

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

# ***Relazione per la prova finale «Il problema dei detriti spaziali»***

Tutor universitario:

*Prof.ssa. Roberta Bertani*

Laureando: *Pamela Bertoncello*

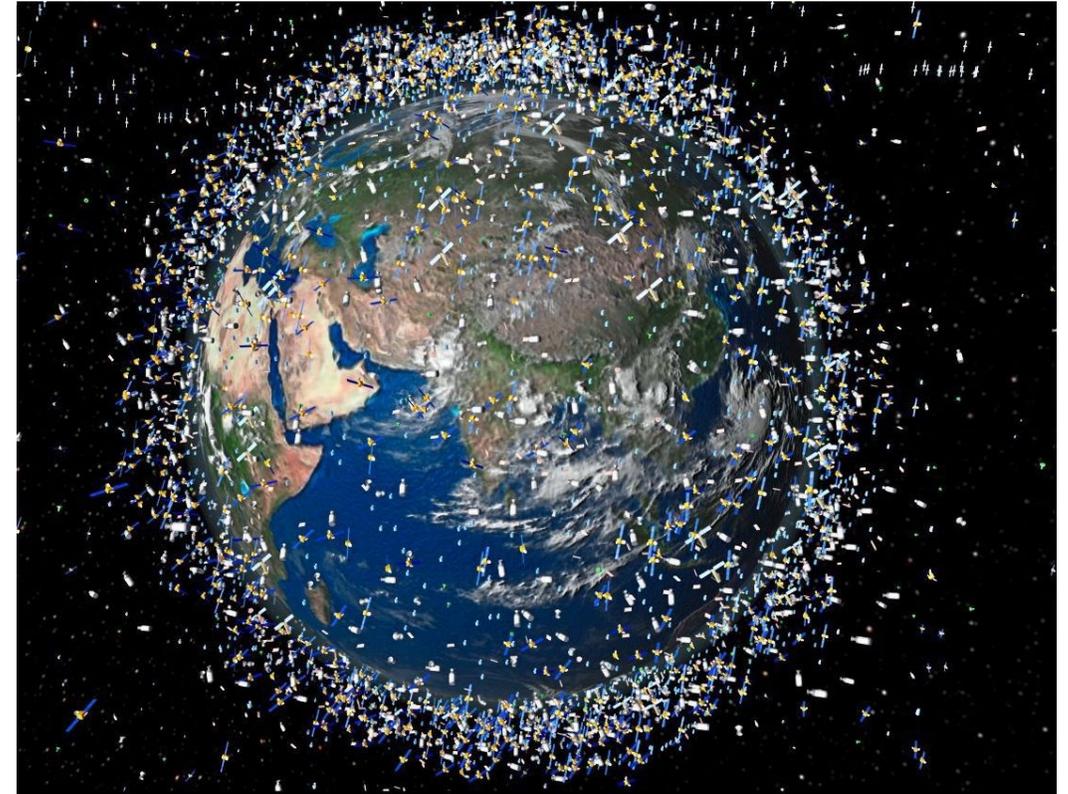
Padova, 27/09/2024

L'elaborato si propone come obiettivo l'analisi e l'approfondimento ingegneristico di un fattore ambientale ad oggi fortemente preoccupante: i detriti spaziali.

La crescente problema che questi rappresentano, a causa dell'incessante proliferazione di oggetti orbitanti, delinea uno scenario seriamente pericoloso per la sopravvivenza dei satelliti operativi, minacciando il corretto adempimento alla missione.

Con lo studio di seguito riportato si mira quindi ad analizzare tutti gli aspetti che caratterizzano tale problematica ambientale, per costruire una dettagliata e completa visione della criticità della situazione.

Partendo dal riconoscimento del rischio e all'approfondimento della natura dei detriti, presenti nell'ambiente orbitale terrestre, si arriva infine alla trattazione delle strategie di misurazione, protezione, mitigazione e rimozione del rischio da impatto iperveloce.



Nel corso del ciclo di vita di un sistema spaziale, il segmento di volo, noto più comunemente come satellite, si vede contestualizzato in una sequenza di fasi caratterizzate da differenti peculiarità e scenari ambientali.

All'interno di queste vengono riconosciuti e distinti due fondamentali modelli ambientali: l'ambiente di pre-lancio e lancio e l'ambiente operativo.

Anche se ad emergere tra questi è la predominanza dell'esposizione all'ambiente operativo, è importante evidenziare che l'adeguata sopravvivenza del sistema a tutti gli scenari, si dimostra fondamentale e necessaria al fine dell'adempimento agli obiettivi della missione.

