

Università degli Studi di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

Whipple Shield: test di impatto iperveloce e analisi del limite balistico

Laureando:

Giovanni Pitacco

Matricola: **1230077**

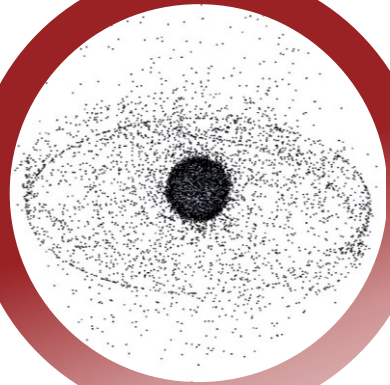
Tutor universitario:

Prof. Alessandro Francesconi

Co-tutor universitario:

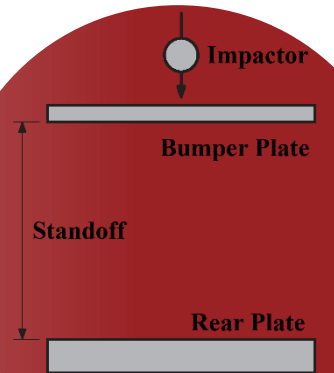
Dott. Lorenzo Olivieri

Padova, 15/03/2023



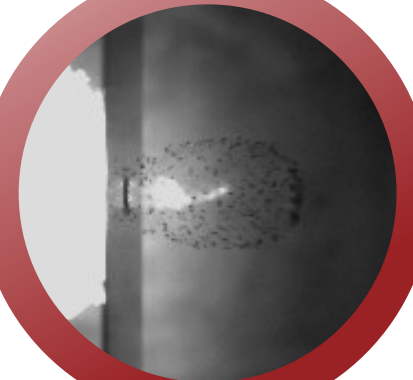
1. Impatti iperveloci

2. Scudi Whipple ed equazioni di limite balistico



3. Campagna sperimentale su HVI

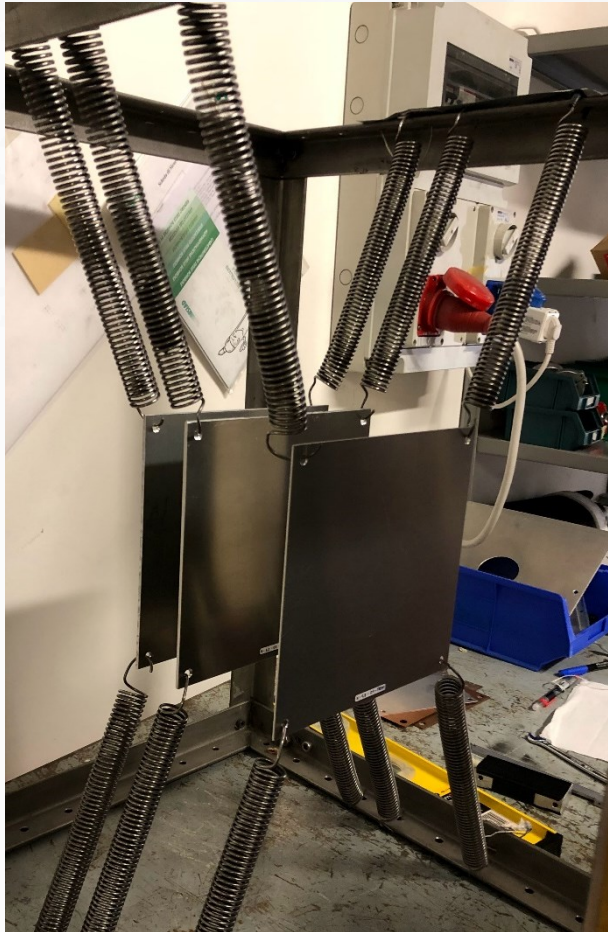
4. Risultati principali dei test



- Detriti orbitali: tracciati e catalogati oltre 32mila detriti (SSN), stimati 130 milioni fra 1 mm e 1 cm
- HVI: collisione a velocità superiore a quella del suono nel materiale in esame (alluminio: 6320 m/s)
- Fenomeno transitorio: il proiettile si frammenta e cambia fase
- Velocità in orbita: fra 2 km/s e 18 km/s
- Necessità di dispositivi di schermatura leggeri ed economici: scudi Whipple



Campione di impatto iperveloce [6]



Modello di scudo Whipple impiegato nei test (comprensivo di una terza parete detta witness wall)

- Sistema dual-wall
- Lastra sacrificale (*bumper*): causa la frammentazione del detrito
- Parete posteriore (*rear wall*): impattata da un carico maggiormente disperso, protegge la superficie principale
- Materiali: alluminio, ceramici, materiali reattivi
- Fallimento scudo: *spall* distaccato o perforazione



