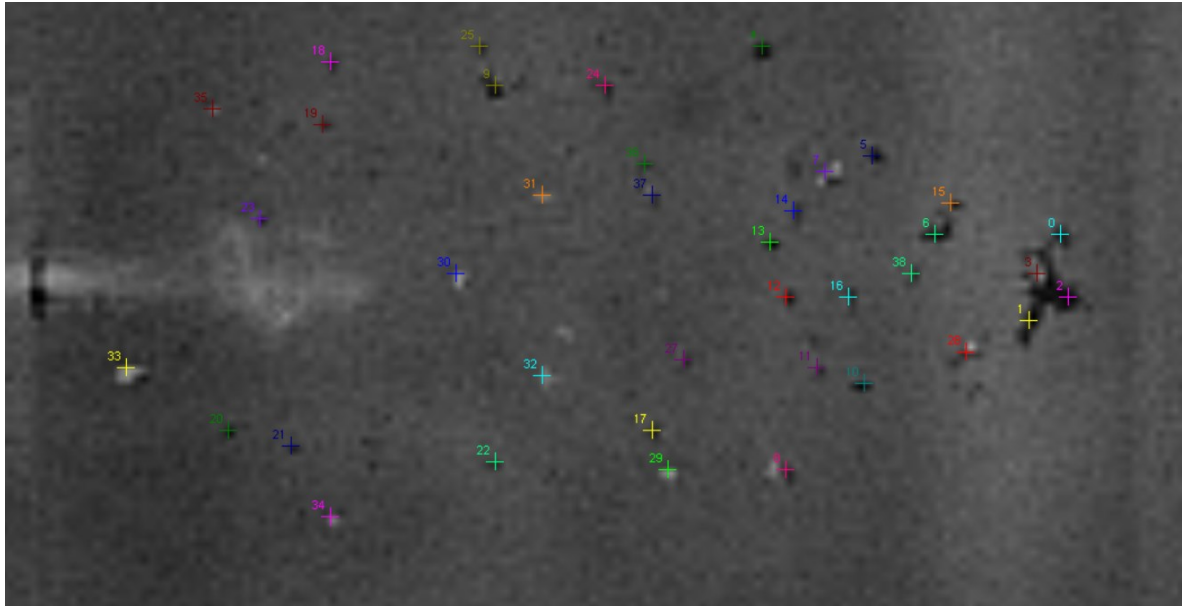


Fig. 17.3 Tracking dei frammenti #9264

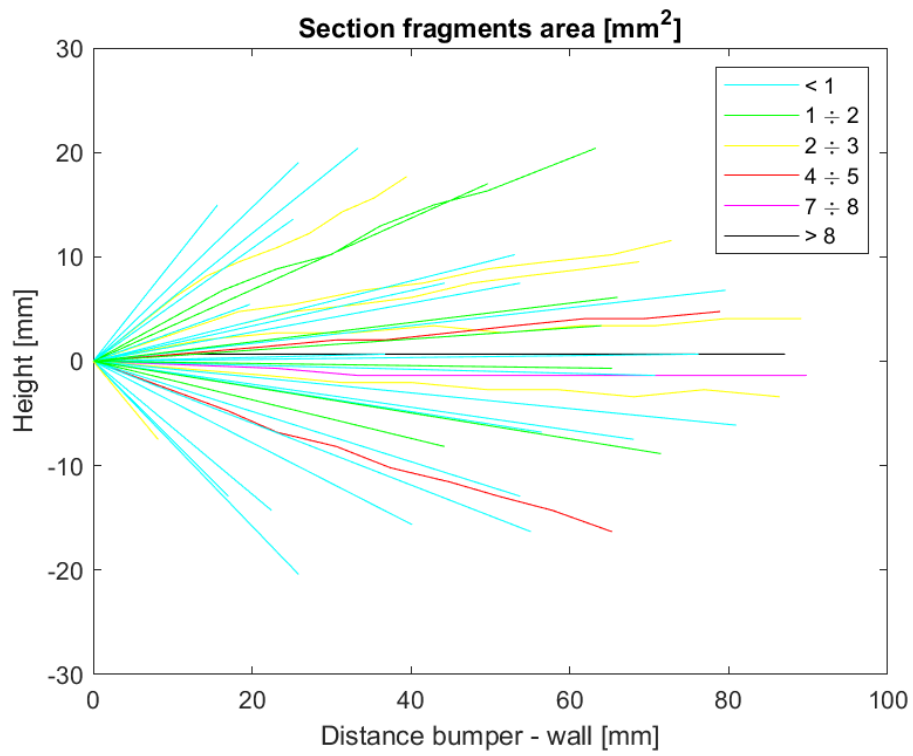


Fig. 17.4 Ricostruzione bidimensionale #9264

Come nel caso del precedente test di sparo, il frammento di dimensioni maggiori, che è il frammento più grande mai registrato in questa campagna sperimentale, segue una traiettoria che costituisce una continuazione naturale della traiettoria del proiettile. Non è un caso che la sua sezione trasversale sia più ampia rispetto al caso precedente, e questo è in parte dovuto allo spessore diverso del bumper utilizzato, che è passato da 2 mm nel caso del test 9266 a 1.5 mm in questo sparo.

Durante il processo di impatto, il proiettile ha subito una sfaldatura superficiale, ma la maggior parte della sua massa non è stata frammentata. Questo fenomeno è significativo in quanto mette in luce come un sistema di protezione Whipple con queste caratteristiche potrebbe non essere completamente efficace nel prevenire danni significativi alle strutture posteriori al bumper.

In effetti, alla fine dell'analisi di questo test, è evidente come il proiettile, che non si è frammentato completamente, abbia causato la creazione di un cratere ben visibile nel wall, indicando il potenziale per danni significativi alle strutture posteriori al bumper in situazioni simili.

Si riporta la distribuzione dei frammenti in base alle dimensioni.

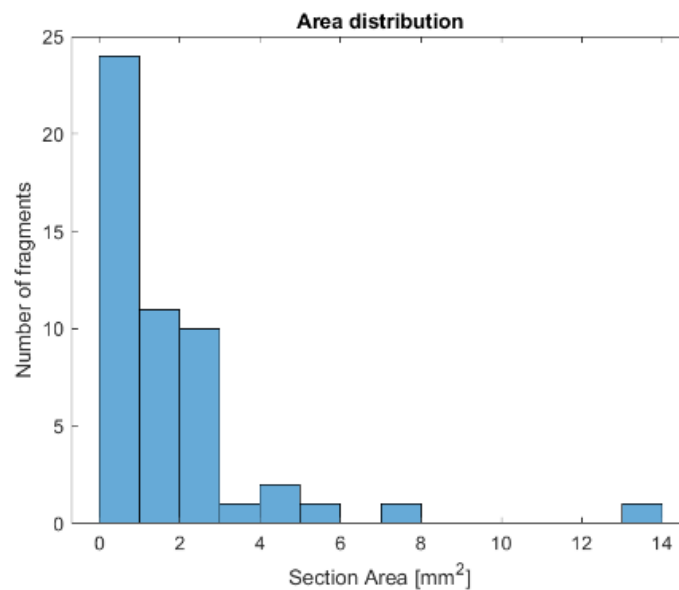


Fig. 17.5 Distribuzione delle sezioni #9264

La distribuzione comprende:

- 1 frammento di dimensione compresa tra 13 mm^2 e 14 mm^2
- 1 frammento di dimensione compresa tra 7 mm^2 e 8 mm^2
- 1 frammento di dimensione compresa tra 5 mm^2 e 6 mm^2
- 2 frammenti di dimensioni comprese tra 4 mm^2 e 5 mm^2
- 1 frammenti di dimensioni comprese tra 3 mm^2 e 4 mm^2
- 10 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm^2 e 3 mm^2
- 11 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm^2 e 2 mm^2
- 24 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm^2 e 1 mm^2

Dall'analisi del grafico, è evidente una notevole diminuzione nel numero di frammenti con dimensioni superiori a 3 mm^2 rispetto al numero di frammenti con dimensioni minori.

Il numero dei crateri che si individuano sulla piastra testimone retrostante è pari a 514. Si noti come si tratta sempre di un numero limitato di crateri, se paragonato agli effetti prodotti da altri spari più veloci.

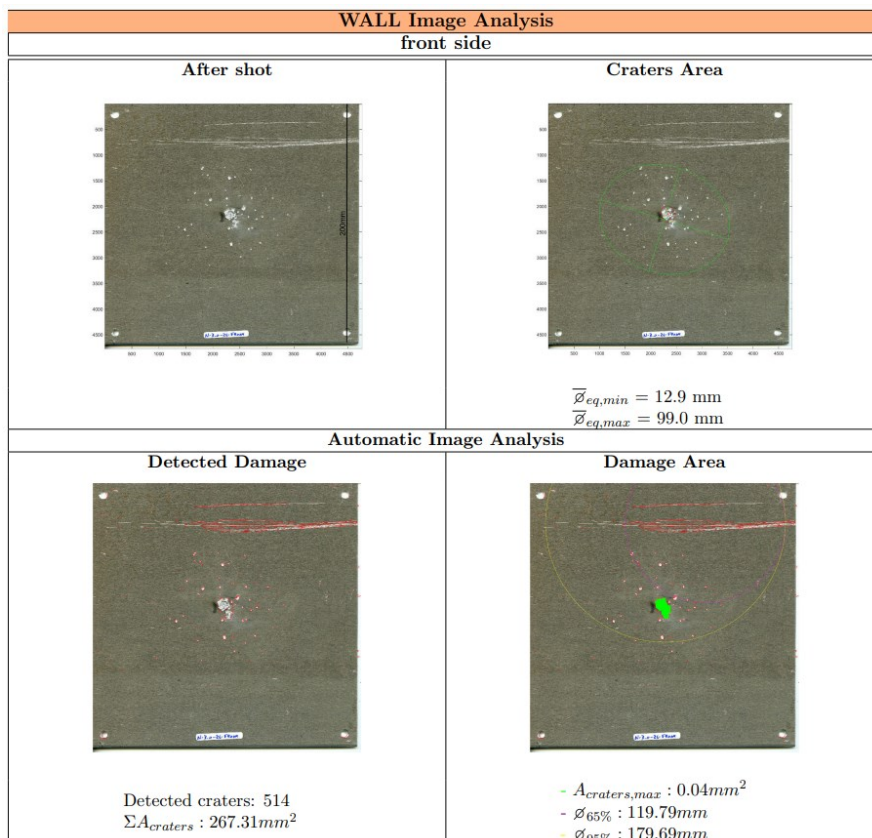


Fig. 17.6 Wall e crateri #9264

Si riporta infine l'analisi dell'estensione del foro nel bumper.

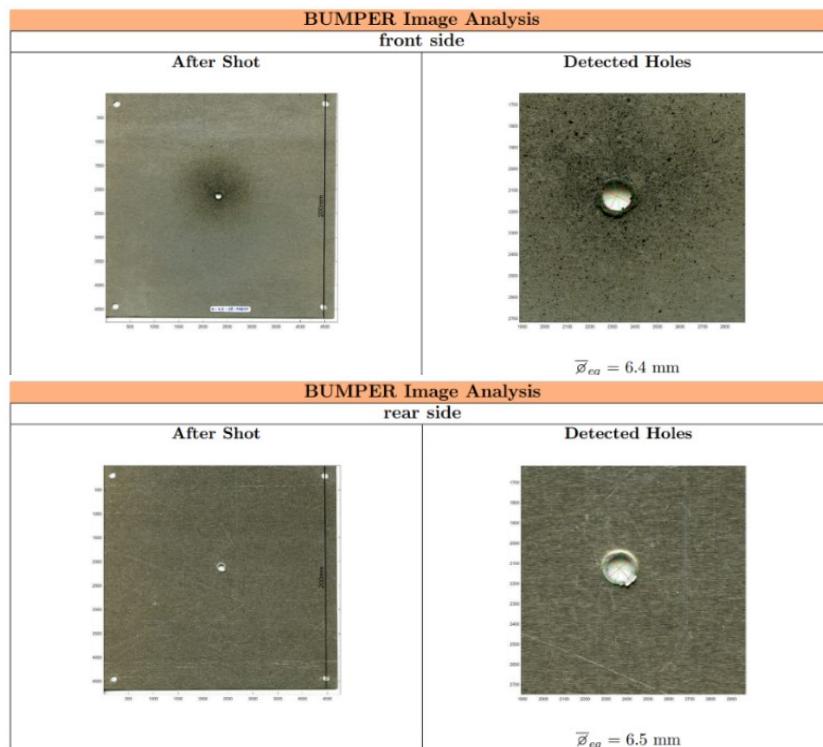


Fig. 17.7 Foro nel bumper #9264

Secondo il modello empirico di Maiden, il diametro del foro nel bumper è stimato pari a $D_h = 4.52 \text{ mm}$. Dai dati sperimentali per lo sparo 9264 però risulta un diametro del foro pari a $D_h = 6.4 \text{ mm}$, quindi c'è un errore del 29.37 % per la stima da parte del modello. Secondo Hill, invece, il diametro del foro si attesterebbe a $D_h = 5.64 \text{ mm}$.

Come anticipato, viene presentata ora la parete posteriore del wall, nella quale si osserva un evidente cratere. Ciò che risulta interessante da notare è che i crateri nella piastra posteriore si manifestano solamente nei casi in cui la frammentazione non avviene in modo completo e nelle situazioni in cui sono presenti frammenti che, a causa delle loro dimensioni significative, si discostano dalla tipica distribuzione esponenziale decrescente.

Per questo particolare test di sparo, non si è verificato il cosiddetto "detached spall," ossia il distacco di frammenti dalla parete posteriore del wall. Di conseguenza, da un punto di

vista tecnico, non è stata soddisfatta, sebbene per poco, una delle condizioni che potrebbero indicare il failure del sistema.

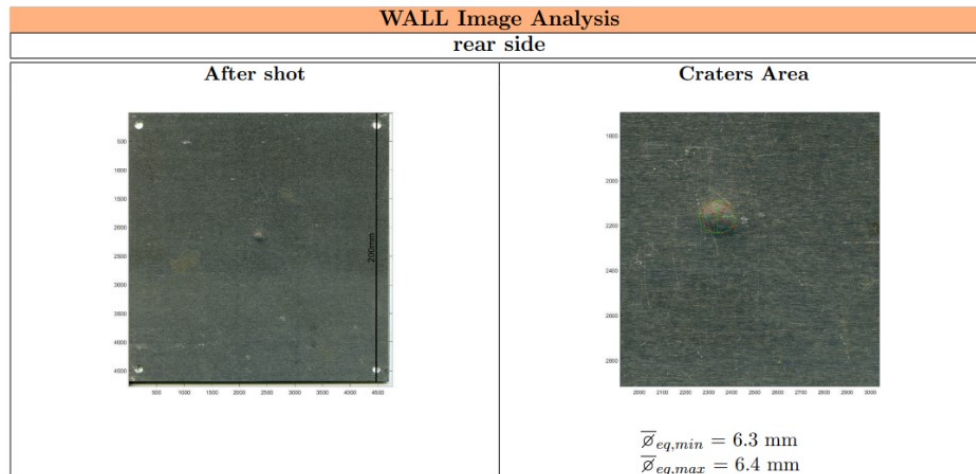


Fig. 17.8 Faccia posteriore del wall #9264

6.2 Sabot failure

La categoria di "sabot failure" comprende tutti quegli spari in cui non si verifica il rilascio perfetto della sfera proiettile dall'alloggiamento tra i quattro sabot. In particolare, uno dei sabot segue la traiettoria della sfera proiettile e impatta con il bumper, dopo che la sfera ha perforato quest'ultimo. Questo comporta due di perforazione nel bumper: uno corrispondente alla sfera proiettile e l'altro causato dal sabot.

Un aspetto notevole di questa situazione è che l'impatto del sabot con il bumper genera un forte flash di luce che si propaga sull'intera area dell'esperimento. Questa intensa emissione luminosa ostacola l'osservazione accurata delle fasi finali dell'espansione della nuvola di detriti, rendendo difficile la ricostruzione bidimensionale completa del processo.

Di conseguenza, in questi casi, la ricostruzione bidimensionale dello sparo è limitata agli istanti iniziali dell'espansione della nuvola, e ciò significa che non è possibile ottenere una visione completa del comportamento della nuvola di detriti durante il suo sviluppo. Questo fenomeno evidenzia l'importanza di un rilascio preciso del proiettile dai sabot e sottolinea come anche piccole deviazioni da questa condizione possano avere un impatto significativo sulla dinamica complessiva dell'evento sperimentale.

6.2.1 Sparo 9252

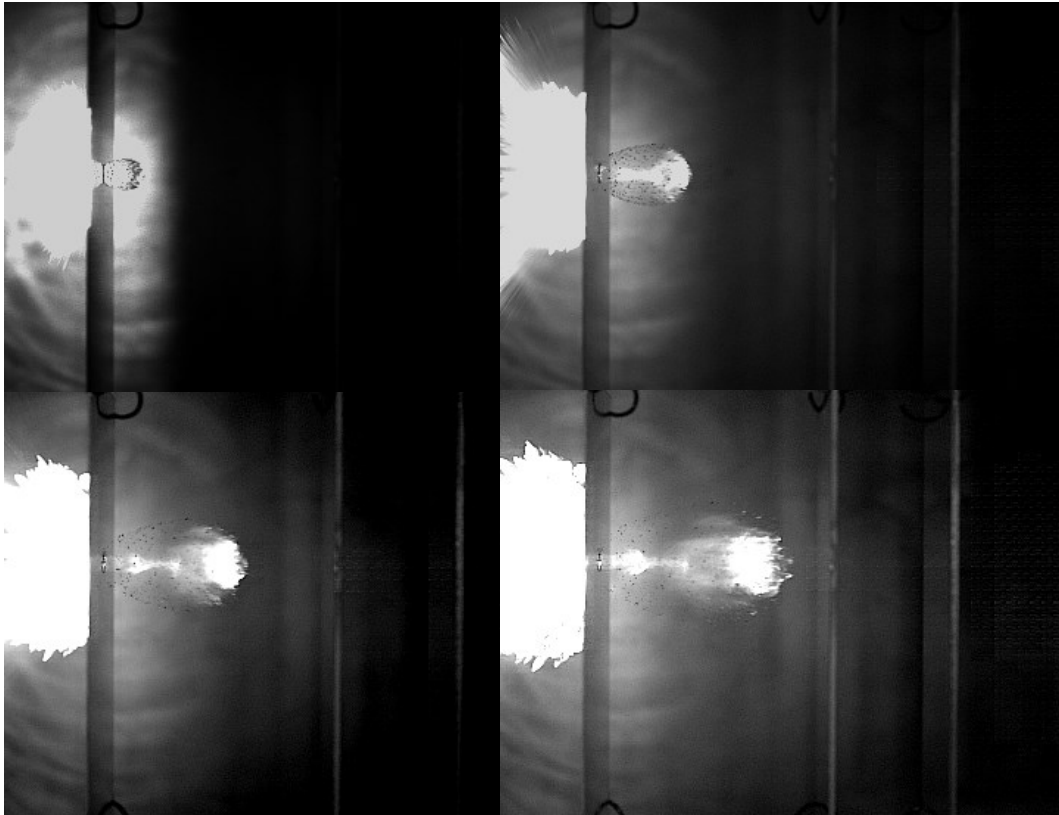


Fig. 18.1 Frame dello sparo #9252

Il test di sparo 9252 rappresenta il caso migliore da un punto di vista teorico, in quanto permette di delineare con estrema precisione la forma ellittica della nuvola di detriti. Questa caratteristica rende l'analisi di questo evento più semplice e immediata. Si invita il lettore a dedicare un momento per ammirare l'eccezionale precisione di questa nuvola.

Tuttavia, è importante notare che sono disponibili solamente quattro frame utili per lo studio di questo evento. Dopo l'ultimo frame, si verificano due impatti successivi che compromettono la qualità delle immagini. Inizialmente, vi è l'impatto della nuvola contro il rear plate, e successivamente, l'impatto del sabot contro il bumper. Questi impatti generano una quantità eccessiva di luce che rende le immagini completamente inutilizzabili, senza possibilità di attenuarne l'intensità in alcun modo.

Il proiettile di alluminio viaggia ha una velocità $V_0 = 4.625$ km/s. Questa è una delle velocità più elevate che siano state analizzate finora. Come nel caso dello sparo 9250, dove la velocità di impatto è $V_0 > 4.5$ km/s, la nuvola di detriti è chiaramente visibile e ben delineata. È rilevante notare che in questo sparo si usa la piastra con lo spessore minore finora testato, pari a $t_b = 1$ mm. Non è stato possibile stimare la velocità del proiettile in quanto, simili al caso dello sparo 9250, i frame precedenti all'impatto utili all'analisi sono solamente due e nel secondo frame il proiettile è nascosto dal bumper, rendendo impossibile determinarne la posizione con precisione.

Considerando anticipatamente la velocità dell'impatto e lo spessore del bumper, ci aspettiamo un alto grado di frammentazione. Questo dovrebbe tradursi in un elevato numero di frammenti generati durante l'impatto e, di conseguenza, in una numerosa quantità di crateri sulla piastra posteriore. L'osservazione di questo fenomeno è rilevante in quanto sottolinea come la velocità dell'impatto e lo spessore del materiale bersaglio siano parametri critici che influenzano la frammentazione e la generazione di crateri. Tale comprensione è essenziale per valutare l'efficacia di sistemi di protezione e per anticipare l'entità dei danni in scenari di impatto ad alta velocità.

La velocità di avanzamento stimata corrisponde a $V_a = 3.509$ km/s, pari al 75.78 % della velocità di impatto.

Le velocità di espansione calcolate sono:

- $V_{EV} = 1,046$ km/s
- $V_{EP} = 0,936$ km/s

e per la seconda è stata effettuata, come sempre, una stima basata solo su un frame. Lo scarto è pari al 10.49 %. Si ricorda che, in base alla teoria, la velocità di espansione della nube dovrebbe essere uniforme e costante da qualsiasi angolazione la si osservi. Pertanto, qualsiasi scarto osservato può essere attribuito a errori di misura, le cui cause sono state precedentemente discusse e affrontate. La migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} .

L'angolo di apertura della nube è di 46.21° , con uno scarto quadratico medio $s = \pm 3.47^\circ$, come riportato nel grafico seguente. Solo tre frame sono stati utili per la determinazione dell'angolo a causa dell'imminente arrivo del sabot.

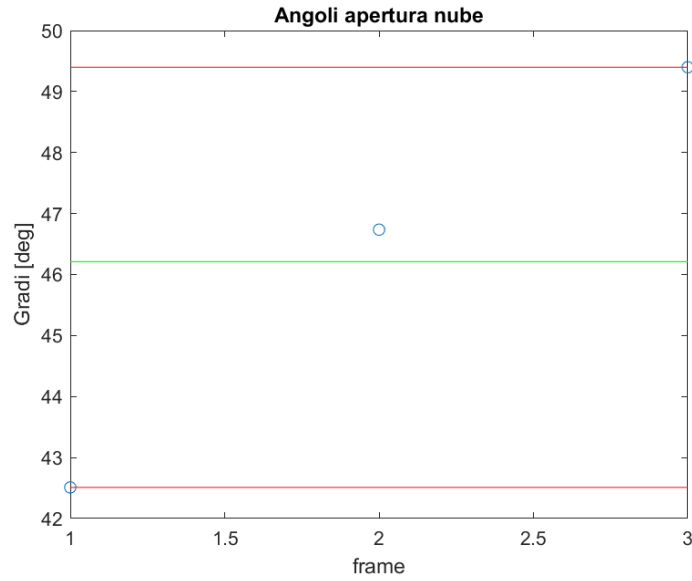


Fig. 18.2 Grafico degli angoli #9252

Secondo i modelli empirici, la velocità del frammento di dimensione maggiore è $V_{LF} = 3.102$ km/s, e la massa del frammento più esteso è $M_{LF} = 0.022$ g. Si nota come la velocità di avanzamento stimata e quella teorica non differiscono di molto: lo scarto è pari al 11.6%.