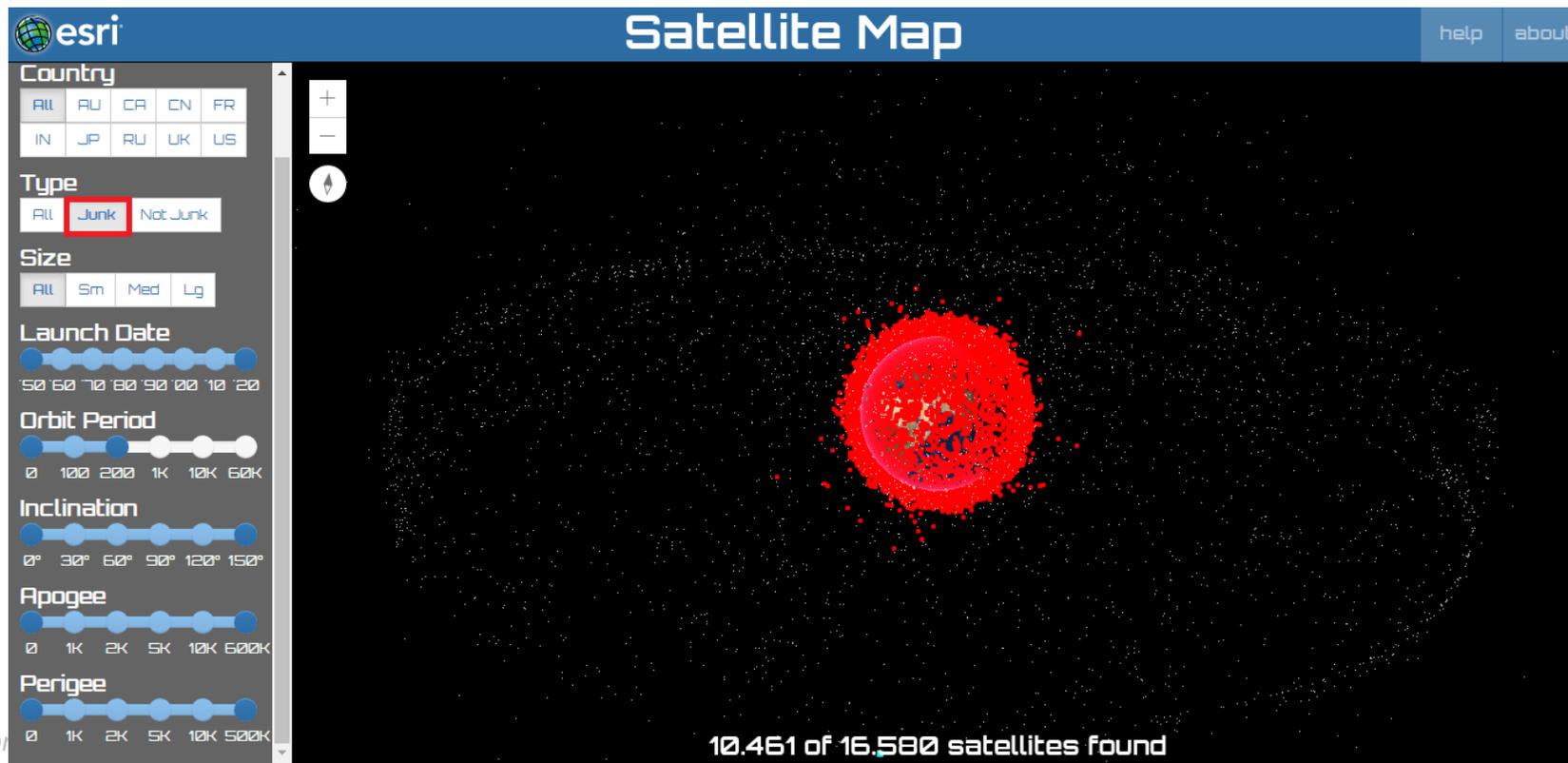
Ogni ambiente, a causa delle sue caratteristiche costitutive, è rappresentativo di una serie di fattori e fenomeni potenzialmente rischiosi, che possono intaccare payload e bus impiantistico originando: calo delle prestazioni, compromissione e danneggiamento delle componenti interne ed esterne e nel peggiore dei casi il fallimento del sistema e l'inevitabile perdita della missione spaziale.

Uno dei rischi ambientali che negli ultimi anni ha destato maggior preoccupazione, a causa della notevole proliferazione, è quello rappresentato dai detriti spaziali. I quali, in sinergia con meteoriti e micro-meteoriti, raffigurano una minaccia per le collisioni in orbita non trascurabile.



La crescente popolazione di oggetti orbitanti diventa infatti protagonista del possibile fallimento di nuove o attualmente in corso missioni spaziali, negli eventi di impatto iperveloce.