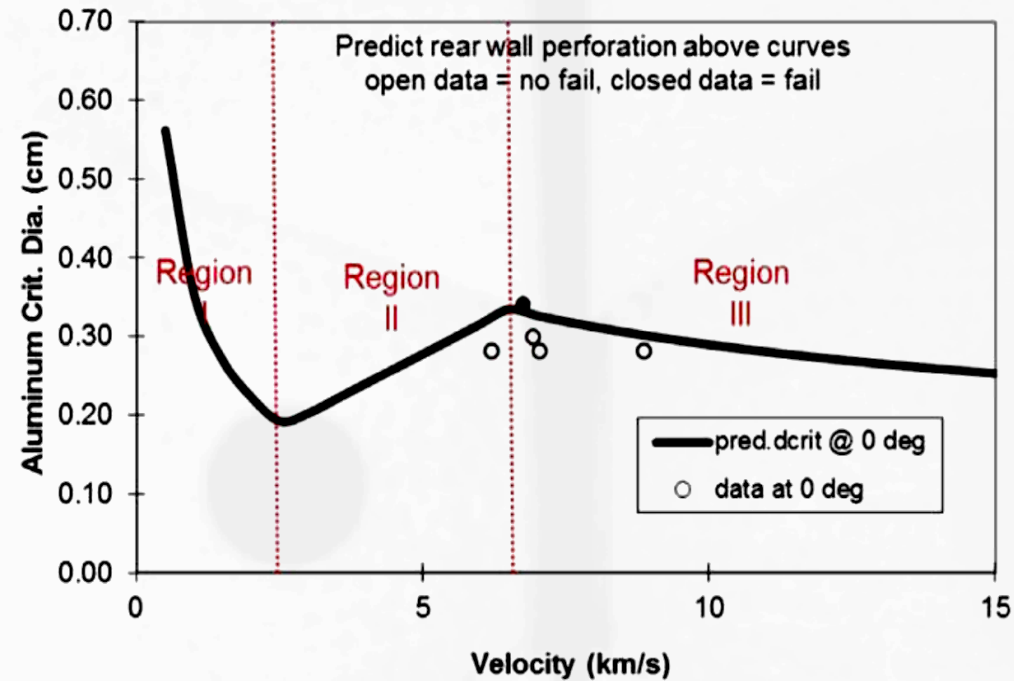
Damage Class C3: Detached spall



Damage Class C4: Perforation



Standoff



Esempio di curva di limite balistico [16]

- Equazioni di previsione della risposta dello scudo
- Descrizione della dimensione della particella impattante critica, in funzione dei parametri d'impatto
- Parametri: proprietà del materiale, densità, spessore, standoff, angolo d'incidenza, velocità
- Distinzione in base al regime di velocità: balistico (I), intermedio (II), iperveloce (III)
- Regime intermedio: interpolazione lineare



SVOLGIMENTO

- 22 test d'impatto (9 fallimenti da sabot) utilizzando LGG a due stadi del CISAS
- Proiettili sferici, 2.9 mm di diametro
- Velocità d'impatto: fra 2.587 km/s e 5.000 km/s
- 3 configurazioni di scudo: bumper da 1.0 mm, 1.5 mm e 2.0 mm
- Materiale: AA6061-T6
- Acquisizione: 2 videocamere
- Scansione piastre a 600 dpi

OBIETTIVI

- Raccolta dati su frammentazione ed espansione nube di detriti
- Misura foro nel bumper e confronto con modello predittivo ([12] *Hill* *)
- Determinazione accuratezza delle BLE teoriche ([3] *Christiansen* **)
- Studio variazione di massa delle piastre

* **S.A. Hill:** vicedirettore per i progetti della divisione ingegneristica presso il NASA Langley Research Center

** **E.L. Christiansen:** capo ricercatore sulle tecnologie degli HVI al NASA Johnson Space Center

EQUAZIONI DI HILL [12]

$$d_h = 3.309 d_p \left(\frac{v}{c_p}\right)^{0.033} \left(\frac{v}{c_b}\right)^{0.298} \left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^{0.022} \left(\frac{t_b}{d_p}\right)^{0.359} \quad (\text{eq.15})$$

$$d_h = 2.947 d_p \left(\frac{v}{c_p}\right)^{0.033} \left(\frac{v}{c_b}\right)^{0.298} \left(\frac{\rho_p}{\rho_b}\right)^{0.022} \left(\frac{t_b}{d_p}\right)^{0.359} \quad (\text{eq.16})$$

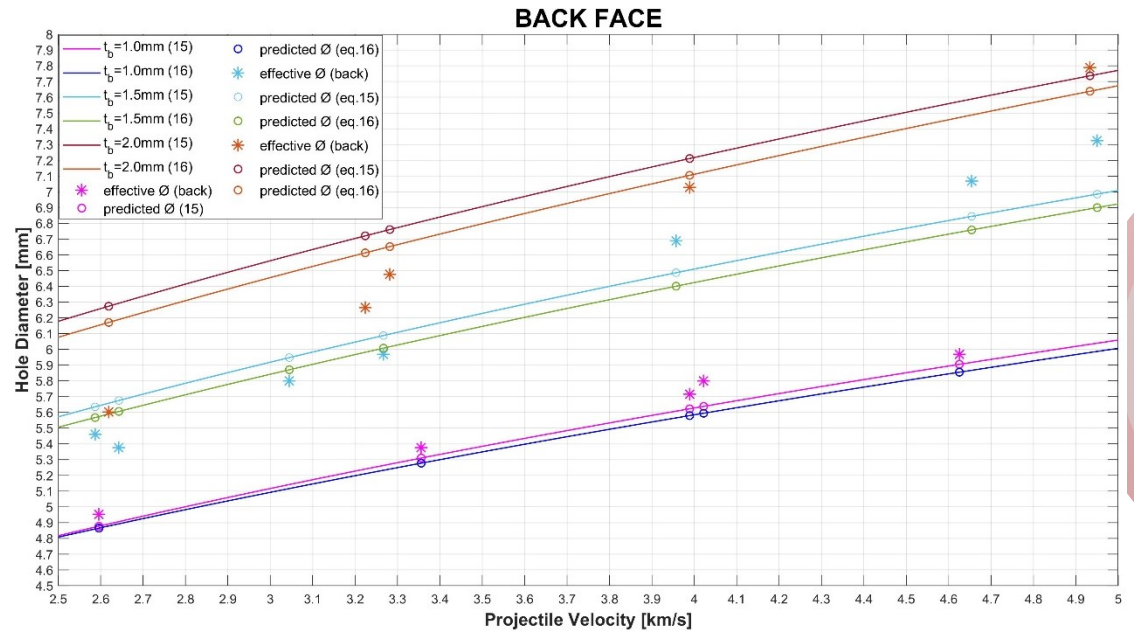
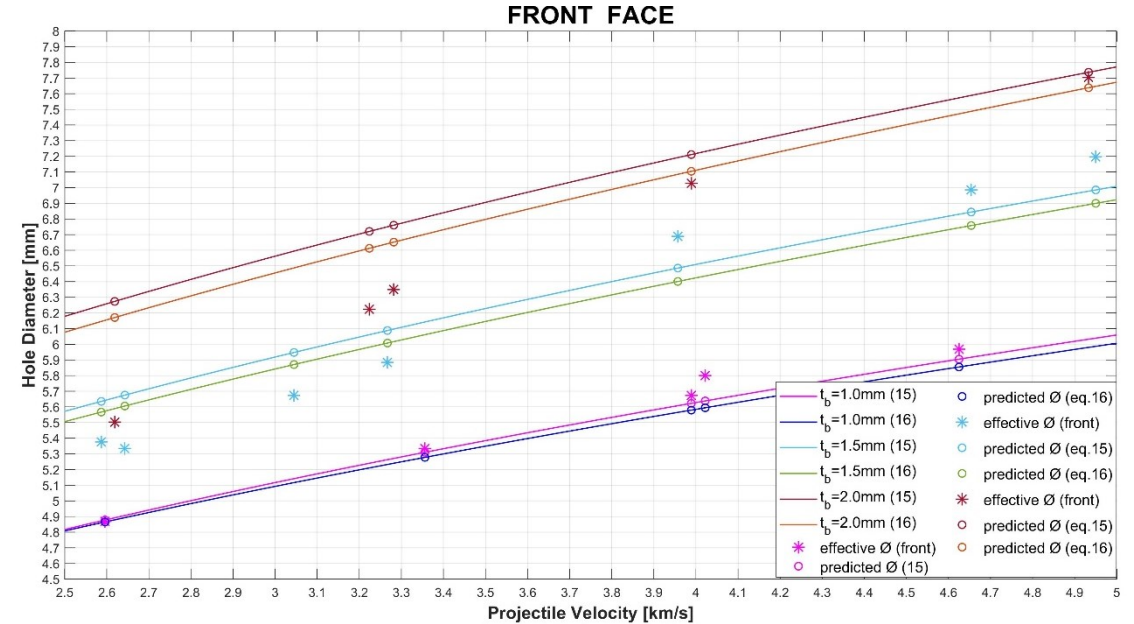