Per il tracking si sono riconosciuti e tracciati 43 frammenti, ottenendo la ricostruzione bidimensionale riportata in figura.

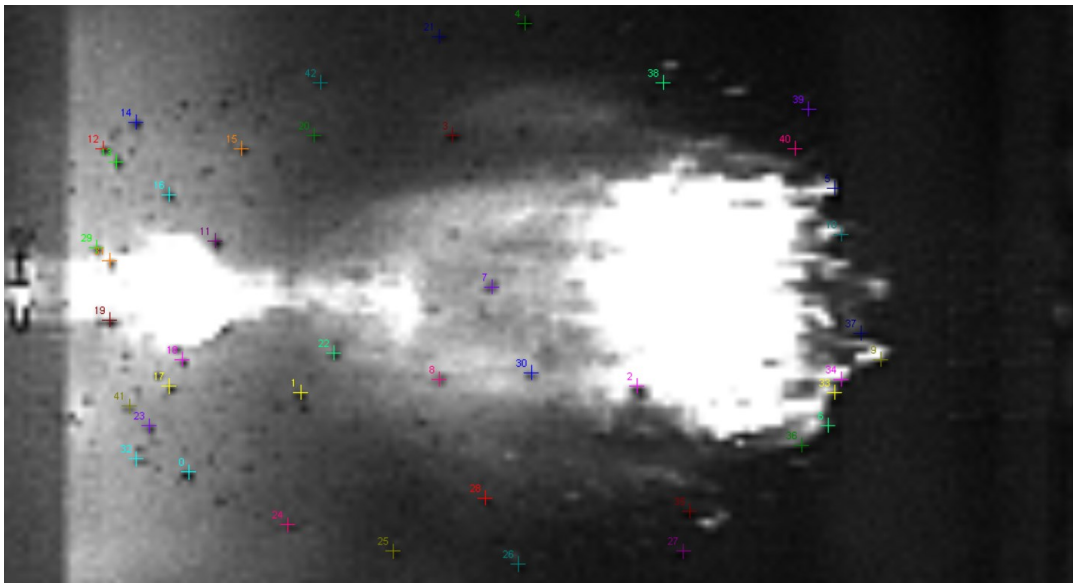


Fig. 18.3 Tracking dei frammenti #9252

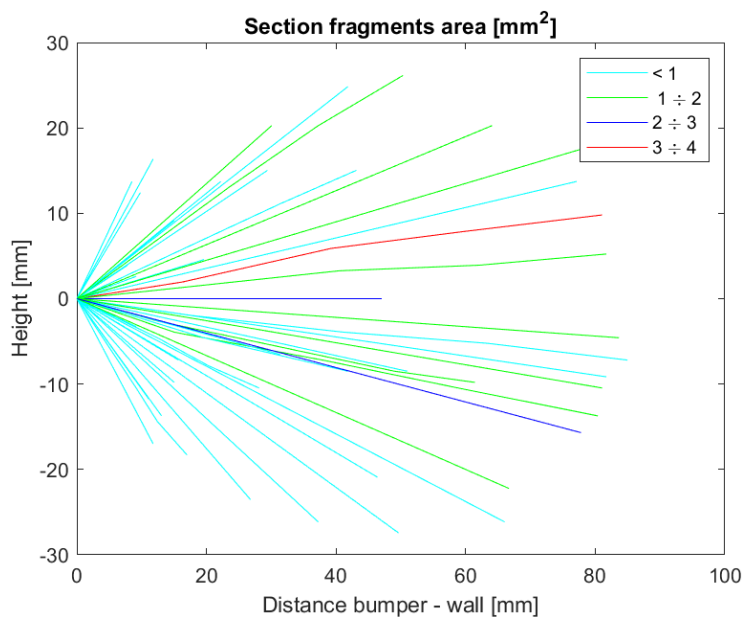


Fig. 18.4 Ricostruzione bidimensionale #9252

Come è stato possibile osservare chiaramente esaminando i frame dell'evento, è evidente che vi sono solo pochi frammenti di dimensioni rilevanti. La frammentazione sia della sfera proiettile che del bumper è avvenuta in modo molto efficace, generando un maggior numero di frammenti di dimensioni più ridotte. Questo risultato è in diretta correlazione con l'elevata velocità dell'impatto e lo spessore limitato del bumper.

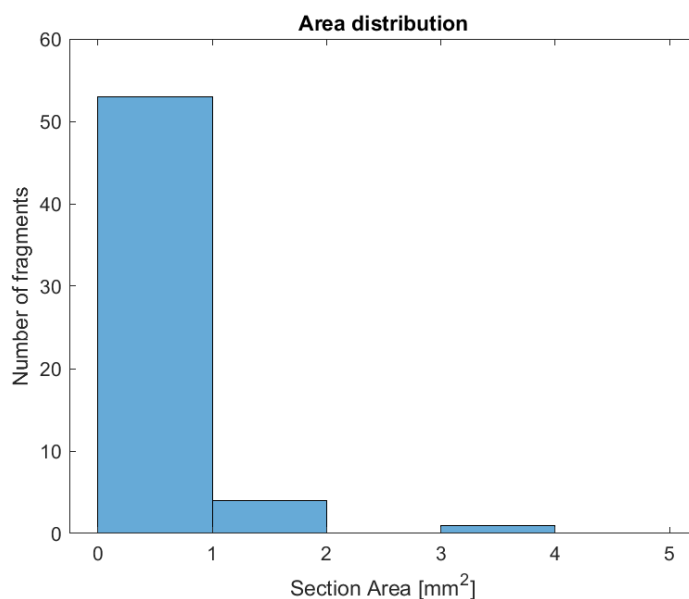


Fig. 18.5 Distribuzione delle sezioni #9252

I frammenti catalogati sono:

- 1 frammento di dimensione compresa tra 3 mm^2 e 4 mm^2
- 4 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm^2 e 2 mm^2
- 53 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm^2 e 1 mm^2

Dalla distribuzione della massa dei frammenti, emerge chiaramente la presenza di un significativo numero di frammenti di dimensioni ridotte. Ciò indica che la frammentazione della sfera e del bumper è avvenuta in modo molto profondo e completo, generando un'ampia gamma di frammenti più piccoli.

Il numero di crateri individuati dall'analisi della piastra testimone è di 2315, e rappresenta il valore più elevato finora registrato. È da tenere in considerazione che parte dei crateri è dovuta all'impatto dei frammenti generati dal sabot, quindi, non è conveniente fare troppo affidamento su questa rilevazione.

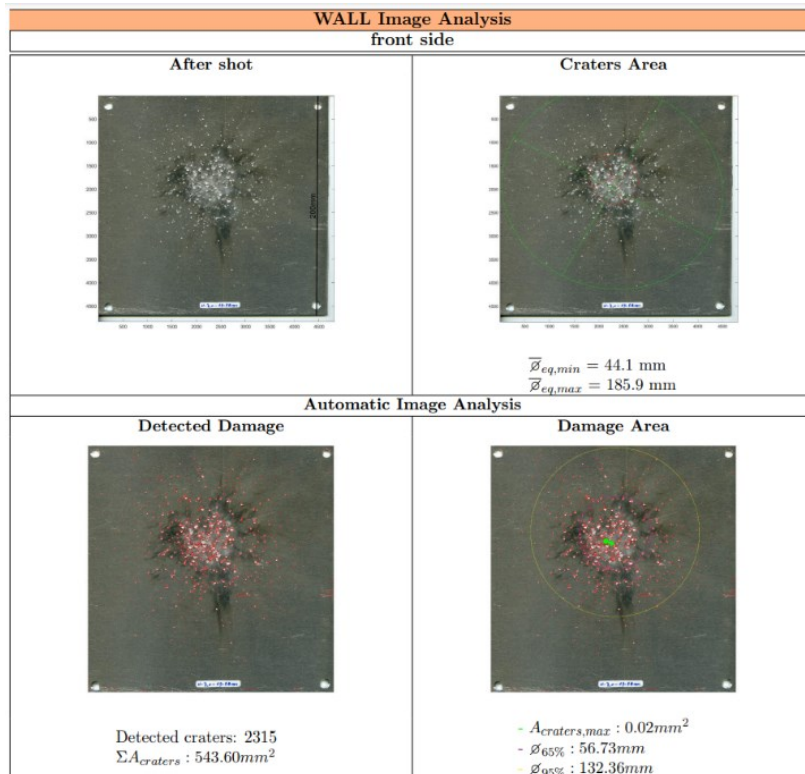


Fig. 18.6 Wall e crateri #9252

Si riporta infine l'analisi dell'estensione del foro nel bumper, di particolare interesse in quanto mostra la traccia dell'impatto del sabot contro la piastra anteriore.

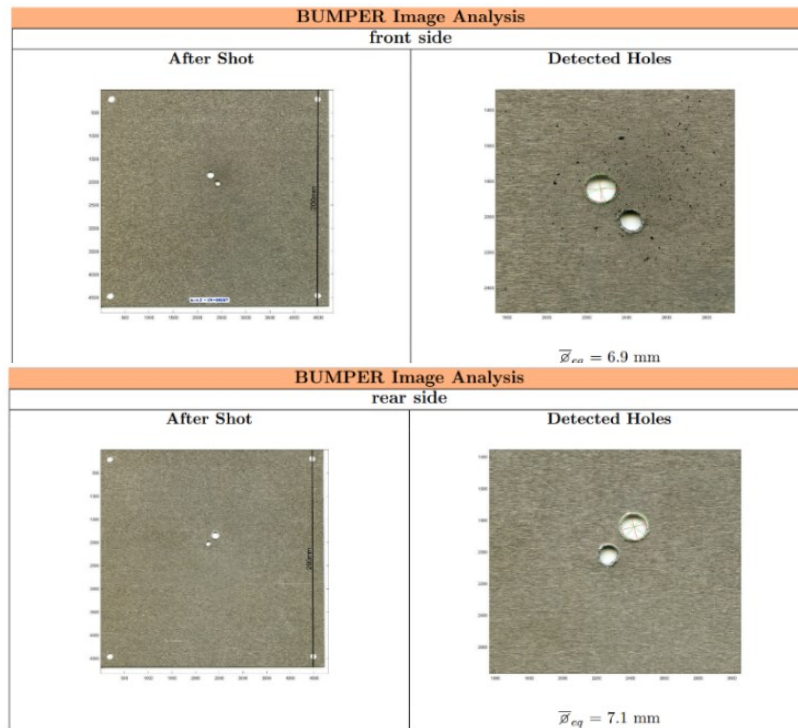


Fig. 18.7 Foro nel bumper #9252

Secondo il modello empirico di Maiden, il diametro del foro nel bumper è stimato pari a $D_h = 5.17$ mm. Dai dati sperimentali per lo sparo 9264 però risulta un diametro del foro pari a $D_h = 6.9$ mm, quindi il modello sbaglia del 25 %. Il modello di Hill prevede un diametro $D_h = 5.89$ mm, più accurato sebbene, ugualmente, non comparabile.

Le dimensioni del foro prodotto dal sabot sono invece più contenute.

All'interno della parete posteriore del wall, è possibile individuare un cratere di dimensioni molto ridotte, che è presumibilmente causato dall'impatto del frammento di dimensioni maggiori o del sabot. Non è possibile determinare in anticipo se questo cratere sia dovuto ai frammenti del proiettile o al sabot, poiché anche il sabot subisce una frammentazione nell'impatto con il bumper. Tuttavia, considerando la distribuzione delle dimensioni dei frammenti generati, è probabile che il cratere sia causato dal sabot.

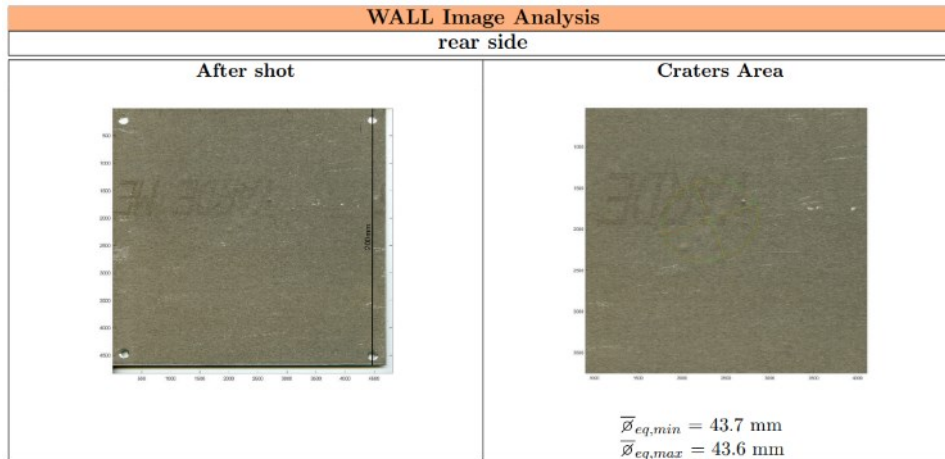


Fig. 18.8 Faccia posteriore del wall #9252

È importante sottolineare che, sebbene dal punto di vista meccanico il test di sparo possa essere considerato un fallimento, in relazione all'obiettivo principale di questa tesi, che è lo studio della diffusione della nuvola di detriti, può comunque essere considerato un successo. Questa considerazione si applica anche a tutti i casi di failure dovuti ai sabot che seguiranno.

Questo evento mette in evidenza la complessità e la variabilità delle dinamiche degli impatti ad alta velocità e sottolinea come anche in situazioni considerate "failure," si possano ottenere dati e informazioni rilevanti per l'analisi della frammentazione e della diffusione dei detriti.

6.2.2 Sparo 9255

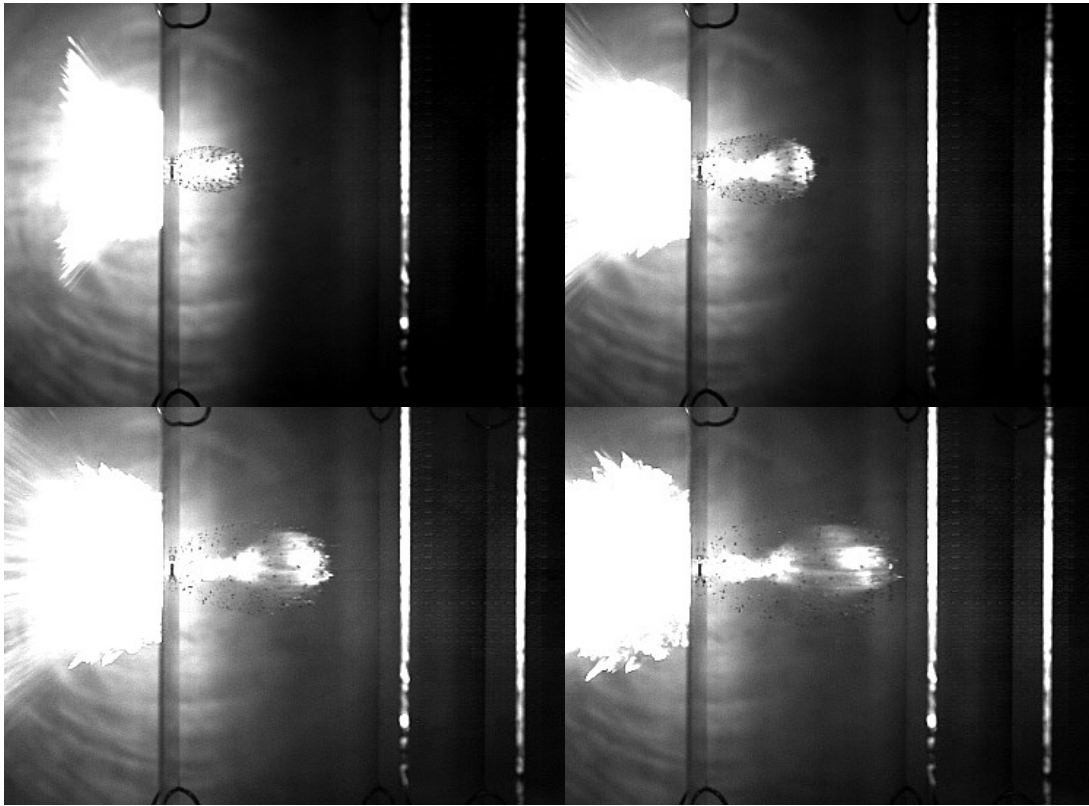


Fig. 19.1 Frame dello sparo #9255

La velocità della sfera proiettile in questo test di sparo è la più elevata in assoluto, raggiungendo il valore di $V_0 = 4.95$ km/s. Questa velocità è di particolare rilevanza e merita una considerazione aggiuntiva, poiché è prossima alla soglia per la quale, nell'ambito dell'impatto di un proiettile di alluminio su una superficie di alluminio, il materiale inizia a fondere. Questa soglia di fusione si colloca a circa 5 km/s. Se la velocità dell'impatto fosse stata leggermente superiore, potremmo aver notato, nel wall retrostante, la presenza di particelle liquide, anche se non è garantito che queste sarebbero state visibili durante l'osservazione delle registrazioni.

La velocità del proiettile stimata tramite le registrazioni è $V_0' = 4.9$ km/s, ottenendo così un errore nelle stime delle velocità della nube di $\varepsilon = \pm 0.05$ km/s.

La velocità di avanzamento della nuvola è pari a $V_a = 3.118$ km/s, che corrisponde al 63 % della velocità del proiettile. È evidente che con l'aumentare della velocità dell'impatto, anche la velocità di avanzamento della nube, o velocità del Leading Edge, cresce proporzionalmente.

Le velocità di espansione calcolate sono:

- $V_{EV} = 0.896$ km/s
- $V_{EP} = 0,689$ km/s

e per la seconda è stata effettuata, come sempre, una stima basata solo su un frame. Lo scarto è pari al 23.09 %. La migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} .

L'angolo di apertura della nube è di 50.66° , con deviazione standard pari a $s = \pm 5.71^\circ$.

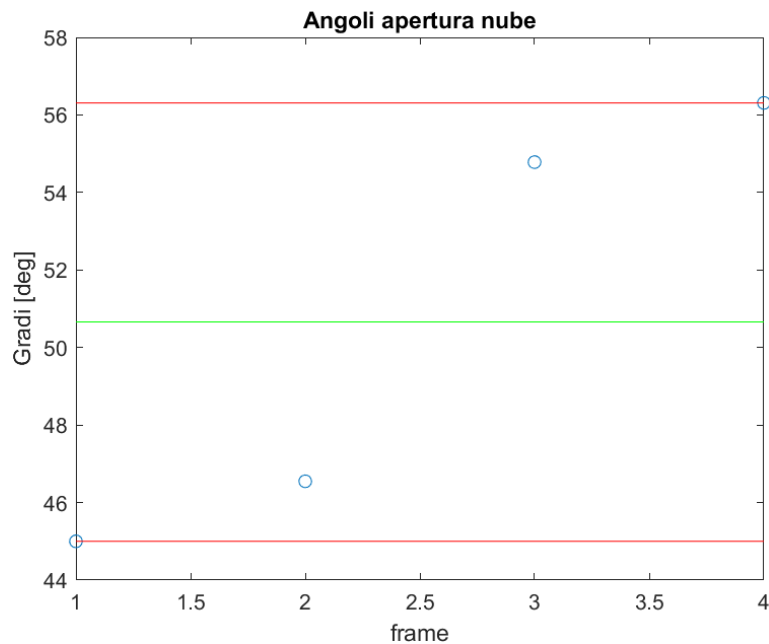


Fig. 19.2 Grafico degli angoli #9255

Secondo il modello Francesconi, la velocità del frammento di dimensione maggiore è $V_{LF} = 3.827$ km/s, e la massa del frammento più esteso è $M_{LF} = 0.02$ g. Lo scarto tra la velocità di avanzamento stimata e quella prevista dal modello Francesconi si attesta al 18.51 %.

Per il tracking si sono riconosciuti e tracciati 32 frammenti, ottenendo la ricostruzione bidimensionale riportata in figura.

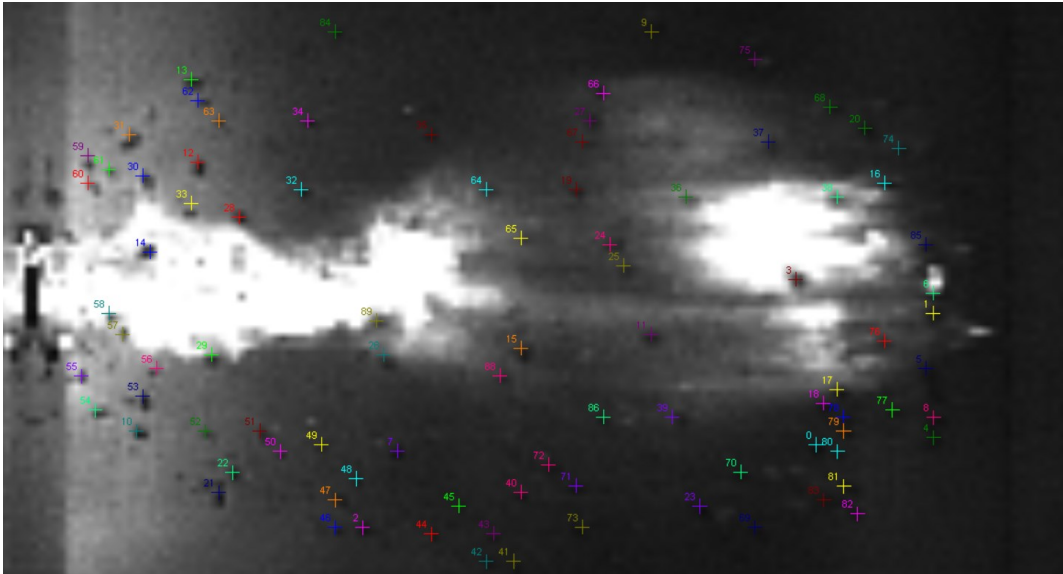


Fig. 19.3 Tracking dei frammenti #9255

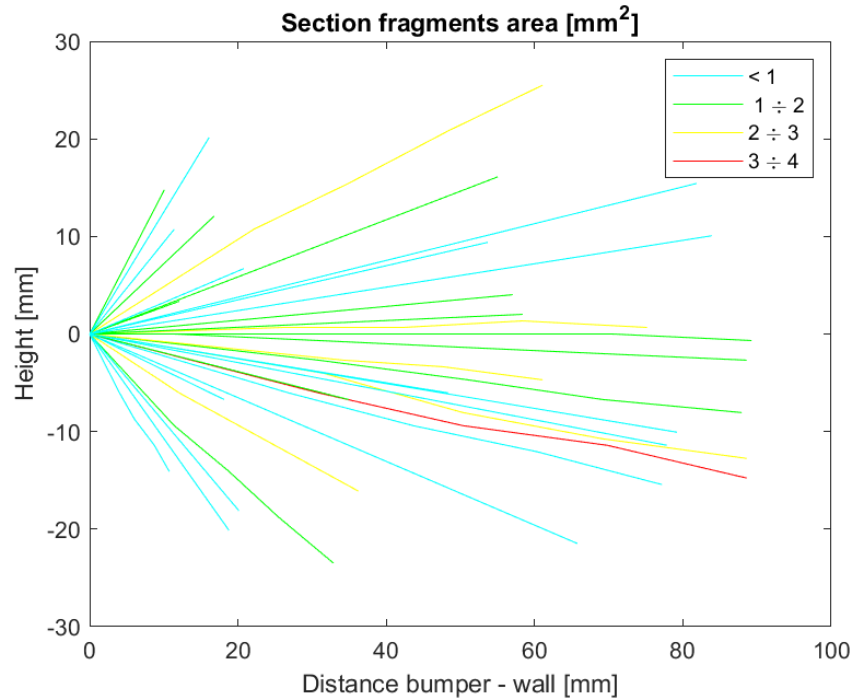


Fig. 19.4 Ricostruzione bidimensionale #9255

Vi è un unico frammento di dimensioni maggiori, con una sezione trasversale di 3.603 mm², come previsto dalla teoria. Infatti, all'aumentare della velocità dell'impatto, ci si aspetta che la dimensione dei frammenti generati diminuisca.