All'interno della conformazione della distribuzione detritica emergono oggetti di variabile dimensione, passando da 0.001 mm di diametro a circa 10 m. Con valor medio di velocità dei detriti di 11 km/s, si dipingono scenari in cui l'impatto con altri corpi avviene a velocità superiore alla velocità di propagazione del suono nel mezzo, dando luogo a vere e proprie collisioni iperveloci, nelle quali anche oggetti di dimensioni molto ridotte, possono impartire un carico energetico tale da causare il fallimento della missione. A destare maggior timore sono gli oggetti più piccoli, in quanto le loro dimensioni impediscono la catalogazione e quindi determinano l'incapacità di prevedere gli impatti, in modo tale da agire tempestivamente tramite manovre evasive. La gestione degli oggetti di dimensioni maggiori si dimostra più semplice, risulta possibile il tracciamento e di conseguenza la catalogazione dei corpi.



Mappa dei detriti spaziali in LEO

Inoltre, a livello delle Low Earth Orbit (LEO), si può verificare il rientro in atmosfera facilitato dall'elevato coefficiente d'attrito che i detriti più estesi presentano.

L'incremento della popolazione detritica è stato fortemente spinto da due eventi in particolare, che hanno contribuito con i più ingenti incrementi di oggetti orbitanti: il primo, avvenuto l'11 gennaio 2007, è rappresentato dal test cinese antisatellite (ASAT), mentre il secondo del febbraio 2009 corrisponde alla collisione accidentale Cosmos 2251-Iridium.

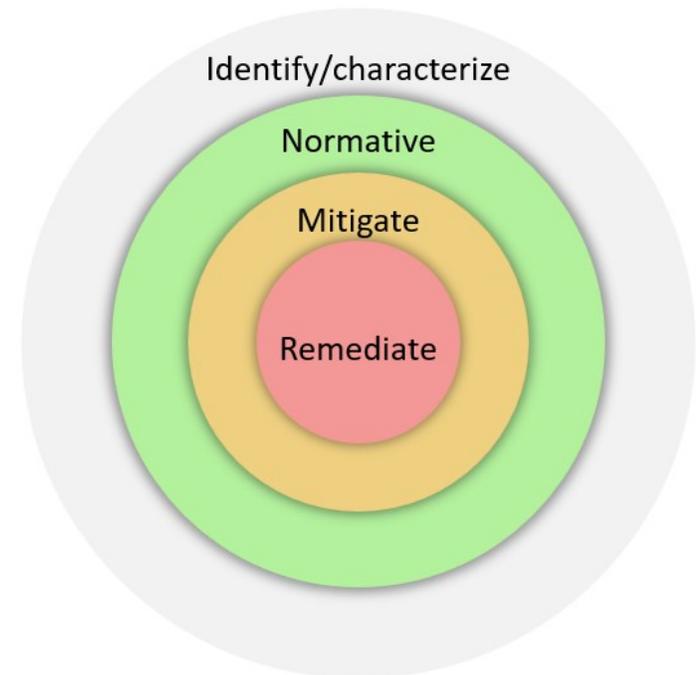
Uno schema d'approccio possibile alla problematica, può essere disegnato come una sequenza di normative sempre più stringenti e fini allo scoraggiamento dell'incessante creazione di detriti.

Quindi attraverso un metodo che affronta la criticità ambientale nei passaggi di:

individuazione del problema,

creazione delle normative,

mitigazione e rimedio.



All'interno della famiglia di oggetti costituenti i detriti spaziali emergono corpi dimensionalmente variabili, che possono essere rilasciati nello spazio volontariamente e necessariamente al fine della missione, oppure originati in seguito a processi di degrado, esplosione o collisione.

### **Mission-related**

Durante lo svolgimento di una determinata missione spaziale può presentarsi la necessità di rilasciare in orbita diversi oggetti quali: coperture delle ottiche, serbatoi di propellente vuoti, dispositivi di separazione e imballaggio, protezioni del payload, meccanismi spin-up ed altri piccoli oggetti espulsi durante le attività.