Foro frontale

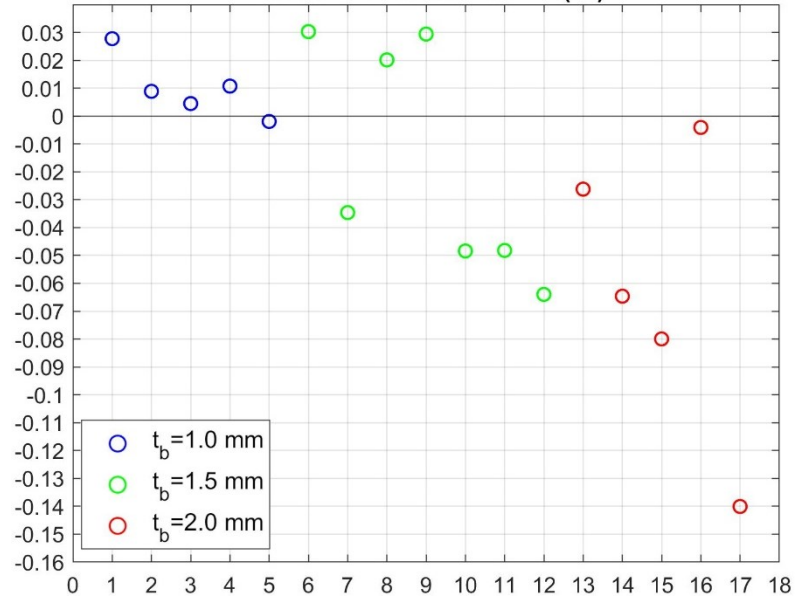


Foro posteriore

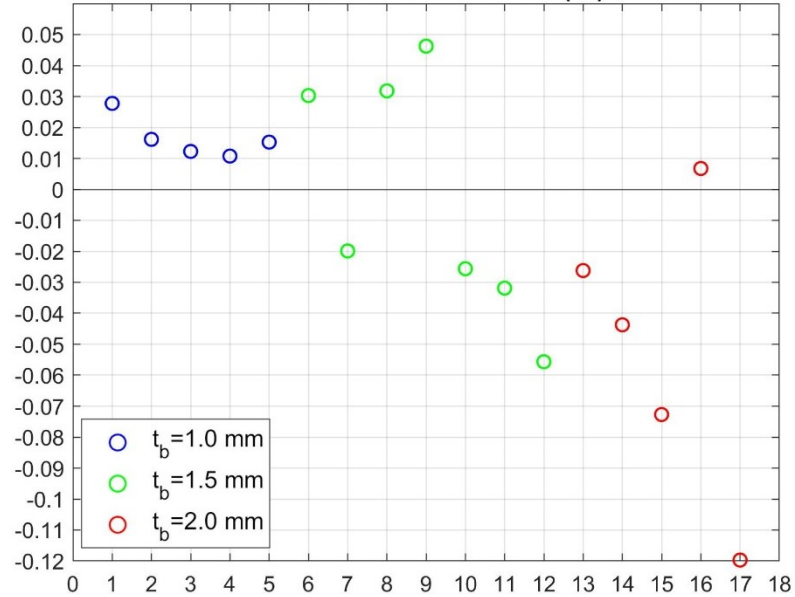
Misure mancanti: 3 spari su 1.0 mm, 2 spari su 2.0 mm



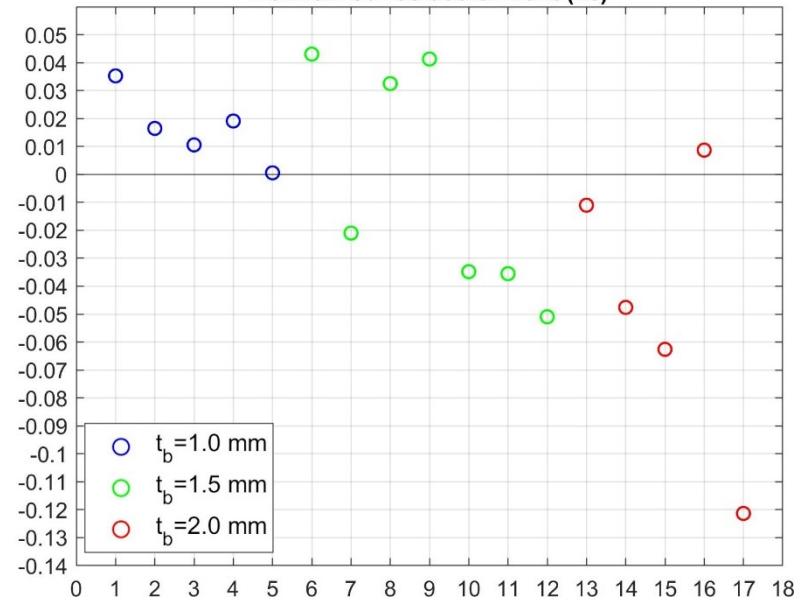
Normalized residuals: front (15)



