POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Aerospaziale e Meccanica

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

Studio di metodi di schermatura dalle radiazioni di un rover pressurizzato per l'esplorazione della superficie lunare.

Relatori
Prof. Alfonso Pagani
Prof. Giuseppe Palaia
Prof. Rodolfo Azzara

Candidato
Lorenzo Giraudo

Settembre 2026

A Cristina.

Abstract

Il rinnovato interesse per l'esplorazione lunare rappresenta una fase significativa delle moderne attività spaziali, orientate non soltanto al ritorno dell'uomo sulla Luna, ma anche alla realizzazione di una presenza sostenibile sulla sua superficie. In tale contesto, la protezione dell'equipaggio dalle radiazioni ionizzanti costituisce uno dei principali vincoli per la progettazione di sistemi abitati destinati a missioni di lunga durata.

Il presente lavoro, sviluppato nell'ambito dell'iniziativa Space It Up! (Spoke 8, Esplorazione Spaziale), propone uno studio preliminare dei sistemi di schermatura per un rover lunare pressurizzato (Lunar Pressurized Rover, LPR). L'analisi parte dalla caratterizzazione dell'ambiente radiativo lunare, con particolare riferimento ai raggi cosmici galattici, agli eventi di particelle solari e alla radiazione secondaria. Successivamente, vengono esaminate soluzioni adottate nei settori medico, nucleare, della ricerca scientifica e aerospaziale, valutandone la possibile trasferibilità al caso del rover.

I materiali e le tecnologie analizzati sono confrontati considerando efficacia schermante, densità areale, massa, produzione di radiazione secondaria, compatibilità strutturale, multifunzionalità e possibilità di integrazione nel layout del veicolo. Particolare attenzione è dedicata ai materiali ricchi di idrogeno, ai compositi avanzati e alle configurazioni multistrato già oggetto di studio per applicazioni spaziali. L'analisi evidenzia come la protezione non possa essere affidata a un unico materiale, ma richieda una strategia integrata basata sulla combinazione di schermatura strutturale, massa funzionale e volumi localmente più protetti, conducendo alla proposta di diverse soluzioni preliminari applicabili al progetto dell'LPR.





Sommario

1. INTRODUZIONE 20
1.1 AMBIENTE LUNARE 20
1.1.1 Interazioni delle radiazioni con la materia 23
1.1.2 Dosi 24
1.2 LIMITI NELLE ESPOSIZIONI 27
2. PROTEZIONE DALLE RADIAZIONI 30
2.1 SETTORE MEDICO 31
2.1.1 Tipologia di radiazione 32
2.1.2 Materiali e tecnologie 35
2.2 SETTORE ENERGETICO NUCLEARE 44
2.2.1 Tipologia di radiazione 46
2.2.2 Materiali e tecnologie 48
2.3 SETTORE DELLA RICERCA SCIENTIFICA 65
2.3.1 Tipologia di radiazione 66
2.3.2 Materiali e tecnologie 67
2.4 SETTORE AEROSPAZIALE 74
2.4.1 Materiali e tecnologie 75
3. METODOLOGIA DI ANALISI 87
3.1 GCR 87
3.2 SPE 90
4. RISULTATI DELLE ANALISI DEI MATERIALI 93
4.1 ALLUMINIO 93
4.1.1 Analisi durante il minimo solare del 2010 93
4.1.2 Analisi durante una SPE 95
4.2 ALLUMINIO ED IDROGENO LIQUIDO 97
4.2.1 Analisi durante il minimo solare del 2010 97
4.2.2 Analisi durante una SPE (solo idrogeno liquido) 99
4.3 ALLUMINIO E METANO LIQUIDO 101
4.3.1 Analisi durante il minimo solare del 2010 101
4.4 ALLUMINIO E POLIETILENE 104
4.4.1 Analisi durante il minimo solare del 2010 104
4.4.2 Analisi durante una SPE (solo polietilene) 106

4.5 ALLUMINIO E ACQUA 108
4.5.1 Analisi durante il minimo solare del 2010 ..... *108*
4.5.2 Analisi durante una SPE (solo acqua) *111*
4.6 ALLUMINIO E NITRURO DI BORO (+ 20WT% IDROGENO) 112
4.6.1 Analisi durante il minimo solare del 2010 ..... *112*
4.6.2 Analisi durante una SPE (solo BN + 20wt% H_2) *115*
4.7 CONFRONTO TRA I MATERIALI ANALIZZATI 116
4.7.1 Confronto in condizioni GCR *117*
4.7.2 Confronto in condizioni SPE *119*
4.7.3 Sintesi qualitativa e indicazioni progettuali *120*
5. CONCLUSIONI 121
6. APPENDICE A 124
7. BIBLIOGRAFIA 130

Elenco figure

Figura 1-1: Flusso dei GCR al variare dei cicli solari [1]. 21

Figura 1-2: Variazione del flusso della frequenza radio di 10,7 MHz, che è indicativa dei cicli solari e dell'intensità dell'attività solare [1]. 21

Figura 1-3: rappresentazione del fattore di qualità dei neutroni, equazione (1.3). 25

Figura 2-1: Trasmissione percentuale in funzione della densità areale di grembiuli equivalenti a 0,25 mm e 0,5 mm Pb a 100 kVp [27]. 36

Figura 2-2: Air kerma trasmesso e dose equivalente ambientale calcolati attraverso 0,568 g/cm² di differenti elementi [15]. 38

Figura 2-3: Kerma in aria trasmesso relativo a 0,5 mm Pb per bilayer Sb/Bi, Sb/W e Ba/Bi in funzione della percentuale del materiale a Z più basso [28]..... 39

Figura 2-4: Trasmissione in funzione dello spessore espresso come densità areale per Pb, materiali Pb-free e bistrato [25]. 40

Figura 2-5: transmission rate per diversi spettri neutronici per il caso con BasBor12-1/3% [38]. 51

Figura 2-6: Tasso di trasmissione neutronica nel calcestruzzo con spettro veloce da fissione al variare dello spessore [38]. 51

Figura 2-7: Tasso di trasmissione neutronica nel calcestruzzo con spettro termico al variare dello spessore [38]..... 52

Figura 2-8: Rapporto di attenuazione al variare dello spessore per materiali omogenei e combinazioni WC-Pb/WC-PbBi [39]. 54

Figura 2-9: Flusso di neutroni lenti dietro vetri al piombo al variare dello spessore [40]. 55

Figura 2-10: Flusso neutronico normalizzato al variare dello spessore per diversi regimi energetici [43]. 57

Figura 2-11: Andamento di -ln(I/I0) al variare dello spessore nei compositi Spectra/Epoxy/B_4C [44]..... 58

Figura 2-12: Mass attenuation coefficient per compositi a matrice polimerica e confronto [45]..... 59

Figura 2-13: Attenuazione neutronica in B_4C e ferro-boro al variare dello spessore per differenti reazioni di attivazione [46]..... 60

Figura 2-14: Trasmissione neutronica dei nanocompositi h-BN/Gd_2O_3/HDPE al variare dello spessore [48]. 62

Figura 2-15: Trasmissione gamma dei nanocompositi 11 wt% h-BN con 1-3 wt% Gd_2O_3 in HDPE al variare dello spessore [48]..... 63

Figura 2-16: Confronto tra curve sperimentali e simulate della trasmissione neutronica al variare dello spessore per compositi a matrice metallica [50]. 64

Figura 2-17: Trasmissione neutronica e parametri di attenuazione dei compositi PE/h-BN random e multilayer al variare del contenuto di filler [56]. 69

Figura 2-18: Trasmissione neutronica dei nanocompositi h-BN/Gd_2O_3/HDPE al variare dello spessore e del contenuto di filler [48]. 70

Figura 2-19: Prestazione schermante del composito W-B_4C al variare dello spessore e della frazione di assorbitore termico [43]. 71

Figura 2-20: Trasmittanza neutronica e gamma di compositi a matrice metallica schiumata al variare della porosità e del riempitivo [50]. 72

Figura 2-21: Dose equivalente per pelle e per midollo osseo in diversi eventi SPE storici al variare della schermatura di regolite lunare [58]. 76

Figura 2-22: Rateo di dose assorbita, dose equivalente e fattore di qualità per GCR sulla superficie lunare al variare dello spessore di regolite [58]. 77

Figura 2-23: Confronto tra dose equivalente da neutroni e ioni al variare dello spessore schermante in alluminio e polietilene per un campo GCR completo [61]. 81

Figura 2-24: Dose equivalente annua per configurazioni multistrato esposte al GCR del minimo solare 2010 al variare della densità areale del materiale [62]... 82

Figura 2-25: Confronto tra combinazioni multistrato Al+materiale idrogenato simulato con OLTARIS e HZETRN per GCR al minimo solare 2010 [62]..... 83

Figura 2-26: Dose equivalente GCR calcolata per materiali a base di BN e idrogeno al variare della densità areale [63]. 84

Figura 2-27: Dose equivalente per l'evento SPE 1972 calcolata per materiali a base di BN e idrogeno al variare della densità areale [63]. 85

Figura 4-1: interpolazione polinomiale dei dati originali. 94

Figura 4-2: limiti al variare della durata della missione e relative intersezioni con l'interpolazione. 95

Figura 4-3: interpolazione esponenziale dei dati originali..... 96

Figura 4-4: limite in caso di SPE ed intersezione con l'interpolazione esponenziale. 97

Figura 4-5: interpolazione polinomiale dei dati originali. 98

Figura 4-6: punti d'intersezione tra il limite di dose equivalente e l'interpolazione. 99

Figura 4-7: interpolazione esponenziale dei dati. 100

Figura 4-8: intersezione tra il limite di dose equivalente ed interpolazione esponenziale. 101

Figura 4-9: interpolazione polinomiale con i dati originali. 102

Figura 4-10: intersezione tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione..... 103

Figura 4-11: interpolazione polinomiale con i dati originali. 105
Figura 4-12: intersezioni tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione. 106
Figura 4-13: interpolazione esponenziale con i dati originali..... 107
Figura 4-14: intersezione tra il limite di dose equivalente e l'interpolazione. ... 108
Figura 4-15: interpolazione polinomiale con i dati originali. 109
Figura 4-16: intersezione tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione.....110
Figura 4-17: interpolazione esponenziale con i dati originali.....111
Figura 4-18: intersezione tra il limite di dose equivalente d l'interpolazione.....112
Figura 4-19: interpolazione polinomiale dei dati originali. 113
Figura 4-20: intersezioni tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione. 114
Figura 4-21: interpolazione esponenziale con i dati originali.....115
Figura 4-22: intersezioni tra il limite di dose equivalente e l'interpolazione.....116

Elenco tabelle

Tabella 1-1 fattore di qualità in base al tipo di radiazione [1], [9]. 25

Tabella 1-2 fattore di qualità d'assorbimento degli organi. 26

Tabella 1-3 flusso di dose assorbita in silicio rilevato dall'esperimento LND sul lander Chang'E 4 in un periodo di minimo solare. 27

Tabella 1-4 flusso di dose equivalente sulla superficie lunare, sulla ISS e sulla superficie terrestre in un periodo di minimo solare. 27

Tabella 1-5 limiti di dose equivalente per effetti a breve termine e non cancerogeni in base alla durata della missione, misurati in Gy-Eq. 29

Tabella 2-1 Tipologie principali di esposizione medica e funzione della schermatura [9] [14] [22]. 32

Tabella 2-2 Esempi di dosi efficaci tipiche per procedure diagnostiche e medico-nucleari [14]. 34

Tabella 2-3 Esempi di livelli diagnostici di riferimento e parametri dosimetrici in TC [14]. 35

Tabella 2-4 Trasmissione attraverso grembiuli equivalenti a 0.25 mm e 0.5 mm Pb a 70 e 100 kVp [27]. 36

Tabella 2-5 Elementi impiegati o studiati in materiali schermanti per indumenti radioprotettivi [15]. 37

Tabella 2-6 Materiali metallici/elastomerici considerati per bilayer non Pb [28]. 38

Tabella 2-7 Composti non Pb citati per la schermatura in radiologia interventistica [25]. 41

Tabella 2-8 Riduzione di dose con schermature al bismuto in radiografia pelvica pediatrica [29]. 42

Tabella 2-9 Sintesi delle soluzioni di schermatura medica e possibile trasferibilità al caso di un rover pressurizzato [9] [15] [25]. 44

Tabella 2-10 Dati di riferimento per materiali comuni schermanti raggi gamma: densità e HVL per Co-60 [33]. 47

Tabella 2-11 Composizione chimica dell'ematite utilizzata come aggregato per calcestruzzi schermanti [37]. 50

Tabella 2-12 Composizione della fibra basaltica e varianti BasBor impiegate nei calcestruzzi ad alte prestazioni [38]. 50

Tabella 2-13 Composizioni e risultati di progetto per schermature compatte in Pb, Bi, W, WC e combinazioni WC-Pb/WC-PbBi [39]. 53

Tabella 2-14 Composizione dei vetri al piombo e densità dei campioni studiati [40]. 55

Tabella 2-15 Composizione di vetri B_2O_3-Bi_2O_3 e Bi_2O_3-BaO-B_2O_3 per applicazioni di schermatura gamma [41] [42]. 56

Tabella 2-16 Frazioni elementari e densità dei compositi Al-B_4C, W-B_4C, Bi-BSi e Metathene [43]. 56

Tabella 2-17 Composizione elementare dei compositi Spectra/Epoxy/B_4C [44]. 58

Tabella 2-18 Materiali e spessori sperimentali nelle prove di attenuazione neutronica su ferro-boro e B_4C [47]. 59

Tabella 2-19 Composizione dei nanocompositi h-BN/Gd_2O_3/HDPE e densità sperimentali [48]. 61

Tabella 2-20 Matrici, riempitivi e schema ottimo nei compositi a matrice metallica per schermatura neutronica e gamma [50]. 64

Tabella 2-21 Tipologie di radiazione e sorgenti principali negli impianti di ricerca scientifica [18] [51] 67

Tabella 2-22 Materiali trasparenti o speciali per schermature in laboratori e impianti di ricerca. 73

Tabella 2-23 Indicazioni di efficacia della schermatura in regolite lunare per SPE e GCR [58]. 76

Tabella 2-24 Materiali considerati per schermature spaziali, composizione chimica e densità riportate in letteratura [62]. 78

Tabella 2-25 Risultati di schermatura locale in ambito ISS con polietilene e acqua [20] [64]. 80

Tabella 3-1 H limite al variare di t carriera. 88

Tabella 4-1 analisi per valutare il grado del fit polinomiale..... 93

Tabella 4-2 densità areale e spessore al variare della durata di carriera..... 94

Tabella 4-3 analisi per valutare il numero di esponenziali. 95

Tabella 4-4 valori per determinare il grado dell'interpolazione polinomiale. 97

Tabella 4-5 densità areale e spessore al variare della durata della carriera. 99

Tabella 4-6 valori per la scelta del numero N di esponenziali. 100

Tabella 4-7 valori per la scelta del grado N dell'interpolazione. 102

Tabella 4-8 densità areale e spessore al variare della durata della missione. 103

Tabella 4-9 valori per la scelta del grado N dell'interpolazione. 104

Tabella 4-10 densità areali e spessori al variare dei limiti di dose equivalente.. 105

Tabella 4-11 valori per la scelta del numero N di esponenziali..... 106

Tabella 4-12 valori per la scelta del grado N d'interpolazione. 108

Tabella 4-13 densità areali e spessori al variare della durata della missione. 110

Tabella 4-14 valori per la scelta del numero N di esponenziali. 111

Tabella 4-15 valori per la scelta del grado N d'interpolazione. 113

Tabella 4-16 densità areali e spessori al variare della durata della missione. 114

Tabella 4-17 valori per la scelta del numero N di esponenziali. 115

Tabella 4-18 Confronto tra densità areale e spessore richiesti in condizioni GCR al minimo solare del 2010. 117

Tabella 4-19 Confronto tra densità areale e spessore richiesti per lo SPE dell'agosto 1972. 119

Elenco simboli

Simbolo	Significato	Unità di misura
3DHZETRN	Tri-Dimensions High Charge and Energy Transport	
A	Area	cm^2
A_0	Termine costante del fit polinomiale impiegato per l'analisi GCR	mSv/day
Ag	Argento	
Ag-110	Isotopo d'argento con numero di massa 110	
Al	Alluminio	
Al_2O_3	Ossido di alluminio (allumina)	
ALARA	As Low As Reasonably Achievable	
Al-B_4C	Composito alluminio-carburo di boro	
Al-Li2195	Lega alluminio-litio	
A_N (esponenziali)	Coefficienti moltiplicativi dei termini esponenziali	mSv
A_N (polinomio)	Coefficienti dei monomi nell'equazione polinomiale	(mSv/day) cm^{-N}
AP	AnteroPosterior	
Au	Oro	
B	Boro	
B-10	Isotopo del boro con numero di massa 10	
B-11	Isotopo del boro con numero di massa 11	
B_2O_3	Ossido di boro (III), triossido di diboro	
B_4C	Carburo di boro	
Ba	Bario	
Ba/Bi	Configurazione bistrato bario/bismuto	
BaO	Ossido di bario	
$BaSO_4$	Solfato di bario	
BFO	Blood-forming Organs	
Bi	Bismuto	
Bi_2O_3	Ossido di bismuto (III)	
Bi-BSi	Vetro borosilicato al bismuto	
BN	Nitruro di boro	
BN + 20 wt% H_2	Nitruro di boro con il 20% in massa di idrogeno	
BNNT	Boron nitride nanotube	

C	Carbonio	
$C_{14}H_{14}N_2O_4$	Composizione attribuita al Kevlar	
$C_{21}H_{25}ClO_5$	Composizione attribuita alla resina epossidica (Epoxy)	
$C_{27}H_{26}O_6S$	Composizione attribuita al polisulfone (Polysulfone)	
$C_{36}H_{56}N_2O_4$	Composizione attribuita alla polibenzossazina (Polybenzoxazine)	
$C_{37}H_{24}O_6H_2$	Formula attribuita alla polieterimmide (Polyetherimide)	
Ca	Calcio	
CAD	Computer-Aided Design	
CaO	Ossido di calcio	
Cd	Cadmio	
CdO	Ossido di cadmio	
Ce	Cerio	
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire	
CH	Formula di composizione riportata per le nanofibre di grafite idrogenata (HGNF)	
CH_2	Formula empirica usata per il polietilene; non rappresenta una molecola isolata del polimero	
CH_4	Metano	
Cl	Cloro	
Co	Cobalto	
Co-58	Isotopo di cobalto con numero di massa 58	
Co-59	Isotopo di cobalto con numero di massa 59	
Co-60	Isotopo di cobalto con numero di massa 60	
CQ	Crew Quarters	
Cr	Cromo	
Cr-51	Isotopo di cromo con numero di massa 51	
Cs	Cesio	
CTDI	Computed tomography dose index	
$CTDI_{vol}$	Volume Computed Tomography Dose Index	mGy
Cu	Rame	
D	Dose media assorbita	Gy
d	Deutone nella reazione Li(d,xn) riportata per le sorgenti di neutroni	
d_1 ... d_5	Densità dei cinque campioni di vetro al piombo	g/cm^3

DE	Dose equivalente; dose equivalente indicata nelle legende delle simulazioni HZETRN e OLTARIS	Sv
δ	Raggi delta	
DLP	Dose Length Product	mGy*cm
dm	Differenziale di massa del materiale	kg
DPI	Dispositivi di protezione individuale	
DRL	Diagnostic Reference Level(s)	Adimensionale
D_T	Dose media assorbita nell'organo o tessuto	Gy
$D_{T,R}$	Dose assorbita nell'organo o tessuto T associata alla radiazione R	Gy
Dy	Disprosio	
E	Dose efficace	Sv
dE	Differenziale di energia impartita	J
e	Numero di Nepero	Adimensionale
E_N	Energia dei neutroni	MeV
ESA	European Space Agency	
EVA	ExtraVehicular Activity	
F	Fluoro	
F10.7	Indicatore del flusso radio solare a lunghezza d'onda di 10,7 cm	SFU
F-18	Isotopo del fluoro con numero di massa 18	
FDG	FluoroDeossiGlucosio	
Fe	Ferro	
Fe_2O_3	Ossido di ferro (III)	
Fe-56	Isotopo del ferro con numero di massa 56	
Fe-59	Isotopo del ferro con numero di massa 59	
FeB	Sigla del ferro-boro; non identifica necessariamente il composto stechiometrico monoboruro di ferro	
FeO	Ossido di ferro (II)	
FLUKA	FLUktuierende KAskade	
γ	Fotone gamma	
GCR	Galactic Cosmic Rays	
Gd	Gadolinio	
Gd_2O_3	Ossido di gadolinio (III)	
Ge	Germanio	
Geant4	Codice di simulazione	

GeO_2	Ossido di germanio (IV), diossido di germanio	
H (dose)	Dose equivalente	Sv
H (elemento)	Idrogeno	
H_2	Idrogeno molecolare	
H_2O	Acqua	
h-BN; hBN	Nitruro di boro esagonale	
HDPE	High-Density Polyethylene	
Hf	Afnio	
HGNF	Hydrogenated graphite nanofiber	
H_{limite}	Limite giornaliero di dose equivalente	mSv/day
$H_{limite\ SPE}$	Limite di dose equivalente relativo alle SPE	mSv
$H(\sigma)$	Funzione della dose equivalente rispetto alla densità areale	mSv/day (GCR); mSv (SPE)
H_T	Dose equivalente al singolo organo o tessuto T	Sv; Gy-Eq
HVL	Half value layer	cm
HZE	High Z Element	
HZETRN	High Charge and Energy Transport	
i	Indice della sommatoria nei modelli generali di interpolazione	Adimensionale
I_0	Intensità del fascio prima dell'attraversamento dello schermo	W/m2
IAEA	International Atomic Energy Agency	
ICRP	International Commission on Radiological Protection	
I/I_0	Rapporto fra intensità trasmessa e incidente	Adimensionale
In	Indio	
INCLXX	Denominazione del modello INCL++ in Geant4; modello di cascata intranucleare	
IR	Interventional radiology	
ISS	International Space Station	
I(x); I	Intensità trasmessa dopo lo spessore x	W/m^2
K	Potassio	
K (bordo)	Bordo di assorbimento K dei materiali	keV
K_2O	Ossido di potassio	
KAMINI	KAlpakkam MINI reactor	
Kerma	Kinetic Energy Released per unit Mass	J/kg
kVp	Kilovolt peak; tensione massima applicata al tubo radiogeno	V

LaRC	Langley Research Center	
LET	Linear Energy Transfer	eV
LH_2	Liquid Hydrogen	
Li	Litio	
LiH	Idruro di litio	
LIPAc	LInear Prototipe Accelerator	
ln	Logaritmo naturale	
LND	Lunar Lander Neutrons and Dosimetry	
LPR	Lunar Pressurized Rover	
m	Massa del materiale	kg
MCNP6	Monte Carlo N-Particle, versione 6	
MCNPX	Codice di calcolo citato nei lavori su calcestruzzi con sepiolite e vetri borati	
MDCT	Multi-Detector Computed Tomography	
MFP	Mean free path	cm
Mg	Magnesio	
MgO	Ossido di magnesio	
Mn	Manganese	
Mn-54	Isotopo di manganese con numero di massa 54	
MnO	Ossido di manganese (II)	
mol%	Notazione delle percentuali molari	mol%
MRS	Materials Research Society	
μ_l	Coefficiente di attenuazione lineare dei fotoni nel modello I(x)	cm^{-1}
μ (fig. 2-17)	Coefficiente di attenuazione dei neutroni indicato nel grafico dei compositi PE/h-BN	cm^{-1}
μ_m; μ/ρ	Coefficiente di attenuazione massico: μm nella figura 2-12 e μ/ρ nella figura 2-17	cm^2/g
μ_N	Coefficiente dell'esponente del fit SPE	cm^2/g
N (3DHZETRN)	Parametro con valori 1, 2 e 34 nelle legende del confronto tra codici	Adimensionale
N (elemento)	Azoto	
N (esponenziali)	Numero di termini esponenziali utilizzati per ricostruire la curva dei dati SPE	Adimensionale
N (polinomio)	Grado dell'equazione polinomiale scelto per ricostruire la curva dei dati GCR	Adimensionale
n	Neutrone nella notazione delle reazioni nucleari	

n′	Neutrone uscente nelle reazioni di diffusione anelastica
N-16	Isotopo dell'azoto con numero di massa 16
NA; N/A	Indicazione di dato mancante o non applicabile nelle tabelle
Na	Sodio
Na_2O	Ossido di sodio
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASA CP	NASA Conference Publication
NASA RP	NASA Reference Publication
NASA-STD	NASA Standard
NASA TP	NASA Technical Publication
Nb	Niobio
Nb-95	Isotopo del niobio con numero di massa 95
NEA	Nuclear Energy Agency
Ni	Nichel
Ni-58	Isotopo del nichel con numero di massa 58
O	Ossigeno
OLTARIS	On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space
OMS	Organizzazione Mondiale Sanitaria
P	Fosforo
P_2O_5	Ossido di fosforo(V), pentossido di difosforo
PA	PosteroAnterior
Pb	Piombo
PbBi	Lega di piombo e bismuto
PBO	p-fenilene-2,6-benzobisossazolo]
PbO	Ossido di piombo (II)
PE	Polietilene
PE/h-BN	Composito di polietilene e nitruro di boro esagonale
PEI	Polyetherimide
PET	Positron Emission Tomography
PHITS	Particle and Heavy Ion Transport code System; codice Monte Carlo
PS	Polystyrene
PSF	Polysulfone

Q	Fattore di qualità medio	Adimensionale
QMD	Quantum Molecular Dynamics	
R	Indice del tipo di radiazione	Adimensionale
R^2	Indicatore di quanto il modello descrive la variabilità dei dati	Adimensionale
RADOM	RADiation DOse Monitor	
RAFM	Reduced Activation Ferritic/Martensitic steel	
REID	Risk of Exposure-Induced Death	Adimensionale
Rh	Rodio	
ρ	Densità del materiale	g/cm^3
RX	Raggi X	
S	Zolfo	
s	Spessore geometrico del materiale	cm
SATIF	Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities	
Sb	Antimonio	
Sb-124	Isotopo di antimonio con numero di massa 124	
Sb-125	Isotopo di antimonio con numero di massa 125	
Sb/Bi	Configurazione bistrato antimonio/bismuto	
Sb/W	Configurazione bistrato antimonio/tungsteno	
SD	Parametro statistico affiancato alla media della trasmissione dei grembiuli	Adimensionale
SFU	Solar Flux Unit	
SI	Sistema internazionale di unità	
Si	Silicio	
σ	Densità areale	g/cm^2
σ_{SPE}	Densità areale ricavata dal confronto con il limite di dose equivalente per SPE	g/cm^2
SiO_2	Diossido di silicio (silice)	
Sm	Samario	
Sn	Stagno	
∑	Operatore di sommatoria	
SPE	Solar Particle Event	
Sr	Stronzio	
SrO	Ossido di stronzio	
s_{SPE}	Spessore ricavato dal confronto con il limite relativo allo SPE	cm

SW	Solar Wind	
T (eq. 1.2 e 1.4)	Indice dell'organo o tessuto considerato	Adimensionale
T	Numero di organi	Adimensionale
TC	Tomografia computerizzata	
Tc	Tecnezio	
Tc-99m	Isotopo di tecnezio con numero di massa 99, metastabile	
$t_{carriera}$	Tempo massimo complessivo trascorso dall'astronauta nel rover, in un'unica missione o in più missioni	day (giorni)
Te	Tellurio	
TeO_2	Ossido di tellurio (IV), diossido di tellurio	
Ti	Titanio	
TiO_2	Ossido di titanio (IV), diossido di titanio	
T_{shield}	Spessore massico dello schermo	g/cm^2
TVL	Tenth value layer	cm
UHMWPE	Ultra-High Molecular Weight Polyethylene	
W	Tungsteno	
$W\text{-}B_4C$	Composito tungsteno-carburo di boro	
WC	Carburo di tungsteno	
WC-Pb	Combinazione schermante di carburo di tungsteno e piombo	
WC-PbBi	Combinazione schermante di carburo di tungsteno e miscela piombo-bismuto	
w_R	Fattore di qualità o ponderazione associato al tipo di radiazione R	Adimensionale
w_T	Fattore relativo alla sensibilità dell'organo o tessuto T	Adimensionale
wt%	Percentuali in massa nelle composizioni di fibre, riempitivi e materiali	Adimensionale
x	Spessore attraversato dal fascio	cm
xn	Emissione di un numero x di neutroni nella notazione Li(d,xn)	Adimensionale
Z	Numero atomico	Adimensionale
Zn	Zinco	
ZnO	Ossido di zinco	
Zr	Zirconio	
Zr-95	Isotopo dello zirconio con numero di massa 95	

Capitolo 1

1. Introduzione

1.1 Ambiente lunare

L'ambiente lunare è naturalmente ostile alla vita. La Luna è priva di atmosfera perché la sua attrazione gravitazionale non è sufficiente a trattenere i gas a causa delle sue ridotte dimensioni, inoltre, è priva di magnetosfera. In assenza di questi schermi naturali, la quasi totalità delle particelle di origine galattica o solare raggiunge direttamente l'ambiente esterno del rover, e le interazioni con la regolite diventano una sorgente aggiuntiva di radiazione secondaria [1], [2], [3].

Sulla Terra queste sono le principali protezioni naturali contro le radiazioni prodotte dal Sole o provenienti da fuori del Sistema Solare. Ne consegue che, per una permanenza prolungata, la protezione non può essere affidata all'ambiente, ma deve essere incorporata nella geometria, nei materiali e nelle procedure operative del sistema abitato [2], [3].

Sulla superficie lunare le radiazioni hanno principalmente quattro origini [1], [4], [2] di seguito descritte:

- **Raggi cosmici galattici** (Galaxy Cosmic Ray, GCR), sono composti da particelle energetiche che coprono un ampio spettro energetico e di massa; queste particelle sono principalmente nuclei atomici (98%), mentre la restante componente è data da elettroni e positroni. I GCR hanno origine al di fuori del Sistema Solare da eventi altamente energetici come supernove e fusioni di stelle di neutroni. Proprio per la loro provenienza, il flusso di tali particelle non è costante, come mostrato nella figura 1-1, e dipende dall'attività solare: quando c'è il minimo solare, il flusso è massimo e viceversa;

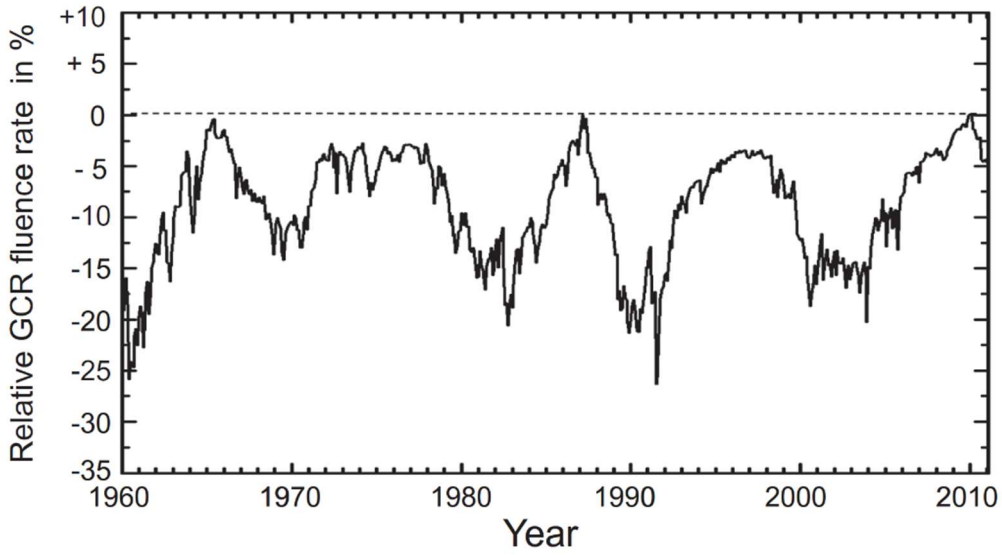


Figura 1-1: Flusso dei GCR al variare dei cicli solari *[1]*.

- **Vento solare** (Solar Wind, SW), è composto da protoni ed elettroni a bassa energia costantemente emessi dal Sole, l'intensità del flusso di particelle varia secondo i cicli solari, di 11 anni di durata, mostrati nella figura1-2;

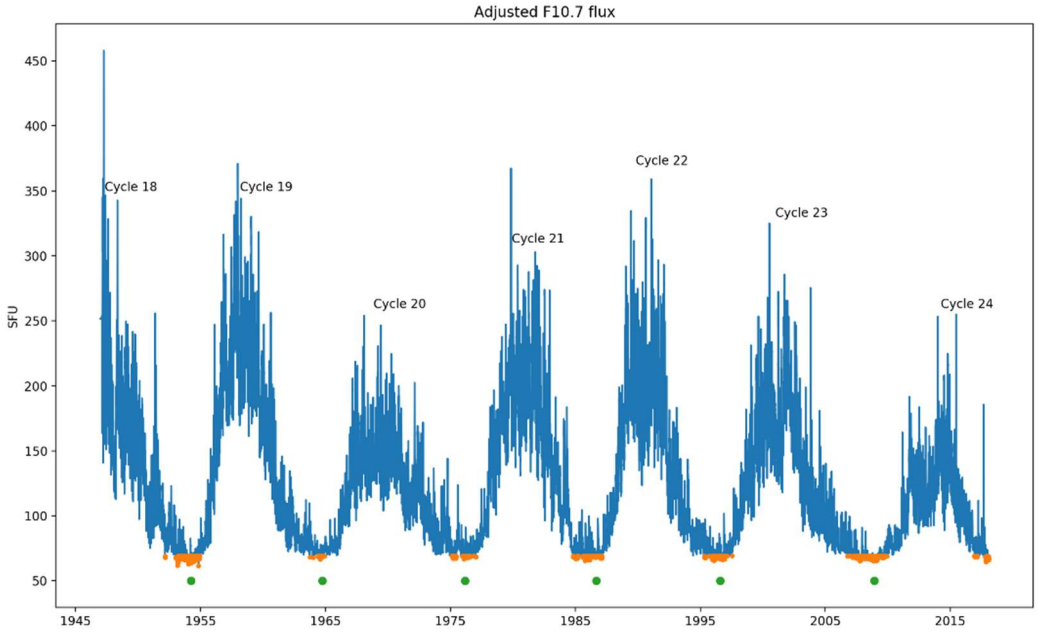


Figura 1-2: Variazione del flusso della frequenza radio di 10,7 MHz, che è indicativa dei cicli solari e dell'intensità dell'attività solare *[1]*.