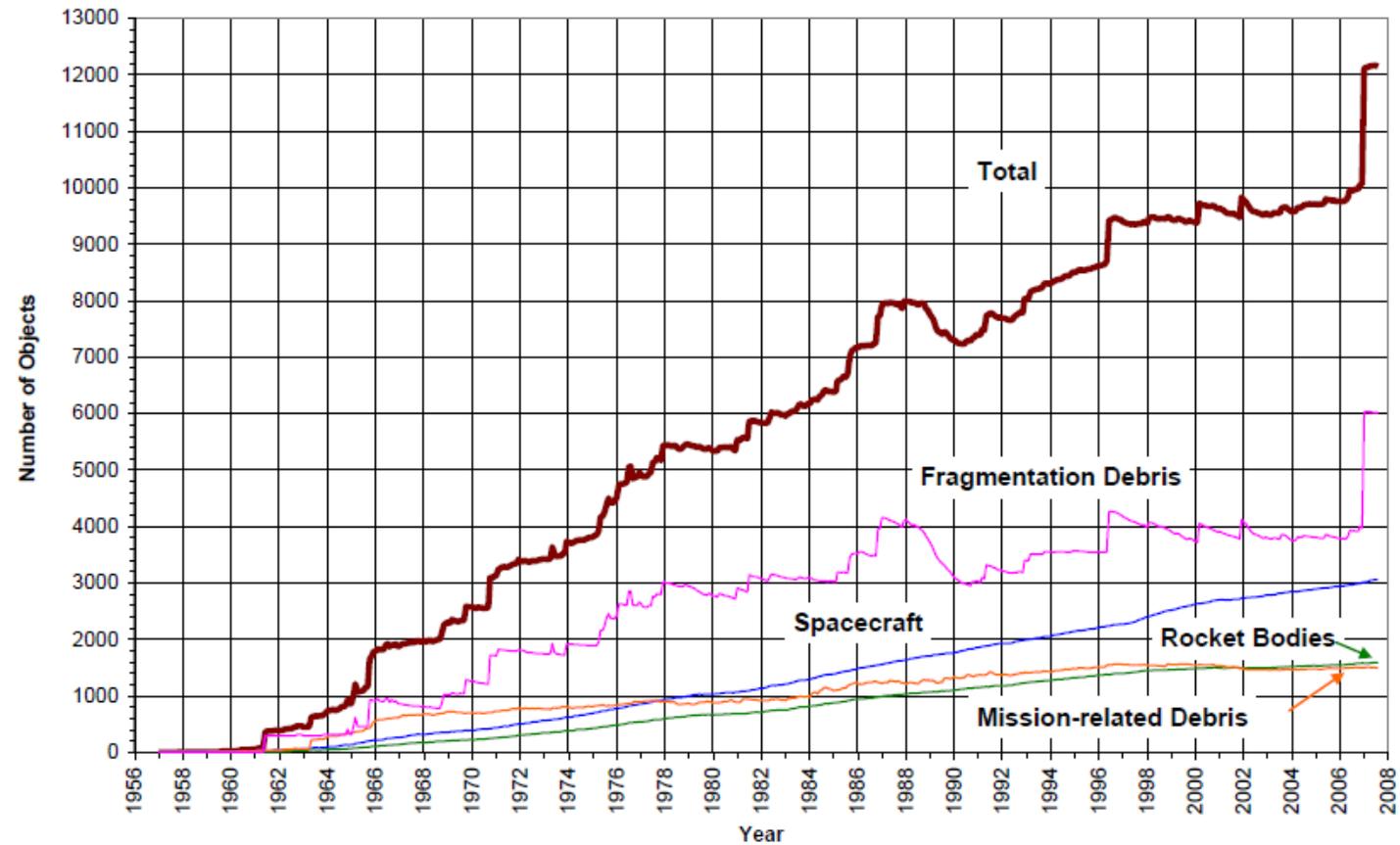
### **Detriti anomali**

I detriti anomali sono le parti e i frammenti che imprevedibilmente, a velocità tendenzialmente contenute e di conseguenza a deterioramento negli anni, si separano e distaccano dal satellite, che nel suo complesso rimane relativamente intatto. Si riconoscono tra questi i frammenti generati dal degrado delle vernici esterne di ricoprimento e i detriti che solitamente vengono invece rilasciati nei processi di separazione satellitare e degli stadi.

## Frammentazione

Gli oggetti originati in seguito a frammentazione sono la principale fonte di detriti spaziali e possono riferirsi a molteplici cause primarie, dalle esplosioni accidentali o intenzionali, fino alle collisioni di tipo volontario o casuale, generandosi in parte anche per effetto delle forze aerodinamiche a cui i corpi sono soggetti.

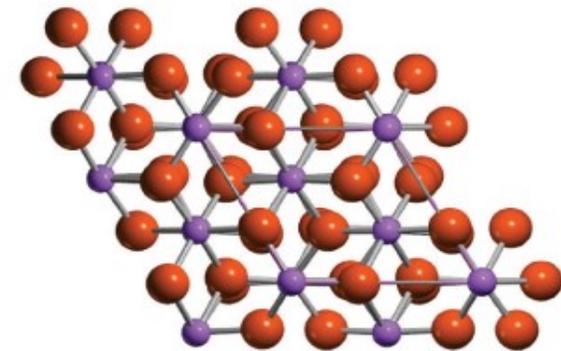
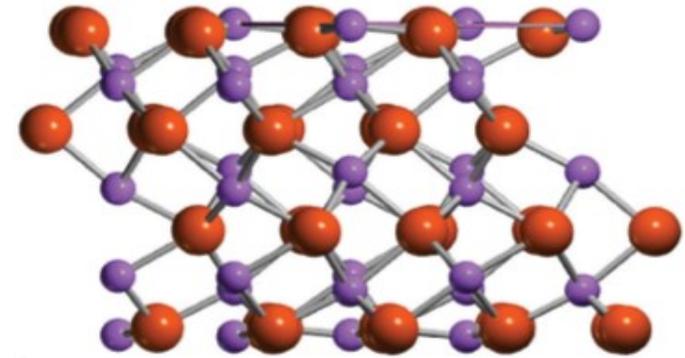
Si riconoscono di preciso cinque cause fondamentali: **eventi deliberati, eventi relativi a propulsione, esplosione di batterie, collisioni accidentali e fenomeni aerodinamici.**