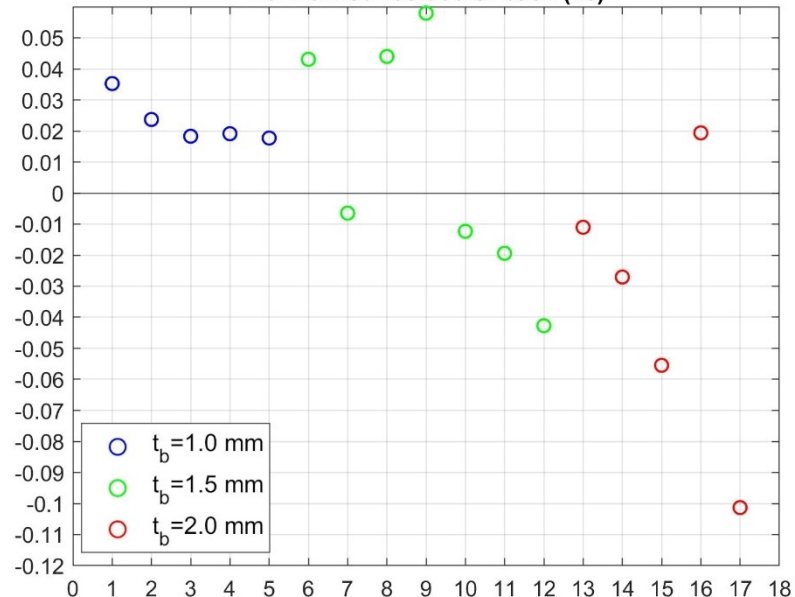
Normalized residuals: back (15)



Normalized residuals: front (16)



Normalized residuals: back (16)



❖ Scarti normalizzati:

$$\sigma_{norm} = \frac{(d_{misurato} - d_{previsto})}{d_{misurato}}$$

❖ Scarto quadratico medio:

$$\bar{\sigma} = \frac{\left(\frac{\sum_1^n (d_{misurato} - d_{previsto})^2}{\sum_1^n d_{misurato}^2} \right)}{n}$$

❖ Valore scarto quadratico medio:

- front: $\begin{cases} 1.3619e-4 & (15) \\ 1.0583e-4 & (16) \end{cases}$
- back: $\begin{cases} 1.0657e-4 & (15) \\ 9.1999e-5 & (16) \end{cases}$

OSSERVAZIONI

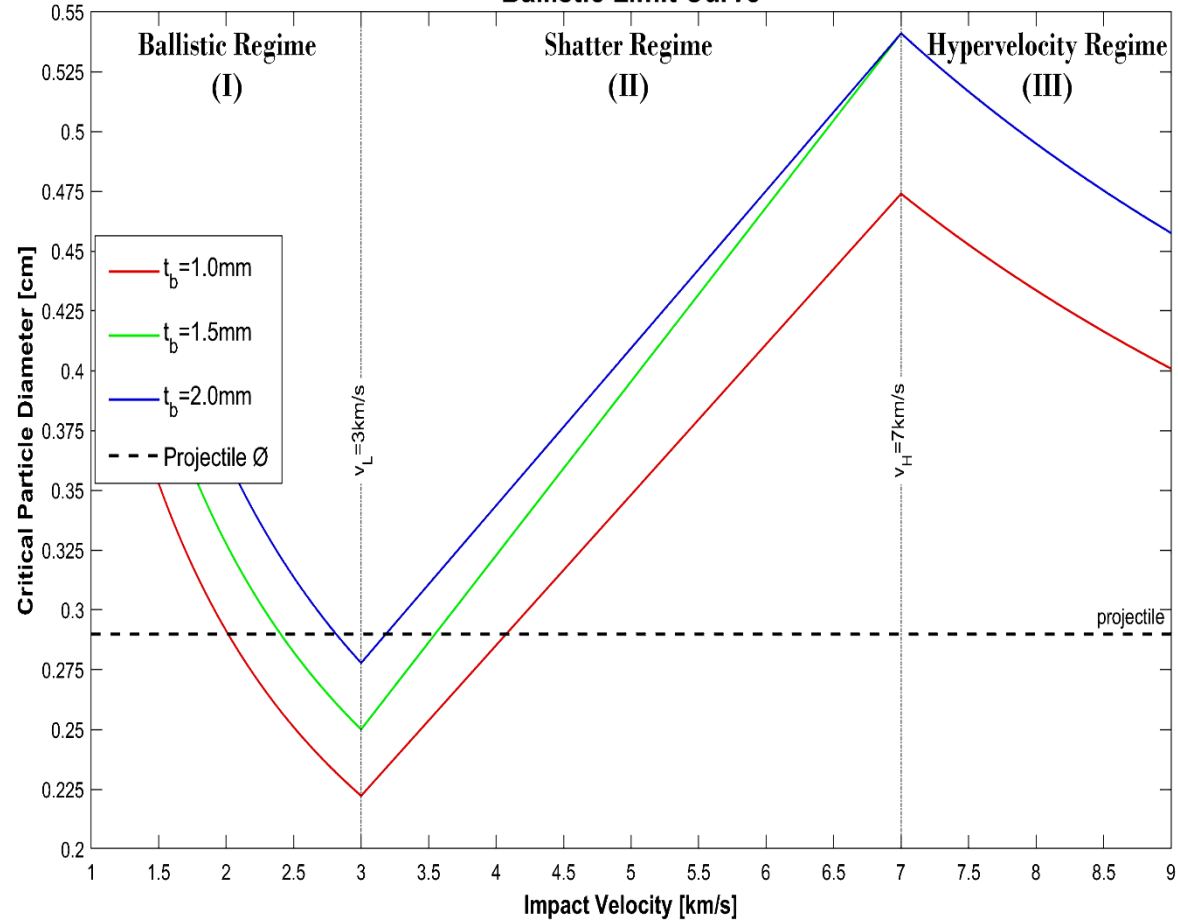
- Differenze medie crescenti con lo spessore del bumper
- Equazione (16) e misure su faccia posteriore più accurate per il secondo e terzo scudo
- Aumento valori e dispersione residui normalizzati al crescere dello spessore del bumper
- Maggior incertezza di previsione al crescere di (t_b/d_p)
- Ottima correlazione fra previsioni e dati sperimentali (scarti quadratici medi $\sim 10e-4$)