- **Espulsione di Massa Coronale e Brillamenti Solari** (Solar Particle Event, SPE), sono dovuti a variazioni improvvise e rapide (pochi secondi) del

campo magnetico nella corona solare che accelerano le particelle solari nello spazio interplanetario. Le particelle accelerate sono principalmente protoni e raggiungono energie di diversi ordini di grandezza superiori rispetto al SW e sono spesso correlate a lampi di raggi gamma, raggi x e onde radio. Di particolare rilevanza è la SPE dell'agosto del 1972 perché il flusso di particelle è stato particolarmente intenso e continuo lungo tutto lo spettro energetico. La frequenza delle SPE dipende dai cicli solari, sono più frequenti durante i massimi solari [2], [3];

- **Radiazioni secondarie**, sono prodotte dall'interazione delle altre radiazioni con il suolo lunare, sono principalmente composte da adroni (nuclei, protoni e neutroni) e leptoni (muoni ed elettroni) a bassa energia. Sono anche prodotte dallo scontro di GCR e SPE con la struttura del rover stesso. In questo caso la composizione è la stessa di quelle originate dal suolo, tuttavia, le energie che trasportano sono molto più elevate a causa dell'origine più energetica. Questa componente è particolarmente importante ai fini progettuali, perché la produzione di neutroni secondari dal suolo o dai materiali strutturali contribuisce in modo significativo alla dose equivalente che può crescere se si adottano materiali non ottimizzati [1], [2], [3].

Come descritto precedentemente l'origine delle radiazioni influenza notevolmente i livelli energetici [1], [5], [3], se le particelle sono cariche o neutre e la capacità di penetrare i materiali:

- GCR: coprono un range energetico da 100 [MeV] a diversi [GeV]. Essendo composti da particelle cariche e di notevole massa, possono essere deflesse da intensi campi magnetici e vengono fermati anche da strati sottili di materia. Tuttavia, generano una cascata di altre particelle, sia cariche che neutre, che penetrano facilmente anche grandi spessori di materiale, ionizzandolo localmente. L'elevata penetrazione e la possibilità di frammentazione degli ioni pesanti fanno sì che l'aumento indiscriminato dello spessore non si traduca sempre in una riduzione proporzionale del rischio biologico, perché parte della dose viene trasferita a campi misti di secondari. Dal punto di vista della progettazione, i GCR costituiscono la componente cronica dell'esposizione: sono sempre presenti, comprendono anche ioni HZE e sono la radiazione più difficile da mitigare con la sola schermatura di massa [1], [4], [2];
- Vento solare: copre un range energetico da 100 [eV] a pochi [keV], poiché è composto da particelle a bassa energia e leggere, bastano pochi strati di tessuto o materiale per fermarle, normalmente generano una momentanea eccitazione degli elettroni atomici. Di conseguenza il vento solare ordinario, pur essendo una componente da considerare, non è critico per il dimensionamento della schermatura di massa rispetto a GCR e SPE [2], [3];
- SPE: coprono una gamma energetica da pochi [MeV] a pochi [GeV], similmente ai GCR, sono particelle cariche che possono essere deflesse da campi magnetici anche se meno intensi, ma possono attraversare più facilmente i materiali in quanto protoni ed elettroni sono più piccoli e leggeri dei nuclei atomici. Possono ionizzare localmente la materia attorno a dove passano a seconda dell'energia che trasportano e possono anch'esse

generare una cascata di particelle, neutre e cariche, ma di dimensioni ed energia ridotte. In compenso, proprio perché lo spettro degli SPE è mediamente meno penetrante di quello dei GCR, volumi rifugio con spessori moderati ma ben localizzati possono essere efficaci nel ridurre la dose con un costo di massa più accettabile [2], [3].

1.1.1 Interazioni delle radiazioni con la materia

Le radiazioni sopra descritte interagiscono in modo diverso con i materiali che incontrano; tali scontri sono descritti dall'equazione di Boltzmann per campi ionici e neutri accoppiati. I termini principali che regolano la natura degli urti sono massa delle radiazioni e degli atomi del materiale, sezione d'urto, incidenza ed energia trasportata; quest'ultima è la più influente sulla tipologia d'interazione. Nella pratica, questa fisica viene implementata in codici di trasporto che, a partire dal flusso incidente, ricostruiscono il campo di radiazione all'interno della struttura e successivamente nel corpo umano, permettendo di confrontare materiali e configurazioni geometriche diverse [1], [4].

A basse energie, come nel caso delle radiazioni derivanti dal vento solare, le interazioni sono soprattutto di natura coulombiana tra la radiazione e la nuvola elettronica di atomi e molecole. Questo tipo di interazione comporta la deviazione della traiettoria di particelle cariche, può portare all'eccitazione degli elettroni e quindi al salto di orbitale se l'energia scambiata è quella corrispondente. In questo regime prevalgono quindi perdita di energia per deviazione delle traiettorie ed eccitazione, mentre la ionizzazione e la produzione di secondari nucleari rimane limitata; per tale ragione bastano spessori molto ridotti per attenuare efficacemente queste particelle [4], [3].

Ad alte energie, come nel caso di SPE e GCR, le radiazioni trasportano abbastanza energia da superare le nuvole elettroniche ed interagire direttamente con i nuclei atomici. In queste situazioni gli urti sono di natura coulombiana o di natura nucleare; se si superano i GeV gli effetti che si possono osservare possono essere la ionizzazione degli atomi con conseguente generazione di elettroni liberi (raggi δ) o la frammentazione del nucleo colpito con conseguente generazione di particelle secondarie (adroni, leptoni o altri nuclei atomici più leggeri). Quando invece il campo è dominato da protoni energetici o ioni pesanti, la schermatura non deve soltanto rallentare la particella primaria, ma anche limitare la produzione di frammenti del bersaglio e neutroni veloci, che ampliano il campo misto e ne aumentano la complessità dosimetrica [1], [4].

Qualsiasi sia la natura dell'urto (coulombiano o nucleare) si ha dispersione di energia; essendo il nostro scopo, tuttavia, quello di proteggere gli astronauti dalle radiazioni, risulta naturale propendere per schermature che prevedono la perdita di energia senza o con limitata generazione di radiazioni secondarie. Quindi conviene utilizzare materiali contenenti atomi leggeri che evitano la generazione di altre particelle indesiderate ed hanno principalmente interazioni di tipo coulombiano. L'ICRP sottolinea infatti che i materiali ricchi di idrogeno sono, a parità di massa areica, i più efficienti nel rallentare gli ioni e nel ridurre l'accumulo di neutroni e frammenti secondari, mentre materiali pesanti come piombo o calcestruzzo possono addirittura peggiorare la risposta ai GCR [1].

1.1.2 Dosi

Per valutare gli effetti delle radiazioni su materiali e persone sono state definite delle quantità di dosi di radiazioni le cui principali sono: dose media assorbita, dose equivalente e dose efficace. Nel caso spaziale questa distinzione è fondamentale, perché il campo radiativo è misto e comprende particelle con diversa efficacia biologica; perciò, una stessa dose assorbita può corrispondere a rischi molto diversi a seconda del tipo di particella che la genera [1], [6], [7], [8], [9].

- **Dose media assorbita (D)**, indica l'energia impartita al materiale per unità di massa. È la base fisica per tutte le valutazioni successive. Nel SI ha come unità di misura il Gray ($Gy = J/Kg$). Per questa ragione le misure sperimentali ottenute con rivelatori in silicio, come nel caso dei dati lunari più recenti, devono essere interpretate e convertite prima di essere confrontate con limiti riferiti ai tessuti umani [5].

$$D = \frac{dE}{dm} \tag{1.1}$$

  Nel caso venga applicata ad un organo del corpo umano, prende il nome di dose media assorbita per organo (D_T) ed indica l'energia impartita all'organo. La grandezza per organo è particolarmente utile perché molti limiti operativi, soprattutto per gli effetti non cancerogeni a breve termine, sono riferiti a organi o tessuti specifici e non soltanto al corpo intero [1], [10].
- **Dose equivalente (H_t)**, indica la dose assorbita dal singolo organo ponderata per il tipo di radiazione, in quanto le radiazioni ad alta energia hanno un impatto biologico maggiore rispetto a quelle a bassa energia, introducendo un fattore di qualità (w_R) riportato in tabella 1-1. Tale fattore rappresenta la media della dose assorbita massima dai singoli organi in base al tipo di radiazione. Nella letteratura per astronauti, tuttavia, si osserva che l'uso del solo fattore w_R può essere una semplificazione eccessiva, soprattutto per gli ioni pesanti, per i quali ICRP 123 raccomanda valutazioni più realistiche basate sul fattore di qualità medio Q [1], [9].
  La dose equivalente consente la valutazione del rischio per i singoli organi. Nel SI si misura in Sievert ($Sv = J/Kg$), tuttavia, può anche essere misurato in Gray-equivalenti (Gy-Eq), soprattutto nella documentazione statunitense.

$$H_T = \sum_R w_R * D_{T,R} \tag{1.2}$$

Tabella 1-1 fattore di qualità in base al tipo di radiazione [1], [9].

Tipo di radiazione	w_R
Fotoni	1
Elettroni e muoni	1
Protoni e pioni carichi	2
Particelle alpha, frammenti di fissione, ioni pesanti	20
Neutroni	Non costante, descritto dall'equazione 1.3 o dalla figura 1-3.

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_N)]^2/6}, & E_N < 1MeV \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_N)]^2/6}, & 1MeV < E_N < 50MeV \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_N)]^2/6}, & E_N > 50MeV \end{cases} \quad (1.3)$$

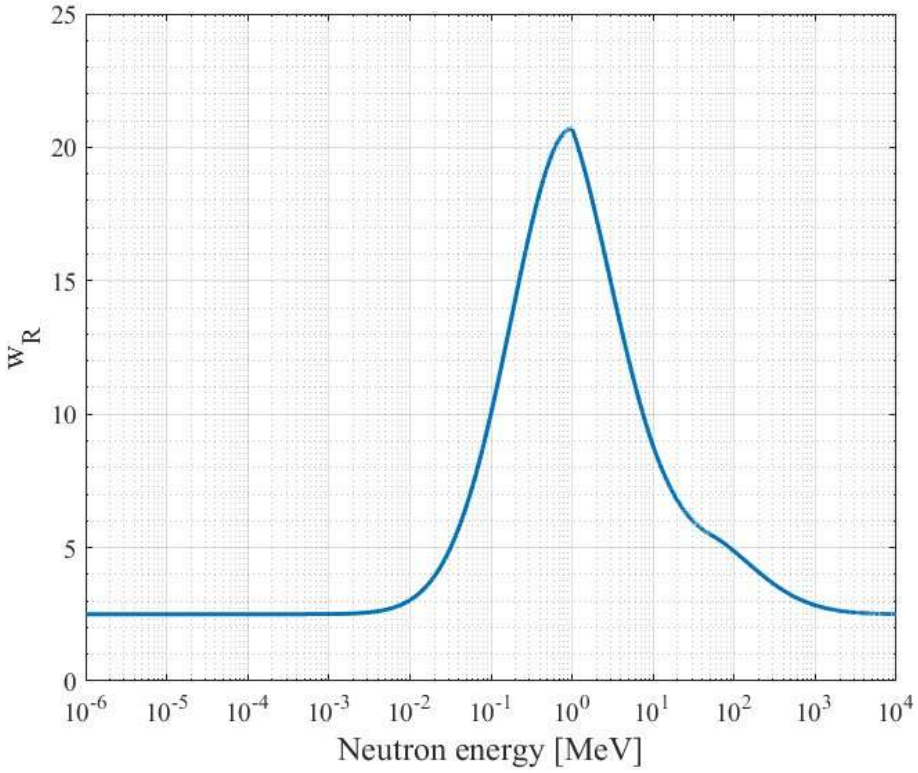


Figura 1-3: rappresentazione del fattore di qualità dei neutroni, equazione (1.3).

Dalla figura 1-3 si deduce che i neutroni ad 1 MeV sono i più dannosi e dunque sono quelli da evitare e limitare maggiormente. Questi neutroni hanno principalmente origine dall'interazione dei GCR con altri atomi ed al variare

dell'energia della radiazione d'origine varia esclusivamente la quantità di radiazione non la sua energia, che è proprio nel dintorno del mega elettronvolt. Quindi, per un'eventuale schermatura, conviene utilizzare materiali leggeri le cui interazioni siano più di tipo coulombiano che nucleari [4]. La rilevanza dei neutroni secondari è confermata anche dagli studi di trasporto sul suolo lunare, che mostrano come il contributo di albedo neutronica diventi non trascurabile sia nelle schermature spesse sia in prossimità della regolite [1], [2], [3].

- **Dose efficace (E)**, indica la somma delle dosi equivalenti pesate per la sensibilità dei singoli organi, viene calcolata sul corpo intero. Questa quantità viene utilizzata per il confronto con i limiti di esposizione stabiliti. Introduce quindi, un fattore di qualità (w_T) esplicitato nella tabella 1-2, relativo alla sensibilità dei vari tessuti. Nel SI si misura in Sievert (Sv). In ambito astronautico, però, la dose efficace viene normalmente affiancata da valutazioni organo-specifiche e da metriche di rischio, perché i limiti terrestri non sono trasferibili in modo diretto a missioni nello spazio profondo [7], [11].

$$E = \sum_T w_T * H_T \tag{1.4}$$

Tabella 1-2 fattore di qualità d'assorbimento degli organi.

Organo/Tessuto	w_T
Polmoni, stomaco, intestino grasso, midollo osseo, seno, ghiandole surrenali, tessuto extratoracico, cistifellea, cuore, reni, nodi linfatici, mucosa orale, muscoli, pancreas, prostata, intestino tenue, milza, timo, utero/cervice	0.12
Gonadi	0.08
Tiroide, esofago, vescica, fegato	0.04
Superficie ossea, pelle, cervello, ghiandole salivari	0.01

Le misurazioni più recenti ed affidabili dei livelli di radiazione sul suolo lunare sono del 2019 e sono state rilevate dall'esperimento Lunar Lander Neutrons and Dosimetry (LND) installato sul lander cinese Chang'E 4. I risultati sono riportati nella tabella 1-3. Questi sono in linea con quanto misurato dalle missioni Apollo, che tuttavia hanno rilevato solo neutroni a bassa energia, e soprattutto con l'esperimento Radiation Dose Monitor (RADOM) durante la missione Chandrayaan-1, che però ha effettuato le misurazioni da un'orbita di 100 km; quindi, mancavano le misurazioni delle radiazioni secondarie prodotte dal suolo. Il dato del LND è particolarmente prezioso perché costituisce la prima misura attiva e temporizzata della dose sulla superficie lunare e mostra che la componente neutra, pari a 3,1 ± 0,5 μGy/h su un totale di 13,2 ± 1 μGy/h, non è trascurabile [5].

Tabella 1-3 flusso di dose assorbita in silicio rilevato dall'esperimento LND sul lander Chang'E 4 in un periodo di minimo solare.

	Rateo di dose assorbita in silicio [uGy/h]
Particelle neutre	$3{,}1 \pm 0{,}5$
Particelle cariche	$10{,}2 \pm 1{,}1$
Totale	$13{,}2 \pm 1$

Ottenuta la dose assorbita, è possibile calcolare la dose equivalente per poter effettuare dei confronti con ambienti più familiari come l'interno della Stazione Spaziale Internazionale e la superficie terrestre. Nella tabella 1-5 [5], [3] è riportato il flusso al giorno delle dosi equivalenti dei tre ambienti. Si può notare come il flusso sulla superficie lunare sia circa il doppio rispetto alla ISS e circa 210 volte maggiore rispetto al flusso sulla superficie terrestre. Questi livelli di radiazioni possono risultare dannosi per la salute di una persona ed impongono la necessità di avere delle protezioni in assenza di schermature naturali.

Tabella 1-4 flusso di dose equivalente sulla superficie lunare, sulla ISS e sulla superficie terrestre in un periodo di minimo solare.

	Rateo dose equivalente [µSv/day]
Superficie lunare	1369
ISS	731
Superficie terrestre	6,6

Se questi valori vengono estesi a permanenze lunghe, la sola componente cronica da GCR sulla Luna può raggiungere circa 500 mSv/anno in minimo solare e circa 110 mSv/anno in massimo solare, mentre scenari SPE severi possono avvicinarsi a 1 Sv; da qui deriva la necessità di prevedere non solo schermature diffuse ma anche un rifugio temporaneo con maggiore massa areica [3].

1.2 Limiti nelle esposizioni

Una volta definito l'ambiente in cui gli astronauti dovranno operare, bisogna definire quelli che saranno i limiti di esposizione per garantire la sicurezza della missione. La definizione dei limiti non ha quindi solo significato sanitario, ma anche strettamente progettuale, perché influenza lo spessore delle pareti, la

distribuzione della massa, la pianificazione delle EVA, la dosimetria di bordo e le procedure di contingenza [11], [12], [10].

Molte agenzie, come l'ESA, stanno ridefinendo tali limitazioni, precedentemente stabilite per l'orbita bassa terrestre; tuttavia, risultano non sufficienti per missioni nello spazio profondo di lunga durata. Tutte le agenzie applicano comunque il principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable) e, prima del volo, ricostruiscono la storia dosimetrica individuale dell'astronauta combinandola con una previsione della dose di missione, così da verificare il rispetto del budget personale di esposizione [10], [13], [12].

La NASA, inoltre, utilizza una metodologia differente, calcola la probabilità che il rischio di morte per cancro indotto dall'esposizione alle radiazioni (REID, Risk of Exposure-Induced Death) per l'intera carriera rimanga sotto il 3% per ogni singolo astronauta. Tuttavia, la NASA-STD-3001 [10] del 2022 pone un limite massimo di dose efficace per la carriera di **600 mSv** per tutti i sessi ed un limite di **250 mSv** in caso di SPE. Tali limiti vengono utilizzati per dimensionare le protezioni delle navicelle e delle infrastrutture delle missioni future verso la Luna. Anche adottando un limite uniforme, il rischio reale resta funzione di variabili come età all'esposizione, sesso, durata della missione, fase del ciclo solare e qualità del campo, come mostrano i più recenti modelli europei di valutazione del rischio [8], [11], [13], [10].

Nella tabella 1-5 sono riportate ulteriori limitazioni di dosi equivalenti in base alla durata della missione per effetti a breve termine e non cancerogeni. Questo si fa perché il superamento di tali soglie comporterebbe un elevato rischio per la salute anche se potrebbe non portare al superamento dei limiti di dose efficace. Tali soglie sono particolarmente rilevanti per la gestione degli SPE, perché una dose somministrata in tempi brevi può compromettere la salute dell'equipaggio e la continuità della missione anche senza esaurire il budget di carriera; per questo motivo il rover dovrebbe integrare sia schermatura passiva sia una configurazione operativa che permetta di rifugiarsi rapidamente nel volume più protetto [2], [10].

Tabella 1-5 limiti di dose equivalente per effetti a breve termine e non cancerogeni in base alla durata della missione, misurati in Gy-Eq.

Organo	Limite 30 giorni	Limite 1 anno	Limite carriera
Occhi	1,000 mGy-Eq	2,000 mGy-Eq	4,000 mGy-Eq
Pelle	1,500 mGy-Eq	3,000 mGy-Eq	6,000 mGy-Eq
Blood-forming Organs (BFO)	250 mGy-Eq	500 mGy-Eq	Non applicabile
Sistema circolatorio	250 mGy-Eq	500 mGy-Eq	1000 mGy-Eq
Sistema nervoso centrale	500 mGy	1,000 mGy	1,500 mGy
Sistema nervoso centrale ($Z \geq 10$)	-	100 mGy	250 mGy

Capitolo 2

2. Protezione dalle radiazioni

Nel capitolo seguente viene analizzato il tema della protezione dalle radiazioni a partire da quattro settori applicativi in cui la schermatura rappresenta un elemento progettuale essenziale: medicina, energia nucleare, ricerca scientifica e aerospazio. L'obiettivo non è descrivere in modo esaustivo tutte le norme o tutte le apparecchiature utilizzate in ciascun ambito, ma individuare materiali e configurazioni che possano fornire criteri utili per la successiva selezione di soluzioni applicabili a un rover pressurizzato destinato all'esplorazione del suolo lunare. Il confronto tra campi di applicazione differenti consente infatti di evidenziare che l'efficacia di una schermatura non dipenda unicamente dallo spessore, bensì dal rapporto tra spettro energetico, massa areale, densità, numero atomico medio, produzione di radiazione secondaria, vincoli di accessibilità e condizioni operative.

Il filo conduttore dell'analisi è il principio di ottimizzazione della protezione radiologica, secondo cui l'esposizione deve essere mantenuta al livello più basso ragionevolmente ottenibile, compatibilmente con i vincoli tecnici, economici e operativi del sistema considerato [9]. In questa tesi ci si concentrerà sui materiali e sulle loro proprietà; tuttavia, in chiave progettuale, non si considera la schermatura come una barriera isolata, bensì come parte di un sistema che comprende la scelta dei materiali, la disposizione degli elementi, la distribuzione degli spessori, il monitoraggio, le procedure operative e la permanenza dell'equipaggio nelle zone più protette. Questo approccio è particolarmente importante per un veicolo lunare pressurizzato, nel quale ogni aumento di massa deve essere giustificato da un beneficio radioprotezionistico reale.

Nel settore medico la schermatura è studiata in condizioni fortemente controllate, con sorgenti note e procedure definite. Le applicazioni diagnostiche e interventistiche mostrano l'importanza della geometria, della distanza dalla sorgente, del controllo della radiazione diffusa e della corretta scelta di dispositivi individuali o barriere strutturali. La letteratura evidenzia inoltre che l'equivalenza al piombo non è un parametro sufficiente se non viene riferita all'energia del fascio e alla configurazione di misura [14] [15]. Questo aspetto è importante anche per applicazioni spaziali, nelle quali la prestazione di un materiale deve essere valutata rispetto allo spettro radiativo effettivamente incidente per evitare di scegliere soluzioni ottimali in certi spetri ma non in altre situazioni.

L'energia nucleare rappresenta invece un caso di riferimento per schermature massicce, permanenti e integrate nel progetto dell'impianto. In questo ambito la protezione radiologica deve garantire la sicurezza del personale e del pubblico

durante l’esercizio, la manutenzione, la fermata dell’impianto e la gestione dei materiali attivati. Le schermature sono quindi progettate considerando non solo l'attenuazione di fotoni e neutroni, ma anche l'attivazione, il calore depositato, l'accessibilità, le penetrazioni geometriche e le configurazioni multistrato [16] [17]. Pur essendo molto diverso da un rover lunare per scala e vincoli di massa, il settore nucleare fornisce criteri utili per comprendere la logica di integrazione tra funzione strutturale, protezione radiologica e manutenzione.

Il settore della ricerca scientifica, in particolare quello degli acceleratori, introduce un ulteriore livello di complessità. Le facility sperimentali possono generare campi misti di radiazione, con componenti prompt e residue, produzione di neutroni secondari, attivazione dei componenti e necessità di controllare sia le aree operative sia quelle accessibili dopo lo spegnimento. Le soluzioni di schermatura comprendono bunker, beam dump, collimatori, pareti in calcestruzzo, materiali idrogenati o borati e geometrie studiate per ridurre streaming e skyshine [18] [19]. Questo ambito è rilevante perché mostra come la forma dello schermo e la posizione delle discontinuità possano essere decisive quanto il materiale impiegato.

Infine, il settore aerospaziale introduce il vincolo di massa e la necessità di proteggere l’equipaggio in ambienti nei quali la radiazione non proviene da una sorgente localizzata e facilmente schermabile. Le esperienze su ISS, gli studi su polietilene, acqua, materiali ricchi di idrogeno e configurazioni multistrato mostrano che la protezione spaziale deve essere progettata privilegiando la massa areale utile, la multifunzionalità dei materiali e la schermatura localizzata nelle zone di maggiore permanenza o rifugio dell’equipaggio [1] [20] [21]. Il capitolo si conclude quindi con il settore aerospaziale, che costituisce il collegamento diretto tra lo stato dell’arte analizzato e la successiva selezione delle tecnologie più adatte al rover pressurizzato.

2.1 Settore medico

Nel settore medico la protezione dalle radiazioni ha una particolarità rispetto agli altri ambiti analizzati in questa tesi: l’impiego della radiazione è intenzionale e produce un beneficio clinico diretto; tuttavia, una parte dell’energia emessa non contribuisce all’informazione diagnostica o al trattamento e diventa dose indesiderata per il paziente, gli operatori ed il pubblico. Per questo motivo il problema non è eliminare il campo radiativo, bensì controllarlo e limitarlo alle regioni e ai tempi necessari. Il sistema di protezione radiologica dell’ICRP si basa sui principi di giustificazione, ottimizzazione e limitazione. La giustificazione riguarda la scelta dell’esame o del trattamento, l’ottimizzazione richiede di mantenere la dose assorbita a livelli compatibili con l’obiettivo clinico e con una qualità di immagine o di trattamento sufficiente; infine, la limitazione serve per evitare irraggiamenti indesiderati [9].

Le applicazioni mediche possono essere suddivise in: diagnostica radiologica convenzionale (raggi X), tomografia computerizzata (TC), fluoroscopia, radiologia interventistica, medicina nucleare e radioterapia. In tutte queste aree la schermatura assume forme diverse, da barriere fisse e strutturali a schermature mobili e dispositivi di protezione individuale, come mostrato nella tabella 2-1. La dose al

paziente è generalmente dominata dal fascio primario o dal radionuclide somministrato, mentre la dose al personale deriva soprattutto dalla radiazione diffusa, perdite, manipolazione di sorgenti e permanenza in prossimità del paziente irradiato [22].

Tabella 2-1 Tipologie principali di esposizione medica e funzione della schermatura *[9] [14] [22]*.

Ambito medico	Sorgente/campo dominante	Tipologia di radiazione	Funzione principale della schermatura
Radiografia convenzionale	Tubo radiogeno, fascio primario breve	Fotoni in banda X	Limitare fascio utile, radiazione diffusa e dose a organi non bersaglio
TC	Tubo RX rotante e fasci multiproiezione	Fotoni in banda X policromatici	Contenere perdite e scatter della sala
Fluoroscopia/ interventistica	Fascio RX continuo o pulsato, paziente come sorgente diffusa	Fotoni in banda X primari, scatter	Proteggere operatori
Medicina nucleare	Radiofarmaci non sigillati e paziente radioattivo	Fotoni in banda gamma, positroni, raggi beta	Schermare manipolazione, trasporto e stoccaggio dei radionuclidi
Radioterapia	Acceleratori lineari, brachiterapia o sorgenti sigillate	Raggi beta, fotoni in banda gamma; secondari dove rilevanti	Confinare campo di trattamento e proteggere aree adiacenti

2.1.1 Tipologia di radiazione

In ambito sanitario le radiazioni ionizzanti sono costituite principalmente da fotoni in banda X prodotti da tubi radiogeni, fotoni gamma emessi da radionuclidi, elettroni in radioterapia e, in medicina nucleare, positroni a seconda del radiofarmaco impiegato. L'OMS definisce la radiazione ionizzante come l'energia rilasciata da atomi in forma di onde elettromagnetiche o particelle; le sorgenti mediche, in particolare i raggi X, rientrano tra le sorgenti artificiali più diffuse di esposizione [23].

Nella diagnostica convenzionale e nella TC lo spettro del fascio è policromatico: il valore di kVp non indica una singola energia ma la tensione massima del tubo, mentre la distribuzione effettiva dipende dalla filtrazione, dall'anodo, dalla geometria e dal paziente. Gli studi sui materiali per indumenti schermanti

considerano tipicamente fasci tra 60 e 120 kVp, con energie medie dell'ordine di alcune decine di keV; in questo intervallo il trasferimento di energia è dominato dall'effetto fotoelettrico e quindi è fortemente influenzato dal numero atomico e dai bordi di assorbimento K dei materiali [15].

Per la TC la situazione è particolare, perché lo scopo della schermatura non è solo proteggere dal fascio primario, che è confinato all'interno della gantry (struttura contenente tubo, collimatore e rilevatore) e del volume di scansione, ma evitare esposizioni non necessarie e mantenere gli indici dosimetrici entro valori coerenti con l'indicazione clinica. ICRP sottolinea l'uso dei livelli di riferimento diagnostici e delle grandezze CTDI e DLP per confrontare protocolli e identificare condizioni non ottimizzate [14].

La radiazione diffusa è particolarmente importante nelle procedure fluoroscopiche e interventistiche. In queste procedure il paziente irradiato diventa una sorgente estesa di scatter, con direzioni e intensità legate alla geometria dell'intensificatore d'immagine fluoroscopica (C-arm), alla posizione dell'operatore e ai parametri di esposizione. La protezione del personale richiede quindi dispositivi vicini al corpo, schermi sospesi, paratie mobili e corretta disposizione del tubo e dell'intensificatore/detettore [24].

In medicina nucleare il campo radiativo è legato alla presenza di radionuclidi. In questo caso la sorgente non è un tubo che può essere spento a fine esame, ma un materiale radioattivo che continua a emettere fino al decadimento o all'eliminazione biologica. La schermatura deve quindi seguire il radiofarmaco lungo l'intero percorso: preparazione, trasporto, somministrazione, attesa del paziente, acquisizione e gestione dei rifiuti [22].

Dal punto di vista della progettazione di schermature, la distinzione più importante è tra fascio primario e radiazione secondaria. Il fascio primario e il campo utile, collimato e diretto verso il paziente o il bersaglio; la radiazione secondaria comprende scatter dal paziente, fluorescenza caratteristica prodotta sullo schermo, perdite dalla sorgente e fotoni di scatter dall'ambiente. La differenza è critica per i materiali poiché la presenza di picchi di radiazione secondaria può modificare la dose trasmessa in geometrie articolate o in condizioni di scatter [25].

Le grandezze operative usate in medicina includono dose assorbita, kerma in aria, dose equivalente e dose efficace. I valori tipici di quest'ultima grandezza sono riportati nella tabella 2-2. Nella protezione del personale si ricorre spesso alla dose equivalente ambientale, che approssima il danno biologico a 10 mm di profondità in tessuto e può differire dal semplice karma in aria nello spettro diagnostico. Questo punto è rilevante per la scelta dei materiali, perché due schermi che producono la stessa riduzione di karma possono non produrre la stessa riduzione della dose equivalente [15].

Tabella 2-2 Esempi di dosi efficaci tipiche per procedure diagnostiche e medico-nucleari *[14]*.

Procedura	Dose efficace tipica [mSv]	Procedura	Dose efficace tipica [mSv]
Arti e articolazioni, esclusa anca	<0.01	TC cranio	2.0
Torace PA singola	0.02	TC torace	8
Cranio	0.06	TC addome e pelvi	10
Colonna lombare	1.0	Scintigrafia ossea Tc-99m	4
Pelvi	0.7	Cardiaca dinamica Tc-99m	6
Clisma opaco	7.2	PET cranio F-18 FDG	5

L'ottimizzazione in TC è particolarmente importante perché la dose non dipende da un solo scatto ma da una sequenza di proiezioni intorno al paziente. L'ICRP Publication 102 riporta livelli diagnostici di riferimento per adulti e pazienti pediatrici e mostra che la valutazione della dose deve essere legata a CTDI, DLP, dimensioni del paziente, regione anatomica e indicazione clinica, riportati nella tabella 2-3. I DRL non sono limiti di dose individuali, ma strumenti di revisione: se una pratica di routine è sistematicamente sopra o sotto il livello di riferimento, occorre verificare rispettivamente dose e qualità dell'immagine [14].

Tabella 2-3 Esempi di livelli diagnostici di riferimento e parametri dosimetrici in TC *[14]*.