## Particelle di $\text{Al}_2\text{O}_3$ e NaK

Dai solid rocket motor utilizzati nei lanciatori viene scaricata un'elevata quantità di particelle nell'ambiente. Infatti questi nella fase finale della combustione rilasciano frammenti solidi di ossido di alluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), come risultano della rapida espansione, diffusione e solidificazione dell'ossido di alluminio liquido presente nei motori.

L'alluminio è un metallo appartenete al gruppo 13 della tavola periodica e con l'ossigeno forma il sesquiossido di alluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), più comunemente noto come allumina, che possiamo trovare nella forma cristallina in due fondamentali tipologie: l' $\alpha$ -allumina (corindone) e la  $\gamma$ -allumina.



Le due forme cristalline dell'allumina

La lega sodio-potassio (NaK) invece si trova in orbita sotto forma di droplets rilasciate dal satellite sovietico RORSAT, lanciato tra il 1971 e il 1988, che di conseguenza ad un espulsione periodica di particelle, da parte dei reattori nucleari a bordo, ha contribuito con detriti a vita a lungo termine

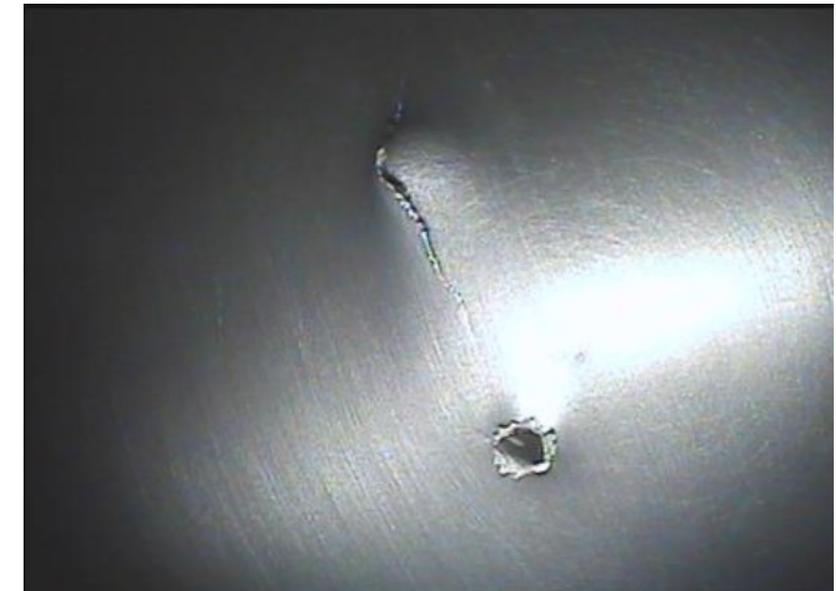
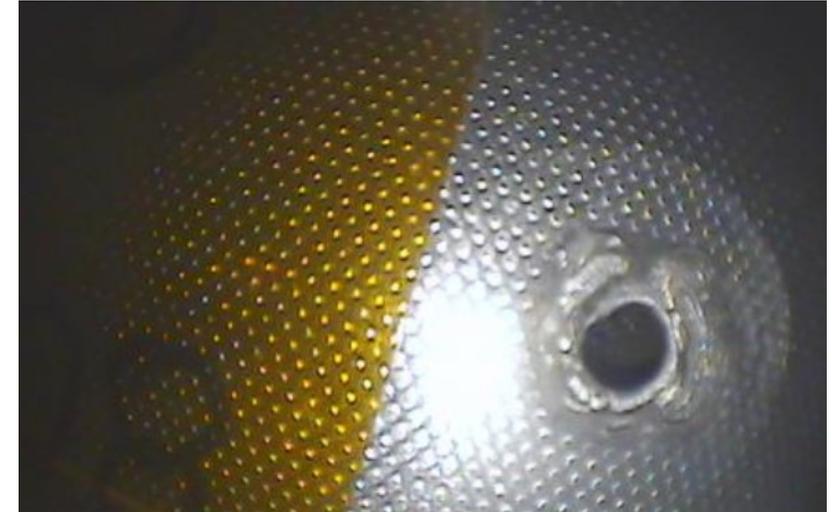
## Impatto con veicolo abitato

Il possibile scenario in cui un detrito spaziale collide con un veicolo che prevede equipaggio a bordo non è poi così irrealizzabile, anzi rappresenta un notevole rischio per la sicurezza.