APPROFONDIRE:

- Studiare trend di accuratezza decrescente all'aumentare di (t_b/d_p)
- Analizzare configurazioni di scudo con spessori diversi e proiettili diversi



Ballistic Limit Curve



EQUAZIONI DI CHRISTIANSEN [3]

- Regime balistico (I): $v \leq 3 \text{ km/s}$:

$$d_c = k_l (t_w \sigma'_L{}^{0.5} + C_L t_b \rho_b) (\cos\theta)^{-11/6} \rho_p^{-0.5} v^{2/3}$$

- Regime shatter (II): $3 \text{ km/s} < v < 7 \text{ km/s}$

$$d_c = \left[k_{hi} \rho_p^{-1/3} (v \cos\theta)^{-2/3} \rho_b^{-1/9} S O^{1/2} (t_w \rho_w)^{2/3} \sigma'_h{}^{1/3} \right] \frac{[v - v_L (\cos\theta)^{-1.5}]}{[v_H (\cos\theta)^{-1} - v_L (\cos\theta)^{-1.5}]} + \left[k_{li} (t_w \sigma'_L{}^{0.5} + C_L t_b \rho_b) (\cos\theta)^{-5/6} \rho_p^{-0.5} \right] \frac{[v_H (\cos\theta)^{-1} - v]}{[v_H (\cos\theta)^{-1} - v_L (\cos\theta)^{-1.5}]}$$

- Regime iperveloce (III): $v \geq 7 \text{ km/s}$

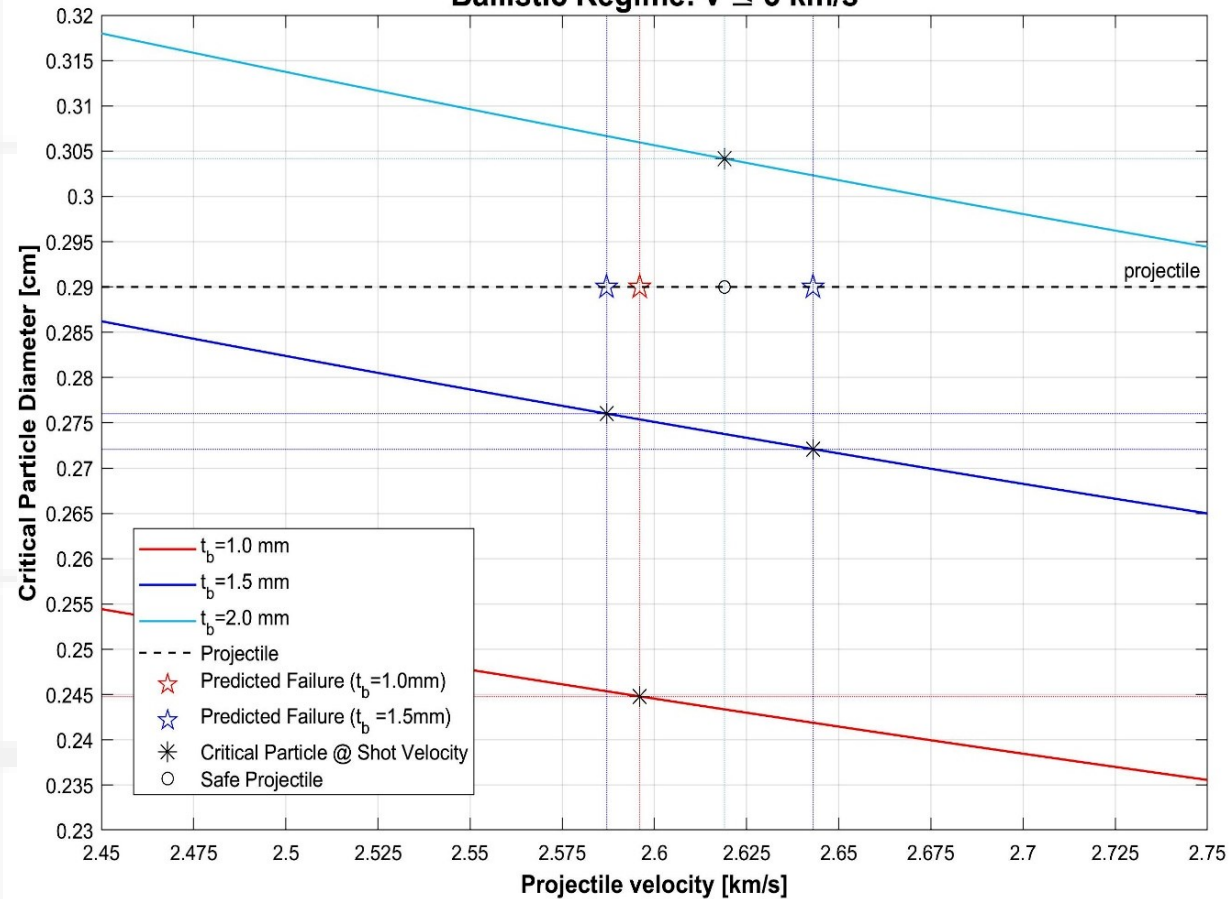
$$d_c = k_h \rho_p^{-1/3} (v \cos\theta)^{-2/3} \rho_b^{-1/9} S O^{1/2} (t_w \rho_w)^{2/3} \sigma'_h{}^{1/3}$$

$$k_h = 7.451 \frac{t_b}{(t_w^{2/3} S O^{1/3})} + 0.411 \text{ se } \frac{t_b}{(t_w^{2/3} S O^{1/3})} < 0.126; \quad \text{altrimenti } k_h = 1.35.$$

$$k_h = (1.1827, 1.35, 1.35) [\text{cm}^{1/2} \text{ km}^{2/3} \text{ g}^{-2/9} \text{ s}^{-2/3}]$$