La distribuzione dei frammenti secondo la sezione trasversale è riportata nel diagramma. Si individuano:

- 1 frammenti di dimensioni comprese tra 3 mm² e 4 mm²
- 7 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm² e 3 mm²
- 8 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm² e 2 mm²
- 53 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm² e 1 mm²

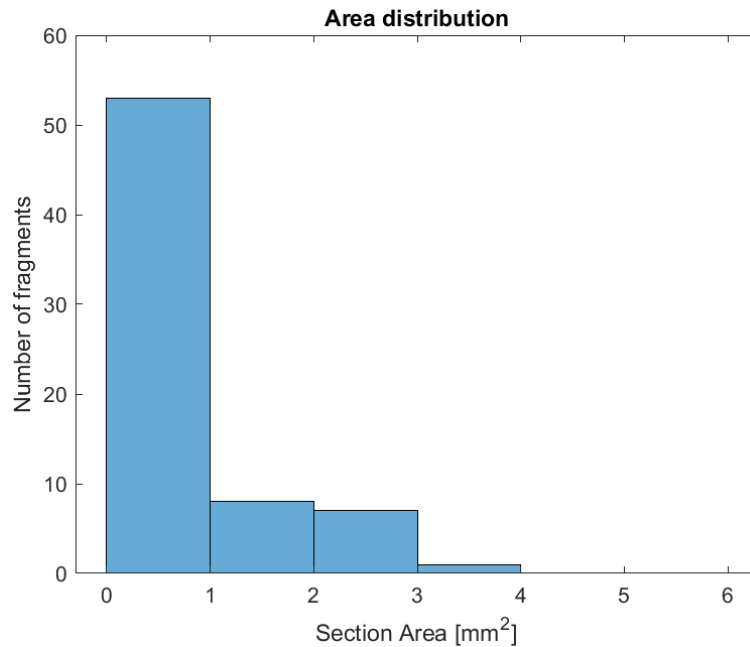


Fig. 19.5 Distribuzione delle sezioni #9255

Il numero di crateri riportati sul wall è pari a 2226, a testimonianza del fatto che la frammentazione del proiettile e del materiale del bumper sono avvenuti in maniera profonda.

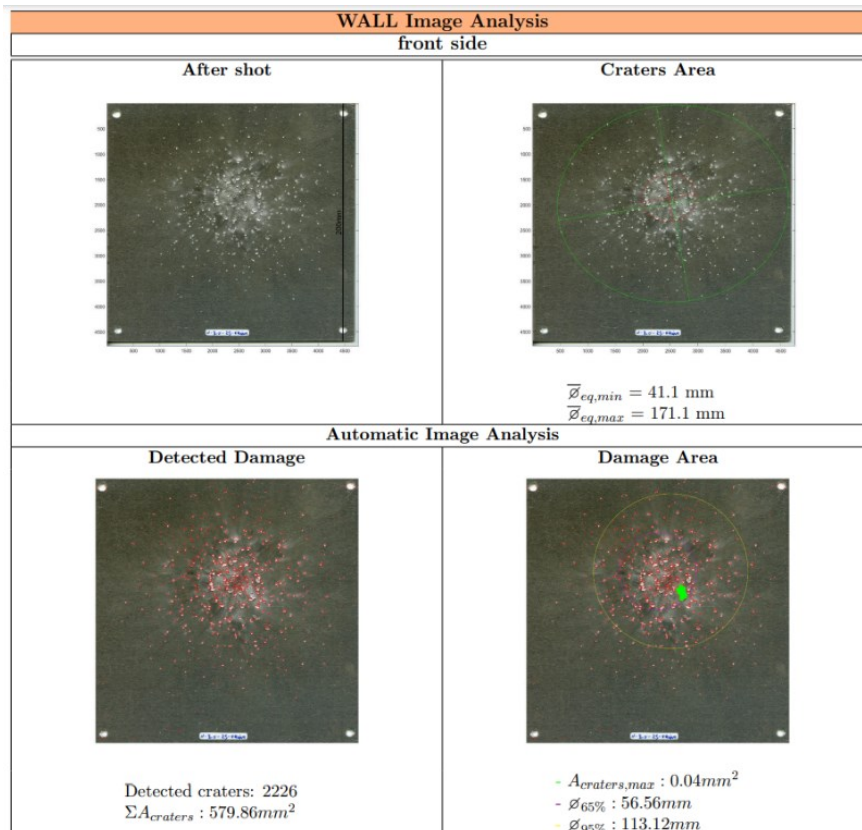


Fig. 19.6 Wall e crateri #9255

Si riporta infine l'analisi dell'estensione del foro nel bumper, di particolare interesse in quanto mostra la traccia dell'impatto del sabot contro la piastra anteriore.

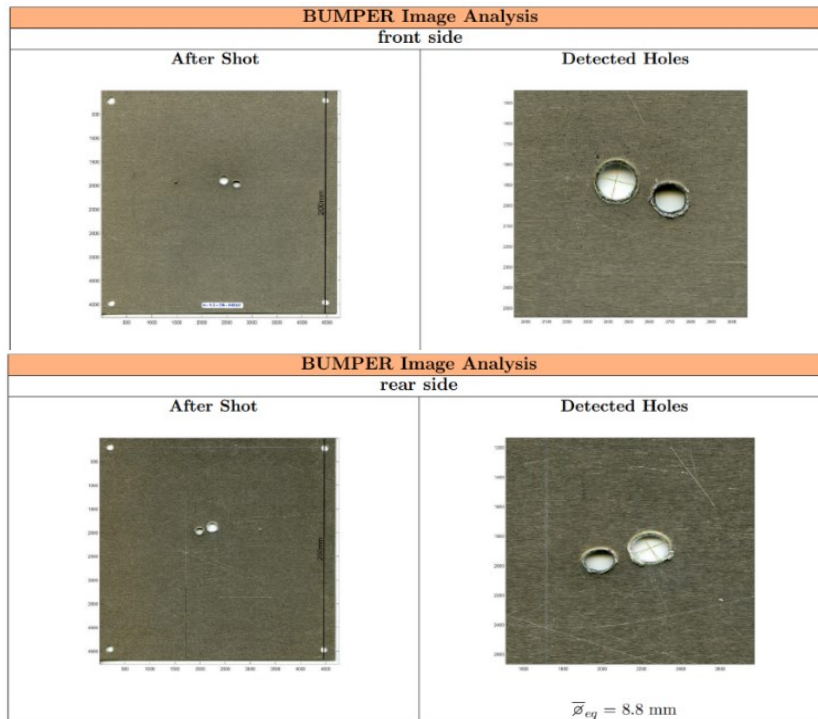


Fig. 19.7 Foro nel bumper #9255

Secondo il modello empirico di Maiden, il diametro del foro nel bumper è stimato pari a $D_h = 6.19 \text{ mm}$. Dai dati sperimentali per lo sparo 9255 però risulta un diametro del foro pari a $D_h = 8.6 \text{ mm}$, quindi l'errore del modello di Maiden è del 28 %. Il modello di Hill produce un foro nel bumper di diametro $D_h = 6.94 \text{ mm}$.

Le dimensioni del foro prodotto dal sabot sono invece più contenute.

6.2.3 Sparo 9259

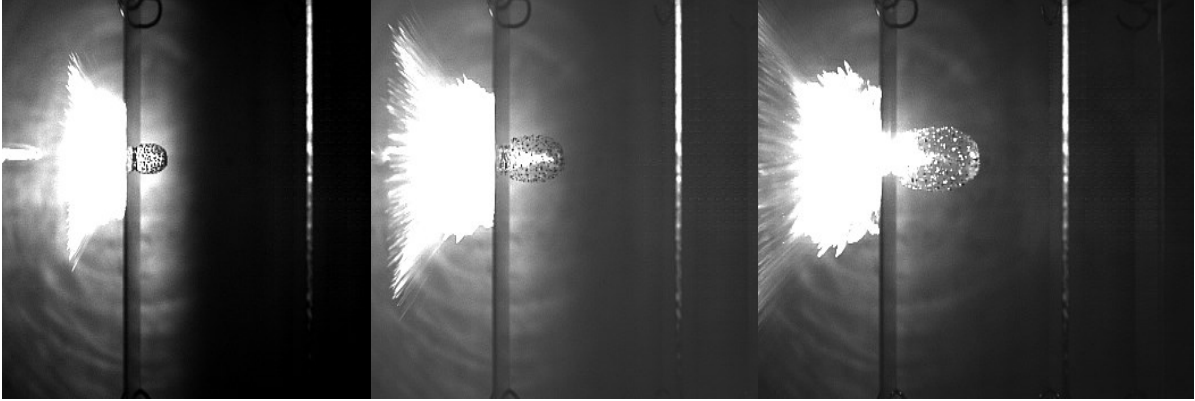


Fig. 20.1 Frame dello sparo #9259

Una caratteristica distintiva di questo test di sparo è che solo tre frame sono stati utili per l'analisi. Questo è dovuto al fatto che, nel quarto frame, il sabot ha già impattato contro il bumper, rendendo impossibile il proseguimento dell'analisi visiva del video.

La velocità del proiettile è $V_0 = 4.933$ km/s, mentre lo spessore della piastra è $t_b = 2$ mm. La velocità del proiettile, tramite il software, è stimata $V_0' = 4.888$ km/s, e si ricava un errore nelle stime delle velocità della nube di $\varepsilon = \pm 0.045$ km/s.

La velocità di avanzamento della nube è pari a $V_a = 2.599$ km/s, ovvero il 52.72 %.

Le velocità di espansione calcolate sono simili al caso precedente e risultano:

- $V_{EV} = 0.809$ km/s
- $V_{EP} = 0.680$ km/s

e per la seconda è stata effettuata, come sempre, una stima basata solo su un frame. Lo scarto è pari al 15.89 %. La migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} .

L'angolo di apertura della nube è di 36.58° , con deviazione standard $s = \pm 4.09^\circ$. I frame utili sono stati solamente due.

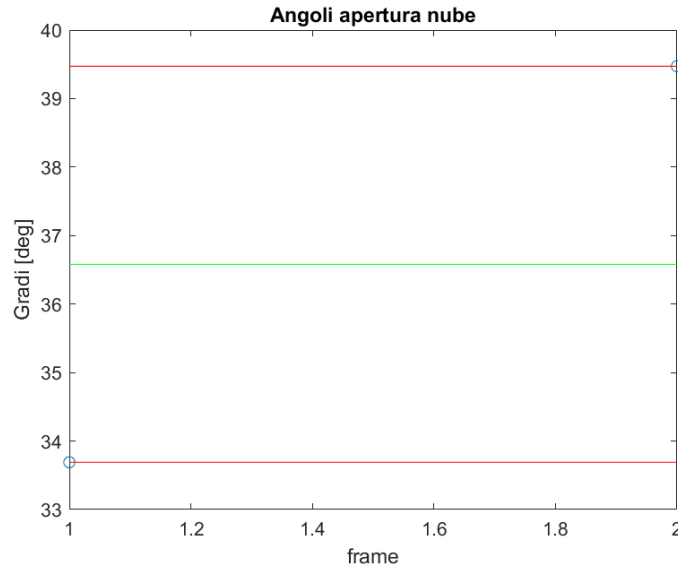


Fig. 20.2 Grafico degli angoli #9259

Secondo la teoria, la velocità del frammento di dimensione maggiore è $V_{LF} = 4.321$ km/s, e la massa del frammento più esteso è $M_{LF} = 0.018$ g. Lo scarto tra la velocità di avanzamento stimata e quella teorica è molto alto, pari al 39.8 %

Il processo di tracciamento è stato effettuato utilizzando un solo frame centrale. Questo è stato possibile grazie all'ipotesi che le traiettorie dei frammenti, a seguito dell'impatto, siano rettilinee e quindi possano essere determinate conoscendo solamente due punti lungo la loro traiettoria.

L'uso di un solo frame è giustificato dal fatto che il sabot illumina i frame finali, che sono generalmente cruciali per lo studio dell'evento. Inoltre, nei frame iniziali, quando la nuvola è ancora piccola e poco espansa, risulta estremamente difficile distinguere i frammenti, rendendo tali frame di scarso valore per l'analisi.

In totale, sono stati tracciati 24 frammenti durante questo processo.

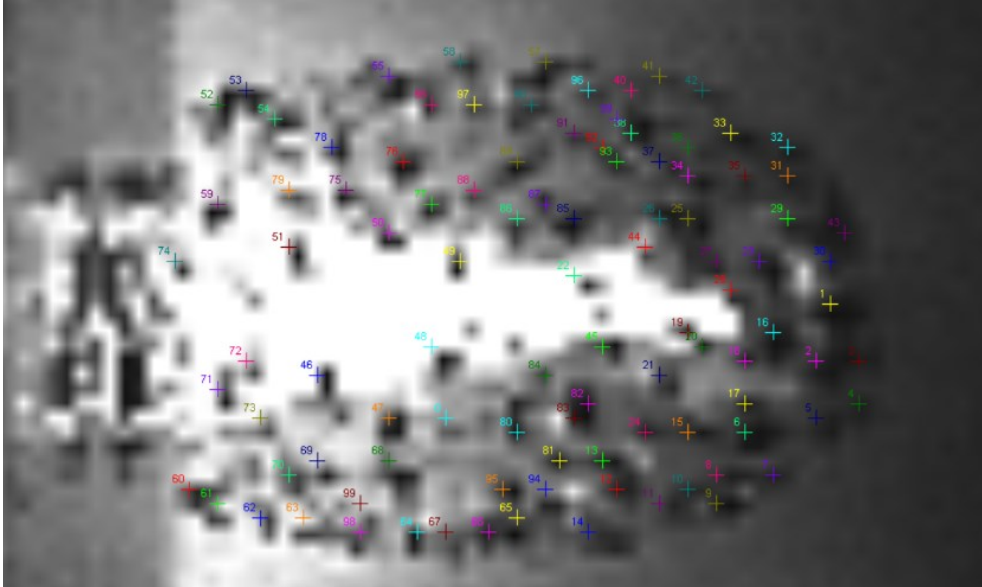


Fig. 20.3 Tracking dei frammenti #9259

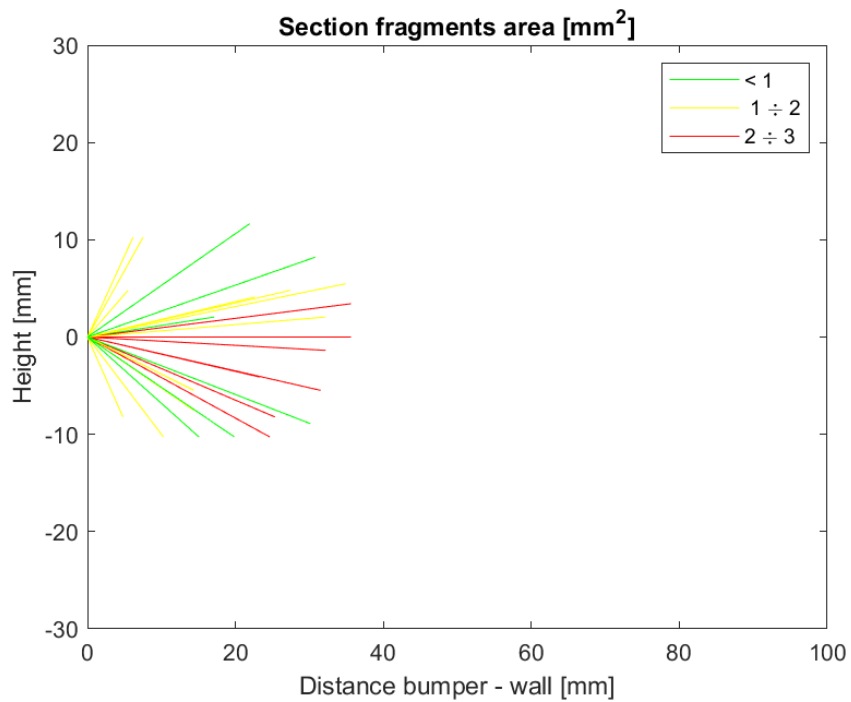


Fig. 20.4 Ricostruzione bidimensionale #9259

Questa ricostruzione fornisce un'idea limitata della diffusione della nube di detriti. Tuttavia, è evidente come i frammenti di dimensioni maggiori, ma comunque abbastanza contenute, stiano diffondendo nella direzione del moto e verso il basso.

Nel frame a sinistra, è ben visibile la scia prodotta dal sabot prima del suo impatto sul bumper. Nel frame a destra, si osserva chiaramente l'effetto ottico generato dalla perforazione del bumper, che rende impossibile distinguere ulteriormente i frammenti all'interno della nuvola.

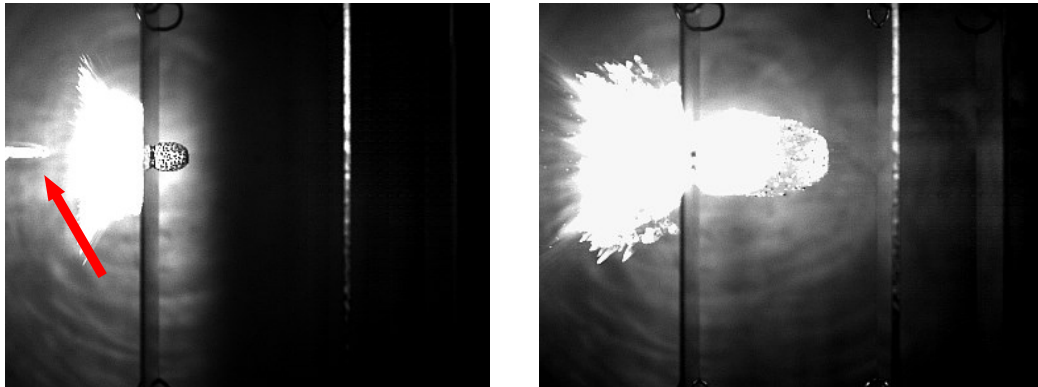


Fig. 20.5 Sabot e flash #9259

Il numero di crateri riportati sulla rear plate è 2023.

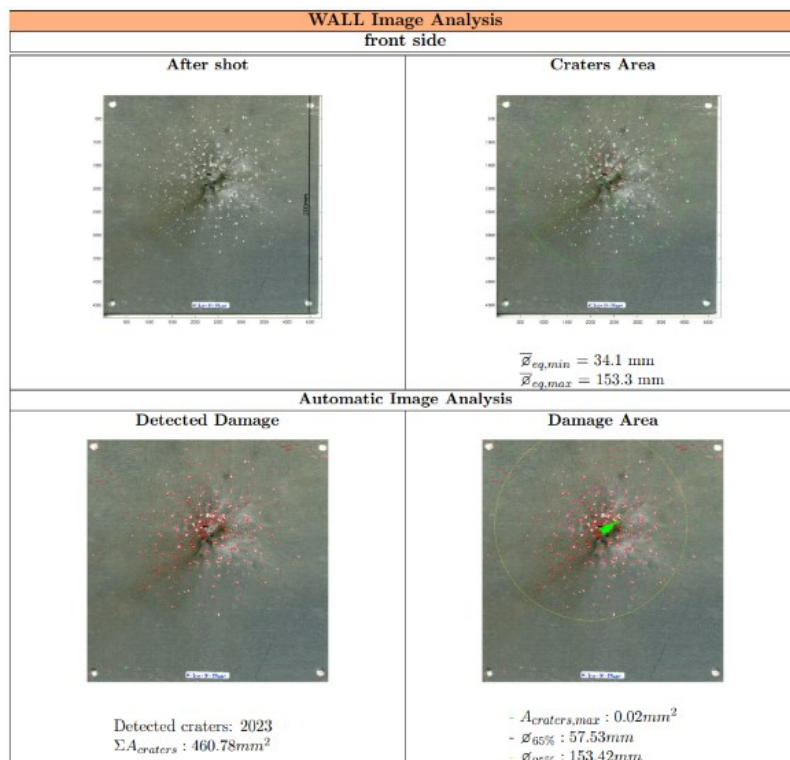


Fig. 20.6 Wall e crateri #9259

La distribuzione dei frammenti secondo la sezione trasversale è riportata nel diagramma. È molto accentuato l'andamento esponenziale decrescente, con la maggior parte dei frammenti appartenenti alla classe più piccola.

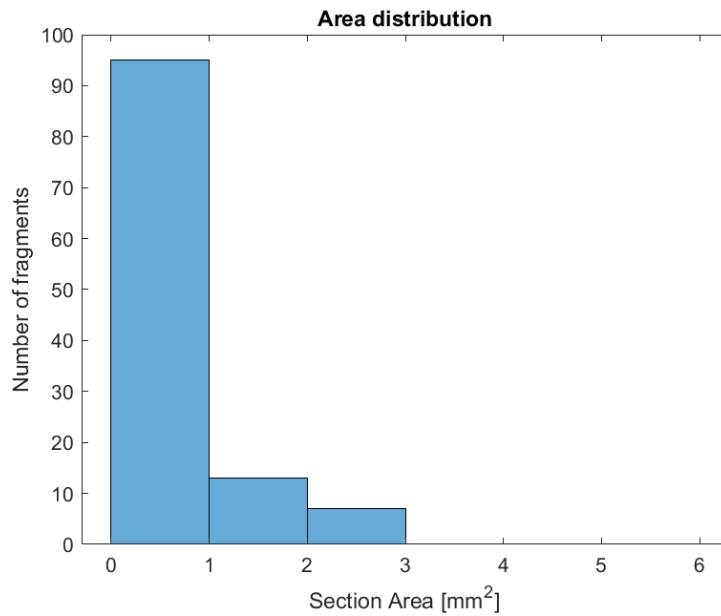


Fig. 20.7 Distribuzione delle sezioni #9259

Si individuano:

- 7 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm^2 e 3 mm^2
- 13 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm^2 e 2 mm^2
- 95 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm^2 e 1 mm^2

Si riporta infine l'analisi dell'estensione del foro nel bumper, di particolare interesse in quanto mostra la traccia dell'impatto del sabot contro la piastra anteriore.