L'eventuale realizzazione di tale evento può potenzialmente divenire rischiosa per la vita umana, qualora il detrito sia di dimensioni tali da impartire un danno pesante e catastrofico.

Si riportano le immagini del caso dell'Orbiter STS-115, che al rientro sulla terra, nel 2006, presentò un danno da impatto iperveloce ad un radiatore.

A causa della collisione riportò entrambe le pareti superficiali della struttura ad honeycomb perforate, con una breccia di 6.8 mm nella superficie retrostante del radiatore.



L'osservazione e la misurazione della popolazione detritica si rivela fondamentale, non solo per l'individuazione degli oggetti, ma anche per l'aggiornamento dei modelli d'ambiente e predizione dell'evoluzione futura della distribuzione detritica.

Tra le tecnologie e metodologie di misurazione dei detriti spaziali si trova l'impiego di svariate soluzioni, attive e passive e le principali che si riconoscono sono: **radar, laser, osservazioni in radio frequenza, sensori ottici passivi e misurazioni in-situ.**

In particolare, nelle misurazioni in-situ si riconosce uno strumento fondamentale, in quanto permettono la misurazione della popolazione sub-millimetrica, che dalla terra trova difficoltà di realizzazione e limitazioni tecnologiche.



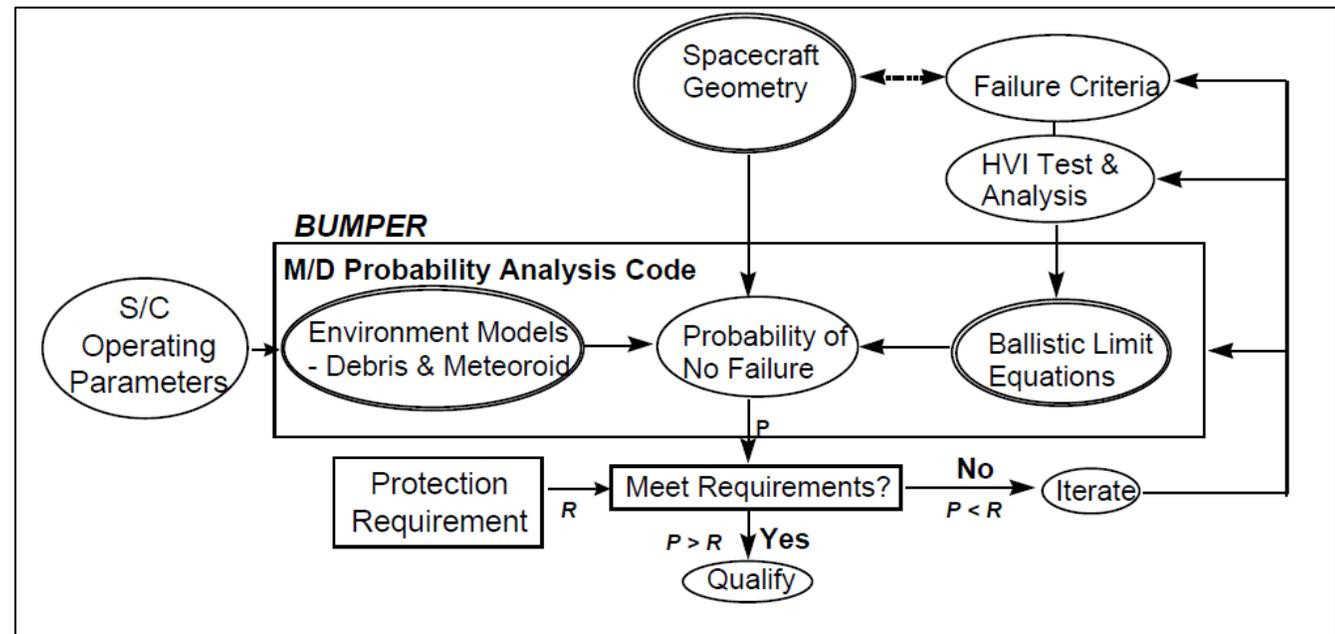
Il processo di valutazione del rischio è uno strumento fondamentale per lo sviluppo delle protezioni, che mirano alla limitazione e riduzione del danno causato in una collisione iperveloce, tra un oggetto orbitante ed un satellite operativo.

La velocità con cui tali collisioni avvengono sono comprese tra gli 11 km/s e i 74 km/s, con valor medio in orbita terrestre attorno ai 20 km/s, per i meteoriti e i micro-meteoriti e tra 1 km/s a 15 km/s, con media sui 9 km/s, per i detriti spaziali.