Caso / esame	Grandezza	Valore riportato	Nota
Adulto – cranio	DLP, studio IAEA	527 mGy cm	Valore al terzo quartile
Adulto – torace	DLP, studio IAEA	447 mGy cm	Valore al terzo quartile
Adulto – addome	DLP, studio IAEA	696 mGy cm	Valore al terzo quartile
Pediatrico torace 0-1 anno	$CTDI_{vol}$ / DLP	12 mGy / 204 mGy cm	Fantoccio 16 cm
Pediatrico torace 10 anni	$CTDI_{vol}$ / DLP	17 mGy / 368 mGy cm	Fantoccio 16 cm
Pediatrico cranio 0-1 anno	$CTDI_{vol}$ / DLP	28 mGy / 270 mGy cm	Fantoccio 16 cm
Pediatrico cranio 10 anni	$CTDI_{vol}$ / DLP	51 mGy / 619 mGy cm	Fantoccio 16 cm

2.1.2 Materiali e tecnologie

Lo stato dell'arte nella protezione medica può essere letto su tre livelli. Il primo è organizzativo: giustificazione, ottimizzazione, controlli di qualità, sorveglianza dosimetrica e formazione. Il secondo è geometrico: tempo, distanza, collimazione, posizione dell'operatore, layout della sala e barriere. Il terzo è materiale: scelta di metalli, vetri, calcestruzzi o materiali compositi in funzione dello spettro e della massa ammissibile [9] [22].

Nelle sale radiologiche e interventistiche la schermatura strutturale viene progettata in funzione delle direzioni del fascio, dei locali adiacenti e della frequenza d'uso. La logica è analoga a quella degli altri settori: uno schermo efficace non è solo un materiale ad alto potere attenuante, ma una combinazione di spessore, densità, posizione, continuità geometrica e gestione delle discontinuità. Nella pratica sanitaria si aggiungono vincoli specifici come ergonomia, sterilità, trasparenza ottica e accessibilità al paziente [26].

Il **piombo** è rimasto il materiale di riferimento per barriere, camici e vetri schermanti grazie all'alta densità, all'alto numero atomico e alla buona attenuazione dei fotoni X diagnostici. Tuttavia, il suo utilizzo non risolve tutti i problemi: è pesante, tossico, poco ergonomico negli indumenti e non fornisce una prestazione costante se confrontato con materiali diversi su spettri diversi. La letteratura sui camici radioprotettivi mostra che la semplice indicazione di spessore equivalente in piombo può essere fuorviante [15].

Per il personale sanitario la schermatura indossabile resta centrale soprattutto in fluoroscopia, cardiologia interventistica, ortopedia e radiologia interventistica. Le misure riportate nella letteratura ortopedica insistono sull'ALARA, collimazione,

riduzione del tempo di esposizione, massimizzazione della distanza, corretto posizionamento del tubo e uso di camice, collare tiroideo, occhiali e barriere. Il controllo periodico dell'integrità dei grembiuli è necessario per individuare crepe, pieghe o perdite di uniformità [24].

Tabella 2-4 Trasmissione attraverso grembiuli equivalenti a 0.25 mm e 0.5 mm Pb a 70 e 100 kVp *[27]*.

kVp	Spessore nominale Pb eq. (mm)	N. grembiuli	Intervallo trasmissione (%)	Media (%)	SD (%)	Pb puro (%)
70	0.25	24	4.3-10.2	7.05	1.4	5.4
70	0.5	34	0.6-1.6	1.03	0.2	0.9
100	0.25	24	12.3-20.7	16.8	2.1	15.0
100	0.5	34	3.5-6.7	4.9	0.7	5.0

La tabella 2-4 evidenzia che, a parità di spessore nominale in piombo equivalente, la trasmissione può variare sensibilmente tra produttori e modelli. Nel caso dei grembiuli da 0,25 mm Pb eq. La trasmissione a 70 kVp varia da 4,3% a 10,2%, cioè oltre un fattore di due, mentre a 100 kVp varia da 12,3% a 20,7%. Per i 0.5 mm Pb eq. La trasmissione media è molto più bassa, ma non nulla, e cresce sensibilmente all'aumentare del kVp [27].

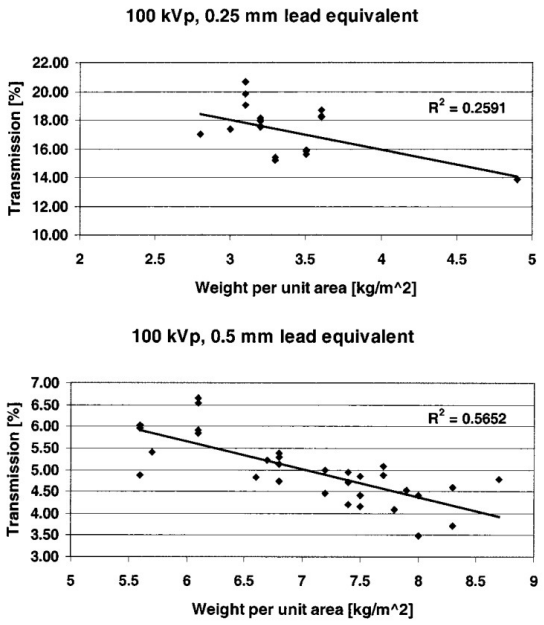


Figura 2-1: Trasmissione percentuale in funzione della densità areale di grembiuli equivalenti a 0,25 mm e 0,5 mm Pb a 100 kVp *[27]*.

La figura 2-1 mostra che la densità areale è un parametro pratico per confrontare dispositivi indossabili, perché lega direttamente la prestazione schermante e la massa da sostenere. Tuttavia, la correlazione sperimentale non è perfetta perché diversi fattori influenzano la trasmissione come composizione, legante polimerico, uniformità, difetti e geometria [27].

La ricerca sui **materiali non piombati** nasce dalla necessità di ridurre la massa e la tossicità mantenendo un'attenuazione sufficiente. Gli elementi considerati nei materiali per grembiuli radioprotettivi sono riportati nella tabella 2-5. La loro efficacia non dipende solo dalla densità, ma anche dall'allineamento tra il bordo di assorbimento K e lo spettro da attenuare [15].

Tabella 2-5 Elementi impiegati o studiati in materiali schermanti per indumenti radioprotettivi *[15]*.

Elemento	Z	Densità (g/cm^3)	Bordo K (keV)	Osservazione tecnica
Cd	48	8.65	26.7	Assorbitore a Z intermedio; limitazioni tossicologiche
In	49	7.31	27.9	Bordo K nel basso intervallo diagnostico
Sn	50	7.30	29.2	Usato in materiali compositi leggeri
Sb	51	6.69	30.5	Strato low-Z in combinazioni bistrato
Cs	55	1.87	36.0	Densità bassa, uso pratico limitato
Ba	56	3.50	37.4	Spesso come BaSO4 nei materiali non Pb
Ce	58	6.66	40.4	Bordo K intermedio
Gd	64	7.90	50.2	Efficace in parte dello spettro diagnostico
W	74	19.3	69.5	Alta densità; utile ma con possibili righe caratteristiche
Pb	82	11.36	88.0	Riferimento storico per equivalenza
Bi	83	9.75	90.5	Alternativa ad alto Z meno problematica del Pb

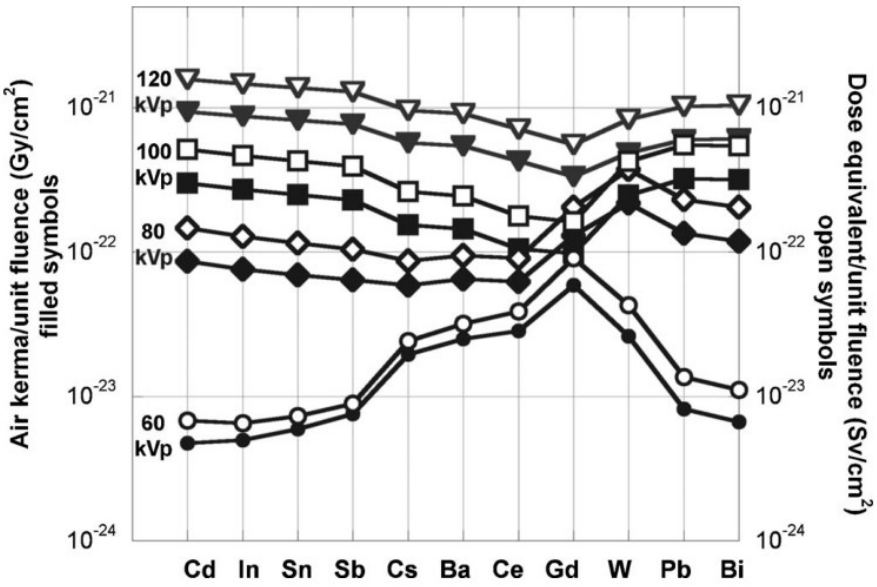


Figura 2-2: Air kerma trasmesso e dose equivalente ambientale calcolati attraverso 0,568 g/cm² di differenti elementi *[15]*.

La figura 2-2 conferma che l'ottimizzazione non consiste nello scegliere sempre l'elemento più pesante. A seconda del kVp, elementi con bordo K posizionati in modo favorevole possono ridurre il kerma o la dose equivalente più efficacemente per unità di massa rispetto ad altri. [15].

Per unire l'efficacia a bassi kVp degli elementi a basso Z e quella ad alti kVp di quelli ad alto Z si è pensato di creare **materiali metallici bistrato** inseriti in elastomeri. L'ordine degli strati è fondamentale in quanto lo strato ad alto Z a valle può assorbire parte della fluorescenza generata dallo strato a Z più basso, migliorando l'attenuazione a parità di massa. I materiali di maggiore interesse di studio sono riportati nella tabella 2-6 [28].

Tabella 2-6 Materiali metallici/elastomerici considerati per bilayer non Pb *[28]*.

Polvere metallica	Z	Densità metallo (g/cm^3)	Densità foglio metallo/elastomero (g/cm^3)	Bordo K (keV)
Antimonio (Sb)	51	6.69	3.24 +/- 0.11	30.5
Bario (Ba)	56	3.50	N/A	37.4
Tungsteno (W)	74	19.3	6.54 +/- 0.18	69.5
Bismuto (Bi)	83	9.75	4.51 +/- 0.17	90.5

In figura 2-3 sono riportate le analisi di kerma trasmesso dalle configurazioni metalliche bistrato a confronto con una schermatura a piombo. I punti al di sotto della linea orizzontale indicano configurazioni capaci di fornire attenuazione equivalente o migliore rispetto a 0,5 mm Pb con massa inferiore. Le curve mostrano che esiste una composizione ottima e che questa dipende dall'intensità del fascio. Il concetto è direttamente trasferibile alla progettazione di schermature leggere: la sequenza degli strati può essere tanto importante quanto la somma delle masse [28].

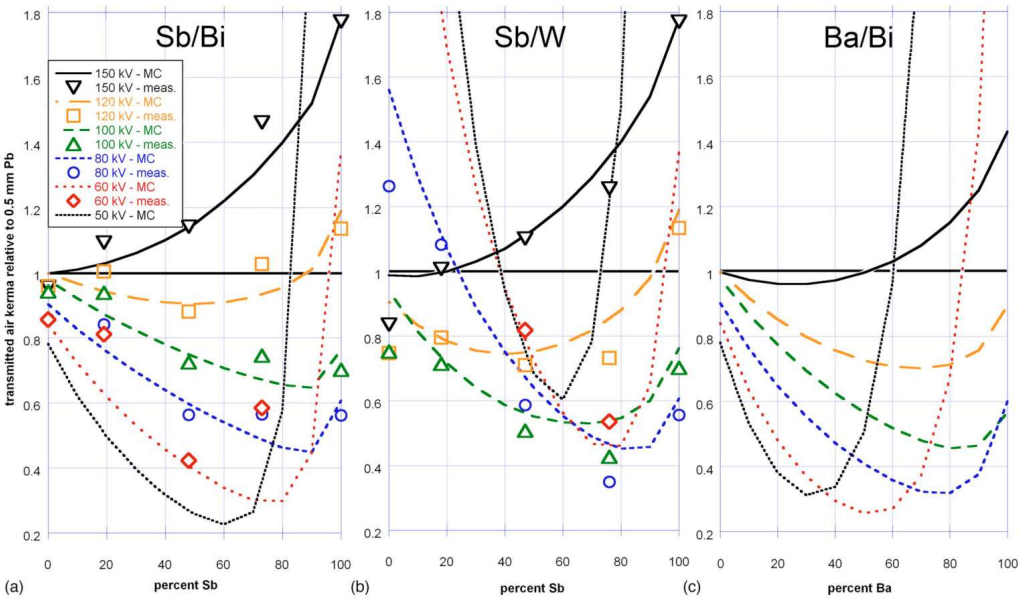


Figura 2-3: Kerma in aria trasmesso relativo a 0,5 mm Pb per bilayer Sb/Bi, Sb/W e Ba/Bi in funzione della percentuale del materiale a Z più basso *[28]*.

La figura 2-4 mostra la trasmissione al variare dello spessore espresso in g/cm². L'uso della densità areale è particolarmente adatto al confronto tra materiali per indumenti o schermi mobili, perché separa il problema della geometria da quello della massa. Le curve indicano che bismuto e bilayer opportunamente configurati possono avvicinarsi o superare le prestazioni di alcuni materiali Pb-based nel campo IR, ma il risultato resta legato allo spettro, alla geometria e all'inclusione della fluorescenza [25].

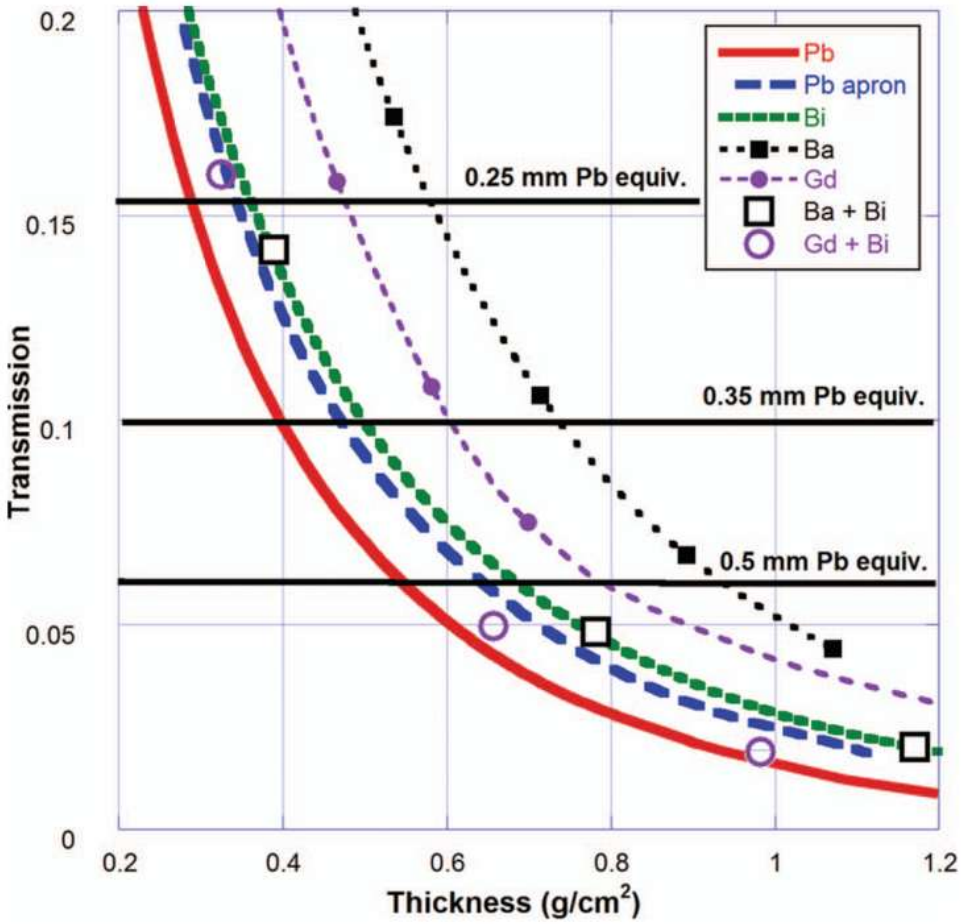


Figura 2-4: Trasmissione in funzione dello spessore espresso come densità areale per Pb, materiali Pb-free e bistrato *[25]*.

Nella radiologia interventistica la schermatura deve essere progettata tenendo conto della geometria del raggio utilizzata. La differenza tra narrow beam e broad beam diventa rilevante, perché nel caso di broad beam la fluorescenza caratteristica e lo scatter possono raggiungere il rivelatore o l'operatore. L'utilizzo di materiali mostrati nella tabella 2-7 può risultare come alternativa valida al piombo, ma la geometria di misura cambia sensibilmente il risultato e, di conseguenza, la bontà dell'analisi [25].

Tabella 2-7 Composti non Pb citati per la schermatura in radiologia interventistica *[25]*.

Composto / materiale	Formula chimica	Elemento schermante principale	Frazione in massa dell'elemento metallico riportata	Ruolo schermante
Ossido di bismuto	Bi_2O_3	Bi	circa 90%	Alta attenuazione fotonica; alternativa al Pb
Ossido di gadolinio	Gd_2O_3	Gd	circa 87%	Efficace in specifiche regioni dello spettro diagnostico
Solfato di bario	$BaSO_4$	Ba	circa 59%	Componente low-Z/intermedio in bilayer con Bi_2O_3
Bilayer Ba + Bi	$BaSO_4$ + Bi_2O_3	Ba e Bi	dipende dagli strati	Riduzione della fluorescenza e miglioramento per massa
Bilayer Gd + Bi	Gd_2O_3 + Bi_2O_3	Gd e Bi	dipende dagli strati	Attenuazione combinata su più intervalli energetici

Un altro tema riguarda la schermatura del paziente. Storicamente si sono utilizzati schermi gonadici o protezioni locali in piombo, ma l'uso non è sempre semplice perché una protezione mal posizionata può nascondere l'area da diagnosticare o interferire con sistemi automatici di controllo dell'esposizione. Per questo, la tendenza moderna è valutare caso per caso il rapporto tra riduzione della dose, qualità d'immagine e rischio di ripetizione [29].

I dati mostrati nella tabella 2-8 indicano che più strati di **bismuto** riducono progressivamente la dose misurata, ma lo stesso studio segnala che le immagini con tre o quattro strati non risultano diagnostiche per tutti i criteri considerati [29].

Tabella 2-8 Riduzione di dose con schermature al bismuto in radiografia pelvica pediatrica *[29]*.

Posizione	Tipo di schermatura	Dose (uSv)	Riduzione vs non schermato	Riduzione Bi vs Pb
Non schermato	Nessuna protezione	149.29 +/- 0.95	NA	NA
Ovaio	Pb 0.5 mm Pb eq.	48.60 +/- 0.74	67.45%	NA
Gonade AP	Bi 0.06 mm Pb eq.	35.26 +/- 0.09	76.38%	27.45%
Gonade AP	Bi 0.12 mm Pb eq.	23.88 +/- 0.00	84.01%	50.87%
Gonade AP	Bi 0.18 mm Pb eq.	3.99 +/- 0.05	97.33%	91.80%
Gonade AP	Bi 0.24 mm Pb eq.	0.99 +/- 0.04	99.34%	97.96%
Gonade AP e laterale	Bi 0.06 mm Pb eq.	39.03 +/- 0.81	73.85%	19.69%
Gonade AP e laterale	Bi 0.12 mm Pb eq.	28.28 +/- 0.63	81.06%	41.81%
Gonade AP e laterale	Bi 0.18 mm Pb eq.	20.16 +/- 0.56	86.50%	58.52%
Gonade AP e laterale	Bi 0.24 mm Pb eq.	3.47 +/- 0.05	97.68%	92.86%

Dal punto di vista progettuale, le barriere fisse delle sale mediche possono essere considerate l'analogo sanitario delle schermature strutturali usate in altri settori. Esse devono proteggere aree occupate, corridoi, locali adiacenti e postazioni di comando, tenendo conto della direzione del fascio, della frequenza d'uso e della probabilità di presenza delle persone. Nella pratica clinica la progettazione delle barriere si combina con le misure operative quali la collimazione, la filtrazione, la scelta dei parametri di esposizione, la riduzione del numero di acquisizioni e la verifica periodica delle prestazioni [26].

Le schermature trasparenti, come **vetri piombati** o **vetri ad alto contenuto di ossidi pesanti**, rispondono a una necessità specifica della medicina: osservare il paziente o il processo mantenendo una barriera. In diagnostica e interventistica questa funzione è svolta da vetri piombati e schermi sospesi, mentre in medicina

nucleare e in radiofarmacia da finestre schermanti integrate in celle o L-block. Il requisito ottico si aggiunge quindi a quelli radiologici e meccanici, rendendo il materiale più vincolato rispetto a una barriera opaca [26].

I controlli di qualità dei dispositivi schermanti sono un ulteriore elemento indispensabile. I grembiuli piombati o Pb-free sono soggetti a pieghe, crepe e usura meccanica; la loro prestazione può degradare localmente anche se il valore nominale resta invariato. La verifica mediante ispezione visiva, palpazione e immagini fluoroscopiche permette di identificare difetti che andrebbero a degradare le prestazioni della protezione ed ad aumentare il rischio per l'operatore. Un'analoga filosofia va seguita per tutte le protezioni viste [24].

Una lezione ingegneristica che il settore medico offre alla progettazione di un rover lunare è la centralità della massa areale. Nei DPI medici la massa è un vincolo ergonomico; in un rover è un vincolo di lancio, mobilità e bilancio strutturale. Le curve di trasmissione in funzione di g/cm² ed i confronti tra materiali equivalenti al piombo mostrano che non ha senso parlare di materiale schermante senza specificare lo spettro incidente, la geometria e la dose o grandezza operativa che si vuole ridurre [25].

Una seconda indicazione riguarda l'ottimizzazione multistrato. I bilayer non Pb dimostrano che due materiali, se disposti con ordine corretto, possono superare il comportamento di uno strato singolo a parità di funzione [28]. Per un rover pressurizzato questo suggerisce di non cercare un unico materiale universale, ma una sequenza funzionale: strati strutturali, materiali idrogenati per particelle cariche e neutroni secondari, eventuali additivi ad alto Z solo dove servono per fotoni secondari o componenti elettronici

Infine, il settore medico evidenzia il rischio di usare metriche troppo sintetiche. L'equivalenza al piombo è utile come linguaggio commerciale e normativo, ma non garantisce una prestazione uniforme al variare del kVp, dello spettro e della geometria [15]. Allo stesso modo, nel caso lunare, un singolo valore di spessore equivalente non sarebbe sufficiente: occorre valutare dose assorbita, dose equivalente, radiazione secondaria, massa, volume, invecchiamento, manutenzione e compatibilità con le operazioni del rover.

In sintesi, il settore medico mostra che la schermatura dalle radiazioni non può essere separata dal workflow. Uno schermo che pesa troppo non viene indossato correttamente, uno schermo che nasconde l'informazione diagnostica genera ripetizioni, uno schermo fisso mal posizionato lascia passare radiazione diffusa e uno schermo non controllato può degradare senza essere notato. Questo è un punto chiave per un rover pressurizzato: la protezione deve essere progettata insieme alle operazioni di missione, ai vincoli di massa e alla manutenzione possibile [9] [25]. Nella tabella 2-9 è riportata una sintesi delle soluzioni usate in campo medico con relativi vantaggi e svantaggi nella loro applicazione in campo aerospaziale.

Tabella 2-9 Sintesi delle soluzioni di schermatura medica e possibile trasferibilità al caso di un rover pressurizzato *[9] [15] [25]*.

Soluzione medica	Vantaggio	Limite	Indicazione utile per rover
Piombo / vetro piombato	Alta attenuazione fotoni X e gamma a bassa-media energia	Massa, tossicità, fluorescenza e scarsa ergonomia	Usabile solo localmente o per componenti specifici
Materiali non Pb ad alto Z	Riduzione massa e tossicità rispetto al Pb	Prestazione fortemente dipendente dallo spettro	Valutare K-edge e produzione di secondari
Bilayer	Ottimizzazione per massa e spettro	Progetto sensibile a ordine e composizione	Approccio promettente per architetture multistrato
Schermi mobili / locali	Protezione adattiva vicino alla sorgente	Copertura non sempre continua	Utile come concetto di storm shelter o zone più protette
Ottimizzazione operativa	Riduce dose senza aggiungere massa	Richiede procedure e monitoraggio	Fondamentale per missioni EVA e gestione SPE

2.2 Settore energetico nucleare

Nelle centrali nucleari la protezione dalle radiazioni non rappresenta un elemento accessorio dell'impianto, ma una funzione progettuale che deve essere integrata fin dalle prime fasi di concezione, durante la costruzione, la messa in servizio, lungo la vita operativa fino al decommisionamento. L'IAEA indica che l'impianto deve essere progettato per proteggere il personale del sito, la popolazione e l'ambiente dai rischi radiologici in condizioni operative, incidentali e di smantellamento. Questa impostazione rende il settore nucleare uno dei casi industriali più completi per lo studio delle schermature, perché combina sorgenti intense, campi misti, geometrie complesse e requisiti di accessibilità per gli operatori [16].

Dal punto di vista ingegneristico, la schermatura in una centrale è solo una parte di una strategia più ampia. Il controllo della dose si ottiene mediante la combinazione di barriere fisiche, configurazione del layout, controllo della contaminazione, ventilazione, monitoraggio radiologico, gestione delle sorgenti e organizzazione del lavoro. La stessa IAEA sottolinea che una radioprotezione efficace deriva dalla combinazione di buon progetto, di costruzioni di qualità ed una corretta conduzione dell'impianto. Analogamente, gli studi sulla gestione della dose evidenziano che la riduzione dell'esposizione richiede il coordinamento tra progettisti, esercizio, manutenzione, chimica, radioprotezione e management [16] [30].

Il principio guida resta quello dell'ottimizzazione della protezione. Secondo l'ICRP, le dosi devono essere mantenute al livello più basso ragionevolmente ottenibile, tenendo conto dei vincoli tecnici, economici e sociali, e non devono essere interpretate esclusivamente come un confronto passivo con un limite numerico. Nelle centrali nucleari questo principio si traduce nella progettazione di schermature permanenti, nell'uso limitato ma pianificato di schermature temporanee, nella riduzione dei tempi di permanenza in zona controllata, nella remotizzazione di alcune attività e nella riduzione della sorgente radiologica dove possibile [9] [30].

La peculiarità del settore nucleare, rispetto ad ambiti come la radiologia medica o l'aerospazio, è la possibilità di impiegare masse e spessori elevati. Le strutture schermanti possono quindi includere calcestruzzi ordinari o pesanti, acciaio, acqua, piombo, tungsteno e materiali borati, senza i vincoli di massa estremamente severi tipici di un veicolo spaziale. Tuttavia, la massa disponibile non elimina il problema progettuale: le schermature devono convivere con vincoli strutturali, termici, sismici, di manutenzione, smaltimento, ispezionabilità, corrosione e decontaminazione. La scelta del materiale deve quindi essere valutata insieme alla geometria dell'impianto, alla natura della radiazione ed alla frequenza di occupazione delle aree dell'impianto [16].

La progettazione radiologica di una centrale parte dall'identificazione delle sorgenti. L'IAEA richiede che magnitudine, posizione, meccanismi di trasporto e vie di propagazione delle sorgenti siano determinati in fase di progetto. Le principali sorgenti comprendono il nocciolo del reattore, il vessel e gli internals attivati, il refrigerante primario e i sistemi associati, il combustibile irraggiato, i sistemi di trattamento dei rifiuti, le resine esauste, le strutture di ventilazione e le sorgenti sigillate eventualmente usate per controlli non distruttivi. Questa mappatura è necessaria per definire quali sorgenti richiedono schermature permanenti, quali richiedono misure operative e quali diventano critiche durante la manutenzione o durante il decommisionamento. Il caso delle centrali nucleari mostra inoltre che la schermatura non può essere progettata soltanto per il funzionamento nominale a piena potenza. Durante le fermate programmate, l'apertura di circuiti, la rimozione di componenti, il trasferimento di combustibile, le ispezioni e la manutenzione si rischia di modificare la distribuzione delle sorgenti e di aumentare l'esposizione occupazionale. Per questo motivo l'IAEA raccomanda di valutare le condizioni radiologiche anche durante l'accensione, lo spegnimento e il decommisionamento, includendo lo spazio necessario per installare schermature temporanee, piattaforme aeree e percorsi di accesso a bassa dose [16].

Nel funzionamento reale degli impianti, una parte importante della dose occupazionale non è associata alla sola sorgente primaria del nocciolo, ma ai radionuclidi prodotti per attivazione e poi trasportati e depositati nei circuiti. Gli studi sulla gestione della dose nelle centrali indicano che la riduzione dei campi radiologici passa attraverso il controllo delle sorgenti di cobalto, la precondizione dei componenti sostitutivi, la chimica del circuito primario, la chimica di accensione e spegnimento, la decontaminazione chimica, la minimizzazione dei difetti di combustibile e l'impiego di filtri fini [30].

2.2.1 Tipologia di radiazione

La tipologia di radiazione prevalente nelle centrali nucleari è costituita da campi misti di fotoni gamma e neutroni. Le particelle alfa e beta sono presenti in numerosi decadimenti radioattivi, ma hanno minore capacità di penetrazione e diventano rilevanti soprattutto come rischio di contaminazione interna o superficiale. Per il dimensionamento delle schermature strutturali, invece, l'attenzione principale è rivolta ai raggi gamma e ai neutroni, perché sono le componenti che possono attraversare spessori significativi di materiale e contribuire alla dose nelle aree accessibili [31].

- I fotoni gamma in un reattore nucleare hanno origini diverse. Possono essere prodotti direttamente nei processi di fissione, nel decadimento dei prodotti di fissione, nell'attivazione neutronica dei materiali strutturali e nelle reazioni di cattura neutronica. La review sulla progettazione di schermature per reattori distingue infatti i gamma primari emessi dalla fissione, i gamma primari dovuti al decadimento dei radionuclidi e i gamma secondari prodotti nelle strutture per cattura neutronica. Questa distinzione è importante perché una schermatura efficace contro i neutroni può generare a sua volta fotoni secondari che devono essere attenuati [31].
- I neutroni derivano principalmente dalla fissione. Essi possono uscire dal nocciolo, interagire con il refrigerante, il moderatore, il vessel, il calcestruzzo biologico e le componenti metalliche, producendo fenomeni di scattering, moderazione, cattura e attivazione. La loro efficacia biologica e la loro capacità di produrre radiazione secondaria dipendono fortemente dall'energia; per questo, nella progettazione schermante, non basta conoscere il flusso totale, ma occorre considerare lo spettro energetico, distinguendo neutroni veloci, epitermici e termici [31] [32].

La schermatura neutronica deve rispondere a due meccanismi fisici successivi. I neutroni veloci devono essere rallentati mediante urti elastici e anelastici, preferibilmente con nuclei leggeri e molecole ricche di idrogeno, come acqua, polietilene o alcuni calcestruzzi idrati; una volta moderati, i neutroni termici devono essere assorbiti da nuclidi con elevata sezione d'urto, come boro, gadolinio o cadmio. L'assorbimento, tuttavia, può emettere raggi gamma di cattura; quindi, la configurazione finale richiede spesso una combinazione di materiali moderanti, assorbenti e attenuatori gamma [32] [31].

La radiazione gamma richiede criteri diversi. L'attenuazione dei fotoni è favorita da materiali ad alta densità e alto numero atomico, poiché le interazioni principali, cioè effetto fotoelettrico, diffusione Compton e produzione di coppie, dipendono dall'energia del fotone e dalla composizione del materiale. Parametri come l'intensità di un fascio stretto riportato nell'equazione 2.1, coefficiente di attenuazione lineare, coefficiente di attenuazione massico, mean free path (MFP), half value layer (HVL) riportato nell'equazione 2.2 e tenth value layer (TVL), equazione 2.3, sono comunemente usati per confrontare materiali e spessori, riportati nella tabella 2-10 [33].

$$I(x) = I_0 \, e^{(-\mu_l \, x)} \tag{2.1}$$

Mentre

$$HVL = ln(2)/\mu_l \quad (2.2)$$

$$TVL = ln(10)/\mu_l \quad (2.3)$$

Tabella 2-10 Dati di riferimento per materiali comuni schermanti raggi gamma: densità e HVL per Co-60 *[33]*.

Materiale	Densità (g/cm^3)	HVL Co^{60} (cm)	Nota
Acqua	1.00	18	Misurato
Alluminio	2.70	6.8	Estratto
Ferro	7.86	2.2	Misurato
Rame	8.96	1.9	Estratto
Bismuto	9.8	1.4	Estratto
Piombo	11.34	1.2	Misurato
Tungsteno	19.3	0.8	Misurato
TFlex-Fe	2.8	6.5	50% riduzione dose
TFlex-50	3.8	4.4	50% riduzione dose
TFlex-Bi	4.7	2.9	50% riduzione dose
TFlex-W	7.2	2.2	50% riduzione dose

Nella centrale, le sorgenti gamma non sono statiche. Un contributo importante deriva dai prodotti di corrosione attivati, come Co^{58}, Co^{60}, Mn^{54}, Fe^{59}, Cr^{51}, Ag^{110}, Sb^{124}, Sb^{125}, Zr^{95} e Nb^{95}, che possono depositarsi sulle superfici fuori dal nocciolo e contribuire alla crescita dei campi di dose durante gli anni di esercizio. Il rapporto NEA sulla chimica del circuito primario evidenzia che, in assenza di difetti significativi del combustibile, i prodotti di corrosione attivati possono dominare il source term per la dose occupazionale durante i periodi in cui l'impianto è spento [34].

Il Co^{60} è particolarmente rilevante per la radioprotezione, perché deriva dall'attivazione del Co_{59} che decade emettendo due gamma di energia relativamente elevata; il Co_{58} deriva invece dall'attivazione del Ni^{58} ed è un elemento che contribuisce in maniera rilevante nei reattori ad acqua pressurizzata, soprattutto in relazione ai materiali a base nichel. La presenza di questi radionuclidi spiega l'interesse operativo verso la riduzione del cobalto nei materiali, la scelta di leghe a basso contenuto di impurità attivabili ed il controllo della corrosione dei componenti del circuito primario [34].