REGIONE DI BASSA VELOCITÀ

Ballistic Regime: $v \leq 3$ km/s



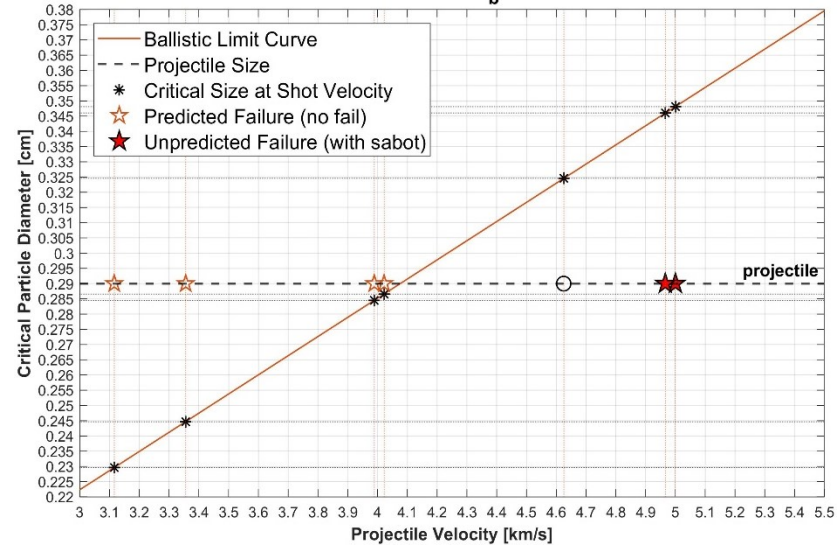
- 4 test
- 3 failure previsti: 2 su bumper da 1.5 mm, 1 su bumper da 1.0 mm
- 0 failure realizzati
- Tendenza leggermente conservativa (entro 0.5 mm di sovrastima) ma numero ridotto di test

Shot Velocity [km/s]	Critical \emptyset at Shot Velocity [mm]	Projectile \emptyset [mm]	Safety Margin [mm]
2.587	2.760	2.9	- 0.140
2.643	2.721		- 0.179
2.596	2.448		- 0.452
2.619	3.042		+0.142

➤ Necessari approfondimenti con ulteriori prove

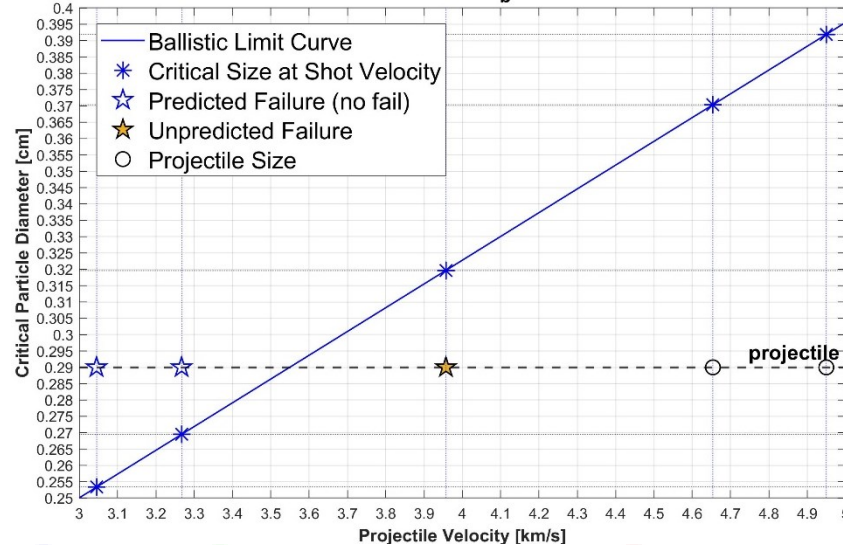
REGIONE DI VELOCITÀ INTERMEDIA

Shatter Regime: $t_b = 1.0$ mm



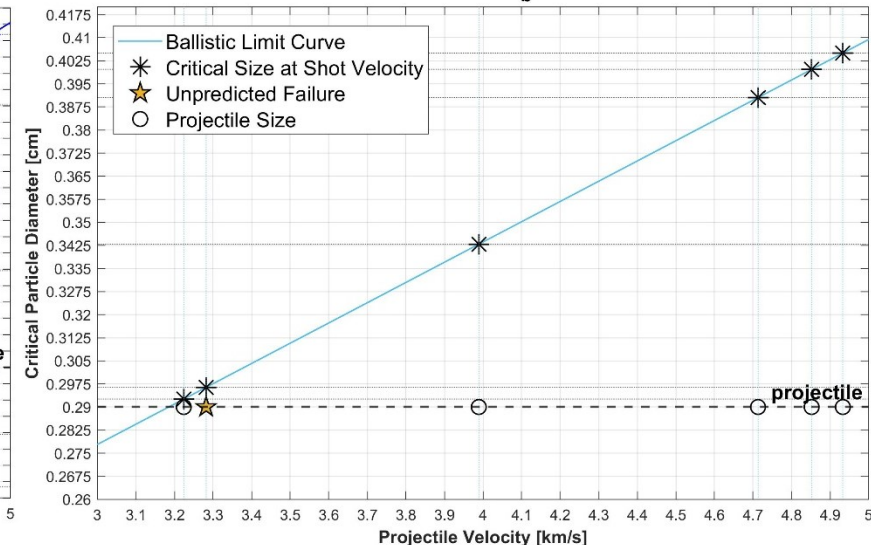
- 7 test, 4 sabot
- 4 failure previsti (non avvenuti)
- 2 failure (con sabot) non previsti, margine superiore a +0.56 mm
- 1/7 sola predizione corretta (non fallimento) nonostante sabot