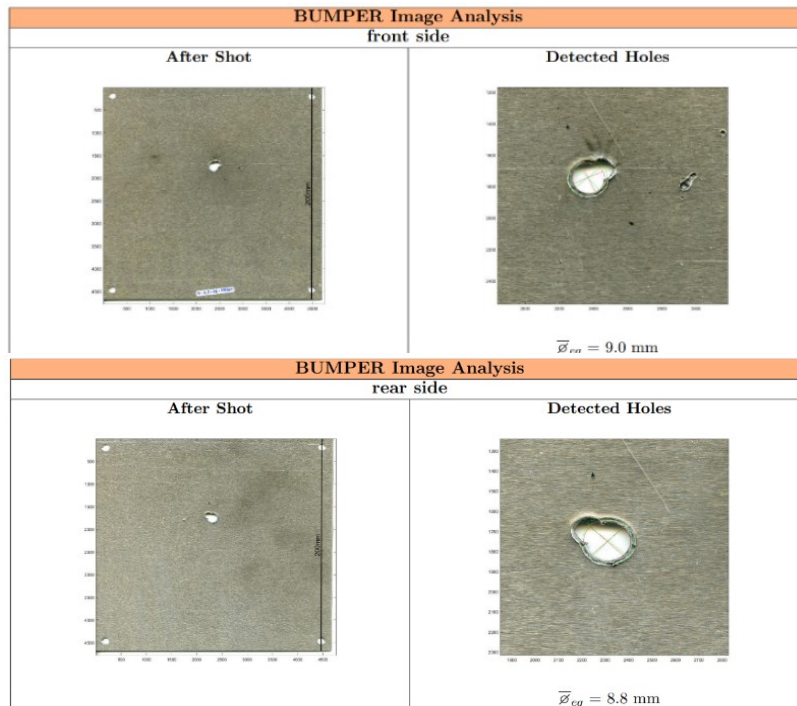


Fig. 20.8 Foro nel bumper #9259

In questo test di sparo, è interessante notare che i punti in cui il proiettile e il sabot perforano il bumper sono molto vicini e quasi coincidenti. Questo significa che il sabot, passando attraverso un foro precedentemente creato dal proiettile, risente in misura molto minore dell'ostacolo del bumper e può impattare sul wall con una forza maggiore rispetto ai frammenti del proiettile. In altre parole, la perdita di energia cinetica del sabot dovuta all'impatto con il bumper è minore. Questo potrebbe spiegare il motivo per cui è stato rilevato un cratere di dimensioni maggiori nella parete posteriore del wall rispetto a quelli solitamente individuati. Un'immagine di tale cratere è presentata di seguito.

Dall'analisi sperimentale risulta, nel bumper, un foro di diametro pari a $D_h = 9.0$ mm. Il modello empirico di Maiden stima un diametro del foro pari a $D_h = 6.93$ mm, quindi vi è un errore del 23%, mentre, per il modello di Hill, il diametro è pari a $D_h = 7.68$ mm.

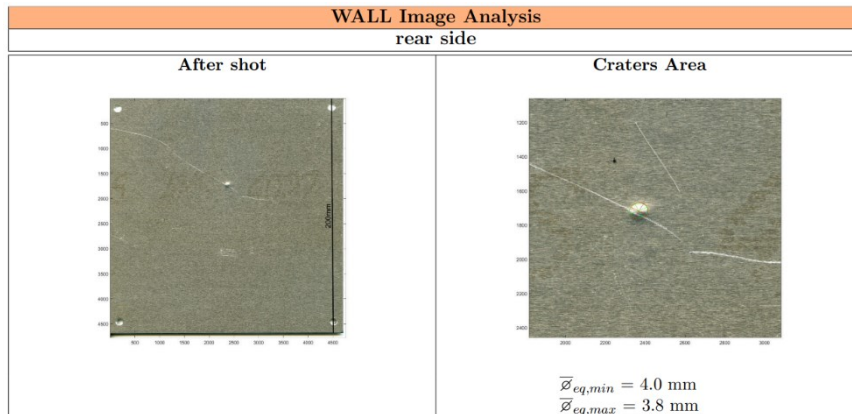


Fig. 20.9 Faccia posteriore del wall #9259

6.3 Pluri sabot failure 9261

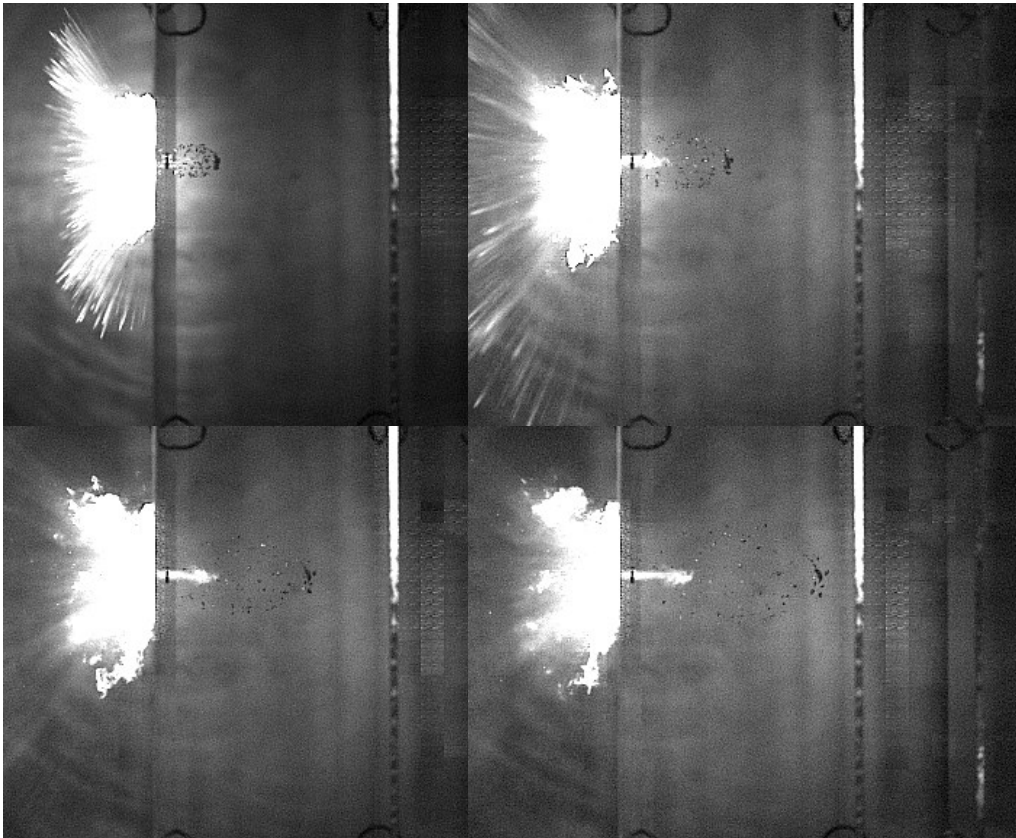


Fig. 21.1 Frame dello sparo #9261

Il termine "pluri sabot failure" fa riferimento a una situazione in cui, durante il test di sparo, più di un sabot segue la traiettoria del proiettile dopo il suo rilascio, fino ad impattare con il bumper. Una caratteristica distintiva di questa categoria è la presenza di più di due fori di perforazione nel bumper. Nel caso specifico del test di sparo 9261, sono stati individuati tre fori aggiuntivi rispetto a quello prodotto dal proiettile, indicando che tre sabot non si sono allontanati correttamente dalla zona di lancio. Inoltre, durante l'impatto, si genera una notevole emissione di energia luminosa, rendendo impossibile l'osservazione degli stadi finali dell'evoluzione della nube di detriti.

La velocità del proiettile misurata sperimentalmente è pari a $V_0 = 3.045$ km/s, mentre la velocità di avanzamento della nuvola è stimata pari a $V_a = 1.699$ km/s, che corrisponde al 55.79 % della velocità d'impatto. La velocità del proiettile stimata grazie al video della

telecamera V2511 è pari a $V_0' = 3.087$ km/s. Perciò, l'errore nella stima delle velocità della nube è pari a $\varepsilon = \pm 0.042$ km/s.

Le velocità di espansione stimate sono:

- espansione verticale $V_{EV} = 0.395$ km/s
- espansione in profondità $V_{EP} = 0.467$ km/s

Lo scarto è pari al 15.42 %. La migliore stima della velocità di espansione è da considerarsi quella in verticale V_{EV} , in quanto mediata su un maggior numero di dati raccolti.

Secondo la teoria, la velocità del frammento di dimensione maggiore è $V_{LF} = 2.354$ km/s, e la massa del frammento più esteso è $M_{LF} = 0.02$ g. Lo scarto tra la velocità di avanzamento misurata e quella stimata dal modello si attesta al 27.83 %.

L'angolo di apertura della nuvola è 36.07° , con scarto quadratico medio pari a $s = \pm 0.89^\circ$.

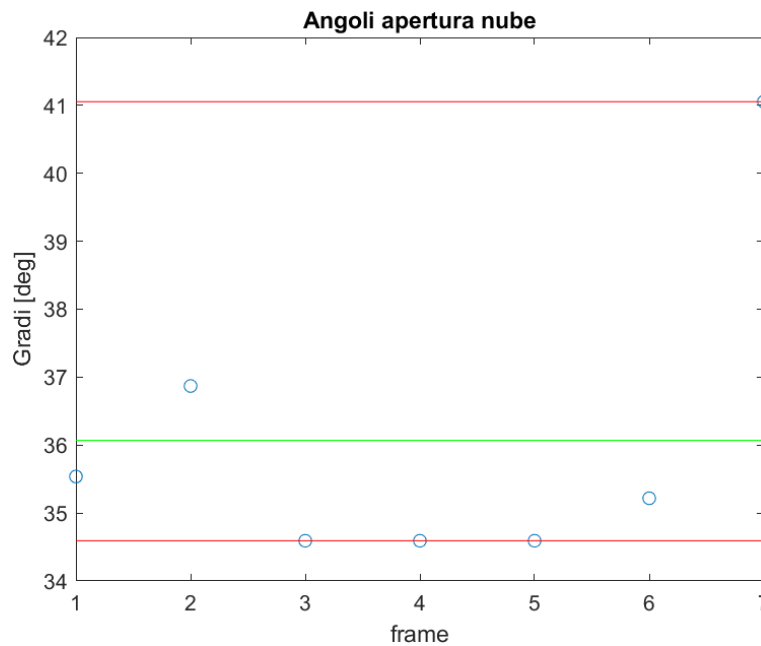


Fig. 21.2 Grafico degli angoli #9261

La ricostruzione bidimensionale riporta le traiettorie di 27 frammenti.

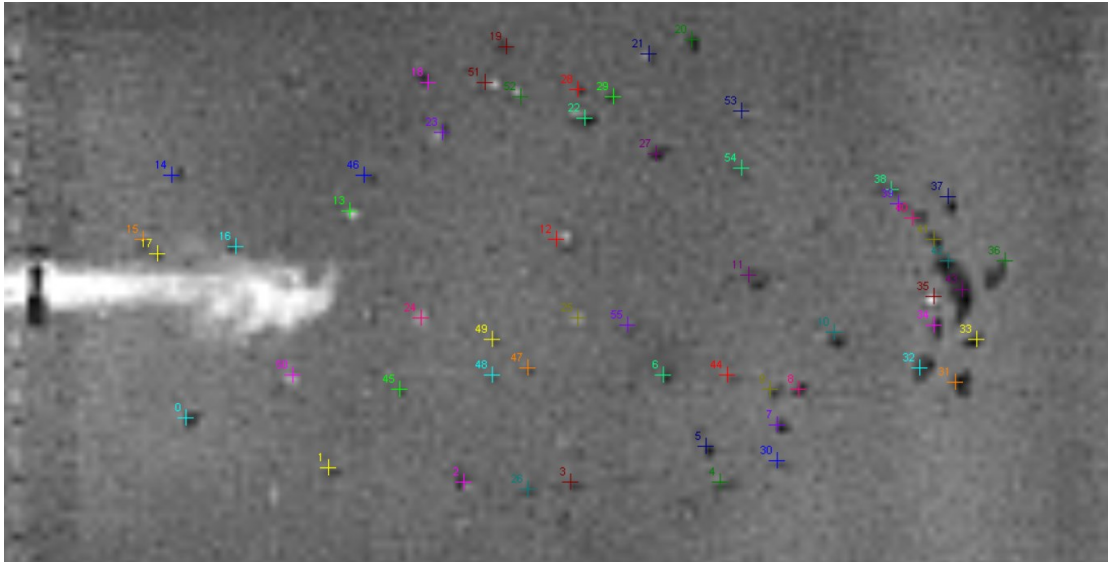


Fig. 21.3 Tracking dei frammenti #9261

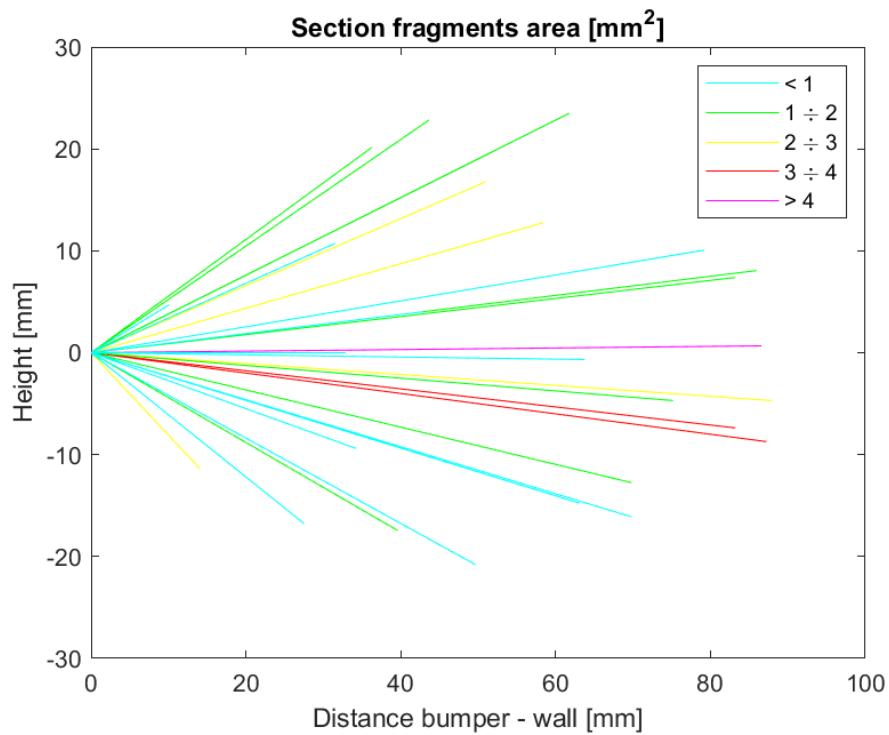


Fig. 21.4 Ricostruzione bidimensionale #9261

Nell'analisi di questo test di sparo, è possibile individuare un frammento di dimensioni notevolmente superiori rispetto alla media, con una sezione trasversale pari a 9.459 mm^2 . Questo frammento segue una traiettoria rettilinea che inizia dal proiettile, suggerendo che

rappresenti una parte significativa di esso, poiché la frammentazione sembra essere avvenuta solo parzialmente. Questa ipotesi è ulteriormente supportata dal basso numero di crateri rilevati sulla parete anteriore del wall, che ammonta a 672.

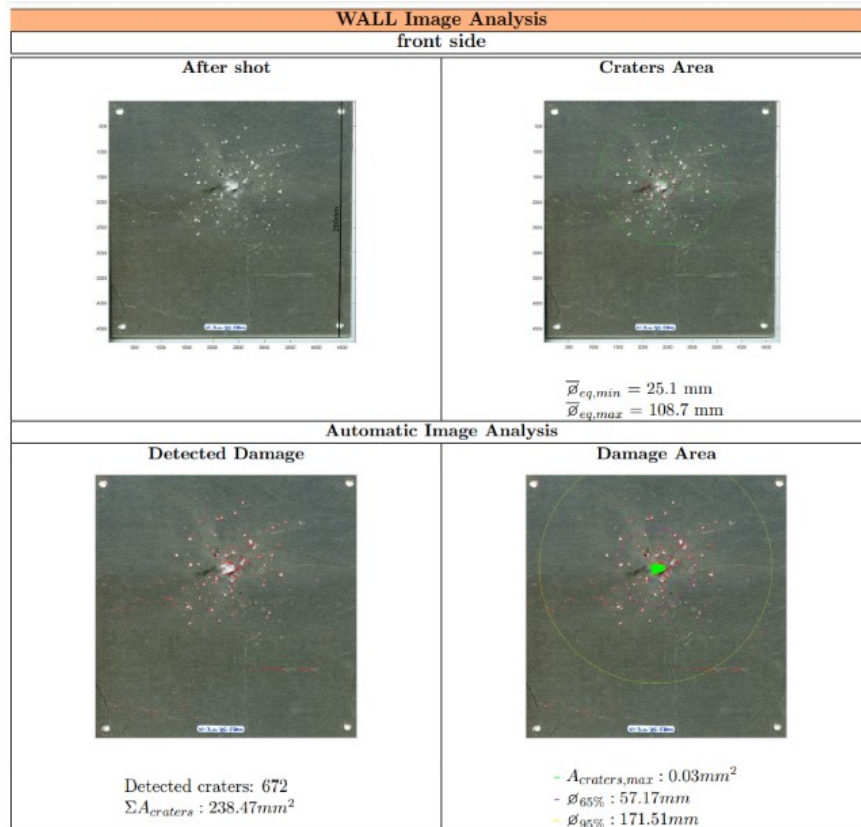


Fig. 21.5 Wall e crateri #9261

La distribuzione dei frammenti a seconda dell'estensione della sezione trasversale è riportata nel diagramma. Si distinguono:

- 1 frammento di dimensione compresa tra 9 mm^2 e 10 mm^2
- 3 frammenti di dimensioni comprese tra 3 mm^2 e 4 mm^2
- 4 frammenti di dimensioni comprese tra 2 mm^2 e 3 mm^2
- 12 frammenti di dimensioni comprese tra 1 mm^2 e 2 mm^2
- 50 frammenti di dimensioni comprese tra 0 mm^2 e 1 mm^2

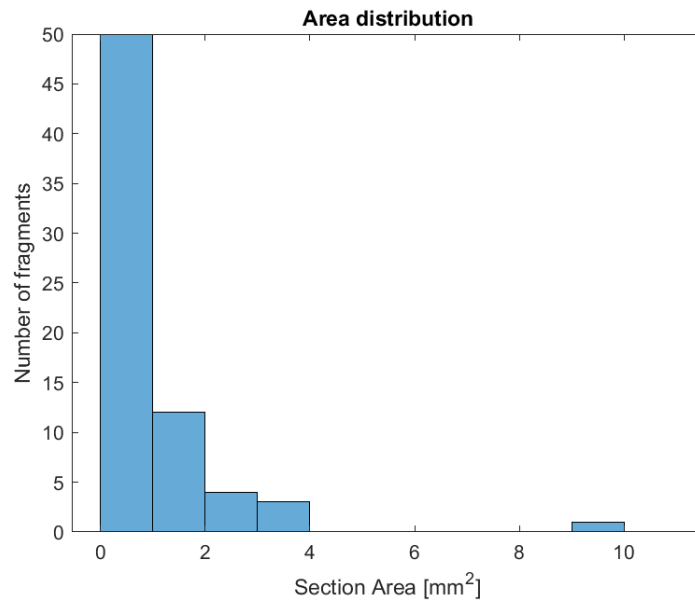


Fig. 21.6 Distribuzione delle sezioni #9261

Particolare rilievo assume l'osservazione del bumper, in quanto è possibile individuare i 3 fori prodotti dai sabot. Il foro di dimensione maggiore è quello dovuto al proiettile, e ha un diametro di $D_h = 6.7$ mm, a differenza del modello empirico di Maiden, secondo cui sarebbe $D_h = 4.81$ mm. Secondo il modello di Hill, invece, il diametro del foro sarebbe dovuto essere $D_h = 5.9$ mm. Come già evidenziato in tutti i test di sparo precedentemente analizzati, il modello di Hill offre previsioni più accurate rispetto al modello di Maiden, anche se quest'ultimo è stato specificamente sviluppato per proiettili in alluminio che impattano su piastre dello stesso materiale.

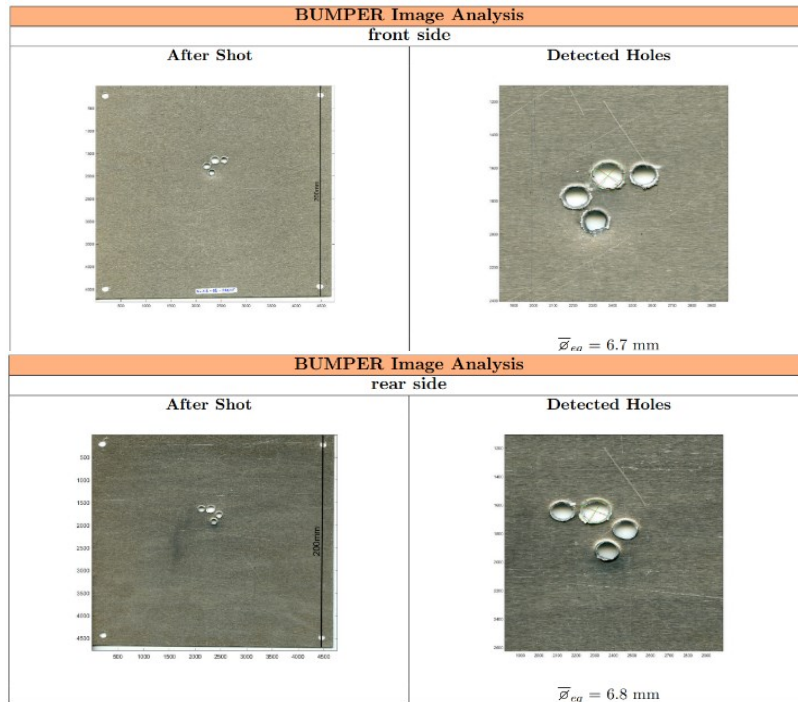


Fig. 21.7 Foro nel bumper #9261

Si riporta anche l'immagine della superficie retrostante del wall, dove si individua un piccolo cratere.

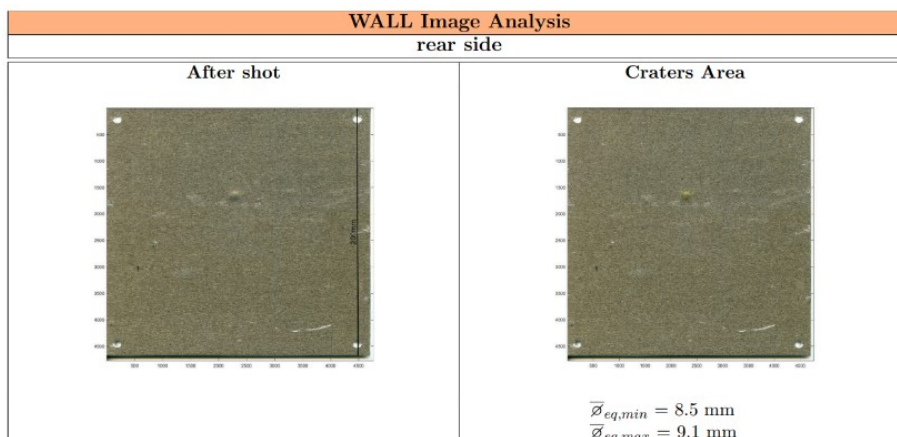


Fig. 21.8 Faccia posteriore del wall #9261

6.4 Camera failure 9247

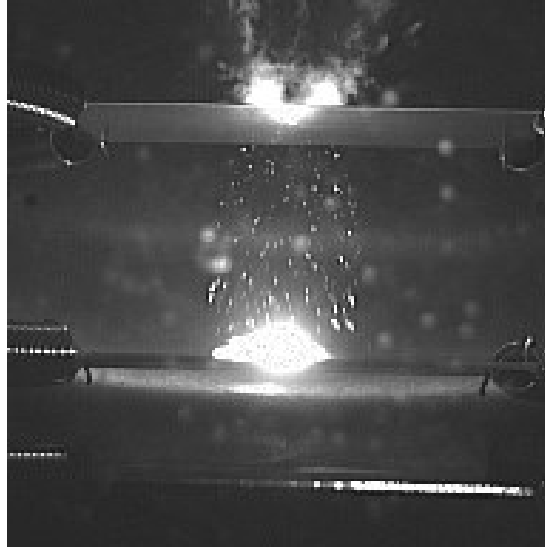


Fig. 22.1 Frame dello sparo #9247

Nel caso del test di sparo 9247, si sono verificati problemi legati alla registrazione del video della telecamera NTNU V2511, che includono malfunzionamenti o un avvio non corretto della registrazione. Pertanto, l'unico materiale disponibile per l'analisi è la registrazione dalla telecamera MIRO M310, che fornisce una prospettiva dall'alto. Questa prospettiva, purtroppo, non consente un'analisi dettagliata e offre solo due frame utili tra la perforazione del bumper e l'impatto. In uno di questi frame, risulta addirittura impossibile distinguere i margini della nube.