Un'altra sorgente rilevante è l'attivazione del refrigerante. Il rapporto NEA distingue tra i prodotti di fissione, i prodotti di attivazione del refrigerante ed i prodotti di corrosione attivati. Tra i prodotti del refrigerante, il N^{16}, con breve emivita e gamma

energetici, può costituire una sorgente significativa quando il reattore è in potenza. Questa differenza temporale tra sorgenti a breve e a lungo termine è un elemento centrale nella progettazione del monitoraggio e delle schermature [34] [16].

Le particelle beta e alfa richiedono una trattazione distinta. Le beta hanno una penetrazione limitata rispetto ai gamma, ma possono generare bremsstrahlung (radiazione di frammentazione) se schermate con materiali ad alto numero atomico e diventano importanti per la dose alla pelle o per la contaminazione superficiale. Le alfa sono facilmente arrestate esternamente, ma sono molto rilevanti se radionuclidi alfa-emettitori vengono inalati o ingeriti [16].

Durante il decommisionamento cambia la natura della sorgente. Non si considera più soltanto il campo radiativo prodotto dal nocciolo in esercizio, ma i materiali attivati in profondità vicino al reattore e le contaminazioni superficiali o interne in tubazioni, serbatoi, sistemi di trattamento e aree che sono state in contatto con fluidi radioattivi. L'IAEA indica che queste sorgenti devono essere caratterizzate singolarmente nella pianificazione radiologica dello smantellamento, perché governano le schermature temporanee, il confezionamento e la gestione dei rifiuti [16].

La compresenza di gamma e neutroni rende il problema diverso da una semplice attenuazione monoenergetica. Un materiale denso può essere efficace contro i fotoni ma poco adatto a moderare neutroni veloci; un materiale idrogenato può moderare bene ma non assorbire sufficientemente i neutroni termici e può richiedere additivi borati; un assorbitore neutronico può generare gamma secondari; infine, le penetrazioni per tubazioni, cavi e accessi possono creare flussi nel campo radioattivo. Per questa ragione le schermature nucleari sono spesso multilayer o composite, con funzioni fisiche differenziate [31] [35].

In sintesi, la tipologia radiativa delle centrali nucleari può essere descritta come un campo misto, spazialmente e temporalmente variabile, dominato da gamma e neutroni per la schermatura strutturale, ma accompagnato da rischi di contaminazione alfa e beta in specifiche operazioni. La scelta della schermatura deve quindi essere guidata non solo dal tipo di radiazione, ma anche dalla sua energia, dalla geometria della sorgente, dal tempo di occupazione, dalla possibilità di accesso, dalla produzione di secondari e dall'evoluzione del source term lungo la vita dell'impianto [16] [31].

2.2.2 Materiali e tecnologie

Lo stato dell'arte della protezione radiologica nelle centrali nucleari può essere analizzato su due livelli complementari: da un lato le tecniche consolidate di progettazione e gestione della dose assorbita, dall'altro lo sviluppo di materiali e metodi computazionali sempre più specializzati. Le centrali moderne non si basano su un singolo materiale schermante universale, ma su una combinazione di layout, barriere permanenti, schermature locali, controllo dalla sorgente, monitoraggio e procedure ALARA. Questa visione sistemica è coerente sia con le guide IAEA sia con le analisi operative sulla gestione della dose assorbita [16] [30].

Le schermature permanenti costituiscono la soluzione preferenziale per le sorgenti prevedibili e stabili, come il nocciolo, il vessel, il combustibile irraggiato e alcuni sistemi ad alta radioattività. La schermatura permanente è indicata come parte

integrante del progetto e le schermature temporanee dovrebbero essere evitate quando non necessarie. Dove non è possibile installare schermature permanenti, il progetto deve prevedere spazi di deposito, telai e supporti per ridurre i tempi di movimentazione e di installazione [16].

Il dimensionamento di una schermatura richiede la definizione di un target di dose rate coerente con la frequenza e la durata dell'occupazione dell'area. Devono inoltre essere considerate le incertezze sulla sorgente, l'accumulo di radionuclidi nel corso della vita dell'impianto e gli effetti delle penetrazioni nelle tubazioni, nei cavi o negli accessi. La progettazione procede in modo iterativo: si valuta una schermatura ideale senza penetrazioni, poi si introducono geometrie realistiche e percorsi preferenziali, verificando che l'efficacia resti nei limiti imposti [16].

La scelta del materiale schermante dipende dalla natura del campo radiativo, ma non solo. L'IAEA elenca i criteri che vanno oltre l'attenuazione: scattering, assorbimento, produzione di radiazione secondaria, attivazione, proprietà chimiche e termiche, stabilità meccanica, compatibilità, tossicità, decontaminabilità, resistenza alle radiazioni, smaltibilità, spazio disponibile, peso e modalità di installazione. Di conseguenza, il materiale migliore dal punto di vista nucleare non coincide necessariamente con la soluzione migliore dal punto di vista impiantistico [16].

Il **calcestruzzo** è il materiale schermante strutturale più diffuso nelle centrali perché combina costo relativamente contenuto, funzione portante, possibilità di realizzare grandi spessori e capacità di attenuare sia i raggi gamma sia i neutroni. Nei reattori, il calcestruzzo biologico è spesso usato come schermatura bulk all'esterno del reattore o attorno a sorgenti estese. Tuttavia, la sua efficacia dipende da molteplici fattori quali: dalla densità, dal contenuto d'acqua, dalla composizione degli aggregati e dalla presenza di elementi capaci di assorbire neutroni termici [16] [36].

Gli studi sul calcestruzzo modificato con ematite, la cui composizione chimica è mostrata in tabella 2-11, mostrano bene la differenza tra schermatura gamma e schermatura neutronica. L'aggiunta di ematite aumenta la densità e migliora l'attenuazione gamma e la resistenza meccanica, ma non produce necessariamente un miglioramento analogo nell'assorbimento dei neutroni. Questo risultato conferma che aumentare la densità non è sufficiente per ottimizzare la schermatura neutronica, perché la moderazione e l'assorbimento dipendono dalla composizione nucleare del materiale [37].

Tabella 2-11 Composizione chimica dell'ematite utilizzata come aggregato per calcestruzzi schermanti *[37]*.

Costituente dell'ematite	Percentuale in massa (%)
Fe_2O_3	81.13
MnO	0.14
MgO	1.55
TiO_2	0.03
Al_2O_3	0.57
CaO	4.80
SiO_2	4.20
Perdita al fuoco	5.82

Per i raggi gamma, i calcestruzzi pesanti e gli aggregati ad alta densità riducono l'HVL e quindi lo spessore necessario. Nel caso dei calcestruzzi ad alte prestazioni con fibre basaltiche arricchite in boro (BasBor) descritte nella tabella 2-12, diversi studi osservano che i coefficienti di attenuazione gamma aumentano principalmente con la densità del calcestruzzo, mentre l'aggiunta di fibre borate ha effetto trascurabile sulla schermatura gamma nelle percentuali studiate. Questo distingue chiaramente il ruolo della fase pesante da quello dell'assorbitore neutronico [38].

Tabella 2-12 Composizione della fibra basaltica e varianti BasBor impiegate nei calcestruzzi ad alte prestazioni *[38]*.

Parte	Composizione / contenuto
Fibra basaltica - SiO_2	49.68 wt%
Fibra basaltica - TiO_2	2.67 wt%
Fibra basaltica - $Al2O_3$	15.62 wt%
Fibra basaltica - FeO	11.72 wt%
Fibra basaltica - MgO	4.81 wt%
Fibra basaltica - CaO	8.29 wt%
Fibra basaltica - Na_2O	4.30 wt%
Fibra basaltica - K_2O	1.75 wt%
Fibra basaltica - P_2O_5 / S / Cl	0.90 / 0.04 / 0.02 wt%
BasBor12-1	12% B_2O_3; boro naturale: 19.8% B-10, 80.2% B-11
BasBor12-2	12% B_2O_3; boro arricchito: 70% B-10, 30% B-11
BasBor20-1	20% B_2O_3; boro naturale: 19.8% B-10, 80.2% B-11
BasBor20-2	20% B_2O_3; boro arricchito: 70% B-10, 30% B-11
Frazione volumetrica fibra	0%, 1%, 2%, 3% del volume totale

Per i neutroni, invece, gli stessi calcestruzzi con fibre basaltiche al boro mostrano un comportamento più selettivo. L'effetto è trascurabile per neutroni molto veloci, con energie superiori a 14 MeV, ma diventa significativo per spettri di fissione e per

spettri termalizzati come mostrato nelle figure 2-5, 2-6 e 2-7, rendendo il materiale potenzialmente utile per impianti con reattori veloci o moderati. Quindi, questi risultati suggeriscono che l'uso di fibre basaltiche borate all'interno del calcestruzzo può portare ad una riduzione dello spessore della protezione in alcuni contesti nucleari; tuttavia, l'aumento del contenuto di fibra non porta sempre benefici proporzionali [38].

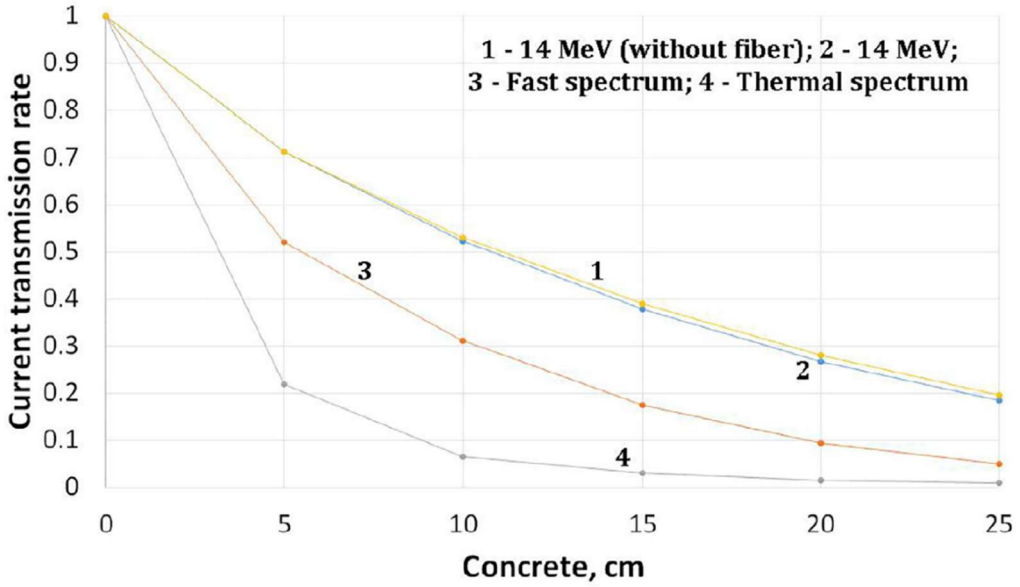


Figura 2-5: transmission rate per diversi spettri neutronici per il caso con BasBor12-1/3% *[38]*.

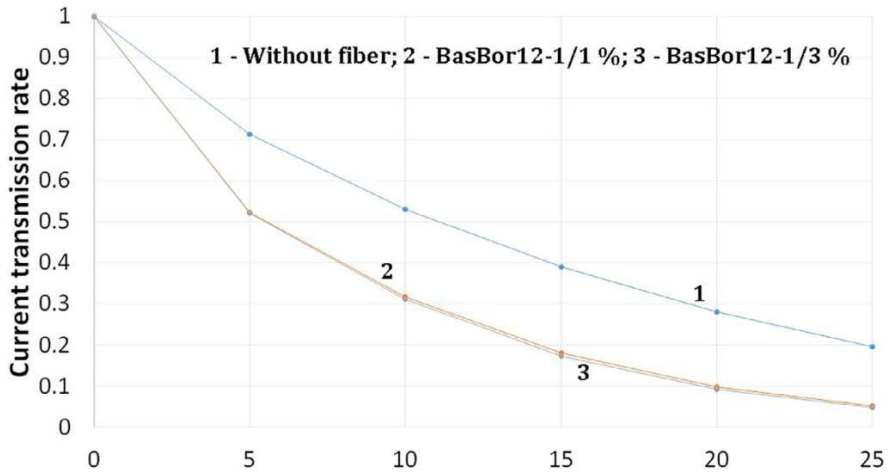


Figura 2-6: Tasso di trasmissione neutronica nel calcestruzzo con spettro veloce da fissione al variare dello spessore *[38]*.

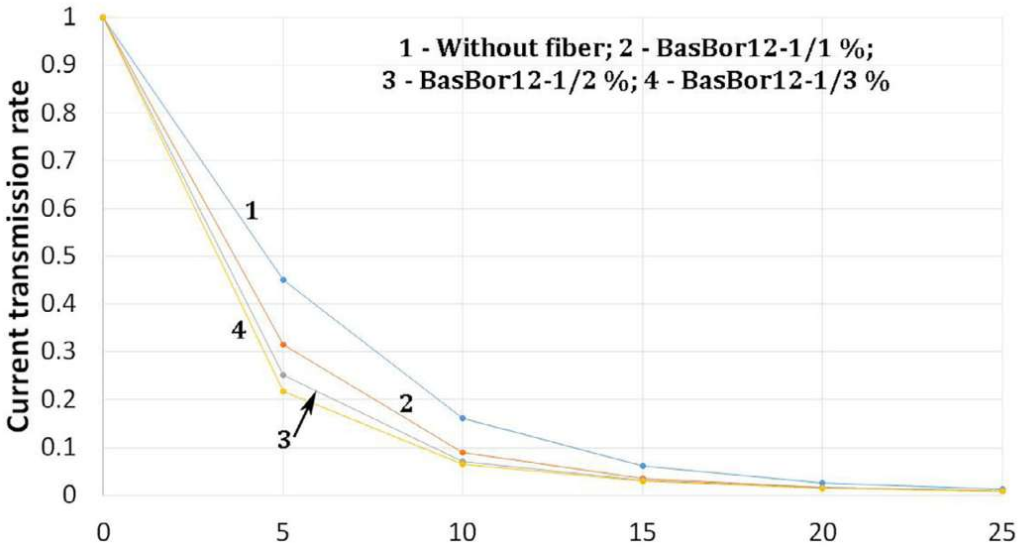


Figura 2-7: Tasso di trasmissione neutronica nel calcestruzzo con spettro termico al variare dello spessore *[38]*.

L'utilizzo di calcestruzzo con l'aggiunta di polimeri, di composti del boro e di ossido di gadolinio può aumentare significativamente l'assorbimento dei neutroni termici. In particolare, il calcestruzzo magnetico modificato con dispersione polimerica e Gd_2O_3 presenta un miglioramento rilevante della sezione d'urto macroscopica totale rispetto al calcestruzzo ordinario con campo magnetico non modificato [36].

L'**acqua** mantiene un ruolo storico e tecnologico importante. Nei reattori ad acqua leggera funge da refrigerante e moderatore, mentre nelle piscine del combustibile irraggiato agisce anche come schermatura. Il suo contenuto di idrogeno è efficace per rallentare i neutroni, ma l'acqua non è un assorbitore neutronico forte senza additivi; inoltre, per fotoni gamma intensi sono necessari spessori significativi. La sua utilità nasce quindi dalla combinazione tra moderazione, raffreddamento, trasparenza operativa e facilità di movimentazione del combustibile [16] [31].

Acciaio, piombo e **tungsteno** sono impiegati quando serve alta densità, robustezza o schermature compatte. Il piombo è molto efficace per fotoni in banda X e gamma, ma presenta problemi di massa, tossicità, proprietà meccaniche e compatibilità con alcune condizioni di impianto. Il tungsteno offre densità elevata e buona resistenza termica, ma è costoso e difficile da lavorare. L'acciaio può svolgere insieme le funzioni strutturali e schermanti, ma per i neutroni deve essere integrato con materiali moderanti o assorbenti [33] [31].

Il **carburo di tungsteno** è stato proposto come soluzione compatta per la schermatura primaria di piccoli reattori modulari. Sfruttando l'alta densità e la presenza di carbonio per ottenere un compromesso tra attenuazione di fotoni e neutroni veloci. L'esempio di progetto riportato nella tabella 2-13 riporta lo spessore e la massa necessari per ottenere un rateo massimo di dose di 3 mSv/h dopo 83 minuti dallo shutdown di piccoli reattori, mostrando il potenziale ma anche la massa

ancora molto elevata di soluzioni compatte per reattori, mentre in figura 2-8 è riportato il rapporto di attenuazione confermandone l'efficacia [39].

Tabella 2-13 Composizioni e risultati di progetto per schermature compatte in Pb, Bi, W, WC e combinazioni WC-Pb/WC-PbBi *[39]*.

Materiale	Composizione	Densità (g/cm^3)	Spessore di progetto (cm)	Massa (MT)
Pb	100% Pb	11.35	36	155
Bi	100% Bi	9.78	41	155
PbBi	55.5% Pb / 44.5% Bi	10.44	38	155
W	100% W	19.35	23	160
WC	93.80% W / 6.19% C	15.63	28	166
WC+PbBi1	92.75% WC / 7.25% PbBi	14.41	30	142
WC+PbBi2	83.95% WC / 16.05% PbBi	13.97	31	144
WC+Pb1	83.96% WC / 16.04% Pb	14.15	31	148
WC+Pb2	92.17% WC / 7.83% Pb	14.50	30	147

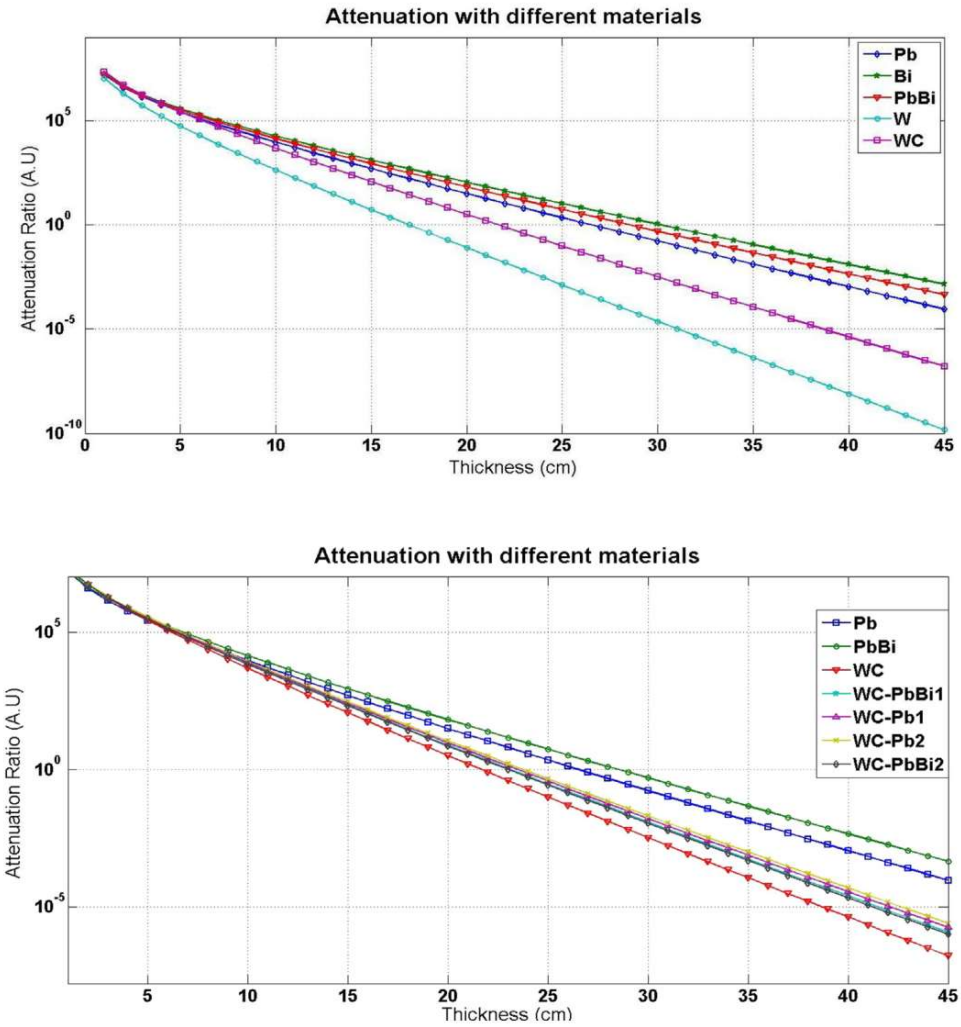


Figura 2-8: Rapporto di attenuazione al variare dello spessore per materiali omogenei e combinazioni WC-Pb/WC-PbBi *[39]*.

Nei laboratori caldi o in alcune aree di manipolazione e ispezione, è necessario osservare il processo mantenendo la protezione radiologica, quindi, servono delle schermature trasparenti. I **vetri al piombo**, la cui composizione è riportata in tabella 2-14, sono tradizionalmente usati per la componente gamma per via dell'elevato numero atomico e della densità, ma la protezione da campi misti richiede l'aggiunta di elementi leggeri o assorbitori neutronici. Studi su vetri compositi al piombo, riportati nella figura 2-9, mostrano infatti la valutazione congiunta di attenuazione gamma, rimozione dei neutroni veloci e interazione con neutroni termici [40].

Tabella 2-14 Composizione dei vetri al piombo e densità dei campioni studiati *[40]*.

Composito	PbO (wt%)	Matrice residua riportata	Densità (g/cm^3)
Matrice vetrosa	0	0.802 SiO2 - 0.133 Na2O - 0.0442 CaO - 0.0152 Al2O3 - 0.0029 Fe2O3 - 0.0027 MgO	2.577
PbO 5%	5	95% matrice vetrosa base	2.678
PbO 10%	10	90% matrice vetrosa base	2.852
PbO 15%	15	85% matrice vetrosa base	3.023
PbO 25%	25	75% matrice vetrosa base	3.205

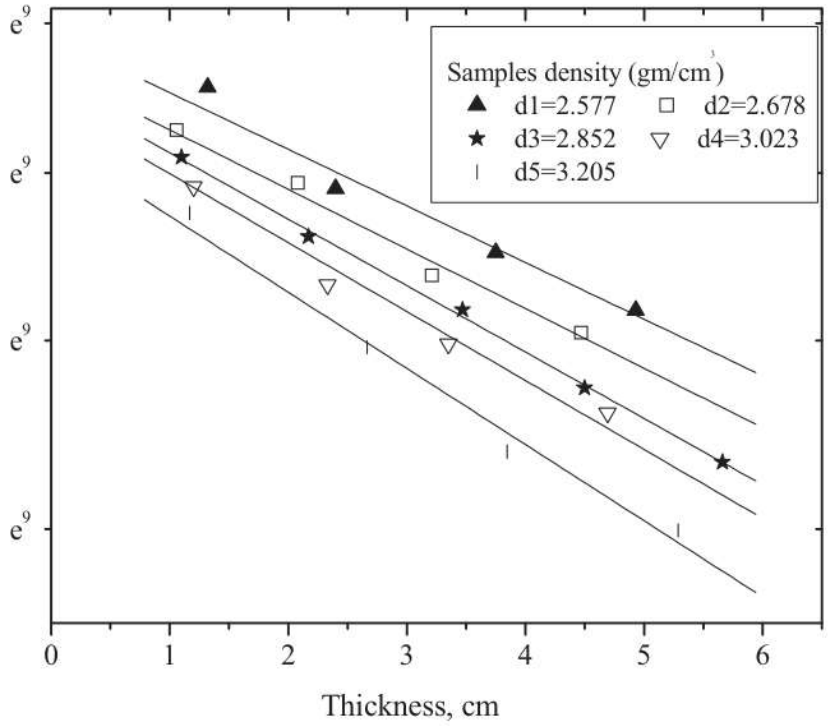


Figura 2-9: Flusso di neutroni lenti dietro vetri al piombo al variare dello spessore *[40]*.

Le famiglie di **vetri borati e bismutati** sono oggetto di ricerca come alternative parziali ai vetri al piombo. I sistemi B_2O_3-Bi_2O_3 o Bi_2O_3-BaO-B_2O_3, riportati in tabella 2-15, mostrano buone proprietà di attenuazione gamma grazie al bismuto e una potenziale utilità neutronica legata al boro. Alcuni studi confrontano coefficienti di attenuazione massici, HVL, TVL, mean free path, numero atomico efficace e sezioni di rimozione dei neutroni con risultati confrontabili se non identici a calcestruzzi borati. Sebbene non siano materiali bulk per grandi strutture di centrale, sono rilevanti per finestre schermanti, hot cells e componenti specializzati [41] [42].

Tabella 2-15 Composizione di vetri B_2O_3-Bi_2O_3 e Bi_2O_3-BaO-B_2O_3 per applicazioni di schermatura gamma *[41] [42]*.

Famiglia/campione	B_2O_3	Bi_2O_3	BaO	Densità (g/cm^3)
B1	80 mol%	20 mol%	-	4.302
B2	75 mol%	25 mol%	-	4.873
B3	70 mol%	30 mol%	-	5.379
B4	65 mol%	35 mol%	-	5.834
B5	57.5 mol%	42.5 mol%	-	6.441
G1	35 wt%	65 wt%	0 wt%	4.492
G2	33 wt%	65 wt%	2 wt%	4.502
G3	31 wt%	65 wt%	4 wt%	4.634
G4	29 wt%	65 wt%	6 wt%	4.691
G5	27 wt%	65 wt%	8 wt%	4.694
G6	25 wt%	65 wt%	10 wt%	4.942

Particolarmente rilevanti sono i materiali compositi, progettati per combinare in un'unica matrice funzioni diverse. La valutazione, figura 2-10, di compositi come **alluminio-boro carburo, tungsteno-boro carburo, vetro bismuto-borosilicato e Metathene**, riportati nella tabella 2-16, mostra che le prestazioni dipendono dall'energia dei neutroni e dalla produzione di radiazione secondaria. In generale, l'aumento del contenuto di assorbitori termici migliora le prestazioni nelle regioni termiche ed epitermiche, mentre componenti a basso numero atomico favoriscono la moderazione dei neutroni veloci [43].

Tabella 2-16 Frazioni elementari e densità dei compositi Al-B_4C, W-B_4C, Bi-BSi e Metathene *[43]*.

Composito	Elementi / frazioni in massa	Densità (g/cm^3)
Al-B_4C	Al 0.33; B^{10} 0.11; B^{11} 0.42; C 0.15	2.45
W-B_4C	W 0.77; B^{10} 0.04; B^{11} 0.14; C 0.05	15.34
Bi-BSi	Bi 0.58; O 0.23; Na 0.07; Si 0.06; Ca 0.03; B^{11} 0.02; Al 0.01; B^{10} 0.00	6.27
Metathene	H 0.04; B^{10} 0.09; B^{11} 0.38; C 0.49	1.60

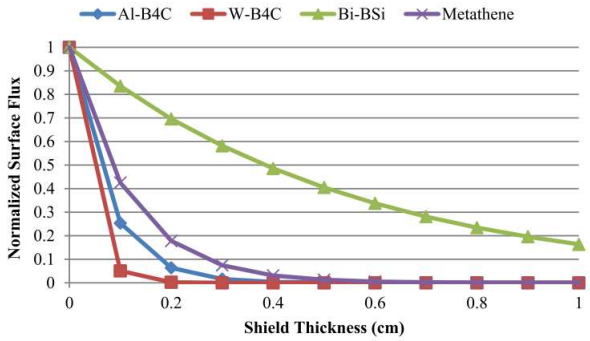


Fig. 3. Thermal regime neutron shielding performance.

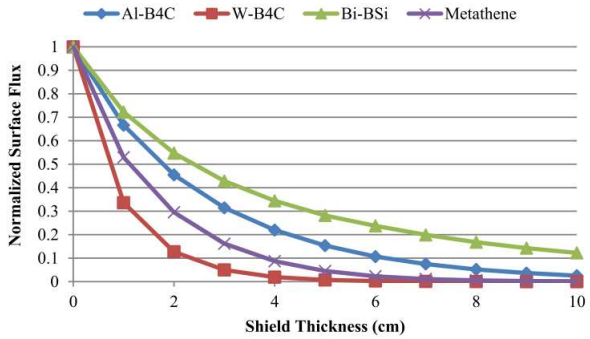


Fig. 4. Epi-thermal regime neutron shielding performance.

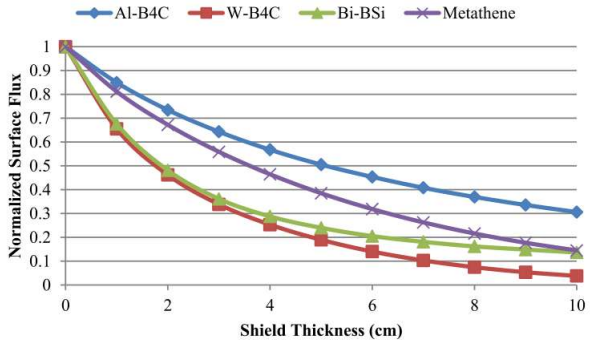


Fig. 5. Fast regime neutron shielding performance.

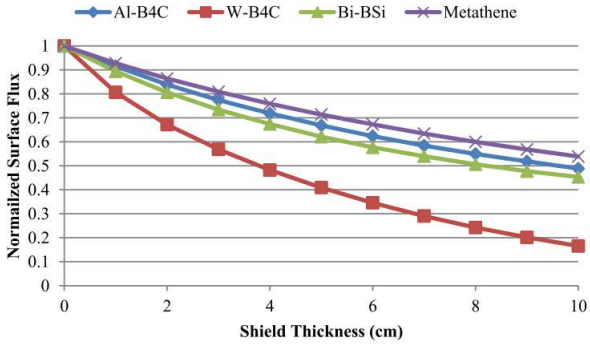


Fig. 6. High energy regime neutron shielding performance.

Figura 2-10: Flusso neutronico normalizzato al variare dello spessore per diversi regimi energetici *[43]*.

Compositi a base epossidica, le cui composizioni sono riportate nella tabella 2-17, fibre UHMWPE e particelle B_4C sono stati sviluppati per schermature leggere e flessibili, dove la matrice e le fibre idrogenate contribuiscono allo scattering dei neutroni e il B_4C all'assorbimento. Il carburo di boro è particolarmente rilevante perché il boro, soprattutto l'isotopo B^{10}, ha un'elevata sezione d'urto per neutroni termici. La figura 2-11 mostra che queste soluzioni sono interessanti per applicazioni locali, mobili o indossabili, ma nelle centrali tradizionali possono essere inserite come schermature supplementari [44].

Tabella 2-17 Composizione elementare dei compositi Spectra/Epoxy/B_4C *[44]*.

Campione	C	H	O	B	Densità (g/cm^3)
Spectra/Epoxy	0.809	0.107	0.085	-	1.828
Spectra/Epoxy/10% B_4C	0.782	0.103	0.076	0.039	1.858
Spectra/Epoxy/20% B_4C	0.755	0.100	0.068	0.078	1.888

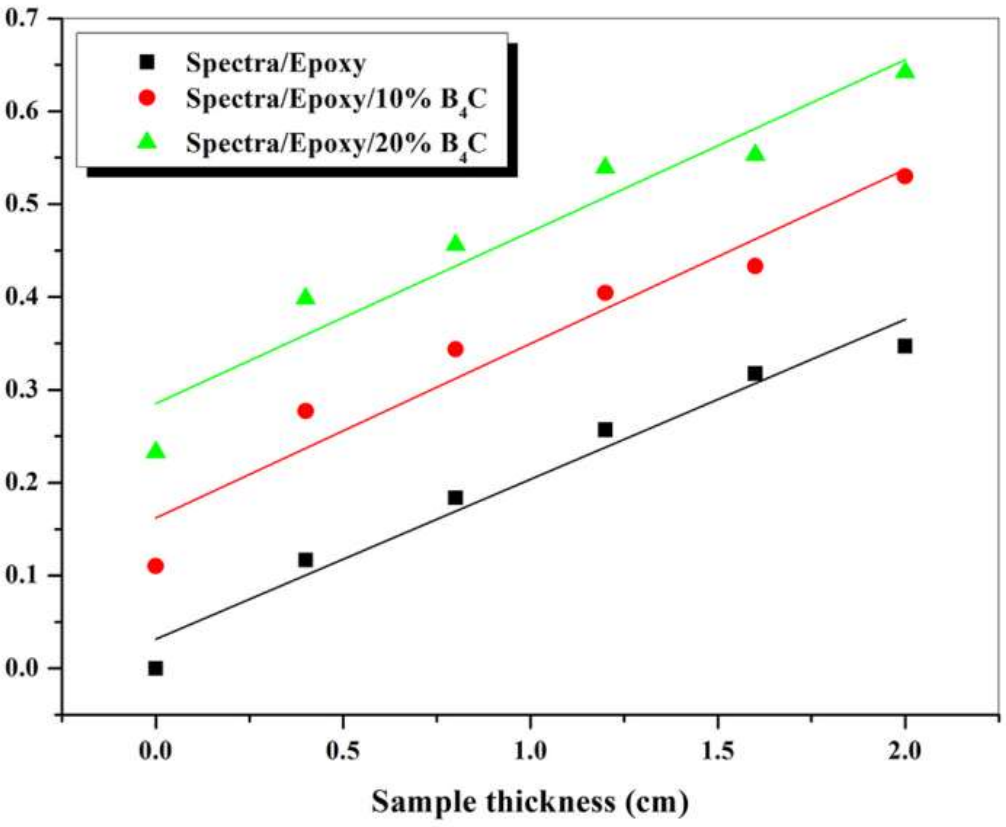


Figura 2-11: Andamento di -ln(I/I0) al variare dello spessore nei compositi Spectra/Epoxy/B_4C *[44]*.