Attraverso l'utilizzo del processo di valutazione del rischio: si rende possibile la comprensione del pericolo da cui il satellite è minacciato, si è in grado di individuare le zone del satellite che diventano driver di rischio e infine è possibile valutare le opzioni che permettono la riduzione della minaccia.

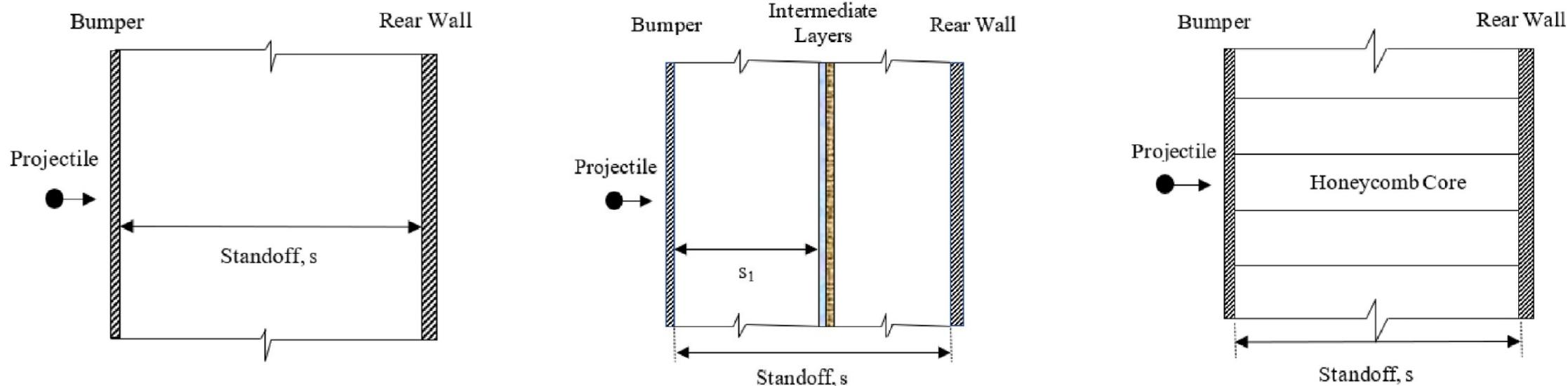
Equazione del numero di impatti

$$N = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n (F \cdot A \cdot t)_i$$



Per far fronte agli eventi di collisione iperveloce si possono applicare sostanzialmente due metodologie di protezione: quella **attiva** che è possibile realizzare solamente per i detriti di maggiori dimensioni, essendo tracciabili e si articola nell'attuazione di manovre evasive atte ad evitare l'impatto e quella **passiva**, che consiste invece nell'impiego di scudi, superfici sacrificabili con lo scopo di assorbire l'urto evitando o riducendo il danno causato.

Esistono svariate tipologie di scudi, basati su materiali e tecnologie diverse, tra cui le soluzioni più diffuse sono: **scudi Wipple**, **scudi Stuffed Wipple**, **scudi multi-shok**, **scudi mesh double bumper** e **pannelli sandwich**.



I materiali che vengono utilizzati nella realizzazione delle varie componenti di uno scudo sono di varia natura. Sia bumper che rear wall vedono come scelta prediletta l'impiego di svariate leghe di alluminio, che manifestano il miglior comportamento, con diffuse applicazioni anche di leghe di titanio.

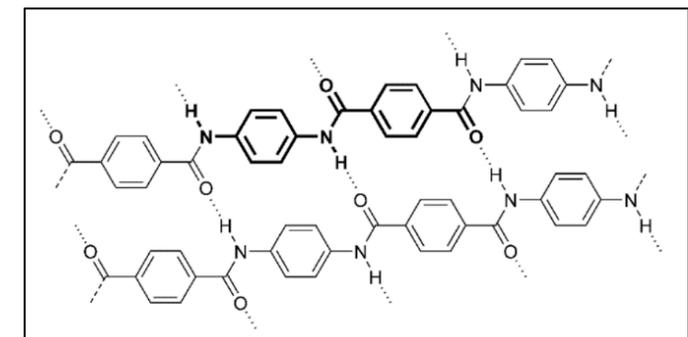
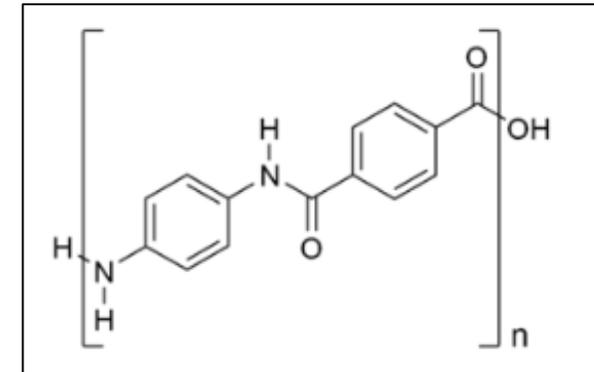
L'imbottitura dello scudo invece, viene realizzata nella maggior parte delle soluzioni con Nextel e Kevlar, che si possono in aggiunta trovare anche nel bumper e nel rear wall di uno scudo multi-shok.