Shatter Regime: $t_b = 1.5$ mm



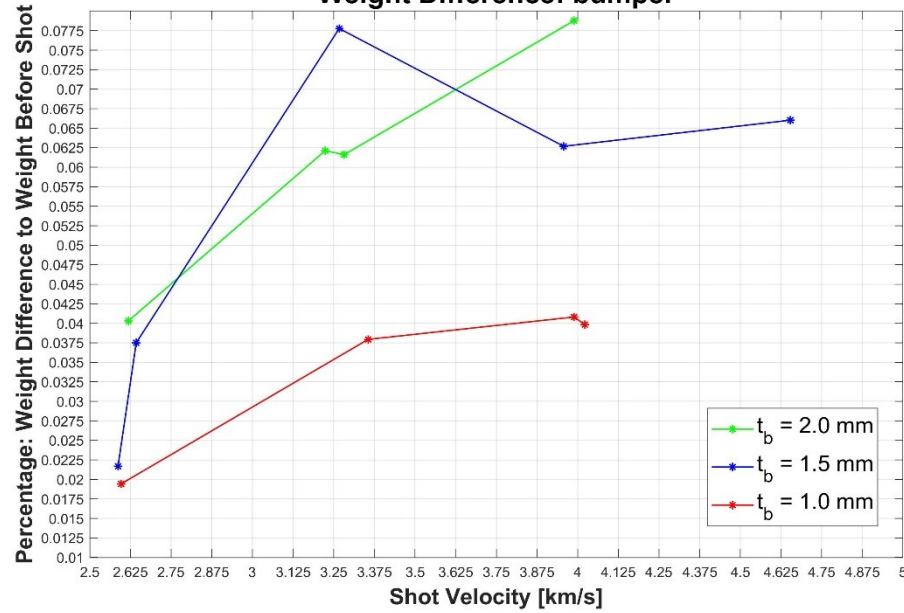
- 5 test, 2 sabot
- 2 failure previsti (non avvenuti)
- 1 failure non previsto, margine di +0.297 mm
- 2/5 predizioni corrette (non fallimento, entrambe), 1 sabot

Shatter Regime: $t_b = 2.0$ mm

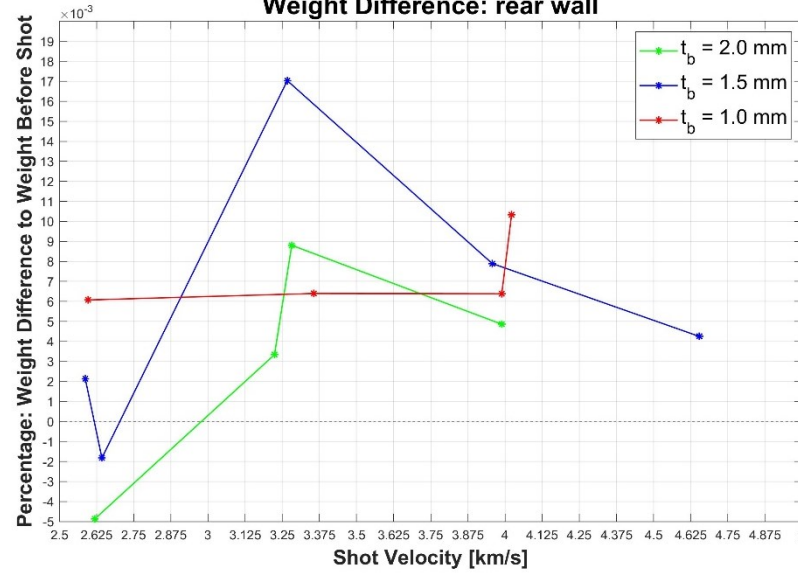


- 6 test, 3 sabot
- 0 failure previsti
- 1 failure non previsto, margine molto ridotto (+0.064 mm)
- 5/6 predizioni corrette (tutte non fallimento), 3 sabot

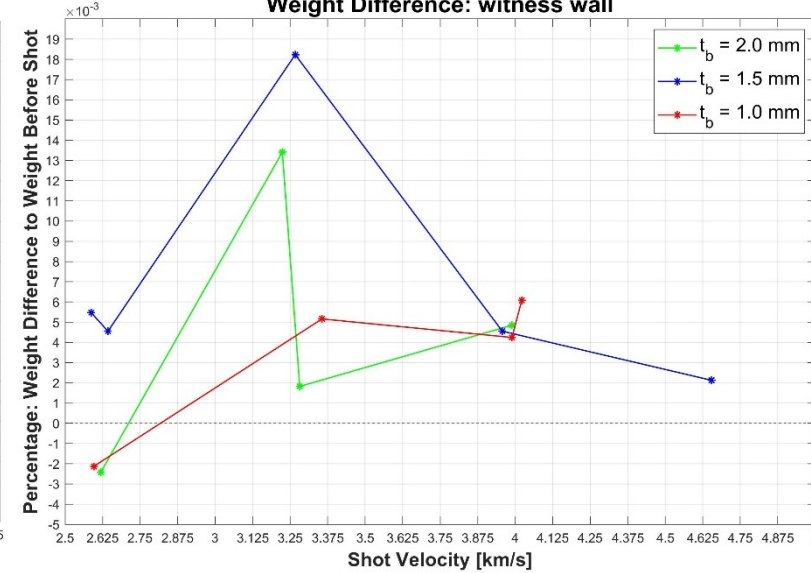
Weight Difference: bumper



Weight Difference: rear wall



Weight Difference: witness wall



- 1.0 mm: differenze di massa crescenti con velocità (in accordo con Hill [12])
- 2.0 mm: stesso risultato
- 1.5 mm: impennata fra 2.6 km/s e 3.2 km/s, poi regressione. Da verificare

- Andamento più caotico: impennata fra 2.5 km/s e 3 km/s, poi caduta da 3 km/s a 4 km/s

- Witness wall con andamento simile
- Possibile errore strumentale

APPROFONDIRE:

- Ulteriori test nella zona di passaggio da balistico a shatter: cambia la massa della nube?

- Ulteriori test con bumper di spessore < 1 mm e > 2 mm: spessore inferiore implica andamento lineare?