Il **polietilene ad alta densità** e in generale i polimeri idrogenati sono efficaci come moderatori neutronici. La review sui compositi polimerici evidenzia il potenziale di matrici polimeriche riempite con filler ad alto numero atomico o assorbitori

neutronici per ottenere materiali più leggeri, processabili e multifunzionali, come mostrato nella figura 2-12. Tuttavia, nelle centrali nucleari occorre considerare limiti termici, invecchiamento radiativo, infiammabilità, stabilità meccanica e produzione di gas o prodotti di degradazione, per cui l'impiego è tipicamente limitato a livello locale o integrato in sistemi specifici [45].

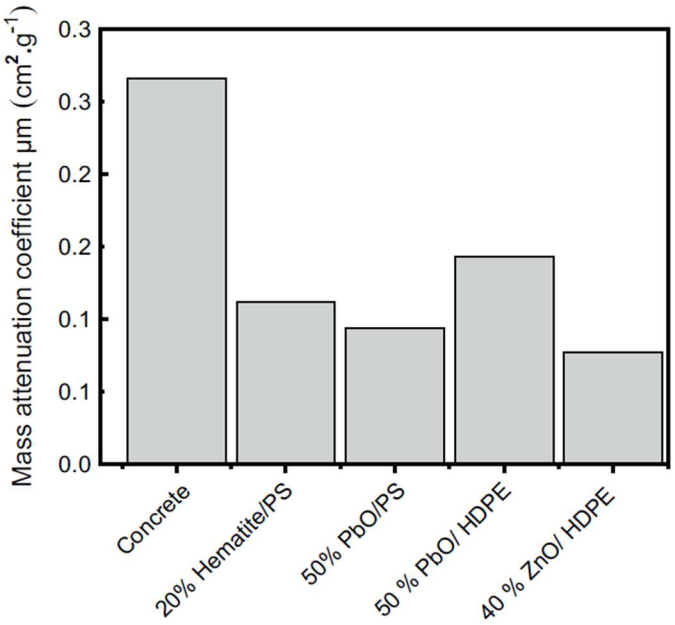


Figura 2-12: Mass attenuation coefficient per compositi a matrice polimerica e confronto [45].

Le leghe di **ferro-boro** sono materiali avanzati; alcune composizioni significative sono riportate nella tabella 2-18, considerate per le schermature di reattori veloci. Le misure nel reattore KAMINI, riportate nella figura 2-13, mostrano l'interesse per un materiale economico e disponibile localmente capace di combinare scattering e assorbimento dei neutroni su intervalli di energia veloce, epitermica e termica con qualità simili al carburo di boro [46].

Tabella 2-18 Materiali e spessori sperimentali nelle prove di attenuazione neutronica su ferro-boro e B_4C *[47]*.

Materiale	Composizione / contenuto	Densità apparente
Ferro-boro 11.8%	Ferro-boro con 11.8% di B	3.8 g/cm^3
Ferro-boro 15%	Ferro-boro con 15% di B	3.8 g/cm^3
B_4C	Carburo di boro, circa 78% B	-
Spessore provini FeB	prove fino a circa 33.5 cm	-
Spessore provini B_4C	prove fino a circa 26,5 cm	-

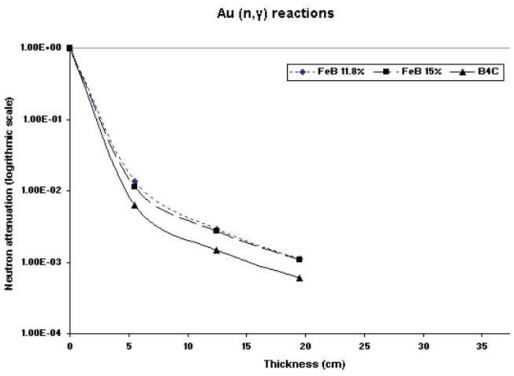


Fig.2.Comparison between attenuations in B4C powder, ferro boron (11.8%) ferro boron (15%) as a function of thickness for Au(n, γ) reactions

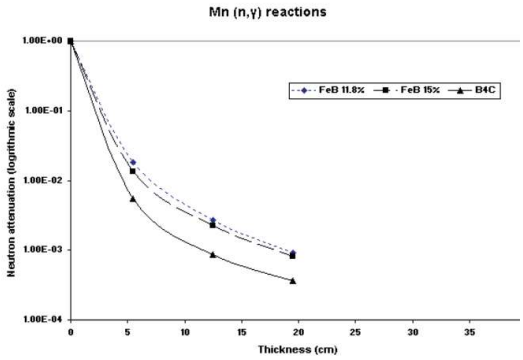


Fig.3.Comparison between attenuations in B4C powder, ferro boron (11.8%) ferro boron (15%) as a function of thickness for Mn (n, γ) reactions

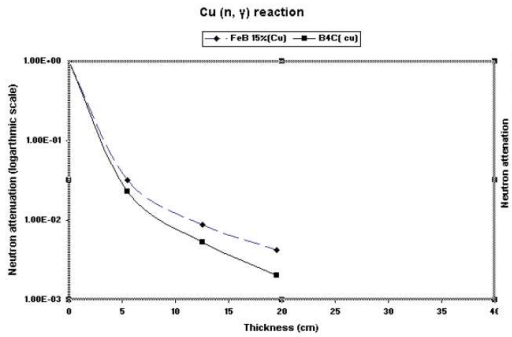


Fig.4.Comparison between attenuations in B4C powder and ferro boron (15%) as a function of thickness for Cu (n, γ) reactions

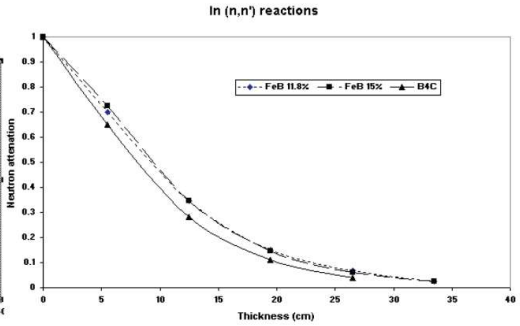
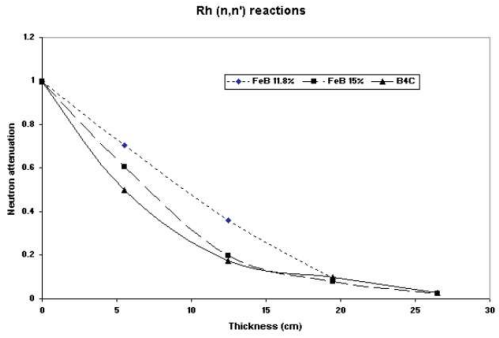


Fig.5.Comparison between attenuations in B4C powder ferro boron (11%) and ferro boron (15%) as a function of thickness for In (n, n') reactions



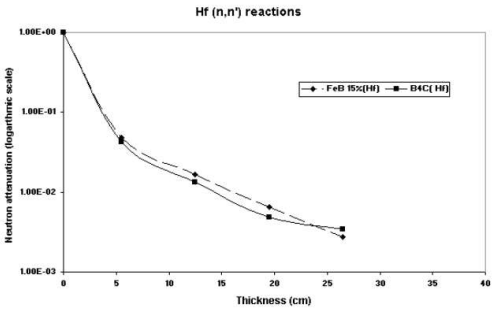


Figura 2-13: Attenuazione neutronica in B_4C e ferro-boro al variare dello spessore per differenti reazioni di attivazione *[46]*.

I **compositi h-BN/Gd_2O_3/HDPE**, riportati nella tabella 2-19, rappresentano un esempio di materiale multifunzionale per l'attenuazione di neutroni e raggi gamma. L'aggiunta di nitruro di boro esagonale (h-BN) e nanoparticelle di ossido di gadolinio in una matrice HDPE aumenta sia l'assorbimento neutronico sia

l'attenuazione gamma, con miglioramenti riportati dell'ordine del 200-280% per i neutroni, figura 2-13, e del 14-52% per i raggi gamma, figura 2-14, rispetto alla matrice di riferimento. Il risultato è interessante per schermature locali o componenti custom, perché unisce moderazione, assorbimento e contributo ad alta Z [48].

Le terre rare sono oggetto di crescente attenzione per la protezione neutronica. Il gadolinio in particolare possiede isotopi con altissima sezione d'urto di assorbimento neutronico e può essere introdotto in matrici metalliche, ceramiche o polimeriche. Sui compositi a terre rare però non basta massimizzare l'assorbimento: occorre mantenere lavorabilità, resistenza meccanica, stabilità termica e compatibilità con la matrice. L'eccesso di filler può indebolire il composito o rendere difficile la produzione su scala industriale [49].

Tabella 2-19 Composizione dei nanocompositi h-BN/Gd_2O_3/HDPE e densità sperimentali *[48]*.

Campione	HDPE wt%	h-BN wt%	Gd_2O_3 wt%	Densità (g/cm^3)
1	100	-	-	0.97808
2	96	3	1	1.03086
3	94	5	1	1.04082
4	92	7	1	1.05908
5	88	11	1	1.08066
6	95	3	2	1.03667
7	93	5	2	1.04663
8	91	7	2	1.06406
9	87	11	2	1.08398
10	94	3	3	1.03418
11	92	5	3	1.05327
12	90	7	3	1.07485
13	86	11	3	1.08647

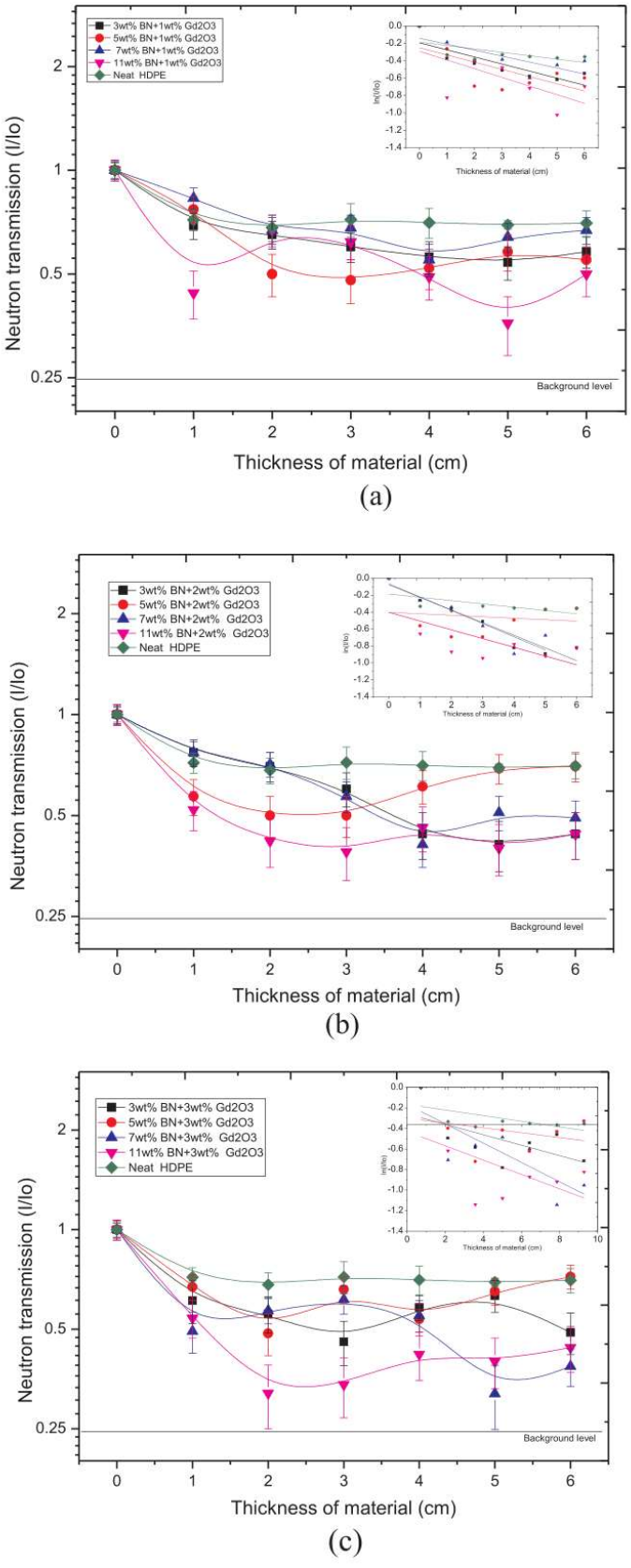


Figura 2-14: Trasmissione neutronica dei nanocompositi h-BN/Gd_2O_3/HDPE al variare dello spessore *[48]*.

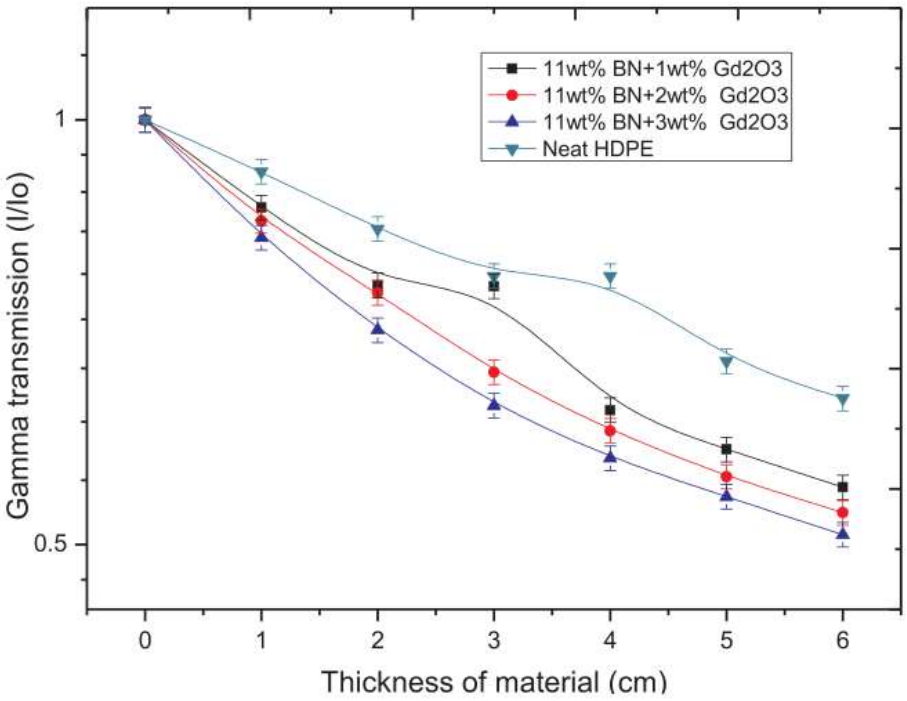


Figura 2-15: Trasmissione gamma dei nanocompositi 11 wt% h-BN con 1-3 wt% Gd_2O_3 in HDPE al variare dello spessore *[48]*.

Nei **compositi foam metal**, una matrice metallica, ad esempio tungsteno, nichel o RAFM, viene combinata con riempitivi come B_4C o polietileni borati come mostrato in tabella 2-20. Le simulazioni, i cui risultati sono riportati in figura 2-16, su materiali foam metal indicano che una matrice di tungsteno con B_4C e porosità dell'80% può raggiungere gli obiettivi di trasmittanza neutronica e gamma con spessori ridotti rispetto a una schermatura convenzionale ferro/acqua. Il vantaggio deriva dalla combinazione tra densità del metallo e funzione assorbente del riempitivo [50].

Tabella 2-20 Matrici, riempitivi e schema ottimo nei compositi a matrice metallica per schermatura neutronica e gamma *[50]*.

Elemento	Composizione / configurazione riportata
Matrici metalliche considerate	RAFM, tungsteno, nichel
B_4C	riempitivo ceramico assorbitore neutronico
Pb-B polyethylene 1.07 g/cm^3	85 wt% PE, 10 wt% Pb, 5 wt% B_4C
Pb-B polyethylene 1.35 g/cm^3	65 wt% PE, 30 wt% Pb, 5 wt% B_4C
Pb-B polyethylene 1.38 g/cm^3	62 wt% PE, 28 wt% Pb, 10 wt% B_4C
Borated polyethylene	PE con 10.0 wt% B come B_4C
Borated polyethylene ad alto B	PE con 30.0 wt% B come B_4C
Schema ottimo riportato	W + B_4C, porosità 80%, spessore 8.5 cm, trasmittanza neutroni 49.95%, gamma 8.18%

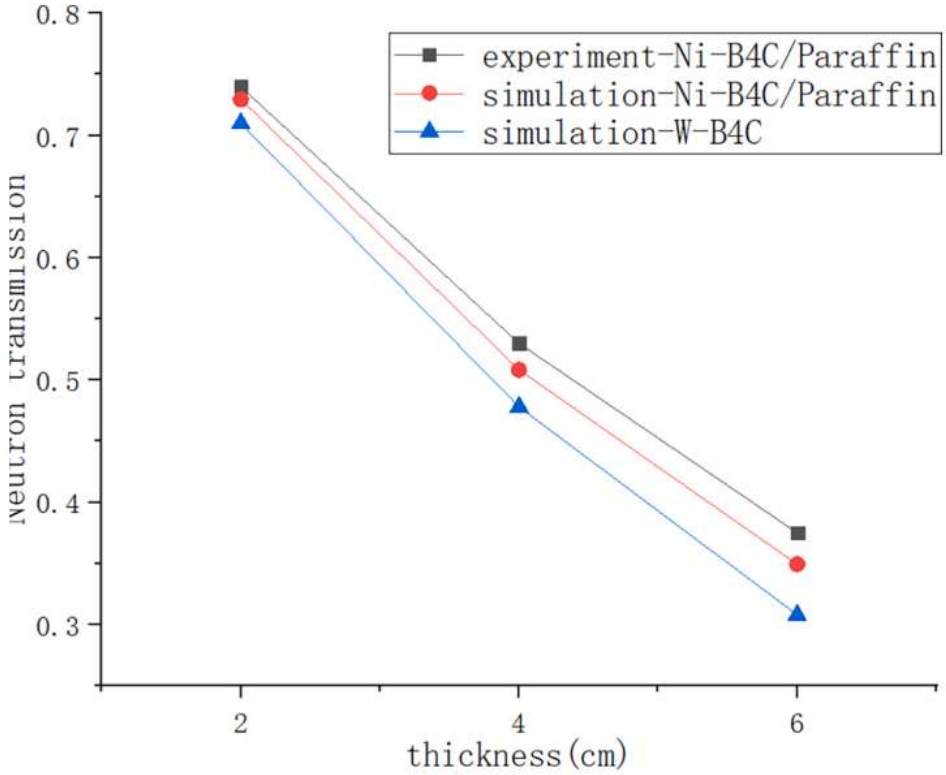


Figura 2-16: Confronto tra curve sperimentali e simulate della trasmissione neutronica al variare dello spessore per compositi a matrice metallica *[50]*.

La scelta dei materiali di circuito incide sul source term. Il cobalto presente come impurità o nei rivestimenti duri può essere attivato a Co^{60}, mentre il nichel può contribuire alla formazione di Co^{58}. Per questo motivo molte centrali hanno adottato

programmi di riduzione del cobalto, sostituzione di componenti, leghe a basso contenuto di impurità di cobalto, elettrolucidatura, passivazione o rivestimenti superficiali. Queste misure non sono schermature in senso geometrico, ma riducono la necessità di schermature aggiuntive e riducono l'esposizione durante la manutenzione [30] [34].

Per le schermature in aree accessibili, il layout è una misura di protezione importante tanto quanto la scelta del materiale. L'IAEA raccomanda di localizzare componenti soggetti a manutenzione frequente in zone a basso rateo di dose, di predisporre aree di attesa a bassa dose, di facilitare la rimozione di componenti verso officine di decontaminazione, di prevedere passaggi adeguati, piattaforme, gru, strumenti remoti e modelli CAD per ottimizzare i tempi di intervento. Queste indicazioni riducono la dose senza cambiare necessariamente lo spessore delle barriere [16].

Dal punto di vista dei materiali, non esiste un assorbitore universale. I materiali ad alto numero atomico sono efficaci per assorbire i fotoni ma non necessariamente per i neutroni; i materiali idrogenati moderano i neutroni ma sono poco efficaci per i raggi gamma; gli assorbitori neutronici possono generare raggi gamma di cattura. I compositi risolvono alcuni limiti ma introducono problemi di produzione, costo, invecchiamento e caratterizzazione [31] [43].

In conclusione, lo stato dell'arte delle protezioni dalle radiazioni nelle centrali nucleari non può essere riassunto come semplice uso di calcestruzzo, piombo o acqua. La protezione moderna è un sistema complesso che parte dalla definizione del source term, usa calcoli di trasporto gamma-neutronico, sceglie materiali in base al campo radiativo e ai vincoli impiantistici, riduce la sorgente tramite chimica e materiali, organizza il lavoro secondo ALARA e verifica le prestazioni con monitoraggio e feedback operativo. Questa integrazione rende il settore nucleare uno dei riferimenti più maturi per lo studio ingegneristico delle schermature dalle radiazioni [16] [30] [34].

2.3 Settore della ricerca scientifica

Nel contesto di questa tesi, il settore della ricerca scientifica comprende soprattutto le infrastrutture in cui fasci di particelle, sorgenti neutroniche, bersagli di irraggiamento e componenti attivati generano campi radiativi complessi. Negli impianti di ricerca la schermatura deve essere progettata attorno a sorgenti molto localizzate ma estremamente intense: target, beam dump, collimatori, scraper, linee di fascio, sorgenti di calibrazione, celle di irraggiamento e zone di manutenzione. Le fonti caricate mostrano che gli acceleratori di particelle e le sorgenti neutroniche per materiali da fusione sono esempi particolarmente significativi, perché combinano radiazione pronta, radiazione residua, attivazione dei materiali e problemi di streaming attraverso aperture e penetrazioni [18] [51].

Gli impianti di ricerca affrontano campi misti nei quali neutroni, fotoni, particelle cariche e componenti secondarie devono essere trattati con una logica integrata. Inoltre, molte soluzioni non consistono semplicemente nell'aumentare lo spessore dello schermo, ma nel combinare materiali con funzioni diverse, nel controllare i percorsi di streaming, nel progettare componenti sostituibili e nel pianificare

l'accesso in base al tempo di raffreddamento. Questi aspetti sono direttamente trasferibili a una schermatura spaziale, nella quale massa, volume, discontinuità geometriche e produzione di secondari diventano vincoli di progetto fondamentali [52] [53].

2.3.1 Tipologia di radiazione

Negli acceleratori e negli impianti di irraggiamento la tipologia di radiazione dipende innanzitutto dalla particella primaria, dall'energia del fascio, dall'intensità media, dal duty factor e dal punto in cui avviene l'interazione con la materia. Le linee guida CERN riportano che i parametri più direttamente legati alla sicurezza radiologica sono il tipo di particella, l'energia e la potenza media del fascio. A parità di energia, il rateo di dose è proporzionale alla potenza media o, in modo equivalente, al numero di particelle perse nei componenti [54].

Durante il funzionamento del fascio, la radiazione è detta prompt radiation. Nel caso di acceleratori adronici, il fascio primario che colpisce un bersaglio, una perdita di fascio o un collimatore genera una cascata intranucleare con emissione di neutroni veloci, neutroni di evaporazione, fotoni e muoni se il fascio è ad elevate energie. La sorgente non è quindi una sorgente monocromatica, ma un campo secondario distribuito in energia e in angolo. Negli acceleratori di elettroni il meccanismo dominante è invece la produzione di bremsstrahlung, cioè fotoni ad alta energia generati dalla decelerazione degli elettroni nella materia. Tuttavia, per energie sufficientemente elevate, anche un acceleratore elettronico può produrre neutroni fotonucleari e campi secondari rilevanti. Per questo motivo la distinzione tra impianti a elettroni e impianti ad adroni non elimina la necessità di una progettazione a campi misti, specialmente quando sono presenti target spessi, beam dump o schermature compatte [18] [51].

A fascio spento rimane invece la radiazione residua. L'attivazione indotta dipende dal tipo e dall’energia delle particelle accelerate, dall’intensità del fascio e dai materiali irradiati. Le conseguenze principali riguardano: l’esposizione del personale durante la manutenzione, il controllo della contaminazione durante lavorazioni meccaniche su componenti attivati, il tracciamento amministrativo dei materiali radioattivi e la gestione dei rifiuti. Nella tabella 2-21 sono riportate le tipologie di radiazioni presenti in base all’ambiente [54].

Tabella 2-21 Tipologie di radiazione e sorgenti principali negli impianti di ricerca scientifica *[18] [51]*

Scenario radiativo	Radiazioni prevalenti	Sorgente fisica
Acceleratori adronici, fascio acceso	Neutroni veloci, neutroni di evaporazione, fotoni	Interazione del fascio con target, collimatori, beam dump o perdite di fascio
Acceleratori ad alta energia	Neutroni, fotoni e muoni	Cascata adronica e decadimento di pioni/kaoni
Acceleratori di elettroni	Bremsstrahlung, fotoni secondari, neutroni fotonucleari	Docce elettromagnetiche e reazioni fotonucleari
Sorgenti neutroniche per materiali da fusione	Neutroni 14-20 MeV e fotoni secondari	Reazioni Li(d,xn) su litio liquido
Beam dump e target	Neutroni prompt, raggi gamma prompt, raggi gamma da attivazione	Arresto del fascio e attivazione del materiale del target
Acceleratori adronici, fascio spento	Fotoni da decadimento dei radionuclidi	Attivazione di target, collimatori, strutture e calcestruzzo

2.3.2 Materiali e tecnologie

Nelle infrastrutture di ricerca scientifica la schermatura radiologica non viene affidata ad un materiale unico, ma a sistemi di materiali con funzioni complementari. Nei laboratori con acceleratori, sorgenti neutroniche, hot cell o linee di fascio, i materiali devono ridurre fotoni, neutroni e radiazioni secondarie, ma devono anche conservare le proprietà meccaniche, la stabilità termica, la possibilità di manutenzione e la compatibilità con l'ambiente di esercizio. Per questo motivo la scelta avviene combinando attenuatori gamma, moderatori neutronici, assorbitori di neutroni termici e materiali strutturali [35] [17].

Il criterio fisico di base è diverso per fotoni e neutroni. Per raggi X e gamma sono favoriti materiali densi e con alto numero atomico, come piombo, tungsteno, bismuto, acciaio e calcestruzzi pesanti; per i neutroni veloci sono invece utili materiali leggeri e ricchi di idrogeno, capaci di rallentare le particelle tramite scattering elastico; per i neutroni termici servono assorbitori con elevata sezione d'urto, come boro, gadolinio, cadmio o carburo di boro. La tecnologia attuale tende quindi a usare configurazioni composite o multistrato, nelle quali ogni strato svolge una funzione radiologica distinta [32] [33].

Il **calcestruzzo** rimane il materiale principale per schermature di grande volume. La sua diffusione deriva dalla possibilità di realizzare pareti portanti, bunker, labirinti e blocchi massivi a costo relativamente contenuto. Il calcestruzzo ordinario

attenua sia gamma sia neutroni grazie alla compresenza di elementi leggeri e pesanti; tuttavia, le sue prestazioni dipendono fortemente da densità, contenuto d'acqua, composizione degli aggregati e additivi. Gli studi su calcestruzzi con ematite mostrano che l'aumento della frazione di ematite migliora l'attenuazione gamma e la resistenza meccanica, ma non produce un miglioramento equivalente nell'assorbimento neutronico, confermando che la densità non è un parametro sufficiente per valutare la schermatura neutronica [37].

Una seconda famiglia di calcestruzzi avanzati utilizza aggregati o fibre capaci di aumentare l'assorbimento neutronico. Le fibre basaltiche arricchite con boro, ad esempio, sono state introdotte in calcestruzzi ad alte prestazioni per aumentare l'assorbimento dei neutroni termici e migliorare la risposta in spettri da fissione. Nelle percentuali studiate l'effetto sulle proprietà gamma risulta limitato, mentre il miglioramento neutronico dipende dallo spettro incidente e dal contenuto di boro. In modo analogo, sepiolite, barite, magnetite, ematite, polimeri, boro e gadolinio sono studiati come modificatori per adattare il calcestruzzo a sorgenti specifiche [38] [36] [47].

I metalli ad alto Z sono usati dove è necessario ottenere forte attenuazione gamma in spazi ridotti. Il **piombo** offre elevata attenuazione e facilità di lavorazione, ma presenta tossicità, bassa resistenza meccanica e problemi di gestione ambientale. Il **tungsteno** è più denso e termicamente stabile, quindi è interessante per collimatori, beam stop, schermature locali e componenti compatti, ma il costo e la lavorabilità limitano l'uso su grandi volumi. Il **bismuto** è studiato come alternativa meno problematica del piombo nei vetri e nei compositi; **l'acciaio** unisce funzione strutturale e schermante, ma può attivarsi e non è sufficiente da solo per schermare i neutroni veloci o termici [33] [55].

Per i neutroni, lo stato dell'arte privilegia materiali idrogenati ed assorbitori. Polietilene, HDPE, UHMWPE, acqua, resine epossidiche e siliconi rallentano i neutroni veloci grazie all'elevato contenuto di idrogeno. Dopo la moderazione, il neutrone deve essere assorbito: per questo i polimeri vengono spesso caricati con B_4C, h-BN, Gd_2O_3, CdO o terre rare. Questa logica permette di ottenere schermature leggere, flessibili o sagomabili, più adatte a dispositivi mobili, protezioni locali, elementi rimovibili e schermature di componenti rispetto ai calcestruzzi massivi. Il vantaggio dei compositi polimerici è la possibilità di incorporare nello stesso materiale moderatori e assorbitori. Nei compositi epossidici rinforzati con fibre UHMWPE e particelle di B_4C, la matrice e le fibre ricche di idrogeno riducono l'energia dei neutroni veloci, mentre il B_4C cattura i neutroni rallentati. L'aggiunta di B_4C aumenta la sezione d'urto macroscopica e riduce il cammino libero medio; tuttavia, percentuali troppo alte di particelle possono penalizzare lavorabilità, duttilità e proprietà meccaniche. La soluzione è quindi un compromesso tra efficacia neutronica e integrità strutturale [32] [44] [49]

I **compositi PE/h-BN multilayer** rappresentano una tecnologia interessante perché sfruttano l'architettura dello schermo oltre alla semplice composizione chimica. Concentrando fogli di nitruro di boro esagonale in strati alternati di polietilene, la struttura produce ripetuti processi di scattering, assorbimento e dissipazione. Dalla figura 2-17 si evince che, con 30 wt% di h-BN, il rapporto tra neutroni trasmessi e incidenti scende al 4,16%, contro il 14,95% del composito PE/h-BN random. Allo

stesso tempo, l'orientamento dei fogli di h-BN aumenta la conducibilità termica in piano, utile per dissipare il calore convertito dall'energia neutronica [56].

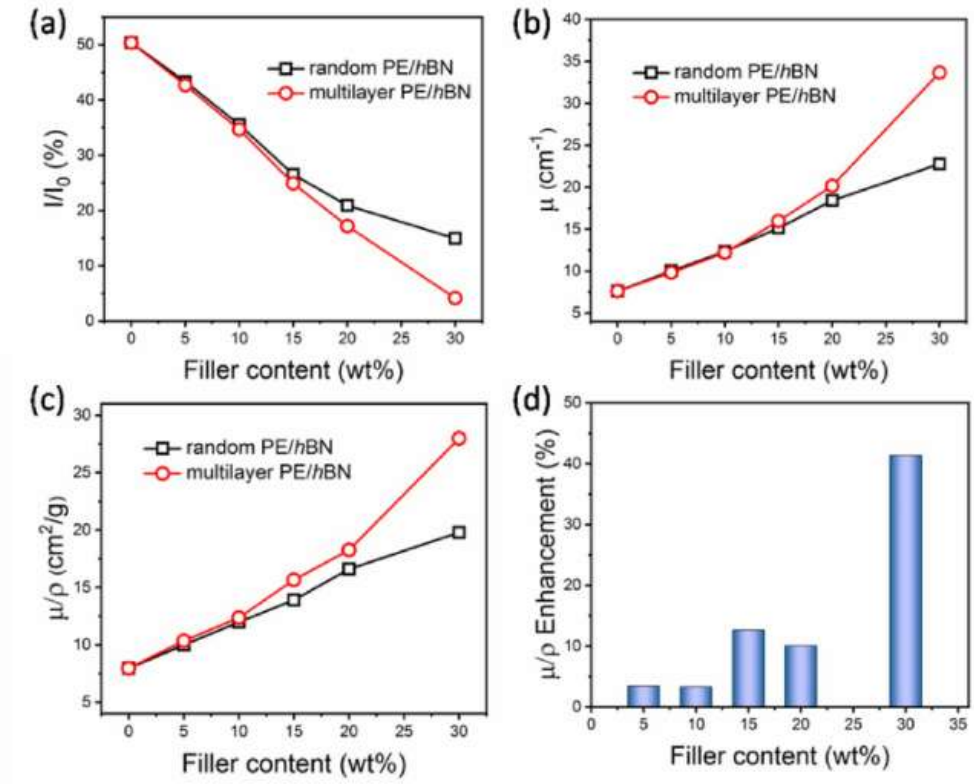


Figura 2-17: Trasmissione neutronica e parametri di attenuazione dei compositi PE/h-BN random e multilayer al variare del contenuto di filler *[56]*.