L'angolo di apertura della nuvola può essere solo approssimativamente stimato basandosi sul frame in cui la nube impatta con il wall. In questo frame, il flash generato dall'impatto consente di distinguere una parte dei frammenti presenti che riflettono la luce, anche se i dettagli sono limitati.

Con una sola misurazione, si stima un angolo di apertura di 52.13° .

La velocità del proiettile è pari a $V_0 = 3.356$ km/s, per uno spessore del bumper di $t_b = 1$ mm. Per quanto concerne il calcolo della velocità del proiettile, è importante tenere presente che la telecamera MIRO M310 presenta limiti di risoluzione e che le condizioni

di illuminazione non permettono di visualizzare il proiettile prima del suo impatto con il bumper. È stato perciò impossibile ottenere una stima della sua velocità.

A partire dai dati raccolti in laboratorio, è possibile determinare, tramite il modello Francesconi, la velocità e la massa del frammento di dimensioni maggiori:

- $V_{LF} = 2.25 \text{ km/s}$
- $M_{LF} = 0.023 \text{ g}$

È anche possibile effettuare una stima della velocità di espansione in profondità, ma anche in questo caso ci basiamo su un unico frame. Questo frame è lo stesso utilizzato per la stima dell'angolo, e il tempo iniziale per il calcolo della velocità è considerato come il tempo trascorso dal primo frame utile dopo la perforazione del bumper. È importante notare che questa stima comporta un errore non trascurabile, ma fornisce comunque una valutazione approssimativa della velocità di espansione in profondità della nube.

La velocità di espansione così stimata si attesta a $V_{EP} = 0,971 \text{ km/s}$.

La determinazione della velocità di avanzamento della nube non è stata possibile a causa della scarsa risoluzione della telecamera e dell'inadeguata illuminazione. Nonostante si siano fatti vari tentativi, comprese diverse combinazioni di filtri e modifiche alle impostazioni di luminosità, guadagno, gamma e tono, non è stato possibile individuare chiaramente il Leading Edge della nube.

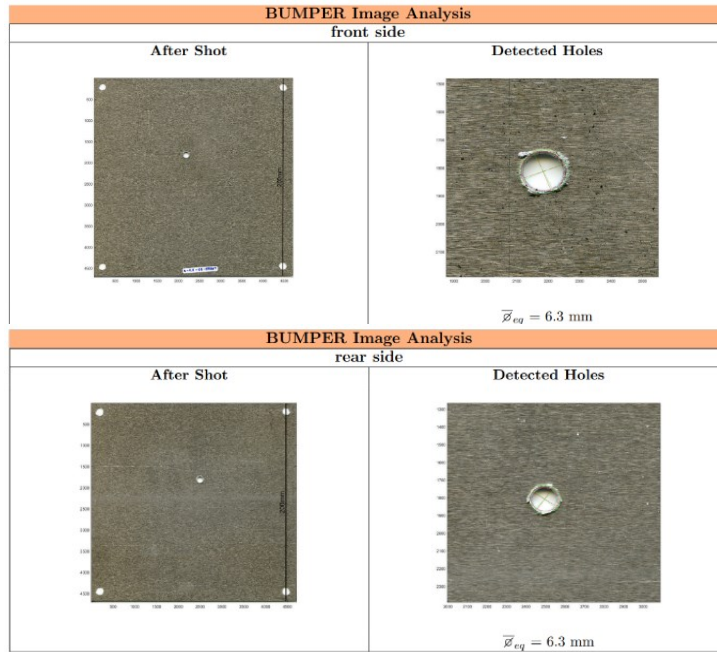


Fig. 22.2 Foro nel bumper #9247

Il diametro del foro nel bumper è pari a $D_h = 6.3 \text{ mm}$, contro i 4.46 mm previsti dalla teoria di Maiden. Secondo il modello di Hill, $D_h = 5.31 \text{ mm}$.

Il numero di crateri presenti sul wall è pari a 669, e si individuano anche due piccoli crateri sulla sua faccia posteriore.

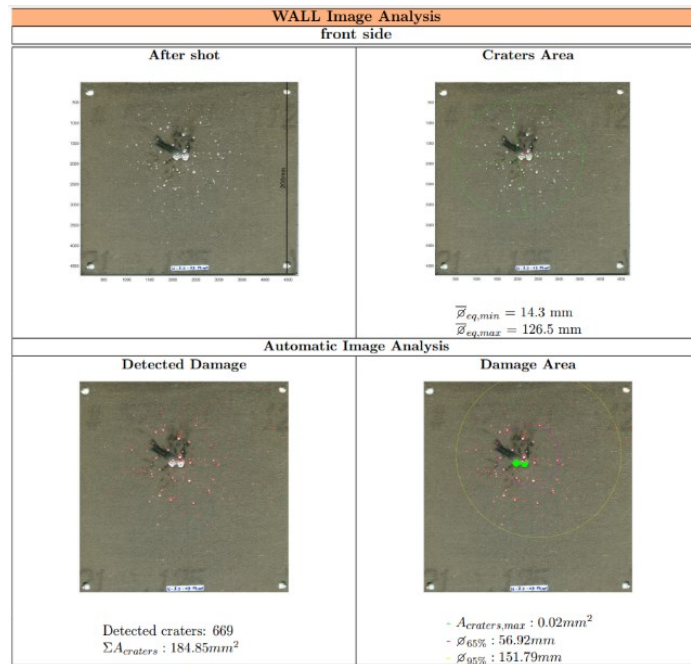


Fig. 22.3 Wall e crateri #9247

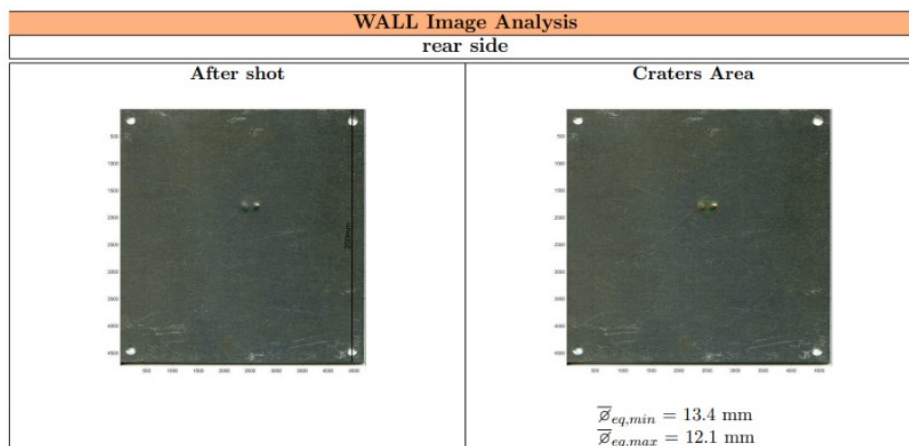


Fig. 22.4 Faccia posteriore del wall #9247

6.5 Camera delay 9243

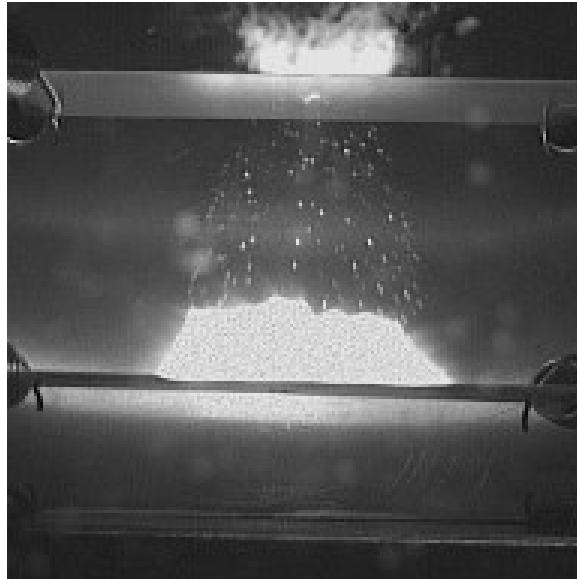


Fig. 23.1 Frame dello sparo #9243

Anche nel caso del test di sparo 9243, l'analisi sarà limitata a poche informazioni poiché la telecamera NTNU V2511 non ha funzionato correttamente e si dispone solo della registrazione dalla telecamera MIRO M310. Tuttavia, il frame utile da cui è possibile trarre informazioni sulla diffusione della nube è quello subito successivo all'impatto della nube con il wall. Questo è dovuto al fatto che tale impatto illumina lo stand-off, cioè lo spazio compreso tra il bumper e il rear plate, e la luce viene riflessa da vari frammenti, consentendo almeno una limitata osservazione della situazione.

Con questo frame si effettua il calcolo dell'angolo di apertura della nuvola, pari a 49.08° .

La velocità del proiettile è pari a $V_0 = 4.022$ km/s, per uno spessore del bumper di $t_b = 1$ mm. Analogamente al caso dello sparo precedente, non è stato possibile stimare la velocità del proiettile tramite il software a causa delle limitazioni già menzionate della telecamera.

A partire dai dati sperimentali, è possibile determinare con il modello Francesconi la velocità e la massa del frammento di dimensioni maggiori:

- $V_{LF} = 3.523$ km/s
- $M_{LF} = 0.017$ g

Sempre dallo stesso frame, come nel caso del “camera failure” precedente, si stima la velocità di espansione della nube, considerando come tempo di inizio il momento più prossimo alla perforazione del bumper.

Da questo discende una stima della velocità di espansione pari a $V_{EP} = 0,822$ km/s. Come già detto, si tratta solo di una stima basata su un unico frame, quindi non attendibile.

Data l'alta velocità dell'impatto e il ridotto spessore del bumper, ci aspettiamo che si verifichi una frammentazione significativa. Purtroppo, la conferma di questo avviene solamente attraverso il numero di crateri rilevati nel wall. Tuttavia, i risultati non deludono le aspettative, suggerendo che la frammentazione sia avvenuta come previsto. Il numero complessivo di crateri individuati ammonta a 1424, e si osservano inoltre due crateri di dimensioni contenute che fuoriescono dalla faccia posteriore del wall.

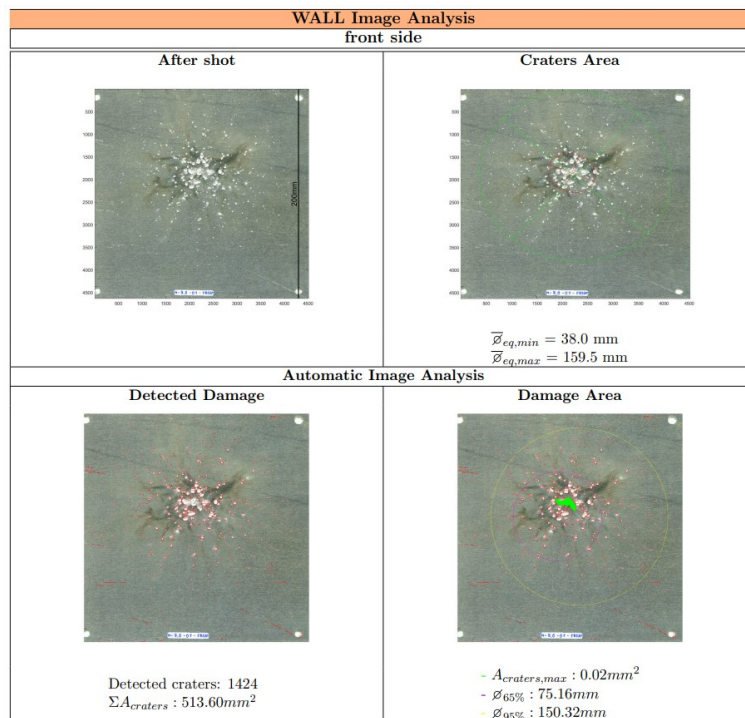


Fig. 23.2 Wall e crateri #9243

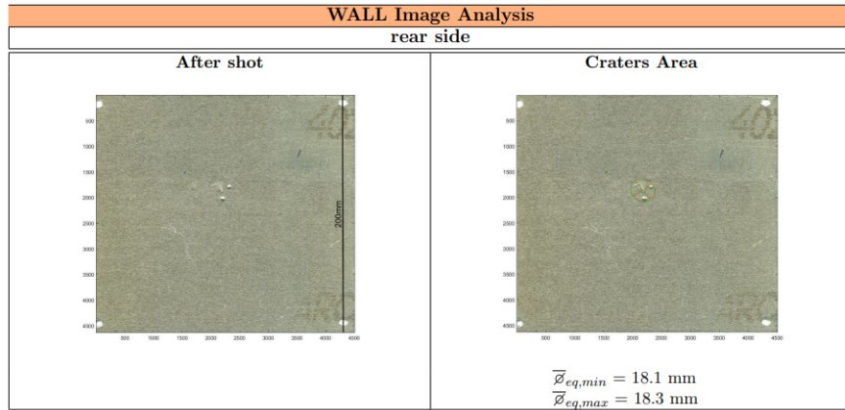


Fig. 23.3 Faccia posteriore del wall #9243

Si riporta l'analisi del foro nel bumper. Il diametro è pari a $D_h = 6.6 \text{ mm}$, mentre secondo la teoria di Maiden sarebbe dovuto essere $D_h = 4.83$. La teoria di Hill, come sempre, si avvicina maggiormente, con $D_h = 5.63 \text{ mm}$.

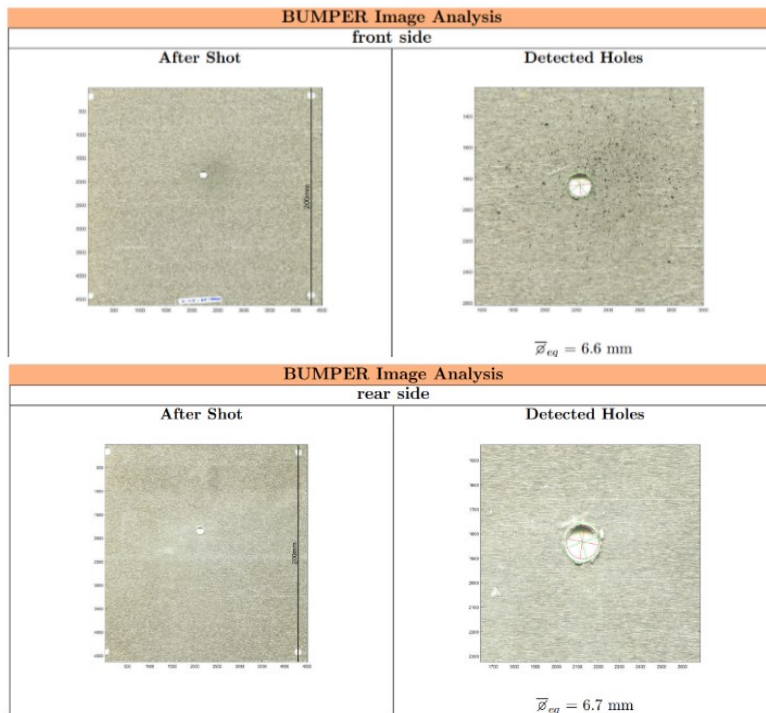


Fig. 23.4 Foro nel bumper #9243

Capitolo 7

CONFRONTO SPARI

Il capitolo presente ha lo scopo di analizzare e confrontare i risultati emersi dai diversi spari condotti nell'ambito di questa ricerca. Durante l'intero percorso, sono state condotte osservazioni in cui diverse variabili sono state modificate, al fine di esplorare gli effetti di questi parametri sul fenomeno in esame.

L'obiettivo primario di questo capitolo è quello di individuare le tendenze e le peculiarità che emergono da ciascun test di sparo, e confrontare tali informazioni con quelle relative ad altri spari simili. Attraverso il confronto dei dati raccolti, ci si propone di evidenziare le somiglianze e le differenze che si sono manifestate. Tale analisi ci consentirà di ottenere una comprensione più approfondita della complessa dinamica del fenomeno, nonché di valutare l'impatto delle variabili indipendenti sulle osservazioni effettuate.

L'importanza di questo confronto risiede nella capacità di evidenziare i fattori chiave che influenzano il comportamento del fenomeno in studio. Attraverso l'identificazione delle variabili che hanno un impatto significativo sulle osservazioni, sarà possibile formulare conclusioni più solide e informate, fornendo così una base teorica più concreta per la nostra ricerca.

Dall'analisi dettagliata di ciascun singolo test di sparo è emerso un quadro generale che aiuta ad illustrare questa fenomenologia. Le caratteristiche di tutti gli spari possono essere riassunte in una tabella che presenta tutti i dati raccolti dall'osservazione dei video. Gli spari sono organizzati in base alle categorie di appartenenza per una visione più chiara e completa del fenomeno.

Tab. 1 Dati raccolti dagli spari

numero sparo	velocità proiettile [km/s]	velocità P frame [km/s]	velocità nube [km/s]				angolo apertura [deg]	bumper				
			avanzamento	%	espansione verticale	espansione profondità		scarto espansioni %	diametro foro [mm]	crateri	spessore [mm]	
SUCCESSI												
9245	3,989	3,8	1,91894	48,11	0,43837	0,564888	22,40	44,66	8,3	709	2	
9250	4,654	P dietro piastra 2° frame	2,76	59,30	0,7885	0,8475	6,96	58,83	8,2	1686	1,5	
9263	2,587	2,57	1,454	56,20	0,2845	0,3129	9,08	36,51	6,5	935	1,5	
9266	2,619	2,647	1,1826	45,15	0,2093	0,2196	4,69	34,6	6,7	218	2	
WS/SUCCESSO												
9264	2,643	2,589	1,50899	57,09	0,2947	0,326977	9,87	38,66	6,4	514	1,5	
SABOT FAILURE												
9252	4,625	P dietro piastra 2° frame	3,50877	75,87	1,046	0,9362	10,50	46,21	6,9	2315	1	
9255	4,95	4,9	3,1185	63,00	0,8965	0,6895	23,09	50,66	8,6	2226	1,5	
9259	4,933	4,888	2,5994	52,69	0,809	0,6804	15,90	36,58	9	2023	2	
PS SABOT FAILURE												
9261	3,045	3,087	1,699	55,80	0,395	0,467	15,42	36,07	6,7	672	1,5	
CAMERA FAILURE												
9247	3,356	/	/	/	/	0,971428	/	52,13	6,3	669	1	
CAMERA DELAY												
9243	4,022	/	/	/	/	0,822301	/	49,09	6,6	1424	1	

Per ogni test di sparo, si rende nota anche l'informazione fondamentale dello spessore del bumper. Questo dato è di estrema importanza poiché rappresenta il punto di partenza per i confronti e le analisi successive. La conoscenza dello spessore del bumper è essenziale per valutare in che modo le varie equazioni e modelli si comportino in condizioni specifiche, considerando le diverse caratteristiche del bumper. Questo ci consente di comprendere meglio come i risultati empirici si allineino o si discostino dai calcoli teorici in base alle specifiche condizioni operative.

Gli spari sono suddivisi in tre raggruppamenti distinti in base allo spessore del bumper utilizzato: quelli con uno spessore di 1 mm, quelli con uno spessore di 1.5 mm e quelli con uno spessore di 2 mm. Questa suddivisione consente di esaminare e confrontare le diverse prestazioni dei bumper in relazione alla frammentazione e alla diffusione della nube di detriti, così come le dinamiche e le relazioni che emergono dai dati. In un secondo momento procederemo all'analisi simultanea di tutti gli spari con diverso spessore, in funzione dei diversi parametri.

Tutti gli spari appartenenti allo stesso gruppo vengono confrontati riguardo:

- Velocità di avanzamento della nube
- Velocità di espansione verticale e in profondità
- Angolo di apertura della nube
- Numero di crateri nel wall retrostante il bumper
- Diametro del foro nel bumper

I grafici a seguire, che raccolgono i dati relativi agli spari appartenenti alla stessa categoria, costituiscono uno strumento prezioso per l'analisi dell'andamento di una variabile specifica rispetto all'aumento della velocità del proiettile.

Questi grafici permettono di visualizzare in modo chiaro e ordinato come la variabile in questione si comporti al variare della velocità del proiettile. Esaminando i dati in questo modo, è possibile identificare tendenze, relazioni e pattern che potrebbero non emergere in modo evidente da una semplice analisi visiva dei dati grezzi.

Prima di procedere con l'analisi comparativa, si riporta il confronto effettuato tra la velocità dei proiettili misurata tramite appositi sensori laser in laboratorio e quella stimata attraverso l'analisi dei video raccolti. Il grafico seguente mette in evidenza anche l'incertezza associata alle misurazioni, sia da parte dei sensori laser che derivante dai frame nei video. Questo confronto verrà applicata solo a quegli spari per i quali è stato possibile stimare la velocità del proiettile tramite i video, come precedentemente discusso in quattro dei test nel capitolo precedente. In Fig. 24 sono riportati in rosso i valori delle velocità dei proiettili misurati dai sensori laser, mentre in verde i valori delle velocità stimate dall'analisi dei video. Ad entrambe le misurazioni è associata la propria incertezza.

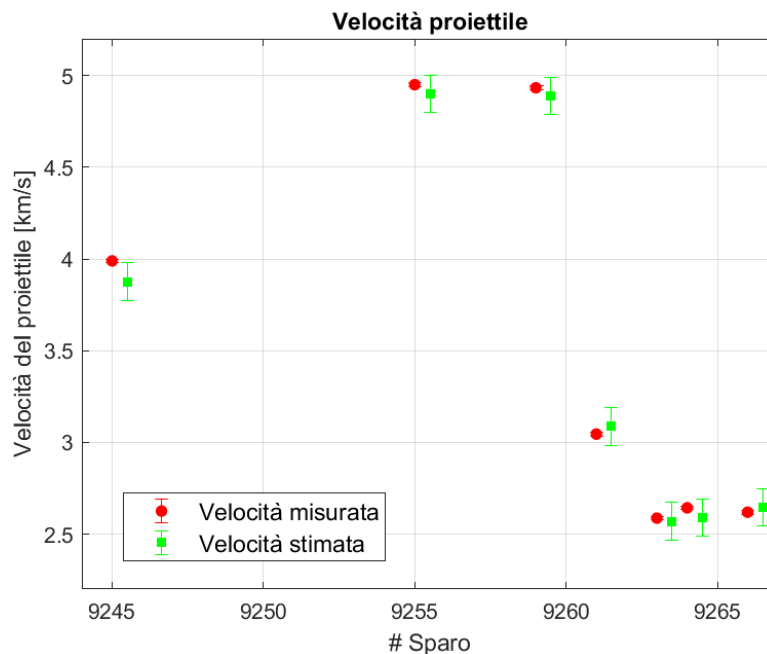


Fig. 24 Confronto velocità del proiettile misurata e stimata

L'incertezza media del laser è pari a ± 0.01 km/s, ed è talmente piccola che tale intervallo è inglobato all'interno del marker rosso. È importante sottolineare che il valore della velocità misurato dai sensori laser si colloca costantemente all'interno dell'intervallo di incertezza derivante dall'analisi dei video.