## Kevlar

Il kevlar è un polimero aramidico, ossia poli (para-fenilene tereftalamide), con composizione in percentuale di massa pari a: C (77.06%), H (4.59 %), N (12.84 %) e O (14.68 %).

Le molecole, nel Kevlar, risultano altamente allineate, dotate di forti legami covalenti nella conformazione in catene e legami ad idrogeno per la formazione di fogli, dalla cui sovrapposizione è possibile ottenere la fibra intrecciata.

Le principali caratteristiche che rendono il Kevlar vantaggioso nelle applicazioni ingegneristiche sono: resistenza, flessibilità, stabilità sia chimica che termica, bassa infiammabilità e rigidità dielettrica.



La criticità della situazione attuale dell'ambiente detritico spaziale, pone nelle condizioni di necessità di mitigazione del rischio da impatto iperveloce, che ad ora vede tre fronti su cui agire: il design, la dismissione e la rimozione attiva.

Agire a livello nel design del sistema spaziale si traduce nel progettare satellite e segmento di lancio con accortezze che permettono una riduzione della produzione di detriti; l'attuazione della dismissione, che garantisce soluzioni maggiormente efficaci, passa invece attraverso ricollocazione e rientro in atmosfera, mentre infine, la rimozione attiva rimane ancora oggetto di studio e ricerca, per le difficoltà tecnologiche ad essa associate.

Si può quindi concludere che dallo studio approfondito che si è condotto sono emersi molti aspetti fondamentali alla base della problematica.

*Si è vista crescere negli anni una sempre maggior consapevolezza del pericolo che la situazione ambientale rappresenta ed è stato possibile anche assistere a tentativi di riduzione e controllo della proliferazione di detriti, che hanno dimostrato l'efficacia della mitigazione del rischio.*

*Tuttavia, rimane aperta la strada che porta ad una risoluzione definitiva del problema e che ricerche e studi degli ultimi anni stanno cercando di percorrere, sfidando i limiti tecnologici nello sviluppo di strumentazione in grado di realizzare la rimozione attiva dei detriti.*

Baiocchi D., Welser W. IV, *Confronting Space Debris: Strategies and Warnings from Comparable Examples Including Deepwater Horizon*, RAND Corporation, 2010.

Bertani R., Dettin M., Mozzon M., Sgarbossa P., *Fondamenti di Chimica per le Tecnologie*, Napoli, Edises Università, 2020.

Destefanis R., Amerio E., Briccarello M., Belluco M., Faraud M., Tracino E., Lobascio C., *Space environment characterisation of Kevlar: Good for bullets, debris and radiation too*.

Enzo S., Battaglia G., Basana F., Filippini F., Mozzato M, Marin F., Lion L., Olivieri L., Bettanini C., Francesconi A., *SPRISS: Scalable and precise resistive impact sensor for smallsats, architecture description and tests*, on “*Acta Astronautica*”, v.223, October 2024, p.25-35.

Fortescue P., Swinerd G., Stark J., *Spacecraft system engineering*, Hoboken, N.J., Wiley, 2011, 4<sup>th</sup> ed.

*Handbook for limiting orbital debris*, Washington, DC, National Aeronautics and Space Administration, 2008.

*ISON project & databases on space debris and asteroids*, on “*Astrophysics and Space Science*”, v.369, n.77, 01 August 2024.

Letizia F., Metz M., Faucher P., Krag H., Jing L., Ramos M.A., Sanchez Ortiz N., Schildknecht T., Srivastava S., *Improving the knowledge of the orbital population New technical means of space debris monitoring*, on “*Acta Astronautica*”, v.223, October 2024, p.734-740.

Md Abdur Rakib, Scott T. Smith, T. Tafsirojjaman, *A review of shielding systems for protecting off-earth structures from micrometeoroid and orbital debris impact*, on “*Acta Astronautica*”, v.223, October 2024, p. 404-425.

Miller J. E., McCandless R. J., Davis B., *Hypervelocity Impact Study for Migration from Kevlar® KM2® 705 to KM2® Plus 775*, National Aeronautics and Space Administration, 2021.

Molotov I.E., Zhao H., Li B., Zhang C., Elenin L.V., Streltsov A.I., Abdelaziz A.M., Stepanyants V.A., Ehgamberdiev S.A., Schildknecht T., Tungalag N., Buyankhishig R., Graziani F., Zalles R., Tijerina E.G.P., Tealib S.K., *International*