Un'altra tecnologia rilevante è costituita da **nanocompositi HDPE caricati con h-BN e Gd_2O_3**. L'HDPE fornisce l'idrogeno per rallentare i neutroni; h-BN introduce boro e azoto; Gd_2O_3 aggiunge gadolinio, un elemento con elevata capacità di assorbimento dei neutroni termici e un contributo all'attenuazione gamma. Lo studio mostrato in figura 2-18 riporta un miglioramento delle prestazioni di schermatura pari a circa 200-280% per neutroni e 14-52% per gamma rispetto alla matrice di riferimento, mostrando la possibilità di ottenere materiali multifunzionali per campi misti [48].

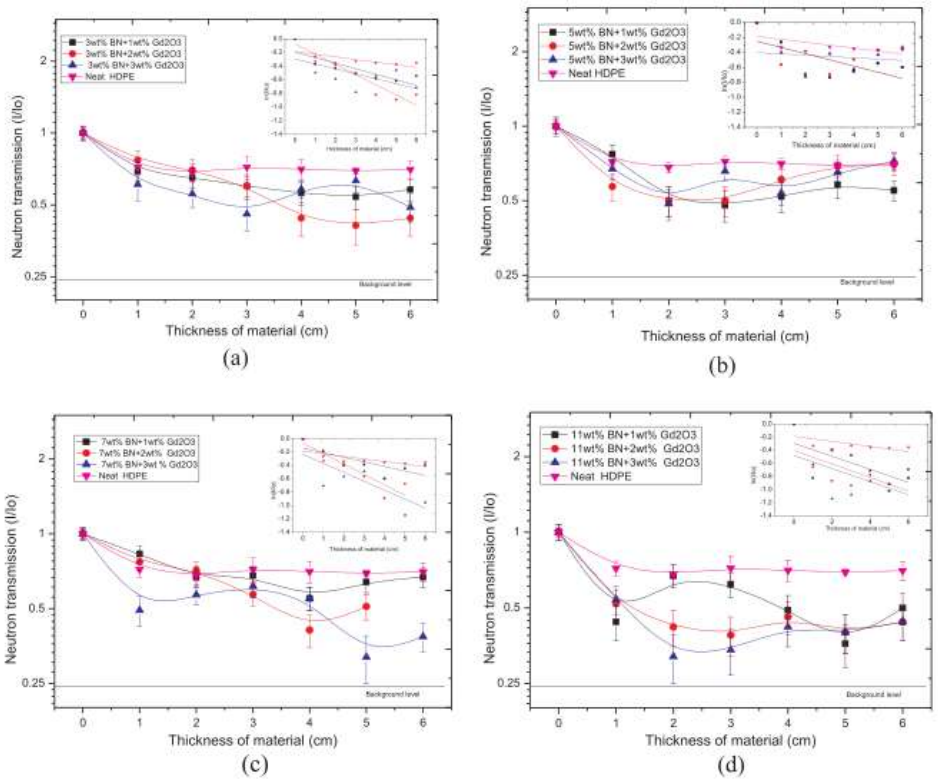


Figura 2-18: Trasmissione neutronica dei nanocompositi h-BN/Gd_2O_3/HDPE al variare dello spessore e del contenuto di filler *[48]*.

Tra i compositi a matrice ceramica o metallica, il sistema **W-B_4C** è significativo perché unisce due funzioni difficilmente ottenibili con un singolo materiale leggero: il tungsteno attenua i fotoni grazie all'elevata densità e all'alto numero atomico, mentre il B_4C introduce un assorbitore neutronico ad alta efficacia. Le simulazioni Monte Carlo, i cui risultati sono riportati in figura 2-19, mostrano che l'aumento della frazione di assorbitore termico riduce rapidamente il flusso neutronico normalizzato, ma la produzione di particelle secondarie deve essere sempre valutata insieme all'attenuazione primaria [43].

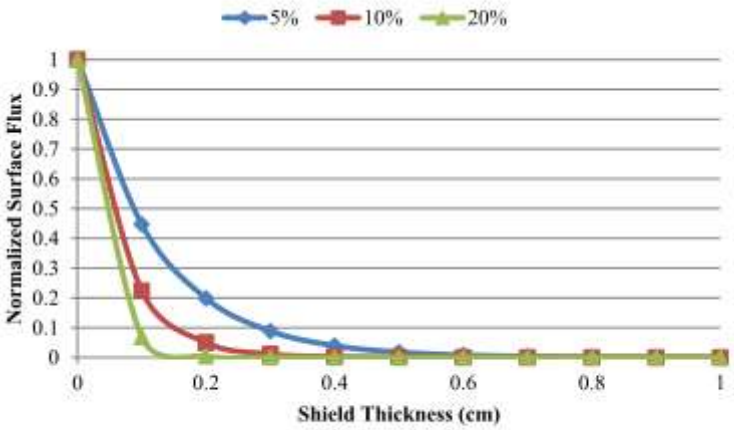


Fig. 13. W-B4C shielding performance for different thermal absorber composition values.

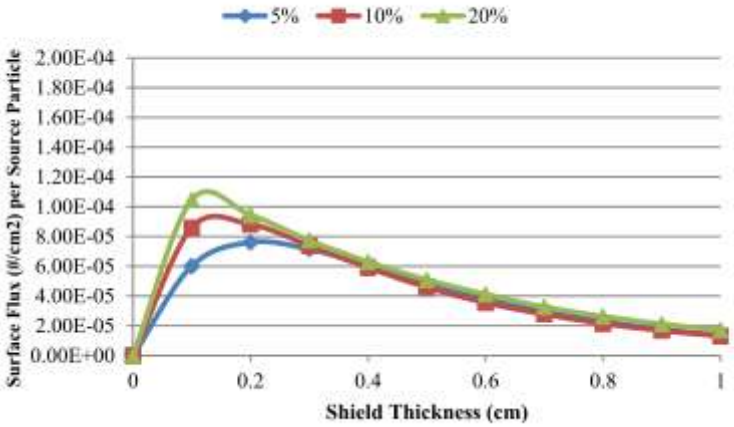


Figura 2-19: Prestazione schermante del composito W-B_4C al variare dello spessore e della frazione di assorbitore termico *[43]*.

Le **matrici metalliche schiumate** sono un'altra direzione di sviluppo. In questo caso una struttura porosa di metallo, come tungsteno, nichel o acciaio ferritico-martensitico a bassa attivazione, viene riempita con materiali schermanti come B_4C, polietilene borato, polietilene piombato-borato o poliimmide. La porosità permette di ridurre la massa e regolare il rapporto tra il materiale denso e il materiale assorbitore. Nello studio caricato, la combinazione tungsteno+B_4C con porosità dell'80% raggiunge l'obiettivo di trasmittanza neutronica minore del 50% e gamma minore del 30% con 8,5 cm di spessore, riducendo lo spessore e la massa rispetto a una soluzione ferro/acqua come mostrato in figura 2-20 [50].

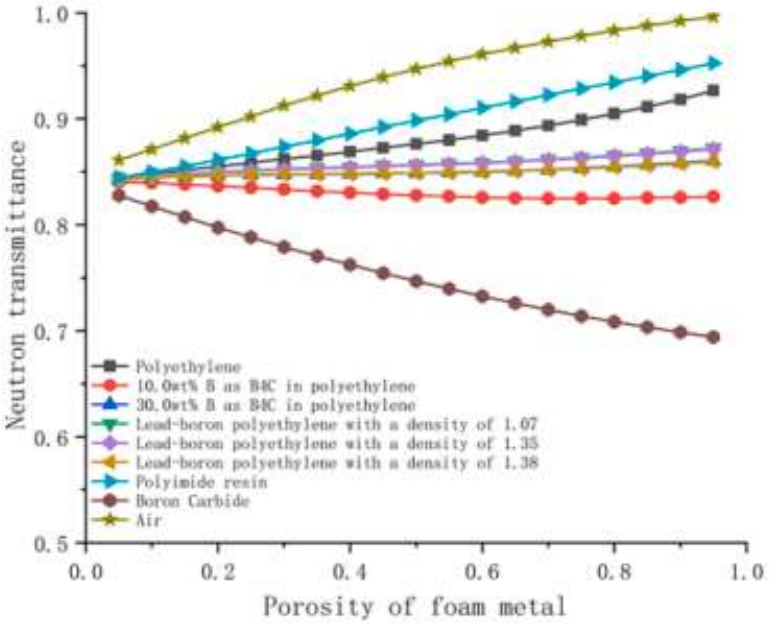


Fig. 10. The neutron transmittance of nickel-based foam matrix composite shielding material varies with porosity.

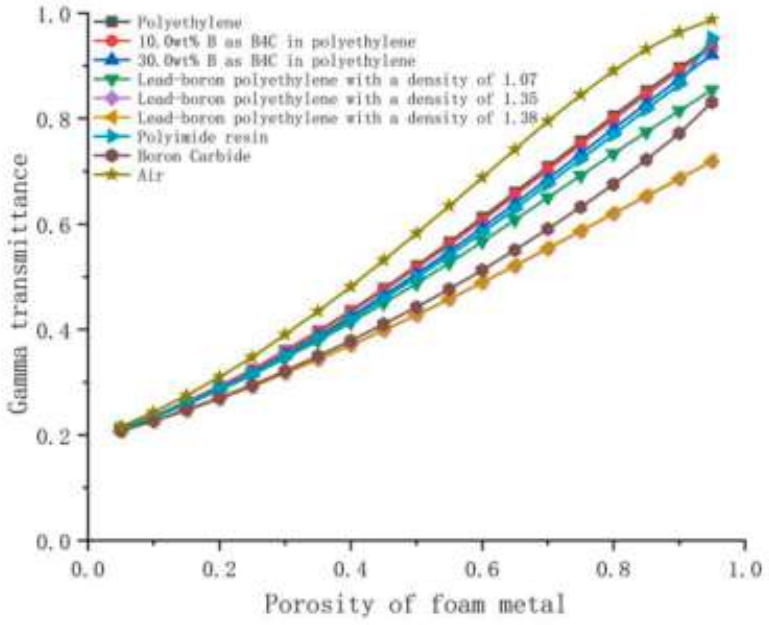


Fig. 11. The gamma ray transmittance of nickel-based foam matrix composite

Figura 2-20: Trasmittanza neutronica e gamma di compositi a matrice metallica schiumata al variare della porosità e del riempitivo *[50]*.

Le schermature trasparenti costituiscono una tecnologia specifica delle infrastrutture di ricerca, perché hot cell, glove box, celle di irraggiamento e finestre di osservazione richiedono visibilità diretta del processo. I **vetri al piombo** sono tradizionalmente usati per la componente gamma; tuttavia, la ricerca recente punta

a **vetri borati, bismutati, germanati e telluriti** per migliorare densità, numero atomico efficace, durabilità chimica e, in alcuni casi, risposta neutronica. L'aggiunta di Bi_2O_3 o BaO aumenta la densità ed il coefficiente di attenuazione gamma, riducendo HVL, TVL e mean free path; il boro può invece contribuire all'assorbimento neutronico [40] [41] [42].

I vetri schermanti non sostituiscono le pareti massicce, ma sono essenziali dove servono osservazione e manipolazione. La scelta tra PbO, Bi_2O_3, BaO, B_2O_3, TeO_2 o GeO_2 dipende dal campo radiativo, dalla trasparenza richiesta, dalla resistenza alla devitrificazione, dalla lavorabilità e dalla tossicità; le proprietà d'interesse sono riportate nella tabella 2-22. I sistemi bismuto-borati e bario-bismuto-borati sono interessanti perché evitano parte delle criticità del piombo e mostrano un'attenuazione dei raggi gamma comparabile o superiore rispetto ai vetri commerciali ed ai calcestruzzi schermanti, in specifiche condizioni [42] [57].

Tabella 2-22 Materiali trasparenti o speciali per schermature in laboratori e impianti di ricerca.

Famiglia materiale	Componenti principali	Proprietà di interesse
Vetri al piombo	Matrice silicea con PbO variabile	Alta attenuazione gamma e trasparenza; massa e tossicità del piombo.
Vetri B_2O_3-Bi_2O_3	Borato di bismuto con Bi_2O_3 crescente	Densità e attenuazione gamma aumentano con il Bi_2O_3; il boro è utile per la risposta neutronica.
Vetri Bi_2O_3-BaO-B_2O_3	Bi_2O_3 fisso e BaO come modificatore	Aumento della densità, riduzione di MFP e TVL rispetto ai sistemi meno pesanti.
Vetri germanio - tellurio	TeO_2-GeO2-ZnO-BaO	Elevata attenuazione gamma e proprietà ottiche; utili dove è necessaria trasparenza.
Vetri al boro piombati	B_2O_3 con PbO variabile	Buona schermatura gamma e studio di protoni, elettroni e neutroni; proprietà influenzate dal contenuto di PbO.

Le **terre rare** costituiscono una linea di ricerca trasversale. Elementi come gadolinio, samario e disprosio possiedono sezioni d'urto elevate per neutroni termici e possono essere introdotti in matrici polimeriche, metalliche o ceramiche. Il vantaggio è la forte capacità di cattura neutronica mentre il limite è la necessità di garantire dispersione uniforme, adesione alla matrice, stabilità termica, resistenza meccanica e controllo dei gamma di cattura. Per questo la ricerca non valuta solo la sezione d'urto, ma anche la possibilità di ottenere compositi lavorabili e affidabili [49].

Nel complesso, lo stato dell'arte nei materiali per la ricerca scientifica conferma che la prestazione schermante deve essere valutata come proprietà di sistema. Il calcestruzzo fornisce massa e struttura; i metalli ad alto Z attenuano fotoni e permettono componenti compatti; polimeri e acqua moderano neutroni; boro, gadolinio e cadmio assorbono neutroni termici; vetri e ceramiche permettono funzioni specializzate; compositi e multistrati combinano più meccanismi in uno stesso elemento. La scelta finale richiede quindi una valutazione simultanea di attenuazione, massa, spessore, produzione di secondari, proprietà meccaniche, resistenza termica, attivazione, tossicità e manutenzione [31] [43].

2.4 Settore aerospaziale

Nel settore aerospaziale la protezione dalle radiazioni assume caratteristiche diverse rispetto agli ambiti analizzati in precedenza. Nella medicina, nell'energia nucleare e nella ricerca scientifica la sorgente è generalmente localizzata, confinabile o almeno separabile dall'operatore mediante barriere, distanze, procedure e controllo degli accessi. In una missione spaziale, invece, il campo radiativo fa parte dell'ambiente operativo: la sorgente non può essere spenta, allontanata o schermata alla fonte. La protezione deve quindi essere integrata nel veicolo, nella distribuzione interna della massa, nella scelta dei materiali, nel profilo di missione e nelle procedure di emergenza. Questo aspetto è particolarmente rilevante per un rover pressurizzato lunare, poiché la Luna non fornisce né atmosfera né magnetosfera, come visto nel primo capitolo, capaci di ridurre il campo incidente, e la schermatura deve essere trasportata, riutilizzata o ricavata localmente [1] [58].

Un primo elemento distintivo è che nello spazio le contromisure classiche, tempo, distanza e schermatura, devono essere reinterpretate. La distanza non è una soluzione efficace per i raggi cosmici galattici, perché il campo è sostanzialmente isotropo; il tempo coincide invece con la durata della missione, la scelta della fase del ciclo solare, la programmazione delle EVA e la rapidità con cui l'equipaggio può raggiungere un volume più protetto durante un evento solare. La schermatura, infine, non può essere progettata come massa illimitata, ma deve essere resa il più possibile multifunzionale: struttura primaria, acqua, alimenti, stivaggio, batterie, sistemi di supporto vitale e arredi possono contribuire alla protezione se disposti in modo opportuno intorno alle zone di permanenza più frequenti [20] [59].

Nel caso della Stazione Spaziale Internazionale, l'applicazione del principio ALARA ha portato allo studio dell'aumento locale della schermatura nei Crew Quarters del modulo Zvezda. La logica non era quella di realizzare una schermatura uniforme dell'intera stazione, ma di rinforzare le aree in cui l'equipaggio trascorre molte ore al giorno per riposo o lavoro. Questo approccio è direttamente trasferibile al rover pressurizzato: la protezione non deve necessariamente essere omogenea su tutta la cabina, ma può essere concentrata nel volume di massima occupazione e in un eventuale storm shelter, riducendo la dose efficace complessiva senza aumentare eccessivamente la massa totale [20].

Lo stato dell'arte aerospaziale mostra quindi che il problema non può essere risolto scegliendo semplicemente il materiale con maggiore densità. Per i fotoni in ambito medico o nucleare la densità e il numero atomico elevato sono spesso vantaggiosi;

nello spazio, invece, il campo è dominato da particelle cariche ad alta energia e da secondari prodotti nello stesso schermo. L'aumento del numero atomico può migliorare alcuni meccanismi di attenuazione, ma può anche aumentare la frammentazione nucleare e la produzione di neutroni o particelle leggere secondarie. Per questo motivo, i materiali a basso numero atomico e ricchi di idrogeno sono considerati come riferimento principale per la protezione passiva [21] [60].

La valutazione dello spessore in ambito spaziale viene espressa spesso in densità areale, cioè in g/cm², più che in centimetri geometrici. Questa scelta consente di confrontare materiali con densità diverse sulla base della massa realmente attraversata dalla particella. Per un rover pressurizzato è una grandezza particolarmente utile, perché il vincolo primario non è solo lo spessore geometrico della parete, ma il contributo alla massa totale, al baricentro, alla mobilità e alla capacità di trasporto. Tuttavia, la stessa densità areale non produce sempre lo stesso effetto: la risposta dipende dalla composizione elementare, dallo spettro incidente, dalla produzione di secondari e dalla posizione dello schermo rispetto all'occupante [61] [62].

2.4.1 Materiali e tecnologie

Sulla superficie lunare, una possibilità non disponibile durante il transito interplanetario è l'uso di materiale in situ. La **regolite** può costituire una schermatura efficace per habitat, rifugi o infrastrutture statiche, soprattutto contro eventi solari, perché permette di ottenere grandi densità areali senza lanciare tutta la massa dalla Terra. Per un rover mobile, però, la situazione è più complessa: un rivestimento permanente di regolite aumenterebbe massa, ingombro e sollecitazioni sulla mobilità; una soluzione più realistica potrebbe essere l'uso della regolite come schermatura temporanea quando il rover è fermo presso una base, una trincea o un riparo predisposto [58].

Le simulazioni più recenti sulla superficie lunare mostrano una differenza netta tra schermatura contro SPE e schermatura contro GCR. Per eventi solari storici, pochi g/cm² di regolite possono ridurre fortemente la dose e riportarla sottosoglie operative di breve periodo; aumentando lo spessore si ottiene un margine ulteriore. Per la componente GCR, invece, l'aggiunta di massa produce benefici più limitati, perché le particelle hanno energie molto elevate e perché l'interazione con il materiale genera componenti secondarie, come riportato nella tabella 2-24. Questa distinzione è essenziale per il rover: lo storm shelter deve essere dimensionato soprattutto per gli SPE, mentre la riduzione della dose cronica da GCR richiede ottimizzazione di massa e materiali, non un semplice aumento dello spessore. Nelle figure 2-21 e 2-22 sono riportati gli andamenti della dose assorbita e della dose equivalente in caso di SPE e di GCR [58] [61].

Tabella 2-23 Indicazioni di efficacia della schermatura in regolite lunare per SPE e GCR *[58]*.

Scenario	Schermatura considerata	Effetto riportato	Implicazione per il rover
SPE storici	> 4 g/cm^2 di regolite	Riduzione della dose al di sotto dei limiti correnti a 30 giorni	Schermatura locale utile per un volume di emergenza
SPE storici	> 10 g/cm^2 di regolite	Margine di sicurezza circa pari a un fattore due	Obiettivo realistico per rifugi temporanei o base
GCR	Aumento della schermatura passiva	Riduzione della dose assorbita poco significativa rispetto agli SPE	Non conviene affidarsi solo all'aumento uniforme di massa
GCR con forte copertura	Circa 180 g/cm² di regolite	Dose equivalente annua ancora dell'ordine di centinaia di mSv/anno	Per permanenze lunghe servono anche limiti di missione, procedure e ottimizzazione interna

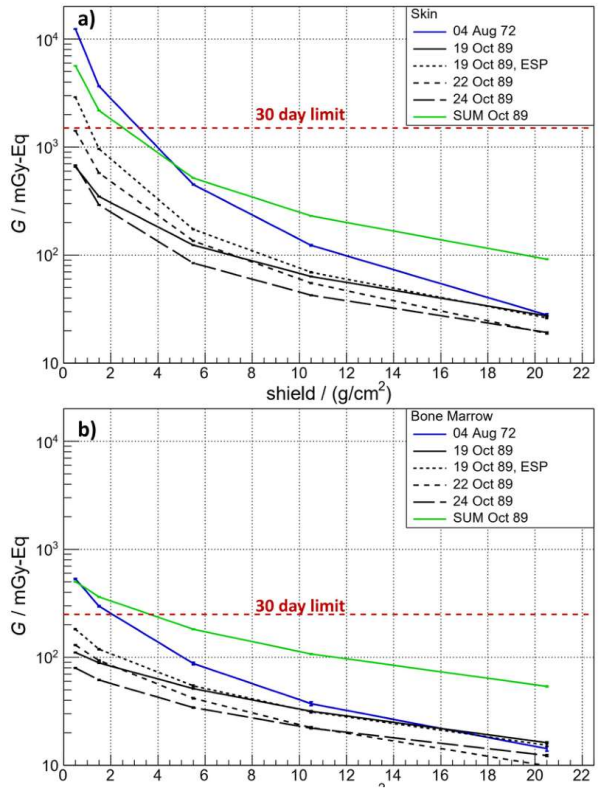


Figura 2-21: Dose equivalente per pelle e per midollo osseo in diversi eventi SPE storici al variare della schermatura di regolite lunare *[58]*.

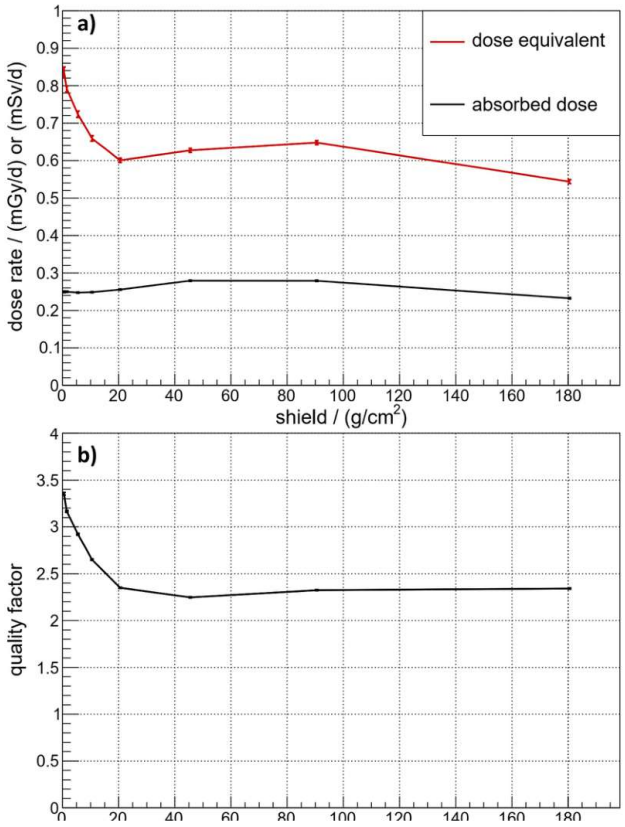


Figura 2-22: Rateo di dose assorbita, dose equivalente e fattore di qualità per GCR sulla superficie lunare al variare dello spessore di regolite *[58]*.

Il **polietilene**, con formula empirica CH_2, è stato scelto come materiale standard per le prove a terra di schermature spaziali perché combina alto contenuto di idrogeno, stabilità chimica, disponibilità e bassa tossicità. Gli esperimenti con fasci di ioni pesanti mostrano che, a parità di densità areale, il polietilene produce una maggiore riduzione di dose per unità di massa rispetto all'alluminio in scenari rappresentativi della componente HZE dei GCR. Il motivo fisico è duplice: l'idrogeno è efficace nel frenare particelle cariche leggere e nel favorire la frammentazione degli ioni pesanti in frammenti a minore carica e minore LET; inoltre, i nuclei leggeri producono meno secondari penalizzanti rispetto a materiali ad alto Z [21] [60].

Questa conclusione non implica che il polietilene sia sempre la soluzione migliore come materiale strutturale. Il suo vantaggio radiologico deve essere bilanciato con densità, rigidezza, resistenza meccanica, comportamento al fuoco, compatibilità con l'ambiente abitabile e volume disponibile. La struttura dei veicoli spaziali resta spesso basata su leghe di alluminio per ragioni meccaniche e tecnologiche, mentre materiali idrogenati, acqua o polimeri avanzati vengono introdotti come schermature locali, rivestimenti interni o componenti multifunzionali. I materiali principalmente considerati sono riportati nella tabella 2-24. Per un rover lunare, questa distinzione è fondamentale: la parete esterna può essere strutturale, ma il massimo beneficio radiologico può derivare da una distribuzione interna di materiali idrogenati e dalla concentrazione di massa intorno ai posti letto, alla zona di comando o al volume di emergenza [20] [63].

Tabella 2-24 Materiali considerati per schermature spaziali, composizione chimica e densità riportate in letteratura *[62]*.

Materiale	Formula / composizione riportata	Densità (g/cm^3)	Ruolo schermante prevalente
Alluminio	Al	2.70	Materiale strutturale di riferimento; schermatura primaria della struttura
Polietilene	CH_2	1.00	Materiale idrogenato di riferimento per test e rivestimenti
Boron nitride	BN	2.10	Materiale a basso Z con boro e azoto; base per BNNT
Acqua	H_2O	1.00	Schermatura idrogenata multifunzionale e consumabile
Polybenzoxazine	$C_{36}H_{56}N_2O_4$	1.07	Polimero strutturale ricco di idrogeno
Epoxy	$C_{21}H_{25}ClO_5$	1.30	Matrice polimerica per compositi
Kevlar	$C_{14}H_{14}N_2O_4$	1.44	Materiale fibroso strutturale e anti-impatto
Zylon	PBO	1.54	Fibra ad alte prestazioni per compositi
Polyetherimide	$C_{37}H_{24}O_6H_2$	1.27	Polimero tecnico per configurazioni multistrato
Polysulfone	$C_{27}H_{26}O_6S$	1.24	Polimero tecnico per configurazioni multistrato
Lithium hydride	LiH	0.82	Materiale molto ricco di idrogeno, efficace ma tecnologicamente vincolante
Liquid methane	CH_4	0.466	Materiale idrogenato potenzialmente legato a propellenti/consumabili
Hydrogenated graphite nanofiber	CH	2.25	Materiale avanzato idrogenato per schermature leggere

Le esperienze operative in orbita bassa forniscono esempi concreti di schermature idrogenate applicate a veicoli abitati. Nei Crew Quarters del modulo Zvezda sono state valutate configurazioni con pannelli o mattoni di polietilene collocati internamente, cioè in prossimità dell'occupante. La scelta interna è importante: a parità di protezione locale, uno schermo esterno dovrebbe coprire un angolo solido molto maggiore e quindi richiedere più massa. In un rover lunare lo stesso principio suggerisce di collocare la massa utile vicino alla zona da proteggere, invece di ispessire indistintamente tutta la parete esterna [20].

I risultati preliminari, indicati nella tabella 2-25, riportati per l'ISS mostrano che spessori di polietilene dell'ordine di 2,4-4,8 g/cm² riducono la dose equivalente nei Crew Quarters di alcuni punti percentuali, con valori stimati fino a circa il 10-11% nelle configurazioni tabulate e fino a valori maggiori in condizioni specifiche di minimo solare. Anche una riduzione apparentemente modesta può diventare significativa per missioni di lunga durata, perché si applica a molte ore giornaliere di permanenza. Questo è un criterio progettuale utile per il rover: la schermatura più efficiente è quella posta dove l'occupazione integrata nel tempo è massima [20].

Un secondo esempio operativo riguarda la schermatura ad **acqua**. Sulla ISS è stata installata una protective curtain costituita da materiali riempiti d'acqua, dalla densità areale media di 6,3 g/cm². Le misure con dosimetri passivi, riportate nella tabella 2-25, hanno mostrato una riduzione del rateo di dose assorbita da 327 μGy/day a 224 μGy/day e del rateo di dose equivalente da 821 μSv/day a 575 μSv/day, con una riduzione della dose equivalente pari al 37 ± 7%. Il risultato è rilevante per il rover perché l'acqua è già una risorsa indispensabile al supporto vitale: se distribuita con criterio può diventare una schermatura dinamica e multifunzionale [64].

Tabella 2-25 Risultati di schermatura locale in ambito ISS con polietilene e acqua *[20] [64]*.

Caso	Materiale e densità areale	Grandezza misurata / stimata	Risultato
Zvezda Port CQ	PE 2.4 g/cm^2	Dose equivalente	0.65 -> 0.60 mSv/day; riduzione 7.3%
Zvezda Port CQ	PE 4.8 g/cm^2	Dose equivalente	0.65 -> 0.58 mSv/day; riduzione 11.2%
Zvezda Starboard CQ	PE 2.4 g/cm^2	Dose equivalente	0.56 -> 0.52 mSv/day; riduzione 6.6%
Zvezda Starboard CQ	PE 4.8 g/cm^2	Dose equivalente	0.56 -> 0.50 mSv/day; riduzione 9.8%
Zvezda Port CQ	PE 2.4 g/cm^2	BFO dose	0.35 -> 0.31 mGy/day; riduzione 9.2%
Zvezda Starboard CQ	PE 4.8 g/cm^2	BFO dose	0.28 -> 0.25 mGy/day; riduzione 12.4%
Protective curtain ISS	Acqua 6.3 g/cm^2	Dose assorbita	327 -> 224 uGy/day
Protective curtain ISS	Acqua 6.3 g/cm^2	Dose equivalente	821 -> 575 µSv/day; riduzione 37 ±- 7%

Gli studi di trasporto confermano che la risposta di una schermatura spaziale non è monotona per tutti i materiali. Nel caso dell'**alluminio**, analisi con codici Monte Carlo indicano un minimo locale della dose equivalente intorno a 20 g/cm^2, seguito da un aumento dovuto soprattutto al build-up di neutroni e di ioni leggeri prodotti nello schermo. Per il polietilene, nello stesso confronto, non si osserva lo stesso minimo locale e la dose equivalente tende a diminuire in modo più regolare. Questo risultato è particolarmente importante per un rover lunare, perché mostra che aumentare lo spessore della struttura metallica non è necessariamente la strategia più efficace per ridurre il rischio biologico. La figura 2-23 illustra direttamente questa differenza tra alluminio e polietilene; le analisi sono state svolte con diversi codici Monte Carlo per verificarne l'attendibilità. Nel pannello relativo all'alluminio la componente di neutroni e ioni mostra una risalita della dose equivalente oltre lo spessore intermedio; nel pannello relativo al polietilene la curva

resta decrescente. La conseguenza progettuale è che la struttura primaria in alluminio non deve essere interpretata come schermatura sufficiente, ma come parte di un sistema nel quale strati interni idrogenati, acqua, stivaggio e materiali compositi possono controllare meglio la produzione di secondari [61].

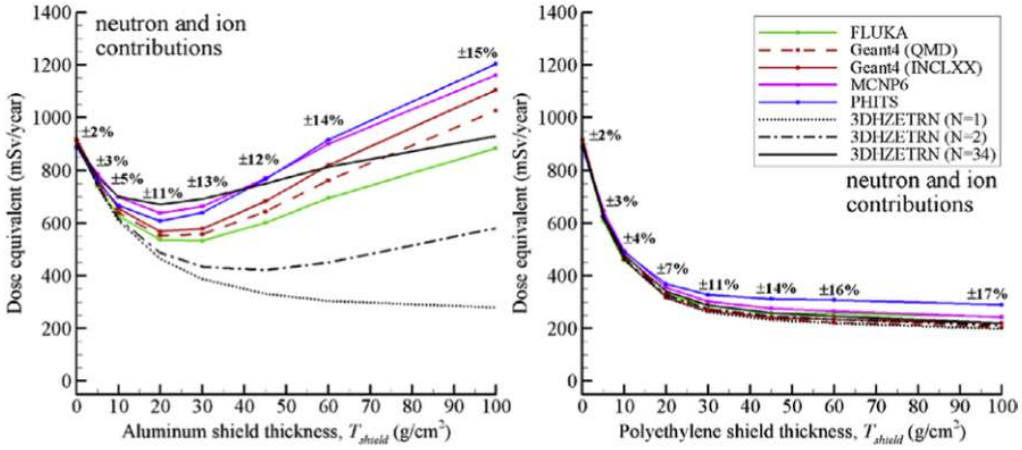


Figura 2-23: Confronto tra dose equivalente da neutroni e ioni al variare dello spessore schermante in alluminio e polietilene per un campo GCR completo *[61]*.