- Campagna di test di HVI su scudi Whipple; 22 spari totali, 9 sabot failures, 4 fallimenti scudo

Previsione dimensione foro bumper (Hill):

- Ottimo accordo con modello
 - Maggiore scostamento al crescere di (t_b/d_p)
- Ulteriori test con spessori e proiettili diversi

Equazioni di limite balistico (Christiansen):

- Tendenza conservativa in regime balistico (4 test)
 - Leggermente conservativa in intermedio-alta
 - 2 failure inattesi in regime di velocità bassa-intermedia
- Ulteriori test in regime di bassa velocità per verificare trend conservativo
- Indagine più approfondita su zona di transizione velocità balistiche-intermedie
- Test in prossimità dell'ipervelocità

Variazione di massa delle piastre:

- Bumper: andamento lineare al crescere della velocità (1.0 mm, 2.0 mm)
 - Andamento imprevisto su bumper da 1.5 mm fra 2.5 km/s e 4 km/s
 - Andamento caotico per rear e witness wall
- Ulteriori indagini in zona di passaggio da regime balistico a shatter

- [1] A. Pai, R. Divakaran, S. Anand et al., “**Advances in the Whipple Shield Design and Development: A Brief Review**”, *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 8(1):20–38, 2021
- [2] “**Space Environment Statistics**” ESA, *ESA - Space Environment Statistics, Space Debris User Portal*, 22 Dec. 2022. <https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/>
- [3] E.L. Christiansen, J.H. Kerr, “**Ballistic Limit Equations for Spacecraft Shielding**”, *International Journal of Impact Engineering*, 26(1-10):93-104, 2001
- [4] K. Wen, X.-w. Chen and Y.-g. Lu, “**Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: An overview**”, *Defence Technology*, 17(6):1864-1886, 2021
- [5] “**Ares**”, NASA, NASA. https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photo-gallery/_images/fullsize/impacts-slag.jpg
- [6] “**Hypervelocity Impacts and Protecting Spacecraft**”, ESA, Space Safety, Space Debris, 20 Apr. 2013. https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/Hypervelocity_impacts_and_protecting_spacecraft
- [7] K. Fowler, F. Teixeira-Dias, “**Hybrid Shielding for Hypervelocity Impact of Orbital Debris on Unmanned Spacecraft**”, *Applied Sciences*, 12(14):7071, 2022
- [8] A.J. Piekutowski, “**Debris cloud produced by the hypervelocity impact of nonspherical projectiles**”, *International Journal of Impact Engineering*, 26(1-10):613–624, 2001
- [9] E.L. Christiansen et al., “**Enhanced meteoroid and orbital debris shielding**”, *International Journal of Impact Engineering*, 17(1-3):217–228, 1995
- [10] E.L. Christiansen et al., “**Space station MMOD shielding**”, *Acta Astronautica*, 65(7-8):921–929, 2009
- [11] J.E. Miller et al., “**Enhanced Analytic Ballistic Performance Model of Whipple Shields**”, *Procedia Engineering*, 103:389–397, 2015
- [12] S.A. Hill, “**Determination of an empirical model for the prediction of penetration hole diameter in thin plates from hypervelocity impact**”, *International Journal of Impact Engineering*, 30(3):303–321, 2004
- [13] D. Pavarin, A. Francesconi, “**Improvement of the CISAS High-Shot-Frequency Light-Gas Gun**”, *International Journal of Impact Engineering*, 29(1-10):549–562, 2003
- [14] W.P. Schonberg, “**Hypervelocity impact penetration phenomena in Aluminum space structures**”, *Journal of Aerospace Engineering*, 3(3):173-85, 1990
- [15] D.M. Lear et al., “**Bumper: a tool for analyzing spacecraft micrometeoroid and orbital debris risk**”, *Nasa Technical Reports Server (NTRS)*, 2019
- [16] W.P. Schonberg, “**Using modified ballistic limit equations in spacecraft risk assessments**”, *Acta Astronautica*, 126:199–204, 2016
- [17] R.M. Færgestad et al., “**Coupled finite element-discrete element method (FEM/DEM) for modelling hypervelocity impacts**”, *Acta Astronautica*, 203:296–307, 2023
- [18] R.M. Færgestad et al., “**Modelling hypervelocity impacts on Whipple shields using a coupled finite element-discrete element method**”, *73rd International Astronautical Congress (IAC)*, 2022
- [19] W.P. Schonberg, L.E. Compton, “**Application of the NASA/JSC Whipple shield ballistic limit equations to dual-wall targets under hypervelocity impact**”, *International Journal of Impact Engineering*, 35(12):1792–1798, 2008
- [20] S. Ryan et al., “**Whipple shield performance in the shatter regime**”, *International Journal of Impact Engineering*, 38(6):504–510, 2011
- [21] S. Ryan et al., “**A ballistic limit equation for hypervelocity impacts on composite honeycomb sandwich panel satellite structures**”, *Advances in Space Research*, 41(7):1152–1166, 2008
- [22] Pradeep Kumar Singh, M. Kumar, “**Hypervelocity impact behavior of projectile penetration on spacecraft structure: A review**”, *Materials Today: Proceedings*, 62:3167–3171, 2022
- [23] S. Ren, Q. Zhang, F. Gao et al., “**Impact resistance mechanism of reactive material bumper for spacecraft Whipple shield: Experiments and numerical simulations**”, *Aerospace Science and Technology*, 126:107646, 2022
- [24] H.-G. Reimerdes et al., “**Modified Cour-Palais/Christiansen damage equations for double-wall structures**”, *International Journal of Impact Engineering*, 33(1-12):645–654, 2006
- [25] L. Ding et al., “**Ballistic limit equations in ballistic and shatter regions**”, *International Journal of Impact Engineering*, 35(12):1490–1496, 2008
- [26] S. Ryan, E.L. Christiansen “**Hypervelocity impact performance of open cell foam coresandwich panel structures**”, *Tech. Rep., NASA TM-2015-218593* (2015) NASA Johnson Space Center, Houston: NASA
- [27] A. Francesconi et al., “**A special design condition to increase the performance of two-stage light-gas guns**”, *International Journal of Impact Engineering*, 35(12):1510–1515, 2008

Vi ringrazio per l'attenzione