7.1 BUMPER CON SPESSORE 1 mm

I bumper con uno spessore di 1 mm sono i più sottili, ma possono comunque introdurre variazioni significative nella frammentazione dei detriti spaziali e nella diffusione delle nuvole di detriti.

Questi bumper costituiscono una soluzione eccellente in termini di ottimizzazione del rapporto tra peso e protezione. Rispetto ai loro omologhi più spessi, offrono un notevole risparmio di massa senza compromettere significativamente la capacità di proteggere da impatti iperveloci.

Questi componenti sottili sono stati impiegati nella nostra ricerca al fine di esplorare le sfumature della dinamica degli impatti spaziali, consentendo di raggiungere un equilibrio tra la necessità di ridurre la massa complessiva di un sistema e la garanzia di un grado accettabile di protezione. Nonostante il loro spessore ridotto, i bumper da 1 mm sono in grado di assorbire una parte significativa dell'energia cinetica degli impatti, contribuendo in modo efficace a prevenire o mitigare i danni ai componenti principali.

7.1.1 VELOCITÀ

Le teorie sulla propagazione della nube di detriti negli impatti ad alta velocità costituiscono una base fondamentale per comprendere il comportamento di tali eventi. Nel corso dell'analisi dei risultati ottenuti dai vari spari, è emerso che l'andamento delle velocità di avanzamento rientra nella dinamica prevista da queste teorie.

In particolare, i dati sperimentali confermano una regola empirica essenziale:

"Maggiore è la velocità di impatto, maggiore è la velocità al Leading Edge (LE) della nube di detriti."

Questa relazione è il risultato diretto dell'energia cinetica iniziale associata al proiettile. Maggiore è l'energia cinetica iniziale del proiettile, maggiore è la quantità di energia disponibile per suddividersi tra i frammenti generati e per alimentare i vari processi

associati agli impatti iperveloci. Di conseguenza, la velocità di avanzamento della nube di detriti tende ad aumentare con l'aumento della velocità d'impatto, come confermato dai dati sperimentali e coerentemente con le previsioni teoriche. Questo è un aspetto fondamentale da considerare nella comprensione e nella previsione degli effetti degli impatti spaziali.

Se fosse stato possibile calcolare la velocità di avanzamento anche per i primi due spari di questo gruppo, avremmo potuto osservare una chiara tendenza nel grafico sotto forma di una linea crescente che collega i vari punti. Questo comportamento è più evidente negli altri spari, che non hanno presentato problemi di registrazione. La crescente velocità di avanzamento della nube di detriti è un aspetto fondamentale che emerge dai dati sperimentali.

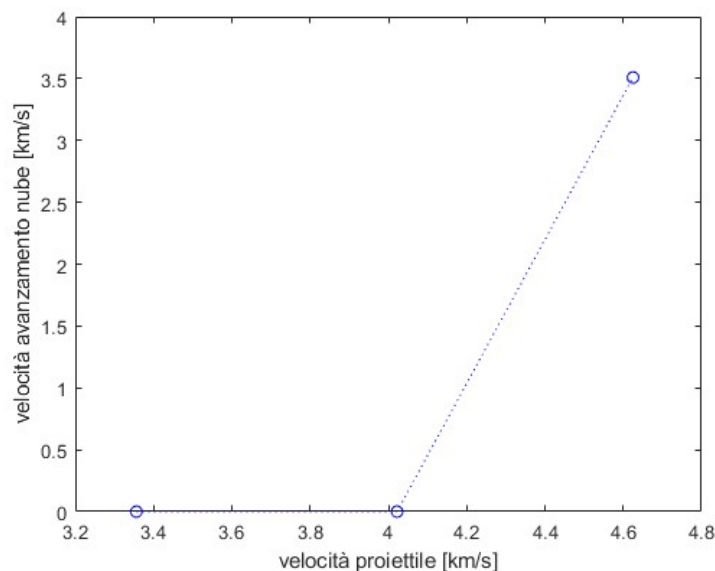


Fig. 25.1 Velocità avanzamento vs velocità proiettile, $t_b = 1$ mm

Lo stesso principio energetico si può applicare anche alle velocità di espansione in profondità e in verticale. In questo caso, la regola fondamentale che emerge è la seguente:

“Maggiore è la velocità *di impatto*, maggiore è la velocità di espansione della nube di detriti”

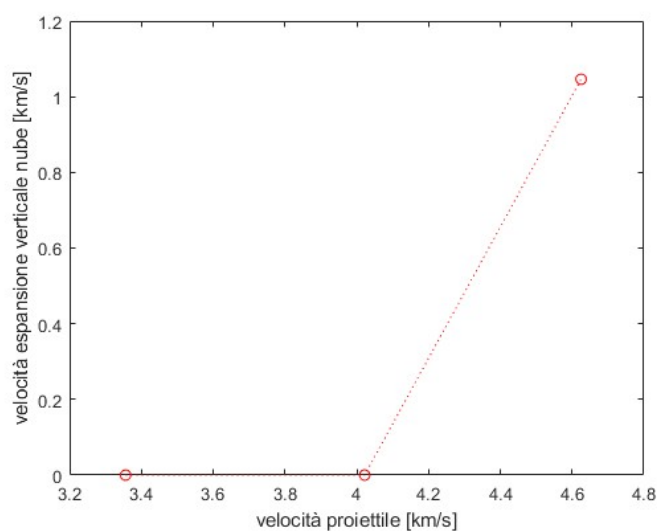


Fig. 25.2 Velocità espansione verticale vs velocità proiettile, $t_b = 1$ mm

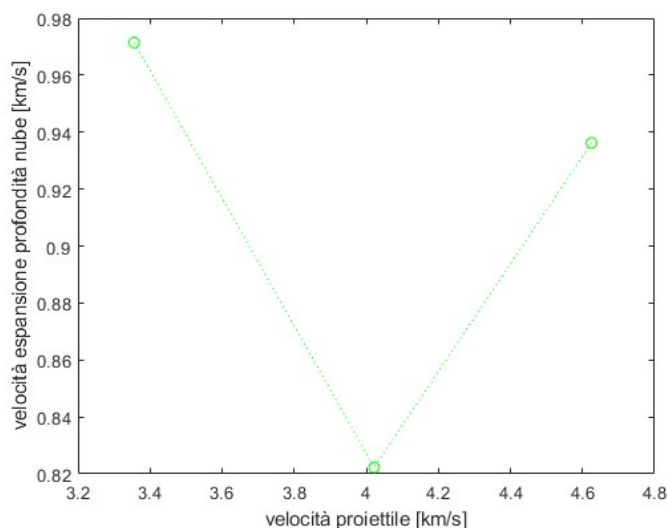


Fig. 25.3 Velocità espansione profondità vs velocità proiettile, $t_b = 1$ mm

Il fenomeno che spiega questo comportamento può essere ricondotto allo stesso ragionamento fisico che abbiamo applicato precedentemente, sempre basato sull'energia cinetica iniziale. Tuttavia, nei primi due spari di questa categoria, la telecamera Phantom V2511 ha riscontrato problemi di funzionamento, e si è deciso di assegnare un valore di velocità di espansione verticale, V_{EV} , pari a 0 km/s. Questo dato inusuale ha contribuito

all'andamento particolare del grafico che raffigura la velocità di espansione verticale. D'altro canto, il diagramma non lineare relativo alla velocità di espansione in profondità è probabilmente il risultato di stime approssimative, dovute all'inadeguata risoluzione e al frame rate decisamente basso della telecamera MIRO M310. Questi fattori hanno reso il calcolo della velocità di espansione in profondità, V_{EP} , approssimativo, e tale incertezza è riflessa nell'andamento del grafico corrispondente.

Ad ogni modo, nelle simulazioni di sparo che impiegano bumper di maggiore spessore, emerge chiaramente l'andamento crescente delle velocità, in linea con quanto previsto dai modelli teorici.

7.1.2 ANGOLO DI APERTURA

L'angolo di apertura della nube rappresenta il parametro più variabile su cui mi sono imbattuto nel corso dall'analisi presentata in questa tesi. Infatti, nei grafici relativi agli altri gruppi di spari si riscontrano andamenti che spesso non seguono un modello matematico o che non trovano spiegazioni fisiche o logiche immediate. Oltre agli errori di misura, l'angolo di apertura si distingue per la sua notevole variabilità tra un singolo frame e un altro all'interno dello stesso sparo.

Dall'osservazione del grafico riportato di seguito, sembrerebbe che l'angolo di apertura mostri un andamento decrescente in relazione alla velocità dell'impatto. Questo comportamento può essere giustificato considerando che un proiettile con maggiore inerzia tende a concentrare la quantità di moto dei frammenti da esso generati nella parte centrale della nube di detriti. Di conseguenza, ciò porta a una diminuzione della densità dei frammenti situati negli anelli periferici della nube, con la conseguenza che la loro rilevazione risulta meno probabile.

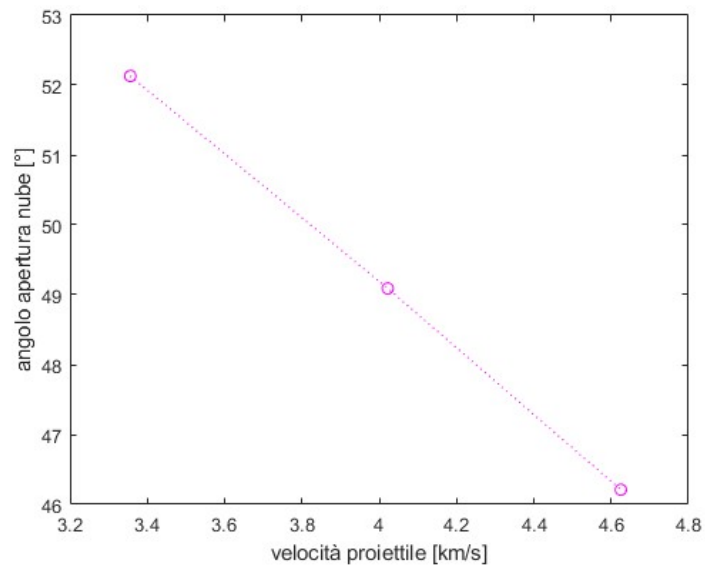


Fig. 25.4 Angoli di apertura vs velocità proiettile, $t_b = 1$ mm

7.1.3 CRATERI E DIAMETRO DEL FORO

Per quanto riguarda il numero di crateri individuati nel wall, questo valore è direttamente correlato alla velocità dell'impatto. Infatti, maggiore è la velocità, maggiore è il numero di crateri individuati. Il principio fisico si basa sul fatto che all'aumentare della velocità dell'impatto, si verifica una frammentazione più completa dell'insieme sfera/bumper, con la conseguente formazione di un maggior numero di frammenti. Inoltre, è possibile dedurre che all'aumentare del numero di frammenti, la dimensione media dei frammenti diminuisca. I principi che guidano questo fenomeno sono quindi due:

“Maggiore è la velocità di impatto, più il grado di frammentazione dell'insieme sfera/bumper è alto, con conseguente formazione di un maggior numero di frammenti.”

“Maggiore è il numero di frammenti, minore è la dimensione media dei frammenti”

In sostanza, spari ad alta velocità generano una frammentazione più intensa, producendo un maggior numero di frammenti più piccoli. Questo principio è fondamentale per comprendere le dinamiche di impatto e l'effetto sul bumper e sul wall, in quanto fornisce

indicazioni sulla gravità dell'evento e sulla capacità del bumper di frammentare gli oggetti impattanti.

Il grado di frammentazione rappresenta quanto profondamente e in maniera efficace avviene il processo di frammentazione di un elemento. In altre parole, quanto più alto è il grado di frammentazione, tanto maggiore è il numero di frammenti prodotti dopo l'impatto. Questo grado di frammentazione è un indicatore di quanto il processo sia avvenuto in modo "efficiente". Nel contesto degli scudi Whipple, un grado di frammentazione elevato è preferibile per garantire la massima efficacia nell'assorbire e frammentare i proiettili; questo permette di non individuare nella nube, o individuare in minor numero possibile, frammenti di dimensioni elevate/critiche che potrebbero rappresentare una minaccia per le strutture retrostanti.

Nel corso dell'analisi, i dati raccolti hanno mostrato una compatibilità con la teoria. In particolare, gli spari eseguiti correttamente con uno scudo Whipple mostrano un grado di frammentazione elevato, il che è auspicabile per garantire la massima protezione. Tuttavia, in uno degli spari di questo gruppo si è verificato un "sabot failure", ossia un malfunzionamento che ha portato ad un doppio impatto sul bumper, e per questo si osserva un numero di crateri significativamente maggiore rispetto agli altri spari eseguiti correttamente. La differenza è chiaramente evidente, e il numero di crateri per l'ultimo sparo diverge dall'andamento lineare dei primi due spari, confermando l'effetto dell'effettiva duplicazione del proiettile sull'analisi dei dati.

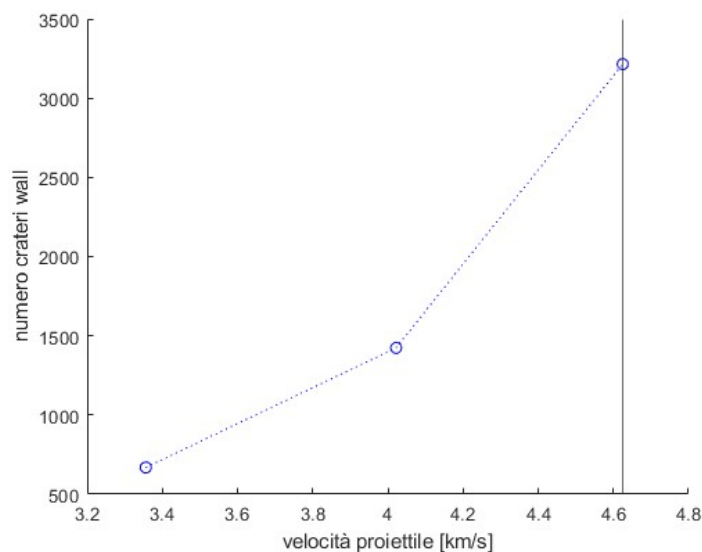


Fig. 25.5 Numero crateri vs velocità proiettile, $t_b = 1$ mm

Infine, per quanto riguarda il diametro del foro nel bumper, il grafico riporta un andamento crescente con la velocità dell'impatto. Ovvero, è deducibile che:

“Per velocità dei detriti maggiori si creano fori di dimensioni maggiori”

Questo fatto può essere spiegato principalmente da due fattori: l'energia cinetica del proiettile e l'energia rilasciata durante l'impatto. La dimensione del foro perforato dal proiettile dipende direttamente dall'energia cinetica del proiettile. Se la velocità del proiettile aumenta, la sua energia cinetica cresce in modo significativo, il che significa che avrà maggiore potenza di perforazione. Quando il proiettile colpisce il bumper, parte dell'energia cinetica si trasferisce al bumper stesso e ai materiali circostanti. Questo trasferimento di energia causa la deformazione e la frammentazione del bumper, portando alla creazione di un foro più grande rispetto a quanto si potrebbe osservare a velocità inferiori.

In sintesi, le velocità più elevate del proiettile garantiscono una maggiore energia e potenza di perforazione, contribuendo alla creazione di fori di dimensioni maggiori nei bumper.

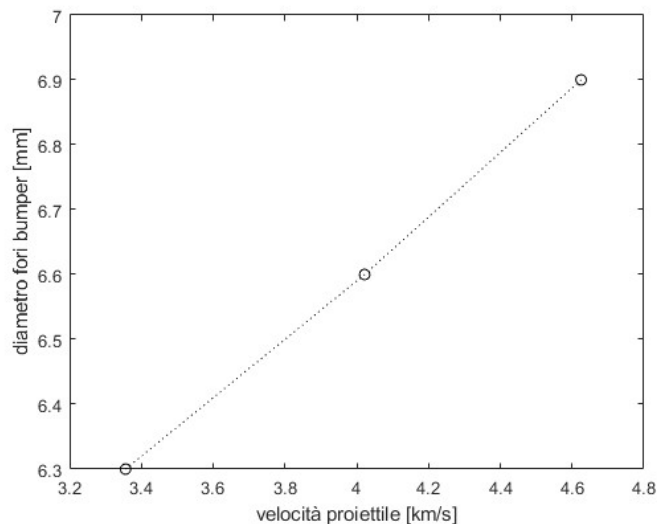


Fig. 25.6 Diametro fori vs velocità proiettile, $t_b = 1$ mm

Le regole precedentemente enunciate riguardo le velocità di avanzamento ed espansione, il numero di crateri e le dimensioni del foro sono universali e dovrebbero trovare riscontro anche negli spari contro bumper di spessore sia da 1.5 mm che da 2 mm. In altre parole, questi principi dovrebbero applicarsi in modo coerente, indipendentemente dallo spessore del bumper utilizzato.

Questo suggerisce che le dinamiche relative al numero di crateri formati sul wall retrostante il bumper, alle diverse velocità che caratterizzano la diffusione della nuvola e alla dimensione media dei frammenti, dovrebbero seguire gli stessi principi fisici di base, indipendentemente dallo spessore specifico del bumper. Questo è un aspetto importante da considerare nella progettazione di strategie di protezione e di difesa contro detriti spaziali, poiché suggerisce che le regole e i risultati ottenuti possono essere applicati in modo coerente in una varietà di contesti, indipendentemente dalle specifiche caratteristiche dei bumper utilizzati.

7.2 BUMPER CON SPESSORE 1.5 mm

Ci rivolgiamo ora all'analisi dei bumper con uno spessore intermedio di 1.5 mm. Questa analisi ci consentirà di comprendere come variazioni sottili nel design degli scudi possano influenzare la loro capacità di protezione contro l'impatto dei detriti spaziali.

7.2.1 VELOCITÀ

Confrontando i risultati ottenuti da tutte le analisi, emergono chiaramente le tendenze che riflettono le teorie sulla propagazione della nube di detriti. In primo luogo, abbiamo osservato un andamento delle velocità di avanzamento che cresce in modo significativo al crescere della velocità dell'impatto. Questo conferma quanto previsto dalla teoria, secondo la quale maggiore è l'energia cinetica iniziale, maggiore sarà l'energia disponibile per frammentare il bumper e il proiettile, generando un maggior numero di frammenti che si propagheranno più velocemente.

Il grafico relativo alla velocità di espansione in profondità, sebbene mostri una variazione di velocità tra l'ultimo sparo e quello precedente, va interpretato con cautela. Tale differenza può essere attribuita agli errori di misura intrinseci all'utilizzo di un solo frame per la stima della velocità. È importante sottolineare che le curve per la velocità di avanzamento e di espansione verticale sono sorprendentemente simili, confermando la validità delle tecniche di misura adottate e la coerenza dei dati raccolti.

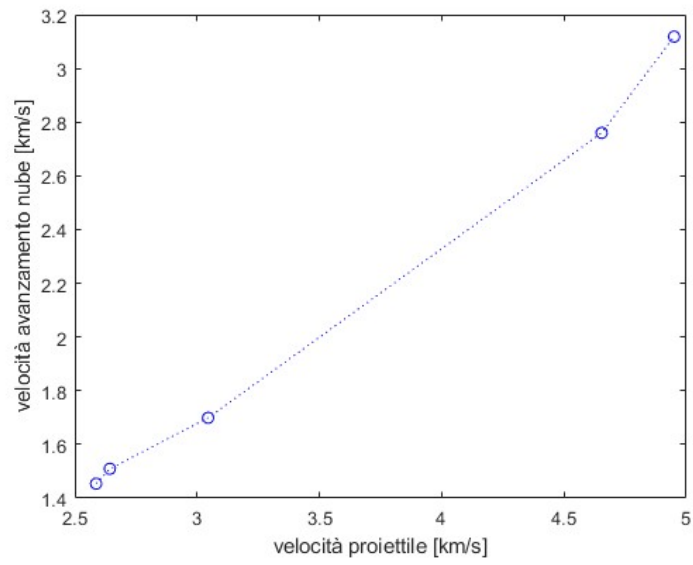


Fig. 26.1 Velocità avanzamento vs velocità proiettile, $t_b = 1.5$ mm

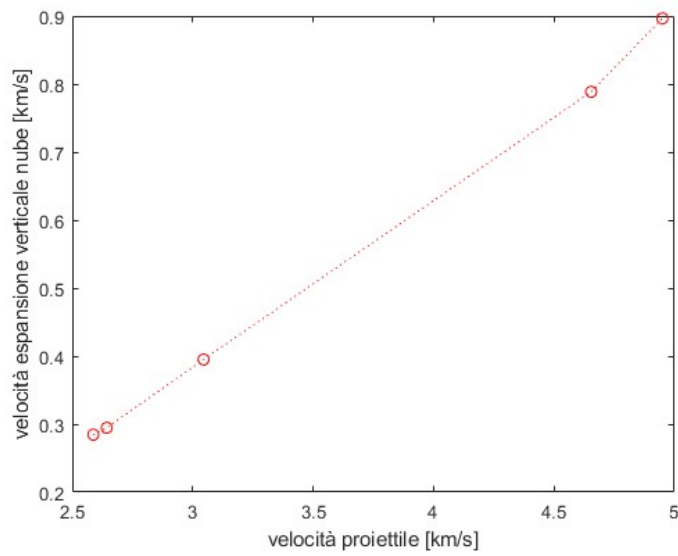


Fig. 26.2 Velocità espansione verticale vs velocità proiettile, $t_b = 1.5$ mm

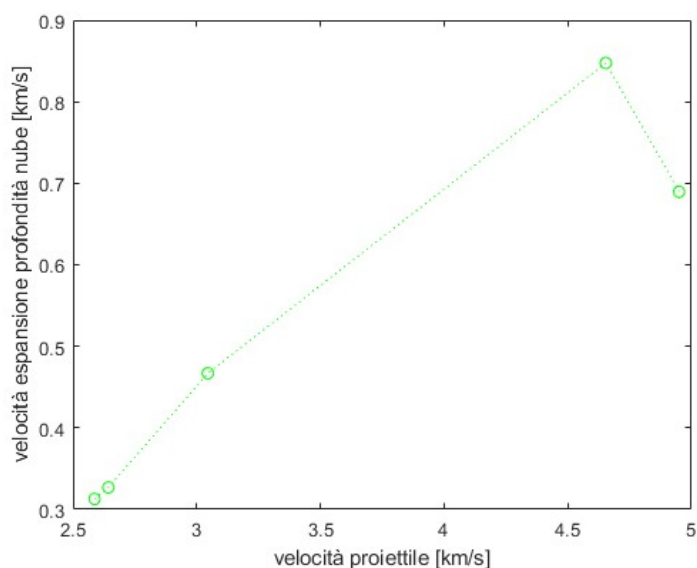


Fig. 26.3 Velocità espansione profondità vs velocità proiettile, $t_b = 1.5$ mm

Da un confronto con il gruppo di spari precedente, caratterizzato da bumper di spessore unitario, emergono importanti considerazioni riguardo alle diverse velocità. In particolare, nelle simulazioni con bumper di spessore di 1.5 mm, a parità di velocità del proiettile, si osservano velocità di avanzamento ed espansione inferiori rispetto a quelle corrispondenti nei test con bumper di 1 mm.

A titolo di esempio, consideriamo il terzo sparo del gruppo precedente e il quarto sparo di questo gruppo, entrambi caratterizzati da una velocità di impatto simile (4.625 km/s nel primo caso, 4.654 km/s nel secondo). Tuttavia, emerge una notevole differenza quando si valutano le velocità di avanzamento:

- Per il bumper di spessore 1 mm, la velocità di avanzamento è $V_a = 3.509$ km/s.
- Per il bumper di spessore 1.5 mm, la velocità di avanzamento è $V_a = 2.76$ km/s.