Le prove con fasci di ioni pesanti sono un passaggio necessario per validare i modelli. Gli esperimenti con Fe^{56} a 1 GeV/nucleone sono stati usati come proxy della componente HZE dei GCR e hanno confrontato elementi, polimeri e compositi in termini di riduzione della dose per unità di densità areale. I dati confermano che le prestazioni migliorano al diminuire del numero di massa del materiale schermante e che l'idrogeno resta il riferimento più efficace. Gli stessi studi, tuttavia, mostrano che il beneficio incrementale dell'aggiunta di materiale diminuisce con lo spessore: ciò significa che esiste un punto oltre il quale la massa aggiunta produce una riduzione marginale sempre più piccola [60] [21].

I risultati più recenti con **configurazioni multistrato** estendono questo concetto; le analisi sono riportate nelle figure 2-24 e 2-25. Invece di confrontare un singolo materiale, viene studiata una parete composta da uno strato di alluminio seguito da materiali idrogenati, polimeri o composti contenenti litio, boro e azoto. Le simulazioni indicano che combinazioni come Al+LiH e sandwich Al+LiH+Al possono offrire prestazioni molto elevate nel caso GCR, mentre materiali come acqua, polietilene, metano liquido, polybenzoxazine e boron nitride idrogenato risultano interessanti perché uniscono contenuto di idrogeno e potenziale multifunzionalità [62].

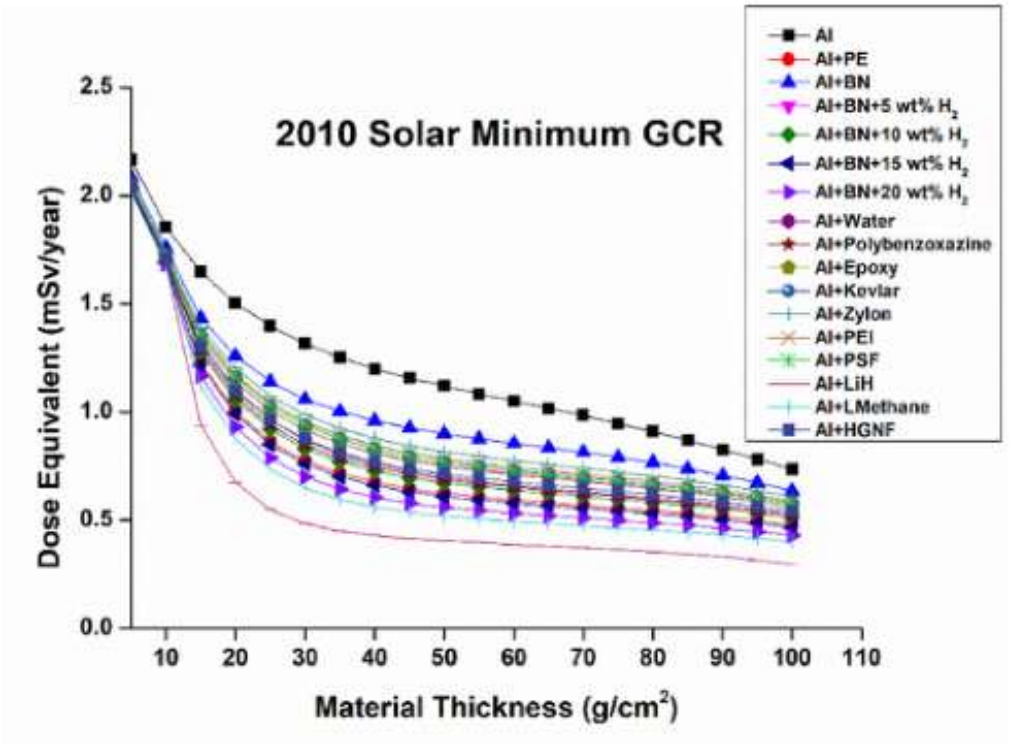


Figura 2-24: Dose equivalente annua per configurazioni multistrato esposte al GCR del minimo solare 2010 al variare della densità areale del materiale *[62]*.

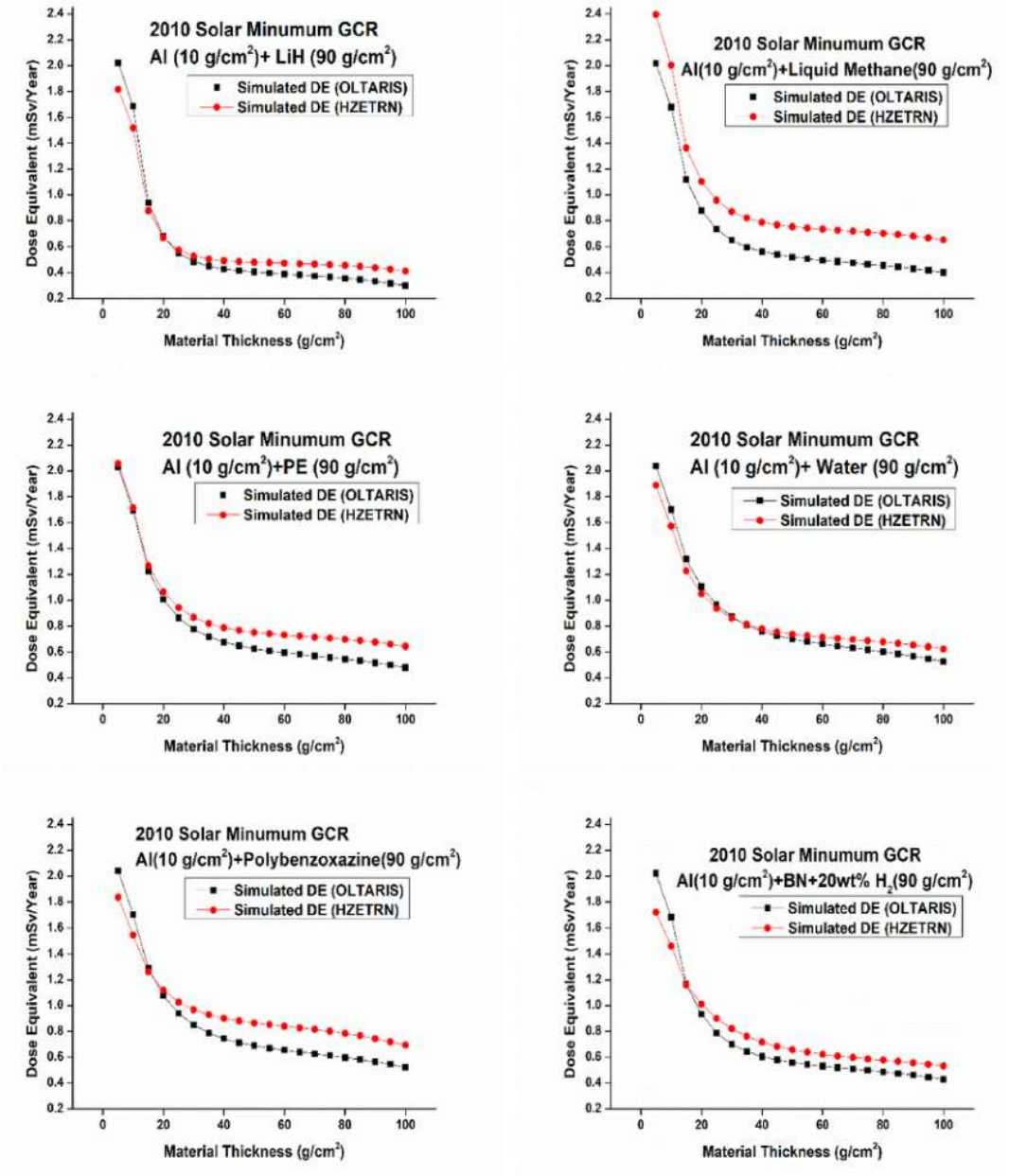


Figura 2-25: Confronto tra combinazioni multistrato Al+materiale idrogenato simulato con OLTARIS e HZETRN per GCR al minimo solare 2010 *[62]*.

La sola aggiunta di polietilene o di acqua può essere efficace dal punto di vista radiologico, ma non sempre efficiente dal punto di vista strutturale. Per questo motivo la ricerca aerospaziale esplora compositi capaci di combinare resistenza meccanica, stabilità termica e schermatura. I sistemi contenenti idrogeno, boro e azoto sono interessanti perché l'idrogeno contribuisce a moderare, fermare o frammentare le particelle incidenti, mentre boro e azoto restano elementi a basso Z e possono contribuire al controllo dei neutroni secondari [63].

Il **boron nitride nanotube**, BNNT, è proposto come rinforzo nanostrutturato per materiali schermanti strutturali. La fonte NASA sottolinea che il BNNT può essere processato in sistemi potenzialmente portanti, incorporato in polimeri ad alto

contenuto di idrogeno e modificato mediante accumulo o idrogenazione. Le simulazioni riportate nelle figure 2-26 e 2-27 indicano che BNNT non idrogenato non supera sempre i materiali schermanti di riferimento, salvo nel caso dei neutroni secondari; l'introduzione di idrogeno, anche al 5% in massa, migliora invece in modo sensibile la protezione a parità di spessore lineare. Il principale limite resta la maturità tecnologica: produzione, scalabilità, controllo della lunghezza dei nanotubi, integrazione in compositi e qualificazione in ambiente spaziale [63].

I materiali a base di **polybenzoxazine, UHMWPE, poliimmidi e nanofiller a base di boro e azoto** rispondono alla stessa esigenza: sostituire il concetto di schermatura aggiuntiva con quello di materiale strutturale schermante. Questo approccio è potenzialmente molto vantaggioso, perché ogni chilogrammo dovrebbe svolgere più funzioni: resistere ai carichi di pressurizzazione, proteggere da micrometeoriti e abrasione, contribuire alla schermatura e mantenere la compatibilità con la temperatura, con il vuoto, con la polvere lunare e l'abitabilità interna [65] [63].

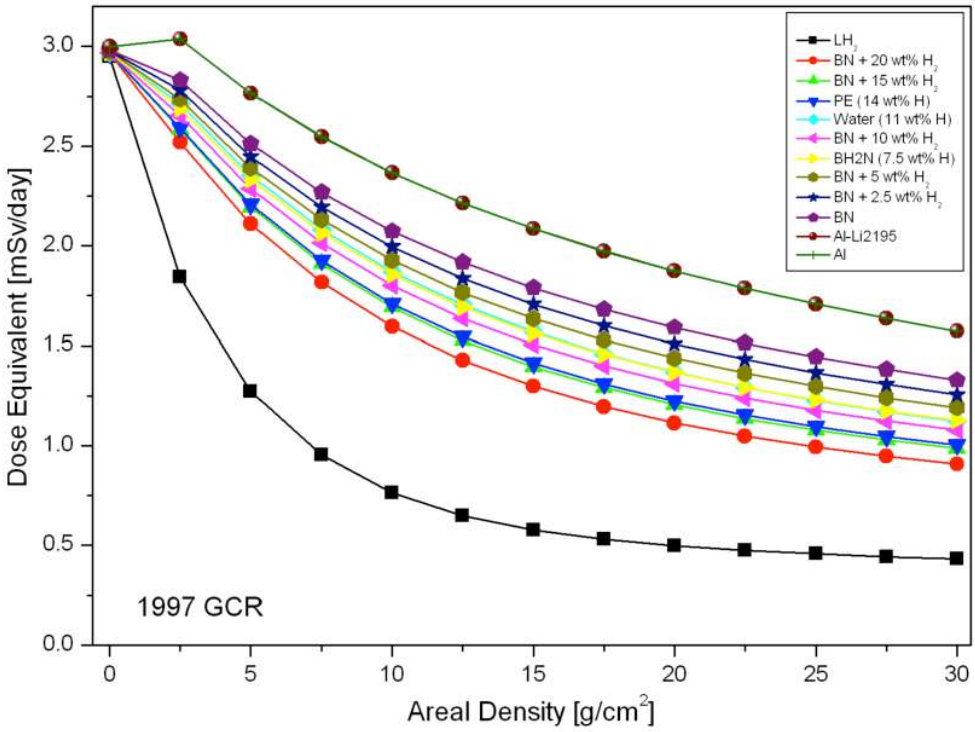


Figura 2-26: Dose equivalente GCR calcolata per materiali a base di BN e idrogeno al variare della densità areale *[63]*.

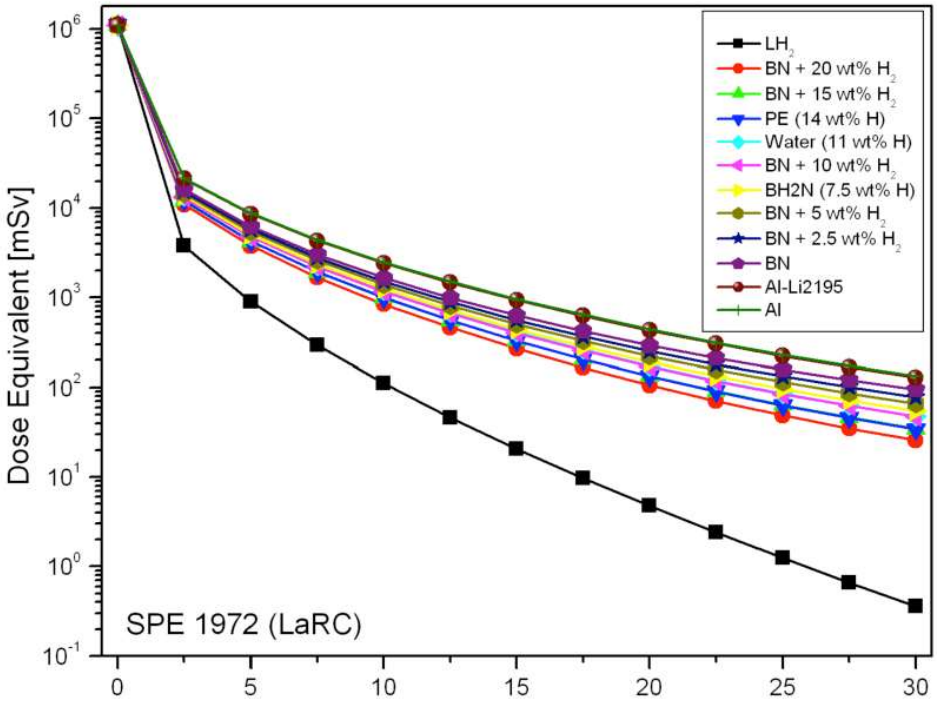


Figura 2-27: Dose equivalente per l'evento SPE 1972 calcolata per materiali a base di BN e idrogeno al variare della densità areale *[63]*.

Accanto alla schermatura passiva e ai materiali multifunzionali, la letteratura considera anche **schermature attive** basate su campi magnetici, elettrostatici o configurazioni al plasma. L'idea è deviare le particelle cariche prima che raggiungano il volume abitato, riducendo la dipendenza dalla massa passiva. Le configurazioni toroidali superconduttive sono tra le più discusse, perché possono teoricamente ridurre il campo incidente su un habitat di lunga durata. Tuttavia, le difficoltà sono rilevanti: dimensioni del sistema, massa, assemblaggio in orbita, criogenia, ridondanza, affidabilità, interazione con il veicolo e necessità di combinazione con una schermatura passiva. Per un rover pressurizzato lunare, la schermatura attiva appare quindi più come prospettiva futura che come soluzione di riferimento a breve termine [66] [67] [59].

Per il rover pressurizzato, la soluzione più realistica nel breve-medio periodo è quindi un'architettura ibrida di schermatura passiva e ottimizzazione operativa. La scocca esterna deve garantire integrità strutturale, pressurizzazione e protezione meccanica; gli strati interni e la disposizione dei sistemi devono invece massimizzare il contenuto di materiali a basso Z e ricchi di idrogeno nella direzione delle zone occupate. Acqua, alimenti, batterie, indumenti, contenitori e materiali polimerici possono diventare parte del sistema di protezione se il layout viene progettato con criteri radiologici fin dall'inizio. La zona di rifugio per SPE dovrebbe essere piccola, raggiungibile rapidamente e circondata dalla massima densità areale disponibile, evitando però materiali ad alto Z non necessari che possano aumentare la produzione di secondari [1] [20] [58].

In sintesi, lo stato dell'arte aerospaziale conferma che la protezione dalle radiazioni per un rover lunare non può essere trattata come una semplice barriera uniforme. La soluzione più credibile è una combinazione di schermatura strutturale, materiali idrogenati, massa funzionale distribuita, rifugio locale per SPE, procedure operative e verifica numerica. Le pareti del rover devono essere considerate come parte di un sistema schermante più ampio: esternamente devono resistere all'ambiente lunare e alla pressurizzazione, internamente devono guidare la produzione e l'assorbimento dei secondari, e geometricamente devono proteggere soprattutto le aree occupate per tempi lunghi.

I settori medico, nucleare e della ricerca scientifica offrono principi consolidati di attenuazione, controllo dell'accesso, scelta dei materiali e ottimizzazione ALARA; il settore spaziale aggiunge però i vincoli decisivi di massa, multifunzionalità, campo isotropo, secondari prodotti dalla struttura e necessità di sopravvivenza a eventi solari improvvisi. Per questo motivo, la selezione delle tecnologie dovrà valutare non solo il coefficiente di attenuazione di ciascun materiale, ma anche la densità areale, la produzione di neutroni, la compatibilità strutturale, l'integrabilità con sistemi già presenti nel rover e la possibilità di creare un volume protetto senza compromettere mobilità e abitabilità.

Capitolo 3

3. Metodologia di analisi

Nel seguente capitolo viene riportata la metodologia seguita effettuare un'analisi preliminare della capacità dei materiali nel mitigare la dose equivalente del flusso radiativo presente sulla superficie lunare.

Da queste analisi si ottiene come risultato la densità areale σ, espressa in g/cm^2, si usa questa perché, nelle schermature radiologiche, è spesso più utile indicare la massa di materiale attraversata per unità di superficie anziché il solo spessore geometrico. Inoltre, da tale quantità è facile ricavare sia lo spessore s, nota la densità ρ del materiale, sia la massa m nota la superficie A da schermare, tramite le equazioni (3.1) (3.2) sotto riportate.

$$s = \frac{\sigma}{\rho} \tag{3.1}$$

$$m = \sigma * A \tag{3.2}$$

Tale analisi è suddivisa in due parti al variare delle condizioni ambientali e delle limitazioni imposte dalla NASA [10]:

- Durante un minimo solare con predominanza di GCR, perché è il periodo durante il quale il flusso radiativo è maggiore rispetto ai periodi di minimo solare, dunque anche la dose risulta maggiore, ma la tipologia di radiazioni è pressoché identica.
  Questa situazione rappresenta la maggior parte del tempo se non la totalità dell'ambiente radiativo lunare.
- Durante una SPE, perché il campo radiativo varia notevolmente rispetto alla maggior parte del tempo proprio per la natura di tali eventi, descritti nel primo capitolo.
  Questi rappresentano eventi sporadici, potenzialmente pericolosi, per cui gli astronauti vanno protetti.

3.1 GCR

Per questa analisi preliminare il limite di dose efficace di 600 mSv/carriera [10] deve essere convertita in dose equivalente per poter effettuare il dimensionamento dello spessore del materiale che svolgerà il compito di protezione dalle radiazioni.

In queste fasi preliminari si può assumere che la dose equivalente sia uguale per tutti gli organi interni quindi, si può scrivere l'equazione inversa dell'equazione (1.4) ottenendo:

$$H = \frac{E}{T * w_T} \tag{3.3}$$

Dove T è il numero di organi presi in considerazione mentre, w_T è la media dei fattori di qualità d'assorbimento degli organi; gli organi ed i fattori di qualità considerati sono quelli riportati nella tabella 1-4.

Poiché nei grafici riportati nel capitolo 2, che verranno utilizzati per le analisi, è riportata la dose equivalente giornaliera mentre la normativa indica la dose per durata della carriera, sarà tutto riportato a dose al giorno e la durata della carriera sarà il parametro libero espresso sempre in giorni.

Per durata della carriera si intende il periodo massimo che un singolo astronauta può passare all'interno del rover pressurizzato, tale periodo può essere speso in un'unica missione o suddivisa in più missioni di durata ridotta, quello che conta, tuttavia, è la totalità dei giorni passati all'interno del veicolo.

Quindi, al variare della durata della carriera varierà anche la dose equivalente limita giornaliera che l'astronauta potrà assorbire.

Nella tabella 3-1 sono riportati i valori di H limite al variare del tempo di carriera che sono stati utilizzati nelle analisi.

Tabella 3-1 H limite al variare di t carriera.

t carriera [day]	H limite [mSv/day]
30	7.81
60	3.91
120	1.95
240	0.98
365	0.64

Per proseguire con l'analisi bisogna definire la funzione caratteristica dell'assorbimento di dose equivalente del materiale che si vuole analizzare. Per fare ciò, si è partito dai grafici riportati nel secondo capitolo e tramite il sito WebPlotDigitaizer [68] si sono ricavati abbastanza punti per poter ricostruire la funzione. In particolare, si è utilizzata la figura 2-23 per l'alluminio e la figura 2-25 per 10 g/cm^2 di alluminio (corrispondente a 3,7 cm di spessore) seguito da: idrogeno liquido, metano liquido, PE, acqua e BN + 20wt% H_2.

Questi grafici sono stati derivati da simulazioni dell'ambiente radiativo durante il minimo solare del 2010 sulla piattaforma OLTARIS utilizzando il codice di trasporto 3DHZETRN realizzato dalla NASA Langley Research Center, che implementa una linearizzazione dell'equazione di Boltzmann descritta nel paragrafo 1.1.1.

Quindi si è svolta un'interpolazione polinomiale, utilizzando le funzioni polyfit e polyval su Matlab, ricavando rispettivamente i coefficienti della funzione ed i valori numerici della stessa. Così facendo si è ottenuta la curva desiderata, sotto forma di equazione del tipo:

$$\mathrm{H}(\sigma) = A_0 + \sum_{i=1}^{N} A_N * \sigma^N \tag{3.4}$$

Dove N è il grado dell'equazione, che è stato scelto da materiale a materiale per ottimizzare la computazione, e gli A_N sono i coefficienti dei monomi.

Il grado N è stato valutato per ogni materiale o coppia di materiali considerando tre valori:

- Norma relativa, indicante la distanza complessiva tra i dati e la curva di fit. Il valore di tale parametro deve essere il più vicino possibile a zero, in quanto più ci è vicino più il modello risulta aderente ai dati. In generale un risultato inferiore a 0.1/0.2 è ritenuto accettabile;
- R^2, indicante quanto il modello descrive la variabilità dei dati. Il valore di tale parametro deve essere il più vicino possibile ad uno, in quanto più ci è vicino più il modello risulta adattato ai dati. In generale un risultato superiore a 0.95 è ritenuto accettabile;
- Numero di condizionamento, indicante la sensibilità numerica del fit a piccole variazioni dei dati. Il valore di tale parametro deve essere il più piccolo possibile, in quanto più è prossimo allo zero minore sarà la sensibilità a piccole variazioni o ad errori numerici, con conseguente minore perdita di cifre significative. In generale, visto che quattro cifre significative sono sufficienti per le analisi, un risultato dell'ordine di $10^{10}/10^{12}$ è ritenuto accettabile;
- Inoltre, viene anche considerata la monotonia della curva, in quanto per spessori tendenti all'infinito deve tendere a zero.

Ricavata l'equazione (3.4) si procede al calcolo delle intersezioni tra la curva trovata e la retta orizzontale rappresentante la limitazione giornaliera della dose equivalente indicate nella tabella 3-1, con la funzione roots su Matlab. Questo comando ricava gli zeri della funzione (3.5)

$$\mathrm{H}(\sigma) - H_{limite} = 0 \tag{3.5}$$

Che coincidono con le intersezioni tra le due curve.

Le intersezioni tra le curve analizzate e la retta rappresentativa del valore limite individuano gli spessori critici della schermatura. Per una curva decrescente, l'intersezione definisce lo spessore minimo oltre il quale la grandezza considerata, ad esempio la dose equivalente, risulta inferiore al limite ammissibile. Per una curva crescente, invece, essa individua lo spessore massimo oltre il quale il limite viene superato. Tali punti consentono quindi di determinare gli intervalli di spessore compatibili con i requisiti di sicurezza e rappresentano i principali risultati ricercati mediante l'analisi.

3.2 SPE

In caso di SPE, la normativa NASA stabilisce un limite di dose efficace pari a 250 mSv per l'intero evento solare di riferimento [10]. Tale valore rappresenta una dose cumulativa integrata durante l'evento e non un rateo di dose giornaliero; pertanto, non deve essere normalizzato rispetto alla durata della missione né espresso in mSv/day. Anche questo limite viene riportato a dose equivalente mediante l'equazione (3.3), secondo l'approssimazione precedentemente introdotta, ma viene analizzato separatamente dalla componente cronica dovuta ai GCR. Nel confronto tra le curve di dose e lo spessore schermante, il valore soglia associato allo SPE rimane quindi costante e individua lo spessore minimo necessario affinché la dose complessiva prodotta dall'evento sia inferiore al limite.

La durata complessiva della missione non modifica il valore numerico della soglia relativa al singolo SPE, ma influenza la probabilità che l'equipaggio incontri uno o più eventi solari. Inoltre, la dose ricevuta durante uno SPE contribuisce comunque al limite cumulativo di carriera. Pertanto, il limite di 250 mSv non è completamente indipendente dalla pianificazione della missione, ma non viene riproporzionato in funzione del numero di giorni trascorsi nello spazio.

Quindi la dose equivalente limite in caso di SPE è $H_{limite\ SPE} = 97.66\ mSv$.

Per quest'analisi si prende la SPE del 1972 come caso esemplare per le simulazioni come descritto nel primo capitolo.

Per proseguire si seguono in modo analogo i passi dell'analisi descritta precedentemente nel paragrafo 3.1, cioè si ricavano i punti delle curve, riportate nel capitolo 2, che descrivono l'andamento della dose equivalente nei diversi materiali in caso di SPE tramite il sito WebPlotDigitaizer [68], per poi ricostruire la funzione caratteristica. In particolare, si è utilizzata la figura 2-27 per: alluminio, idrogeno liquido, PE, acqua e BN + 20wt% H2.

Questi grafici sono stati derivati da simulazioni dell'ambiente radiativo durante la SPE del 1972 come sopra indicato; anche queste sono state svolte sulla piattaforma OLTARIS utilizzando il codice di trasporto 3DHZETRN realizzato dalla NASA Langley Research Center, che implementa una linearizzazione dell'equazione di Boltzmann descritta nel paragrafo 1.1.1.

In questa casistica non è stato possibile effettuare un'analisi sul metano liquido o su un multistrato del tipo alluminio più materiale per mancanza di dati, quindi, si sono utilizzate fonti che trattano i materiali singolarmente per avere un'idea dei loro comportamenti in via preliminare.

Quindi si è svolta un'interpolazione esponenziale, definendo prima la forma della curva con il comando fittype ed in seguito calcolando i valori dei coefficienti con la funzione fit su Matlab. Così facendo si è ottenuta la curva desiderata, sotto forma di equazione del tipo:

$$\mathrm{H}(\sigma) = \sum_{i=1}^{N} \mathrm{A}_N * e^{-\mu_N * \sigma} \tag{3.6}$$

Dove μ_N è il coefficiente dell'esponente e gli A_N sono i coefficienti dei monomi.

Il numero di esponenziali N è stato valutato per ogni materiale o coppia di materiali considerando tre valori:

- Norma relativa, indicante la distanza complessiva tra i dati e la curva di fit. Il valore di tale parametro deve essere il più vicino possibile a zero, in quanto più ci è vicino più il modello risulta aderente ai dati. In generale un risultato inferiore a 0.1 è ritenuto accettabile;
- R^2, indicante quanto il modello descrive la variabilità dei dati. Il valore di tale parametro deve essere il più vicino possibile ad uno, in quanto più ci è vicino più il modello risulta adattato ai dati. In generale un risultato superiore a 0.95 è ritenuto accettabile;
- Numero di condizionamento, indicante la sensibilità numerica del fit a piccole variazioni dei dati. Il valore di tale parametro deve essere il più piccolo possibile, in quanto più è prossimo allo zero minore sarà la sensibilità a piccole variazioni o ad errori numerici, con conseguente minore perdita di cifre significative. In generale, visto che quattro cifre significative sono sufficienti per le analisi, un risultato dell'ordine di 10^{11} è ritenuto accettabile.

Ricavata l'equazione (3.6) si procede al calcolo delle intersezioni tra la curva trovata e la retta orizzontale rappresentante la limitazione in caso di SPE della dose equivalente precedentemente calcolata, con la funzione roots su Matlab. Questo comando ricava gli zeri della funzione (3.7)

$$\mathrm{H}(\sigma) - H_{limite\ SPE} = 0 \tag{3.7}$$

Che coincidono con le intersezioni tra le due curve.

Le intersezioni tra le curve analizzate e la retta rappresentativa del valore limite individuano gli spessori critici della schermatura. Per una curva decrescente, l'intersezione definisce lo spessore minimo oltre il quale la grandezza considerata, ad esempio la dose equivalente, risulta inferiore al limite ammissibile. Per una curva crescente, invece, essa individua lo spessore massimo oltre il quale il limite viene superato. Tali punti consentono quindi di determinare gli intervalli di spessore compatibili con i requisiti di sicurezza e rappresentano i principali risultati ricercati mediante l'analisi.

In conclusione di questa tipologia di analisi, si ricava un solo valore d'intersezione, in quanto il valore limite è unico ed indipendente dalla durata della missione e le curve risultano tutte monotone decrescenti.

Capitolo 4

4. Risultati delle analisi dei materiali

4.1 Alluminio

4.1.1 Analisi durante il minimo solare del 2010

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-23, curva nera continua, è stata fatta un'analisi per scegliere il grado N dell'equazione riportata nella tabella 4-1.

Tabella 4-1 analisi per valutare il grado del fit polinomiale.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
3	0.436	0.936	$1.21*10^6$
5	0.088	0.997	$1.37*10^{10}$
7	0.047	0.999	$1.58*10^{14}$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.1 e dai valori riportati nella tabella 4-1, è stato effettuato il fit polinomiale su Matlab di quinto grado, i gradi pari non sono stati considerati in quanto tendono ad infinito al crescere dello spessore.

Si è ottenuta l'equazione (4.1)

$$\mathrm{H}(\sigma) = -1.55 * 10^{-9} + 4.89 * 10^{-7} * \sigma - 5.90 * 10^{-5} * \sigma^2 + 3.40 * 10^{-3} * \sigma^3 - 7.92 * 10^{-2} * \sigma^4 + 2.47 * \sigma^5 \quad (4.1)$$

Dalla figura 4-1, che riporta la funzione polinomiale (4.1) ottenuta, si evince un comportamento non monotono della curva dovuto alla generazione di radiazione secondaria dopo l'urto degli ioni più pesanti, che porta ad un aumento del flusso e di conseguenza all'aumento della dose.

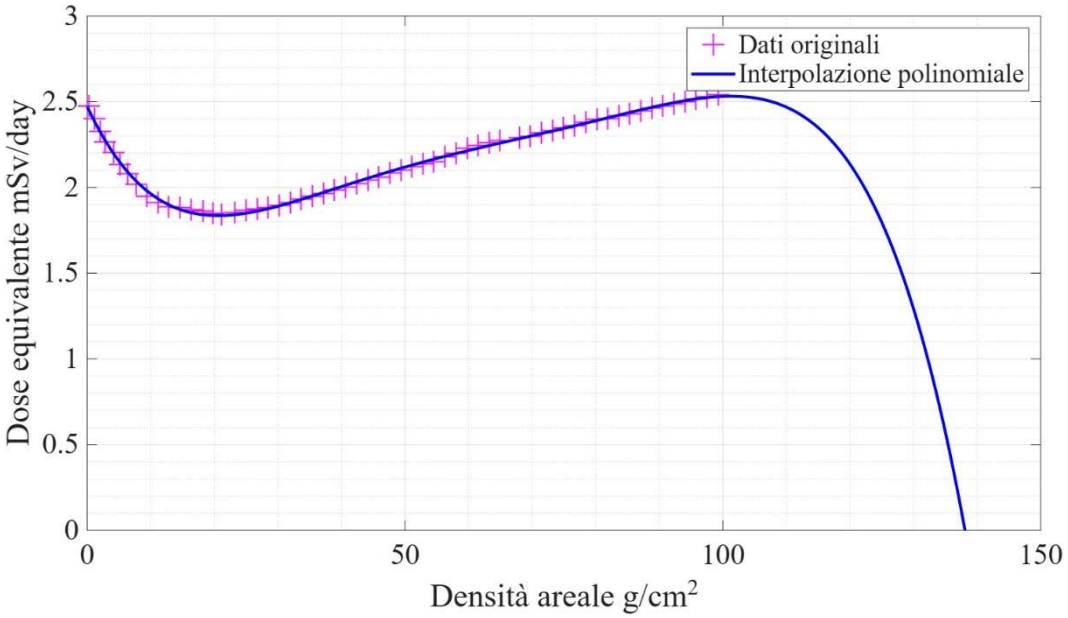


Figura 4-1: interpolazione polinomiale dei dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.1.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono riportati nella tabella 4-2 e graficati nella figura 4-2.