Questa differenza, pari a 0.75 km/s, rappresenta un aspetto di notevole importanza poiché può fare la differenza tra il successo del sistema di protezione e un potenziale fallimento. La stessa osservazione è valida anche per le velocità di espansione verticale e in profondità. Questi dati sottolineano l'importanza critica della scelta dello spessore del bumper nella progettazione di sistemi di protezione e rivelano come variazioni

apparentemente piccole nelle specifiche del bumper possano avere un impatto significativo sulla sua efficacia.

La ragione alla base della riduzione delle velocità caratteristiche che regolano la diffusione della nube, all'aumentare dello spessore del bumper, risiede nel fatto che uno spessore maggiore tende ad assorbire, prima nella fase di deformazione plastica, poi nella frammentazione, una maggiore quantità di energia cinetica del proiettile e la relativa quantità di moto. Ne consegue che l'energia disponibile ai frammenti della nuvola per la loro diffusione sarà limitata.

L'adozione di un sistema caratterizzato da bumper di maggiore spessore indubbiamente aumenta il livello di protezione offerto dallo scudo Whipple. Tuttavia, questo approccio si scontra con l'importante criterio del contenimento della massa, particolarmente cruciale nelle applicazioni spaziali. La necessità di mantenere una massa contenuta è determinante nel design di sistemi spaziali, poiché impatta direttamente sulla facilità di lancio, sui costi e sulla gestione delle missioni nello spazio. Pertanto, la selezione dello spessore del bumper rappresenta una decisione delicata che richiede un trade-off tra l'aumento della protezione e il mantenimento di una massa accettabile per l'oggetto spaziale in questione.

7.2.2 ANGOLO DI APERTURA

Per quanto riguarda il bumper con uno spessore di 1.5 mm, i risultati relativi agli angoli di apertura della nube mostrano una variabilità significativa. Non emerge un andamento chiaro o prevedibile per tali angoli, ma sembra che l'angolo di apertura possa tendere ad aumentare per una maggiore velocità di impatto. Questa deduzione può essere sostenuta dalla significativa differenza riscontrata tra il terzo e il quarto sparo all'interno di questa categoria.

Tuttavia, è essenziale notare che le stime degli angoli di apertura sono intrinsecamente soggette a errori di misura, sebbene questi sembrino avere un impatto relativamente limitato sui risultati, come evidenziato nel grafico. Pertanto, è fondamentale adottare un approccio prudente nell'interpretare tali dati poiché l'andamento osservato per gli angoli

di apertura sembra discostarsi dalla teoria precedentemente ipotizzata per i bumper di 1 mm, che suggeriva un andamento rettilineo decrescente.

L'incremento dell'angolo di apertura potrebbe trovare giustificazione nel fatto che, all'interno di un bumper più spesso, la quantità di materiale che può frammentarsi risulta maggiore. Di conseguenza, per ragioni geometriche, è più probabile che si verifichi un maggior numero di frammenti che tendono a allontanarsi dalla parte centrale della nube in direzione degli anelli periferici.

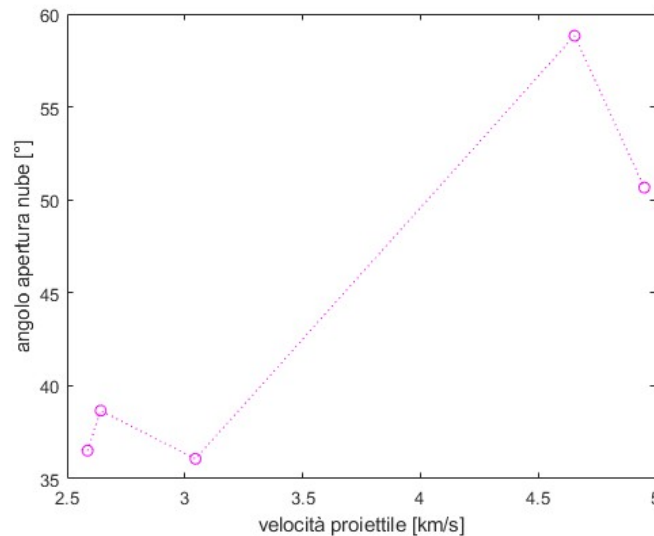


Fig. 26.4 Angoli di apertura vs velocità proiettile, $t_b = 1.5$ mm

7.2.3 CRATERI E DIAMETRO DEL FORO

Per quanto riguarda il numero di crateri nel wall, si osserva una tendenza crescente, ad eccezione del primo sparo che si discosta da questa regola. Tuttavia, vi sono due spari in cui si è verificato un errore dovuto ai sabot e identificati da una barra verticale nera: uno è il cosiddetto pluri sabot failure, caratterizzato da un numero relativamente basso di crateri, mentre l'altro è uno dei sabot failure, in cui si individua il massimo numero di crateri.

È interessante notare che il terzo sparo, identificato come "pluri sabot failure" e contenente, di fatto, quattro proiettili, non si distingue per il numero di crateri,

contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare. Questa situazione potrebbe essere attribuita a una relativa bassa velocità di impatto, che ha comportato una frammentazione limitata, sia del proiettile che dei sabot, generando un numero complessivamente ridotto di crateri.

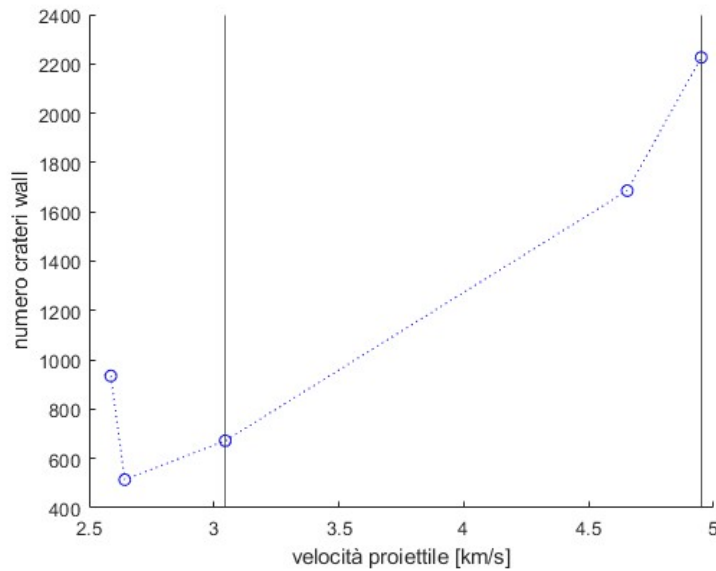


Fig. 26.5 Numero crateri vs velocità proiettile, $t_b = 1.5$ mm

Anche il diametro dei fori creati nel bumper segue un andamento crescente, coerente con le aspettative teoriche. Tale tendenza si verifica parallelamente all'aumento della velocità di impatto, risultando in fori di dimensioni maggiori per velocità più elevate

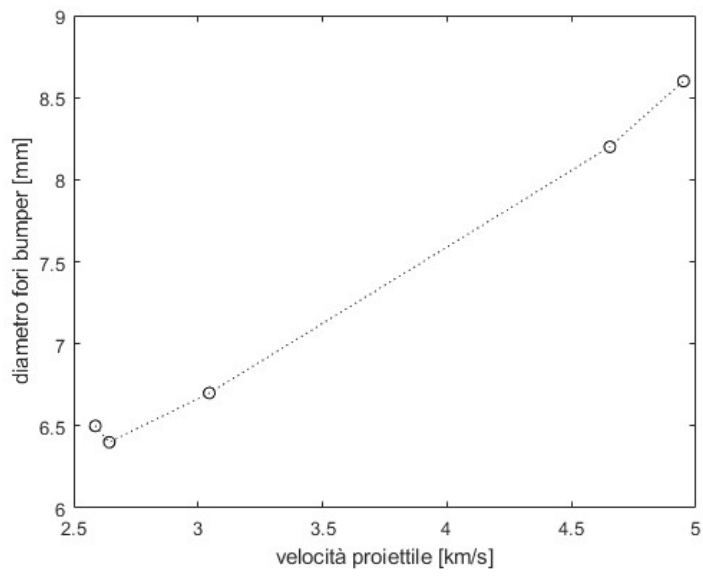


Fig. 26.6 Diametro fori vs velocità proiettile, $t_b = 1.5$ mm

7.3 BUMPER CON SPESSORE 2 mm

Il gruppo di spari appartenenti a questa categoria mostra un comportamento che si avvicina maggiormente ai risultati attesi secondo la teoria balistica. In particolare, si osserva che, tranne per l'angolo di apertura della nube, tutti gli altri parametri analizzati mostrano un andamento crescente. Questo suggerisce una maggiore coerenza tra i dati sperimentali e le previsioni teoriche.

7.3.1 VELOCITÀ

È interessante notare che i grafici relativi alla velocità di avanzamento e di espansione verticale mostrano somiglianze significative. Allo stesso tempo, il grafico della velocità di espansione in profondità presenta un andamento più congruente con le aspettative teoriche rispetto ai precedenti. Questi risultati confermano la coerenza delle velocità osservate con il principio energetico precedentemente esaminato.

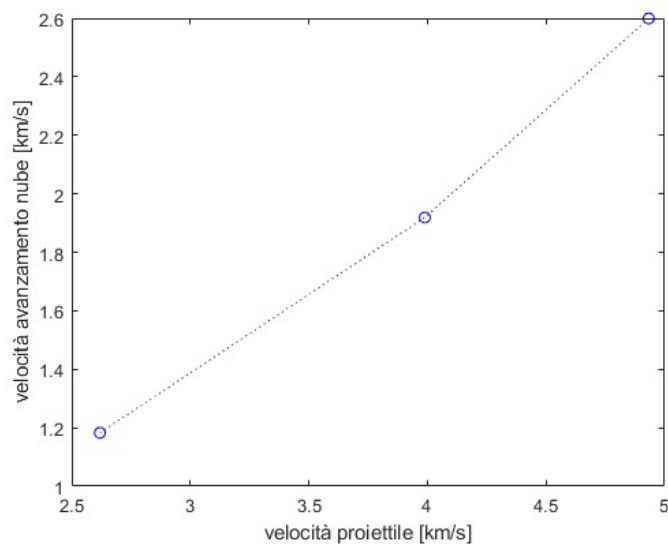


Fig. 27.1 Velocità avanzamento vs velocità proiettile, $t_b = 2$ mm

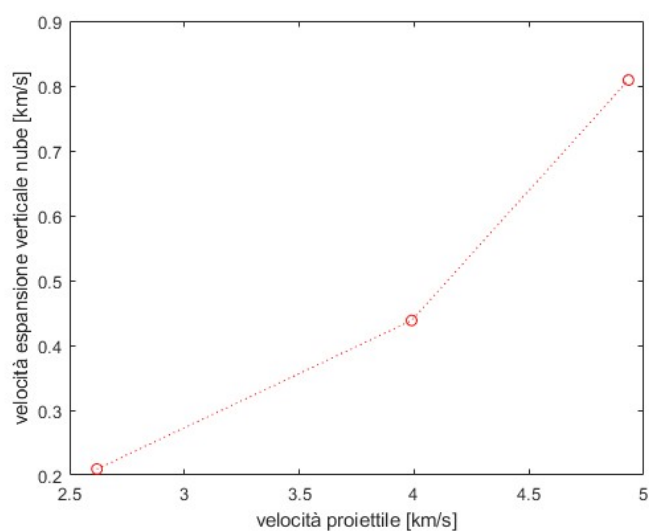


Fig. 27.2 Velocità espansione verticale vs velocità proiettile, $t_b = 2$ mm

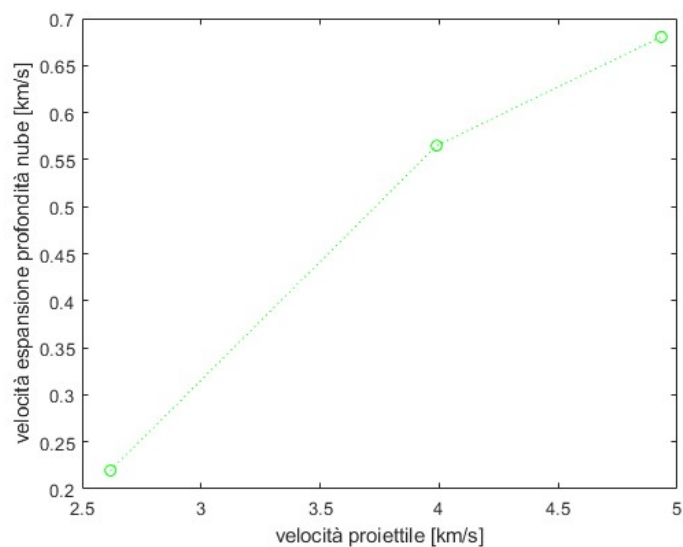


Fig. 27.3 Velocità espansione profondità vs velocità proiettile, $t_b = 2$ mm

Anche per questo gruppo di spari è possibile effettuare un confronto delle velocità con i gruppi precedenti; dato che il gruppo di spari con bumper da 1 mm comprende un solo test che ha effettivamente permesso la stima delle velocità con la telecamera NTNU, il confronto si effettua con il gruppo precedente, ovvero gli spari su bumper di spessore 1.5 mm. Come precedentemente discusso, le velocità della nube di detriti risultano minori, a

parità di velocità del proiettile, quando si utilizzano bumper di 2 mm rispetto a bumper più sottili.

Ad esempio, lo sparo sul bumper di 2 mm con una velocità del proiettile pari a 3.989 km/s ha fornito una velocità di avanzamento pari a $V_a = 1.919$ km/s. Al contrario, considerando una velocità di impatto simile per il caso con spessore 1.5 mm (Fig. 25.1), se si assume corretto l'andamento rettilineo della velocità rappresentato con la linea tratteggiata, si otterrebbe una velocità di avanzamento della nube di 2.3 km/s. Allo stesso modo, se le registrazioni avessero permesso di valutare la nube prodotta da un bumper di spessore 1 mm alla stessa velocità di impatto, avremmo misurato una velocità di avanzamento ancora superiore.

7.3.2 ANGOLO DI APERTURA

L'analisi degli angoli di apertura in questo gruppo di spari non fornisce un andamento predittivo chiaro. Gli andamenti osservati sembrano svincolarsi da qualsiasi logica o principio fisico riconosciuto.

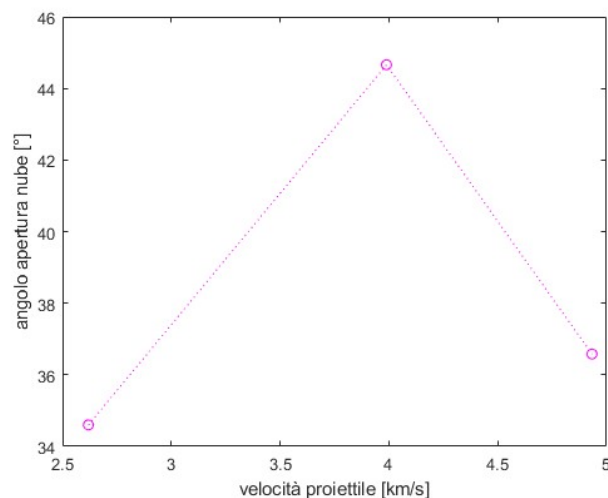


Fig. 27.4 Angoli di apertura vs velocità proiettile, $t_b = 2$ mm

7.3.3 CRATERI E DIAMETRO DEL FORO

Le dimensioni dei fori nei bumper sono maggiori all'aumentare della velocità del proiettile, così come il numero di crateri nel wall. Come ci si aspetterebbe, l'ultimo sparo, in quanto "sabot failure", diverge dall'andamento rettilineo, ma è sempre concorde con le teorie sopracitate.

È interessante notare che l'andamento del numero di crateri nel bumper di spessore 2 mm è quasi coincidente con l'andamento osservato nel caso del bumper di 1 mm, sebbene il gruppo da 1 mm mostri valori molto più elevati. Ciò può essere spiegato dal fatto che un bumper più spesso ha una maggiore capacità di assorbire l'energia cinetica del proiettile in impatto, mentre un bumper più sottile è più suscettibile alla frammentazione, in quanto è più "fragile".

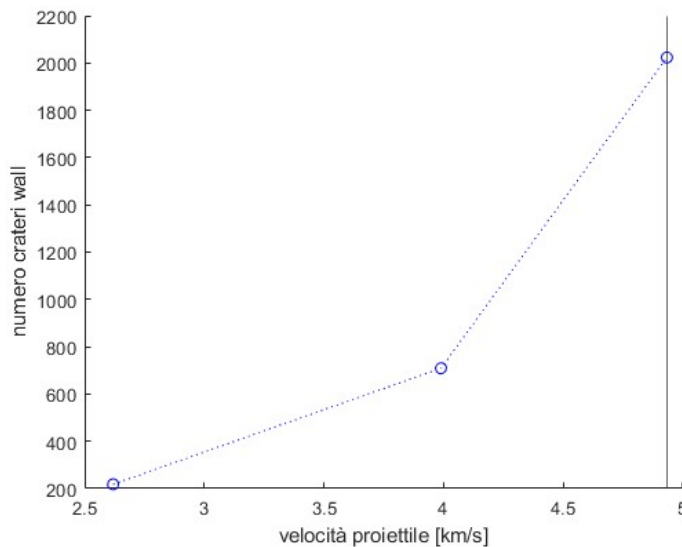


Fig. 27.5 Numero crateri vs velocità proiettile, $t_b = 2$ mm

Come precedentemente discusso, anche per i bumper di spessore 2 mm si osserva un andamento del diametro del foro crescente all'aumentare della velocità del proiettile, in pieno accordo con le previsioni teoriche.

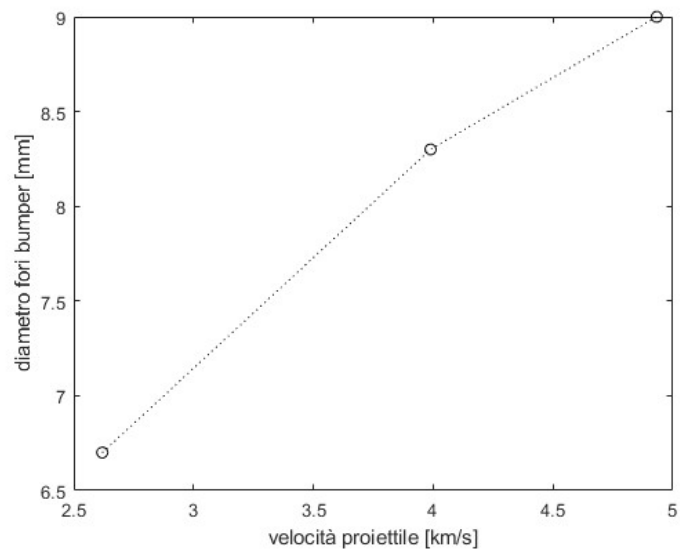


Fig. 27.6 Diametro fori vs velocità proiettile, $t_b = 2$ mm

7.4 GRAFICI CUMULATIVI

Di seguito si riportano i grafici cumulativi relativi alle proprietà specifiche delle nubi precedentemente illustrate, al cui interno sono rappresentati tutti gli spari analizzati, denotati con forme e colori diversi in funzione dello spessore. Questi grafici consentono di visualizzare più chiaramente l'andamento dei parametri in esame al variare dello spessore, evidenziando le tendenze e le differenze significative tra i diversi test di sparo. Osservando attentamente tali grafici, è possibile confermare le importanti conclusioni che abbiamo precedentemente trattato riguardo le prestazioni degli scudi Whipple con bumper di spessori differenti.

Osservando la Fig. 27.1, che rappresenta il valore della velocità di avanzamento della nube in funzione della velocità del proiettile, si evince come all'aumentare dello spessore, la velocità dei frammenti prodotti diminuisca. Il motivo alla base di questa differenza è stato discusso nel paragrafo 7.2.1. Per lo stesso motivo, è interessante osservare anche le Fig. 27.2 e Fig. 27.3, che riportano le velocità di espansione. Si tenga presente che le misure delle velocità di espansione in profondità sono affette da incertezze importanti.

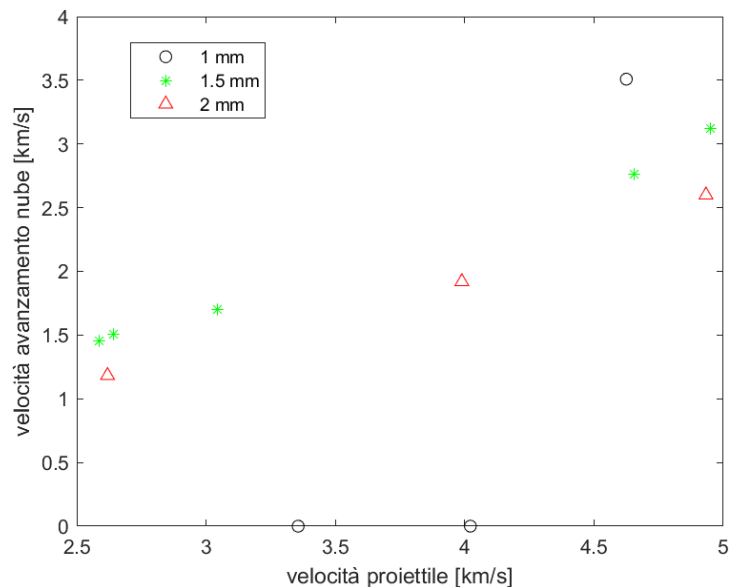


Fig. 28.1 Velocità avanzamento vs velocità proiettile

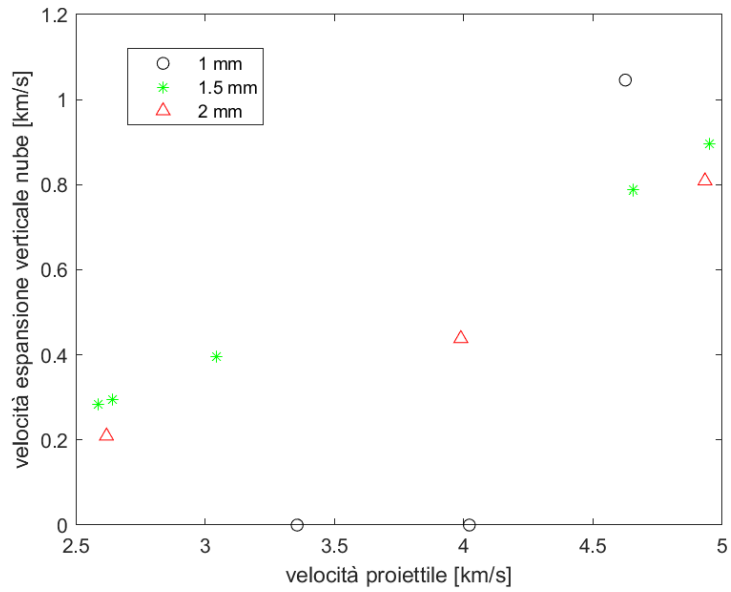


Fig. 28.2 Velocità espansione verticale vs velocità proiettile

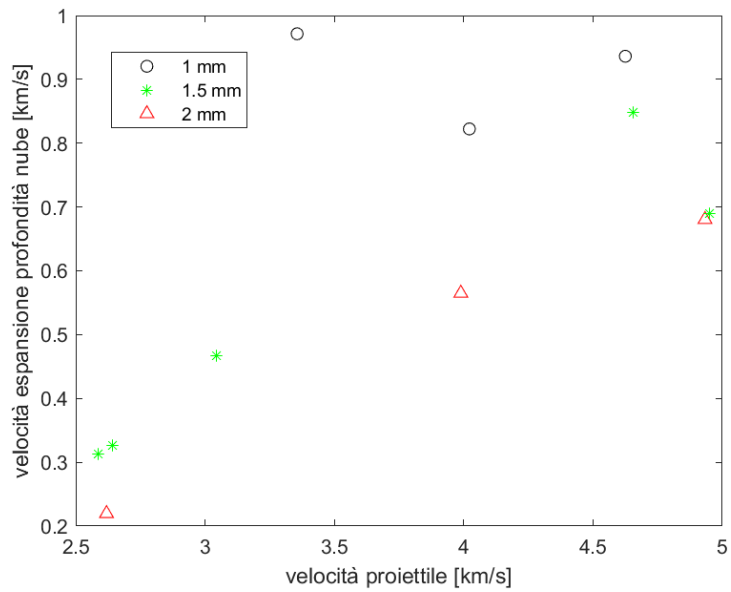


Fig. 28.3 Velocità espansione in profondità vs velocità proiettile

Gli andamenti degli angoli, per i diversi valori dello spessore del bumper, presentano irregolarità o tratti monotoni che tuttavia non seguono uno schema uniforme tra loro. La Fig. 27.4 riassume questa distribuzione aleatoria.

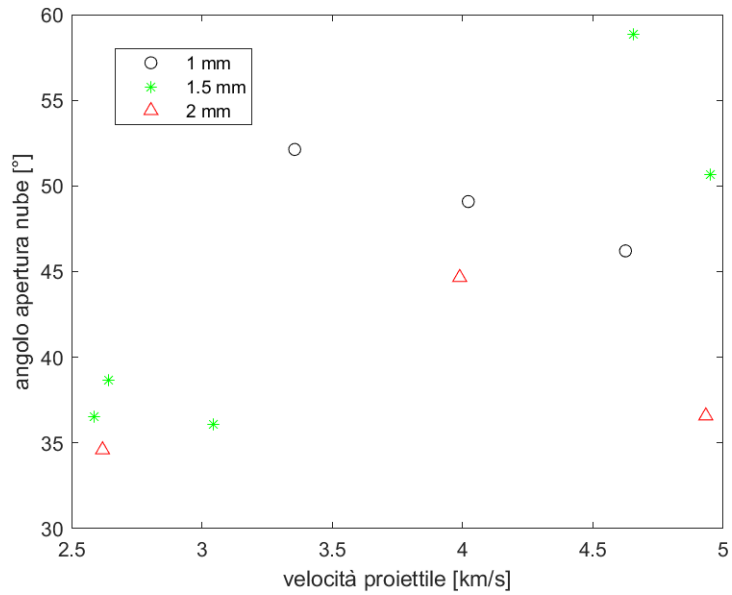


Fig. 28.4 Angoli di apertura vs velocità proiettile

Per il numero di crateri, particolare attenzione richiedono gli spari con sabot failure, in quanto il numero totale di frammenti prodotti è maggiore. Si nota comunque un aumento del numero di crateri al diminuire dello spessore della piastra frontale, in accordo con il fatto che un bumper più spesso ha una maggiore capacità di assorbire l'energia cinetica del proiettile in impatto.

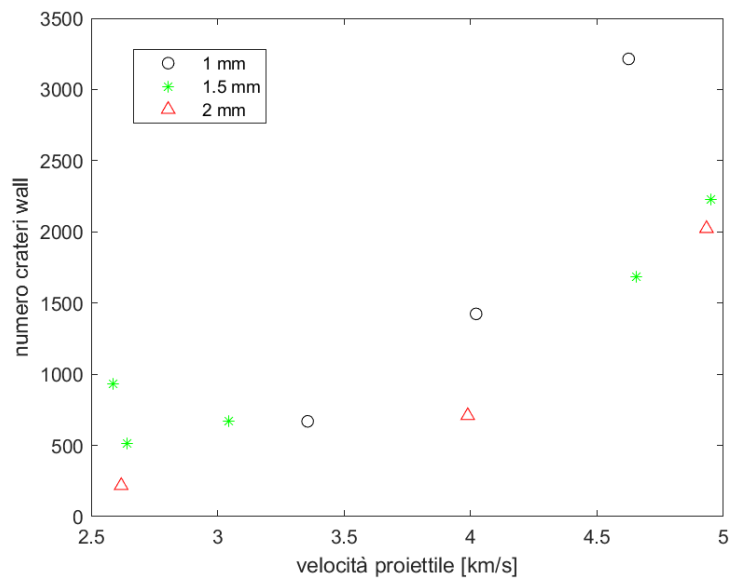


Fig. 28.5 Numero crateri vs velocità proiettile

Infine, dal grafico relativo alle dimensioni dei fori nel bumper, Fig. 27.6, si nota come all'aumentare dello spessore, le dimensioni del foro siano maggiori. Questo comportamento è determinato da diversi fattori. In generale, quando un proiettile ad alta velocità colpisce una piastra, parte della sua energia cinetica e della quantità di moto vengono trasferite alla piastra stessa. Nelle piastre spesse, c'è più spazio in cui l'energia può essere assorbita, il che può portare a una deformazione più ampia della piastra. Inoltre, in una piastra più spessa, il proiettile deve attraversare un percorso più lungo prima di emergere dall'altro lato, quindi c'è una maggiore interazione con il materiale della piastra stessa.

In sintesi, la piastra spessa offre più spazio e opportunità per l'assorbimento dell'energia del proiettile, il che può portare a fori di dimensioni maggiori rispetto a una piastra più sottile in cui lo spazio è limitato e l'energia del proiettile è concentrata in una zona più ristretta.

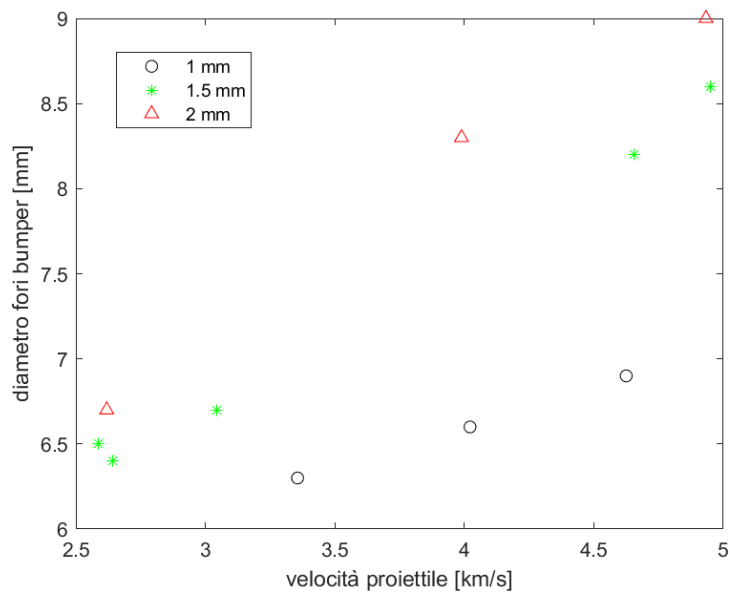


Fig. 28.6 Diametro fori vs velocità proiettile

Capitolo 8

CONCLUSIONE

L'impatto e la protezione contro i detriti iperveloci rivestono una notevole rilevanza nei settori della difesa aerospaziale e della sicurezza planetaria. Questo perché l'aumento del traffico spaziale e delle operazioni in orbita terrestre ha generato una crescente quantità di rifiuti spaziali, che possono rappresentare una minaccia per i satelliti, le stazioni spaziali e le future missioni spaziali. Questi detriti possono raggiungere velocità molto elevate, rendendo gli impatti potenzialmente distruttivi.

Nel settore della difesa aerospaziale, la protezione contro i detriti spaziali è necessaria per garantire l'integrità e l'operatività dei satelliti, dei sistemi di comunicazione, dei sistemi di sorveglianza e di altre infrastrutture spaziali critiche. Le collisioni con detriti spaziali possono causare gravi danni o la perdita completa di missioni costose.

Per affrontare questi problemi, vengono sviluppati e implementati scudi e sistemi di protezione per prevenire o mitigare gli impatti. Tra questi, il sistema Whipple Shield è uno dei più noti ed efficaci. Questo sistema prevede l'uso di uno o più strati di materiale resistente, come l'alluminio, per dissipare l'energia cinetica dei detriti spaziali o degli impatti iperveloci.

La ricerca e lo sviluppo in questo settore sono cruciali per migliorare la nostra capacità di proteggerci dagli impatti nello spazio. Sono necessari avanzamenti tecnologici per la rilevazione precoce di oggetti pericolosi, la previsione di impatti, lo sviluppo di sistemi di protezione più avanzati e la pianificazione di strategie di mitigazione degli impatti asteroidali.

La collisione di un detrito con una struttura spaziale genera una nube di frammenti che non solo costituisce una minaccia immediata per i veicoli spaziali in orbita, ma continua a essere una potenziale fonte di pericolo nel futuro. Questa è la motivazione per cui, oltre all'analisi delle prestazioni degli scudi di protezione, è di fondamentale importanza acquisire una comprensione completa della formazione e dell'evoluzione dei detriti

spaziali generati da impatti ad altissima velocità. La creazione di nubi di detriti a seguito di collisioni ad altissima velocità è un fenomeno estremamente temporaneo e il rilevamento in situ è notoriamente complicato. L'analisi della piastra campione potrebbe fornire informazioni fondamentali sulla natura di queste nubi di detriti.

La presente tesi è solamente l'ennesima dimostrazione di quanto siano necessari i compromessi quando si parla di operatività nell'ambiente spaziale, in particolare sotto l'aspetto della protezione strutturale e dell'incolumità dei moduli adibiti a trasporto passeggeri. Infatti, l'obiettivo primo dei sistemi di protezione, come lo scudo Whipple, è di ridurre il più possibile la capacità dei detriti spaziali di arrecare danno a qualsiasi struttura posta oltre il sistema di schermatura. Per adempiere in maniera ottimale al suo compito, lo scudo deve assorbire la maggiore quantità possibile di energia cinetica del detrito, in modo che i frammenti che si generano dopo l'impatto non rappresentino una minaccia significativa. Come visto nel corso della tesi, per ottenere elevati livelli di protezione, risulta vantaggioso aumentare lo spessore delle pareti. Tuttavia, questa ottimizzazione comporta purtroppo l'inevitabile aumento della massa totale del sistema. Questa situazione mette in luce una delle sfide principali quando si tratta di progettare sistemi di protezione spaziale: il costante bilanciamento tra la sicurezza e i costi associati, che spesso si traduce in compromessi necessari per garantire l'efficacia della schermatura contro i detriti spaziali. In un settore in cui l'efficienza e la riduzione dei costi sono obiettivi chiave, queste considerazioni rafforzano la necessità di trovare un equilibrio tra protezione e massa aggiuntiva. Le decisioni in merito allo spessore e al design dello scudo devono essere basate su una valutazione oculata dei rischi e dei costi, tenendo sempre presente l'obiettivo di massimizzare la sicurezza nell'ambiente spaziale.

È altresì chiaro che lo studio degli impatti iperveloci può portare a notevoli progressi nel campo delle scienze dei materiali e nella fisica, oltre che nelle applicazioni ingegneristiche relative alla protezione dagli impatti. L'orientamento degli ingegneri dovrebbe mirare ai requisiti reali, ovvero testare strutture di protezione esplorative, avanzate e dispiegabili. Si dovrebbero proporre metodi di valutazione delle prestazioni di diverse strutture e modelli ingegneristici per la nube di detriti al fine di orientare la progettazione dello scudo. Questo approccio è essenziale per garantire che gli scudi spaziali siano in grado di proteggere le missioni e le infrastrutture spaziali da impatti

iperveloci e dai detriti spaziali. I metodi di valutazione delle prestazioni e i modelli ingegneristici consentono di:

- Valutare l'efficacia dello scudo; ciò include la capacità di ridurre l'energia cinetica degli oggetti in collisione e minimizzare i danni alle strutture protette.
- Identificare i punti critici in cui gli impatti sono più probabili o potenzialmente più dannosi, e questo è possibile con l'aiuto dei modelli ingegneristici. Ciò consente di concentrare la progettazione e l'ottimizzazione delle soluzioni di protezione in quei punti.
- Ottimizzare i materiali e la progettazione: i modelli ingegneristici consentono di valutare diversi materiali e design per gli scudi spaziali. Questo include la scelta del materiale migliore per dissipare l'energia cinetica degli impatti e la progettazione di scudi stratificati o multi-strato per migliorare le prestazioni.
- Guidare lo sviluppo tecnologico: La creazione di metodi di valutazione delle prestazioni e modelli ingegneristici avanzati favorisce lo sviluppo di nuove tecnologie e soluzioni innovative per la protezione contro impatti iperveloci e detriti spaziali.
- Migliorare la sicurezza spaziale: L'adozione di metodi di valutazione delle prestazioni e modelli ingegneristici guida la progettazione di scudi più sicuri e affidabili, riducendo il rischio di danni a missioni spaziali e infrastrutture in orbita.

In conclusione, l'utilizzo di metodi di valutazione delle prestazioni e modelli ingegneristici è essenziale per la progettazione di scudi spaziali avanzati e affidabili. Questi strumenti consentono di ottimizzare la protezione contro impatti iperveloci e detriti spaziali, contribuendo alla sicurezza e alla continuità delle operazioni nello spazio.

L'avanzamento scientifico, invece, dovrebbe concentrarsi sulla ricerca interdisciplinare ed esplorare la fisica alla base della protezione dall'iper velocità, la propagazione e l'evoluzione del sistema ondulatorio, la frammentazione dinamica dei materiali ed il relativo fenomeno della radiazione elettromagnetica.

Per la sperimentazione a terra, gli sviluppi potrebbero includere:

- Miglioramento della capacità di lancio, con una più ampia gamma di condizioni di impatto, inclusi materiale, massa, dimensioni e velocità del proiettile;

- Adozione di tecniche diagnostiche ad alta risoluzione e alta precisione per acquisire informazioni, tra cui velocità di impatto, immagine della nuvola di detriti, il plasma e le radiazioni indotti dall'impatto;
- Utilizzare nuovi e abbondanti metodi per l'analisi dei risultati, tra cui il microscopio elettronico a scansione (SEM), lo spettrometro a raggi X a dispersione di energia (EDX), reti neurali artificiali e metodi di machine learning;
- Testare ulteriormente materiali e configurazioni avanzate per l'impatto dell'ipervelocità in ambienti complessi, come materiali fibrosi, materiali in schiuma, strutture multi-parete e strutture sandwich a diverse temperature.

La ricerca sulla protezione dagli impatti ad altissima velocità basata sul principio dello scudo Whipple ha applicazioni pratiche rilevanti. Gli impatti iperveloci generano fenomeni di alta temperatura e pressione, offrendo al contempo un terreno fertile per l'indagine scientifica di frontiera. Attualmente, la tendenza principale nello sviluppo dei sistemi Whipple è la combinazione di piastre multi-layer, anziché l'uso di singoli layer metallici. Inoltre, l'applicazione di materiali avanzati in fibra, materiali multifunzionali con densità differenziate, materiali a nido d'ape e schiume metalliche sta contribuendo a modificare le caratteristiche delle nubi di detriti. Tuttavia, le ricerche in questo settore rimangono limitate, soprattutto per quanto riguarda le nubi di detriti generate da impatti ad alto angolo di attacco.

Studi sulla relazione tra vari materiali e strutture e le caratteristiche delle nubi di detriti stanno migliorando la progettazione dei sistemi di protezione. Tuttavia, mancano modelli adeguati per le nubi di detriti e ricerche sulle prestazioni nella fase di penetrazione. Per i sistemi Whipple migliorati, è cruciale sviluppare equazioni di limite balistico personalizzate in stretta correlazione con l'ottimizzazione del design e l'applicazione pratica.

La comprensione delle caratteristiche delle nubi di detriti sta evolvendo da una valutazione della distribuzione di massa/fase delle nubi di detriti a una comprensione quantitativa dei singoli frammenti presenti nella nube di detriti. Tuttavia, a causa delle limitazioni nelle tecniche sperimentali, i test di impatto ad altissima velocità, maggiori di

8 km/s, che comprendono la transizione di fase e la vaporizzazione sono ancora rari. L'analisi delle caratteristiche delle nubi di detriti multifase è attualmente di natura fenomenologica e manca di un modello teorico adeguato. Inoltre, la ricerca sulla transizione di fase negli impatti obliqui e/o nei sistemi di protezione avanzati non è stata ancora condotta in modo sistematico. Le equazioni di stato esistenti, i parametri dei materiali e i metodi di calcolo numerico presentano notevoli sfide quando si tratta di simulare nubi di detriti trifase.

In base a quanto esposto finora, il problema degli *space debris* rappresenta probabilmente la sfida più significativa che i nuovi pionieri dello spazio dovranno affrontare. Sebbene lo spazio sia stato esplorato in passato, le opportunità e modalità di utilizzo e sfruttamento sono notevolmente aumentate rispetto al periodo della Guerra Fredda. Tuttavia, molte attività sono attualmente prive di una solida base normativa, poiché le principali fonti di diritto internazionale relative allo spazio extraterrestre, redatte in un'epoca tecnologicamente arretrata e in un contesto geopolitico molto diverso da quello odierno, non riescono a soddisfare appieno le esigenze attuali.

Qualsiasi futura attività di utilizzo dello spazio extraterrestre dovrà affrontare con urgenza il problema dei detriti spaziali. È necessario trovare una soluzione condivisa, se non definitiva, almeno pratica ed efficace per mitigare questo problema. In caso contrario, potremmo trovarci nell'impossibilità di condurre agevolmente attività di ricerca scientifica o esplorazione nello spazio extraterrestre. È ampiamente riconosciuto che l'assenza di una soluzione potrebbe portare a un disastro economico su scala globale, considerando i considerevoli flussi di finanziamenti nel settore dell'economia spaziale, oltre a rappresentare un rischio per la sicurezza di beni e persone e una minaccia per la salute del nostro pianeta.

La difficoltà oggettiva di elaborare un quadro giuridico vincolante, flessibile e condiviso in un settore in costante evoluzione, dovuta al rapido progresso tecnologico e ai cambiamenti nei rapporti geopolitici, è causata dalla mancanza di convergenza di interessi e volontà tra Stati e attori privati, alcuni dei quali si trovano in netto disaccordo tra loro. È auspicabile una ripresa della costante e pacifica cooperazione internazionale attraverso organizzazioni autorevoli, in grado di incoraggiare Stati e attori privati a rispettare i

principi fondamentali sanciti nei primi trattati e nelle convenzioni spaziali. Oggi più che mai, questi principi devono essere osservati e applicati "per il benessere di tutti i popoli".

BIBLIOGRAFIA

- [1] Er kai Watson, Nathanael Durr, Martin Schimmerohn , “*Tracking Debris Cloud Fragments: An experimental method for measuring hypervelocity fragmentation in the context of validating numerical simulations*”, Fraunhofer Institute for High-Speed Dynamics, Ernst Mach-Institut, EMI, 79104 Freiburg, Germany
- [2] S. Zou, L. Olivieri, Z. Ma, C. Giacomuzzo, A. Francesconia, “*Numerical simulation research on Fragmentation effect of hypervelocity impact of ellipsoid shaped projectile normally onto a thin plate*”, 72nd International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021.
- [3] K.N.Kreyenhagen, M.H.Wagner, J.J.Plechocki, and R.L.Bjork , “*Ballistic limit determination in impacts on multi-material laminated targets*”, Shock Hydrodynamics, Inc. Sherman Oaks, California 91403, 2012
- [4] Michael R. Migaud, “*Protecting Earth's Orbital Environment: Policy Tools for Combating Space Debris*”, The Bush School of Government and Public Service, Texas A&M University, 4350 TAMU, College Station, TX, 77843, USA, 2020
- [5] Yurim Park, YunHo Kim, Changkyo Shin, Chun-Gon Kim, “*Characterization and statistical approach of hypervelocity impact response of aluminum plates using PVDF sensors*”, Busan 46241, Republic of Korea, 2022
- [6] J. E. Miller, M. D. Bjorkman, E. L. Christiansen, and S. J. Ryan, “*Analytic Ballistic Performance Model of Whipple Shields*”, University of Texas at El Paso, 500 W. University Ave., El Paso, TX 79968, Jacobs, NASA Johnson Space Center, 2101 NASA Parkway, Houston, TX 77058, Defence Science and Technology Organisation, 506 Lorimer Street, Fishermans Bend, VIC 3207, Australia, 2015
- [7] Ken Wen, Xiao-Wei Chen, Run-Qiang Chi, Yong-Gang Lu, “*Analysis on the fragmentation pattern of sphere hypervelocity impacting on thin plate*”, a)State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology,

Beijing, 100081, China, b)Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621999, China, c)Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150080, China, 2020

[8] Jakub Drmola, Tomas Hubik, “*Kessler Syndrome: System Dynamics Model*”, a)Division of Security and Strategic Studies, Department of Political Science at the Faculty of Social Sciences of Masaryk University, Jostova 10, 602 00, Brno, Czech Republic, b)Department of Theoretical Computer Science and Mathematical Logic, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Malostranske Namesti 25, 118 00 Prague, Czech Republic, 2018

[9] Xiao-wei Chen a, Yong-gang Lu b, Ken Wen a b, “*Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: An overview*”, a) State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China, b) Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621999, China, 2020

[10] Scott A. Hill, “*Determination of an empirical model for the prediction of penetration hole diameter in thin plates from hypervelocity impact*”, NASA/Langley Research Center, MS 431, Hampton, VA 23681, USA, 2003

Ringraziamenti

Ci sono persone che sognano per tutta la vita il momento in cui vinceranno il premio Nobel. Lo prenderanno in mano, magari lo baceranno, guarderanno le persone amate che li hanno accompagnati, e poi faranno il loro discorso, sotto un mare di applausi scroscianti.

Fortunatamente, oppure no, non è questo il caso, anche se sono tante le persone a cui devo molto e che ci tengo a nominare, nell'epilogo di questa tesi.

In primo luogo, il Dr. Olivieri. Senza di lui questa tesi non sarebbe mai stata partorita, ne sarebbe scaturito in me l'interesse per questo argomento. Seguono tanti altri professori, il cui ricordo e insegnamenti mi accompagneranno nel corso della vita.

Ringrazio i miei genitori, Sonia e Gianpaolo, fautori di questo lungo ed estenuante viaggio e dell'essere che l'ha intrapreso. Desidero esprimere la mia gratitudine nei confronti di mio fratello, Maxi, per aver condiviso con me molte dispute che hanno contribuito a plasmare la persona resiliente che sono diventato oggi.

Ringrazio i miei amici, i miei personal trainer personali per superare sempre me stesso. In ordine alfabetico: Ale, Alessia V., Alice, Asia, Bea, Ceppo, Cesco, Cippo, Crezu, Dani, Dario, Diarro, il Dio Romano (Zovi), Giulia M. e B., Marco M, Marco Dalla Torre, Marina (my sister), Nepero detta Vita, Nic, Ricky MGR, Samu e Stefy. Leo e Sophie, che proprio in questo momento mi stanno distraendo con la loro richiesta di "atensioni".

Mia nonna, fonte di racconti di vite passate e di cibo prelibato, e Bobi, capoclown del suo villaggio.

E infine, un ringraziamento molto speciale, molto sentito, alla ragazza con la quale ho condiviso tanti momenti, tante gioie e tanti ricordi, e che sarà per sempre una parte del mio cuore. A te, culo.