Tabella 4-2 densità areale e spessore al variare della durata di carriera.

t carriera [day]	H limite [mSv/day]	Densità areale [g/cm^2]	Spessore [cm]
30	7.81	-	-
60	3.91	-	-
120	1.95	10.37, 35.70, 122.9	3.84, 13.22, 45.53
240	0.98	132.39	49.03
365	0.64	134.58	49.84

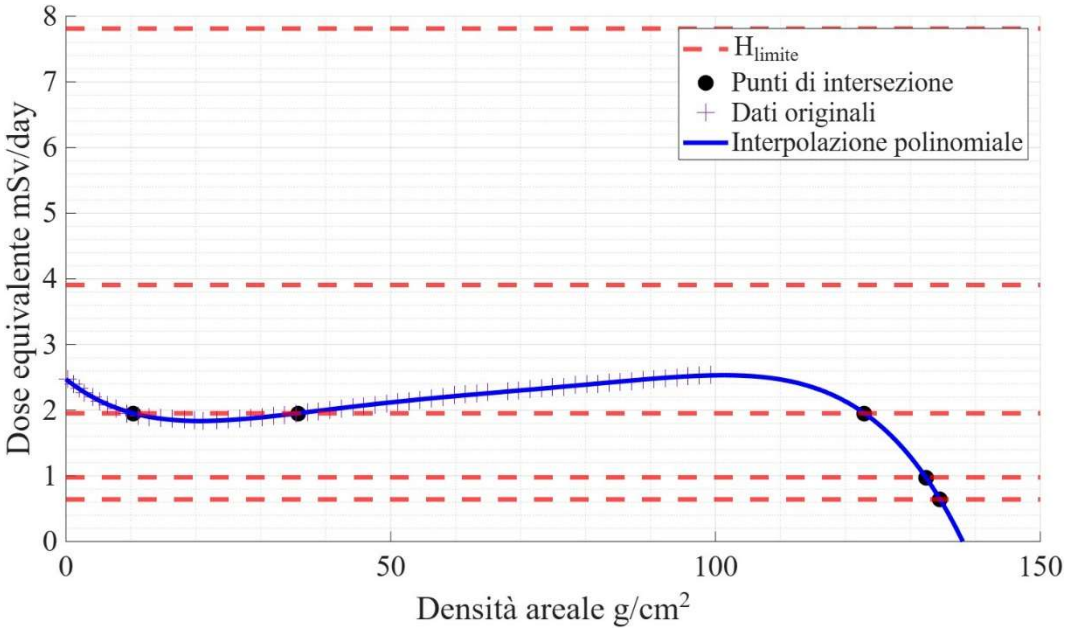


Figura 4-2: limiti al variare della durata della missione e relative intersezioni con l'interpolazione.

Dall'analisi dei dati in tabella 4-2 si nota come, aumentando i giorni che il singolo astronauta po' passare all'interno del rover, lo spessore aumenta molto rapidamente.

Inoltre, dalla figura 4-2 risulta importante tener conto, in successive analisi, del contributo allo spessore dovuto all'elettronica, ai computer, ai serbatoi e alle strutture secondarie per stivaggio o per altri scopi in quanto, queste aumentano lo spessore totale quindi, si rischia di superare il limite di dose equivalente a causa dell'aumento delle radiazioni secondarie, causa della non monotonia della funzione.

4.1.2 Analisi durante una SPE

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-27, curva dell'alluminio, è stata fatta un'analisi per scegliere il numero N di esponenziali nell'equazione riportata nella tabella 4-3.

Tabella 4-3 analisi per valutare il numero di esponenziali.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
1	1.085	0.824	$3.50*10^0$
2	0.193	0.995	$4.82*10^0$
3	0.023	0.999	$3.62*10^1$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.2 e dai valori riportati nella tabella 4-3, è stato effettuato il fit tri-esponenziale su Matlab.

Si è ottenuta l'equazione (4.2)

$$H(\sigma) = 1.04 * 10^6 * e^{-2.23*\sigma} + 3.12 * 10^4 * e^{-0.33*\sigma} + 4.02 * 10^3 * e^{-0.12*\sigma} \quad (4.2)$$

Dalla figura 4-3, che riporta la funzione esponenziale (4.2) ottenuta, si nota che l'andamento è monotono decrescente all'aumentare dello spessore, ciò è dovuto all'assenza di ioni pesanti che producono radiazione secondaria.

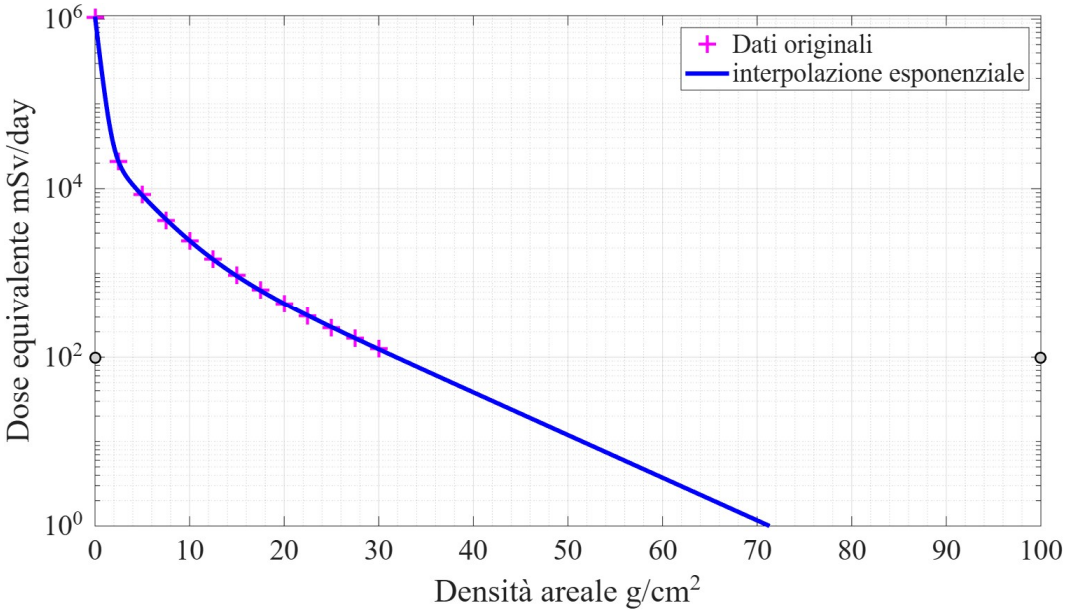


Figura 4-3: interpolazione esponenziale dei dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.2.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono sotto riportati e graficati nella figura 4-3.

$$H_{limite\ SPE} = 97.66\ mSv$$

$$\sigma_{SPE} = 32.02\ \frac{g}{cm^2}$$

$$s_{SPE} = 11.86\ cm$$

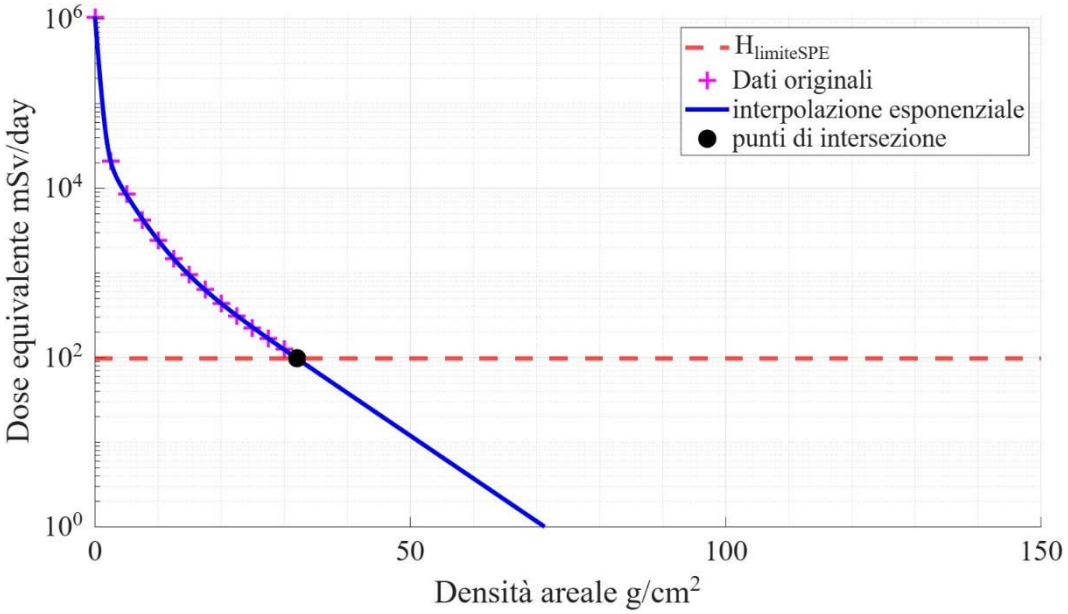


Figura 4-4: limite in caso di SPE ed intersezione con l'interpolazione esponenziale.

Come si vede dal risultato lo spessore risulta essere molto maggiore rispetto al caso precedente. Non conviene utilizzare gli spessori in caso di SPE perché questi sono eventi sporadici, rari e limitati nel tempo, nel caso si verificasse una situazione pericolosa si possono studiare delle protezioni temporanee come quelle viste nel capitolo 2 od in alternativa, si può progettare un'area maggiormente schermata da utilizzare per le emergenze, che però non appesantiscano l'intera struttura.

4.2 Alluminio ed idrogeno liquido

4.2.1 Analisi durante il minimo solare del 2010

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-26, curva dell'idrogeno liquido, è stata fatta un'analisi per scegliere il grado N dell'equazione riportata nella tabella 4-4.

Tabella 4-4 valori per determinare il grado dell'interpolazione polinomiale.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
3	0.476	0.962	$1.36*10^6$
6	0.222	0.992	$1.42*10^{12}$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.1 e dai valori riportati nella tabella 4-4, è stato effettuato il fit polinomiale su Matlab di sesto grado, in quanto per N=3 i dati non sono ben rappresentati e per N>6 il numero di condizionamento peggiora

significativamente senza grandi miglioramenti di precisione; i gradi non riportati indicano che la curva tende all'infinito.

Si è ottenuta l'equazione (4.3)

$$H(\sigma) = 2.48 - 0.13 * \sigma + 1.80 * 10^{-3} * \sigma^2 + 5.30 * 10^{-5} * \sigma^3 - 1.77 * 10^{-6} * \sigma^4 + 1.80 * 10^{-8} * \sigma^5 - 6.25 * 10^{-11} * \sigma^6 \quad (4.3)$$

Dalla figura 4-5, che riporta la funzione polinomiale (4.3) ottenuta, si evince un comportamento monotono decrescente dovuto alla ridotta produzione di radiazioni secondarie grazie al ridotto numero atomico dell'idrogeno.

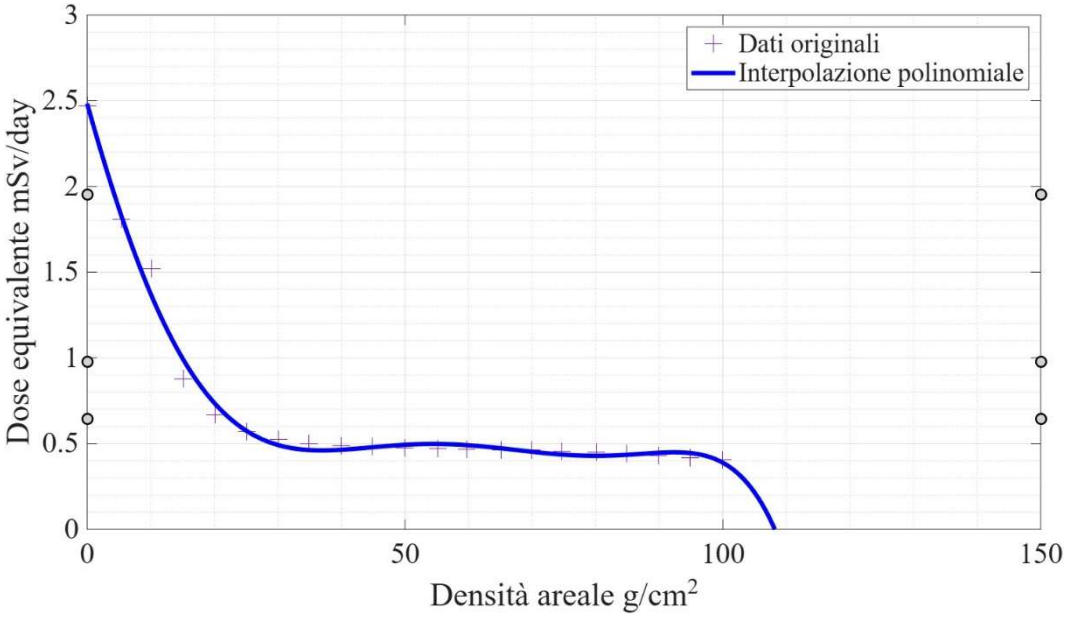


Figura 4-5: interpolazione polinomiale dei dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.1.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono riportati nella tabella 4-5 e graficati nella figura 4-5.

Tabella 4-5 densità areale e spessore al variare della durata della carriera.

t carriera [day]	H limite [mSv/day]	Densità areale [g/cm^2]	Spessore [cm]
30	7.81	-	-
60	3.91	-	-
120	1.95	4.16	12.60
240	0.98	15.17	45.97
365	0.64	22.51	68.20

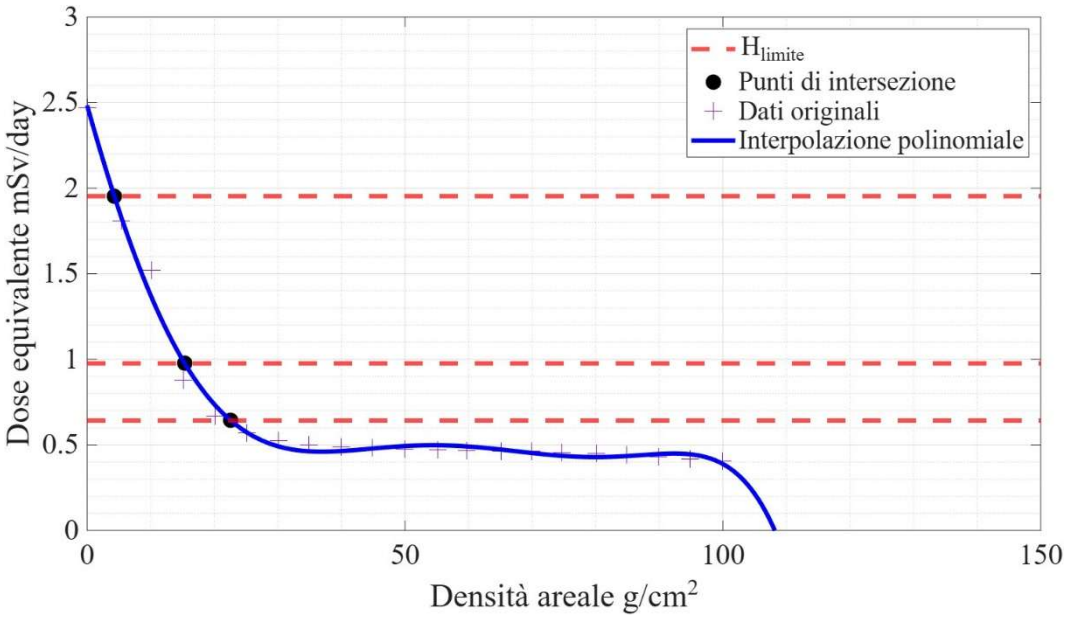


Figura 4-6: punti d'intersezione tra il limite di dose equivalente e l'interpolazione.

Dall'analisi dei dati in tabella 4-5 e dalla figura 4-6 si nota come, l'andamento della dose equivalente è fortemente decrescente fino a densità areali di 20-30 g/cm^2 per poi diventare sostanzialmente costante ed uguale a 0.5 mSv/day per densità superiori. Questo ha effetti rilevanti sugli spessori al variare della durata della carriera, in quanto oltre l'anno di missione gli spessori aumenterebbero molto per stare al di sotto del limite.

Inoltre, dalla figura 4-6 risulta importante tener conto, in successive analisi, del contributo allo spessore dovuto all'elettronica, ai computer, ai serbatoi e alle strutture secondarie per stivaggio o per altri scopi in quanto, queste aumentano lo spessore totale ma, essendo la curva monotona decrescente questo aumento avrebbe solo effetti positivi.

4.2.2 Analisi durante una SPE (solo idrogeno liquido)

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-27, curva dell'idrogeno liquido, è stata fatta un'analisi per scegliere il numero N di esponenziali nell'equazione riportata nella tabella 4-6.

Tabella 4-6 valori per la scelta del numero N di esponenziali.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
1	1.477	0.883	$3.48*10^0$
2	0.245	0.997	$4.70*10^0$
3	0.027	0.999	$2.68*10^1$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.2 e dai valori riportati nella tabella 4-6, è stato effettuato il fit tri-esponenziale su Matlab.

Si è ottenuta l'equazione (4.4)

$$H(\sigma) = 9.91 * 10^5 * e^{-2.81*\sigma} + 8.58 * 10^3 * e^{-0.51*\sigma} + 7.41 * 10^2 * e^{-0.26*\sigma} \quad (4.4)$$

Dalla figura 4-7, che riporta la funzione esponenziale (4.4) ottenuta, si nota che l'andamento è monotono decrescente all'aumentare dello spessore, ciò è dovuto all'assenza di ioni pesanti che producono radiazione secondaria.

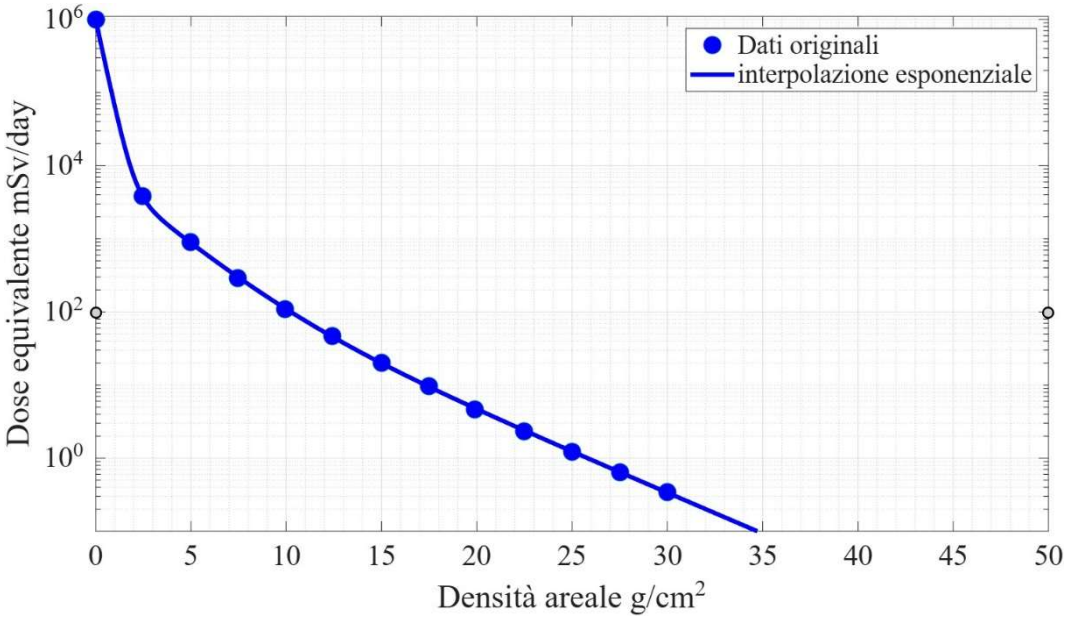


Figura 4-7: interpolazione esponenziale dei dati.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.2.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono sotto riportati e graficati nella figura 4-8.

$$H_{limite\ SPE} = 67.66\ mSv$$

$$\sigma_{SPE} = 10.30 \frac{g}{cm^2}$$

$$s_{SPE} = 31.22\ cm$$

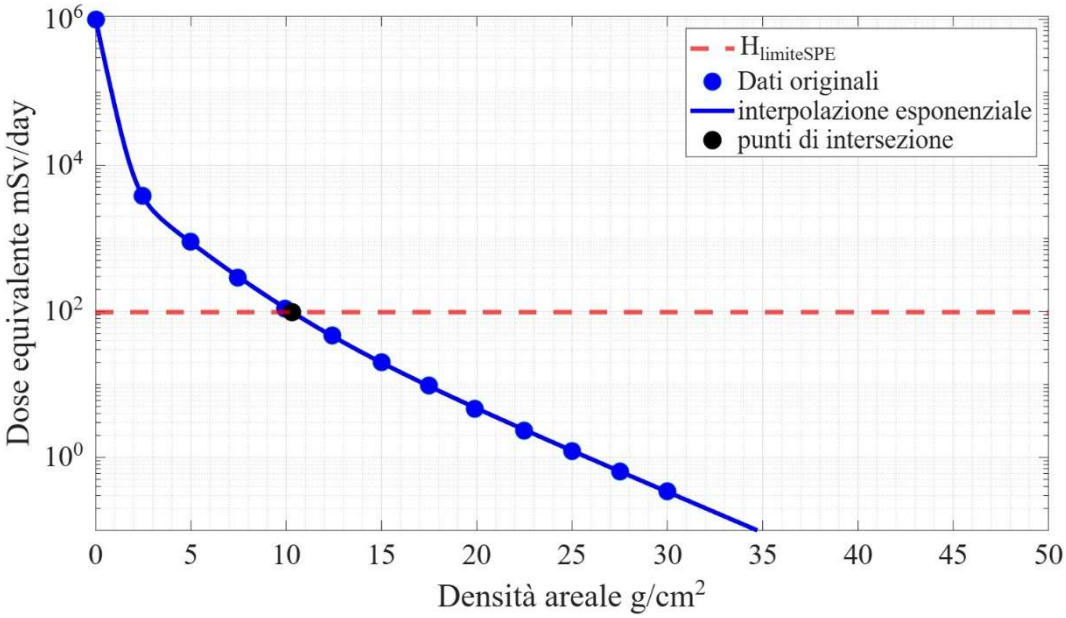


Figura 4-8: intersezione tra il limite di dose equivalente ed interpolazione esponenziale.

Come si vede dal risultato e dalla figura 4-8, lo spessore risulta essere inferiore rispetto al caso precedente. Questo si verifica perché l'idrogeno liquido è poco denso, quindi risulta poco efficacie nello schermare gli ioni pesanti presenti nei GCR ed assenti durante gli SPE.

Quindi, Non conviene utilizzare gli spessori in caso di SPE come dimensionanti perché, questi non basterebbero per la maggioranza delle situazioni in quanto sono eventi sporadici, rari e limitati nel tempo, nel caso si verificasse una situazione pericolosa non sarebbe strettamente necessario progettate delle protezioni aggiuntive.

4.3 Alluminio e metano liquido

4.3.1 Analisi durante il minimo solare del 2010

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-25, curva rossa del grafico alluminio-metano liquido, è stata fatta un'analisi per scegliere il grado N dell'equazione riportata nella tabella 4-7.

Tabella 4-7 valori per la scelta del grado N dell'interpolazione.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
3	0.443	0.969	$1.35*10^6$
6	0.279	0.988	$1.39*10^{12}$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.1 e dai valori riportati nella tabella 4-7, è stato effettuato il fit polinomiale su Matlab di sesto grado, in quanto per N=3 i dati non sono ben rappresentati e per N>6 il numero di condizionamento peggiora significativamente senza grandi miglioramenti di precisione; i gradi non riportati indicano che la curva tende all'infinito.

Si è ottenuta l'equazione (4.5)

$$H(\sigma) = 2.53 - 2.46 * 10^{-2} * \sigma - 6.50 * 10^{-3} * \sigma^2 + 3.21 * 10^{-4} * \sigma^3 - 6.03 * 10^{-6} * \sigma^4 + 5.10 * 10^{-8} * \sigma^5 - 1.62 * 10^{-10} * \sigma^6 \quad (4.5)$$

Dalla figura 4-9, che riporta la funzione polinomiale (4.5) ottenuta, si evince un comportamento monotono decrescente dovuto alla ridotta produzione di radiazioni secondarie grazie al ridotto numero atomico complessivo.

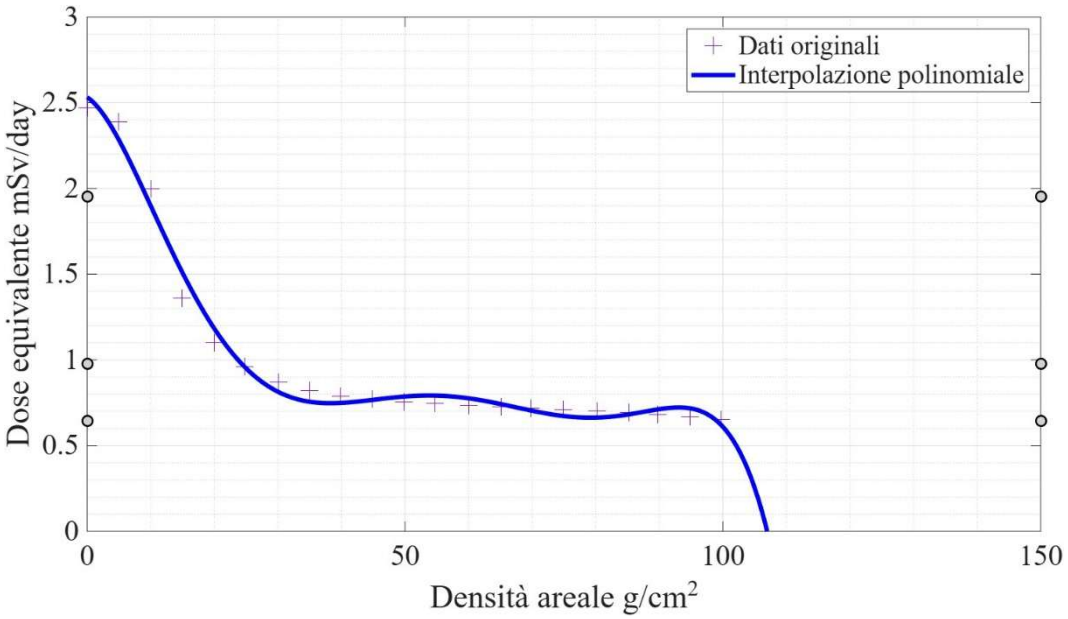


Figura 4-9: interpolazione polinomiale con i dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.1.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono riportati nella tabella 4-8 e graficati nella figura 4-10.

Tabella 4-8 densità areale e spessore al variare della durata della missione.

t carriera [day]	H limite [mSv/day]	Densità areale [g/cm^2]	Spessore [cm]
30	7.81	-	-
60	3.91	-	-
120	1.95	9.37	13.58
240	0.98	24.40	35.36
365	0.64	99.41	144.1

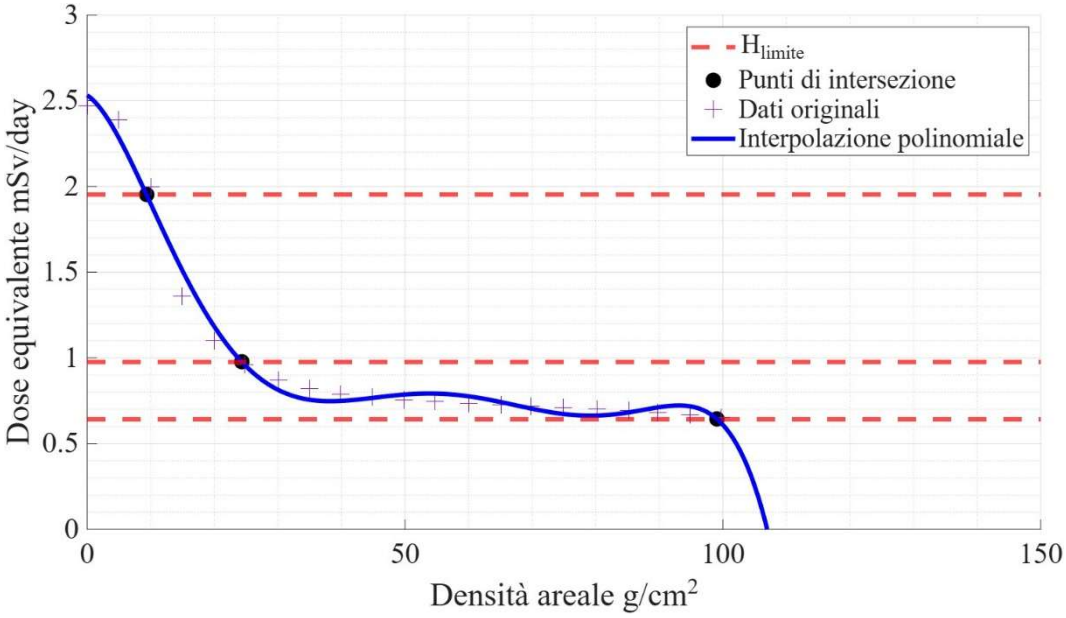


Figura 4-10: intersezione tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione.

Dall'analisi dei dati in tabella 4-8 e dalla figura 4-10 si nota come, l'andamento della dose equivalente è fortemente decrescente fino a densità areali di 35-45 g/cm^2 per poi diventare sostanzialmente costante ed uguale a 0.75 mSv/day per densità superiori. Questo ha effetti rilevanti sugli spessori al variare della durata della carriera, in quanto oltre i 240 giorni di missione gli spessori aumenterebbero molto per stare al di sotto del limite come dimostrato dal caso di un anno di missione.

Inoltre, dalla figura 4-01 risulta importante tener conto, in successive analisi, del contributo allo spessore dovuto all'elettronica, ai computer, ai serbatoi e alle strutture secondarie per stivaggio o per altri scopi in quanto, queste aumentano lo spessore totale ma, essendo la curva monotona decrescente questo aumento avrebbe solo effetti positivi.

4.4 Alluminio e polietilene

4.4.1 Analisi durante il minimo solare del 2010

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-25, curva rossa del grafico alluminio-polietilene, è stata fatta un'analisi per scegliere il grado N dell'equazione riportata nella tabella 4-9.

Tabella 4-9 valori per la scelta del grado N dell'interpolazione.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
3	0.285	0.984	$1.36*10^6$
6	0.122	0.997	$1.41*10^{12}$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.1 e dai valori riportati nella tabella 4-4, è stato effettuato il fit polinomiale su Matlab di sesto grado, in quanto per N=3 i dati non sono ben rappresentati e per N>6 il numero di condizionamento peggiora significativamente senza grandi miglioramenti di precisione; i gradi non riportati indicano che la curva tende all'infinito.

Si è ottenuta l'equazione (4.6)

$$\mathrm{H}(\sigma) = 2.49 - 9.19 * 10^{-2} * \sigma + 2.95 * 10^{-4} * \sigma^2 + 7.09 * 10^{-5} * \sigma^3 - 1.76 * 10^{-6} * \sigma^4 + 1.65 * 10^{-8} * \sigma^5 - 5.48 * 10^{-11} * \sigma^6 \quad (4.6)$$

Dalla figura 4-11, che riporta la funzione polinomiale (4.6) ottenuta, si evince un comportamento monotono decrescente dovuto alla ridotta produzione di radiazioni secondarie grazie al ridotto numero atomico complessivo.

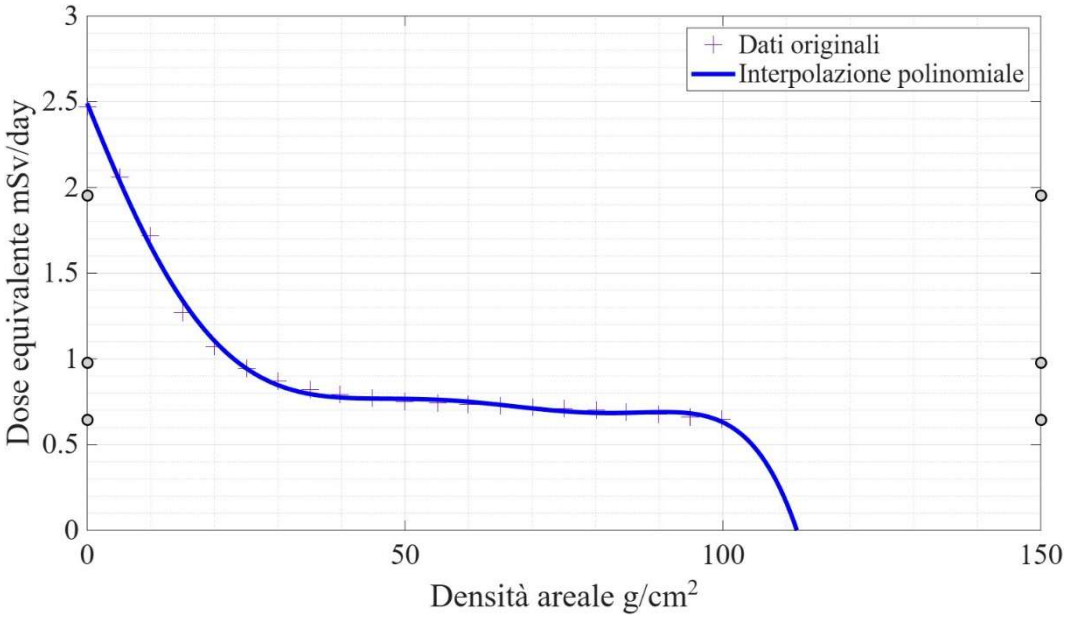


Figura 4-11: interpolazione polinomiale con i dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.1.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono riportati nella tabella 4-10 e graficati nella figura 4-12.

Tabella 4-10 densità areali e spessori al variare dei limiti di dose equivalente.

t carriera [day]	H limite [mSv/day]	Densità areale [g/cm^2]	Spessore [cm]
30	7.81	-	-
60	3.91	-	-
120	1.95	6.13	5.24
240	0.98	23.84	20.38
365	0.64	99.27	84.84

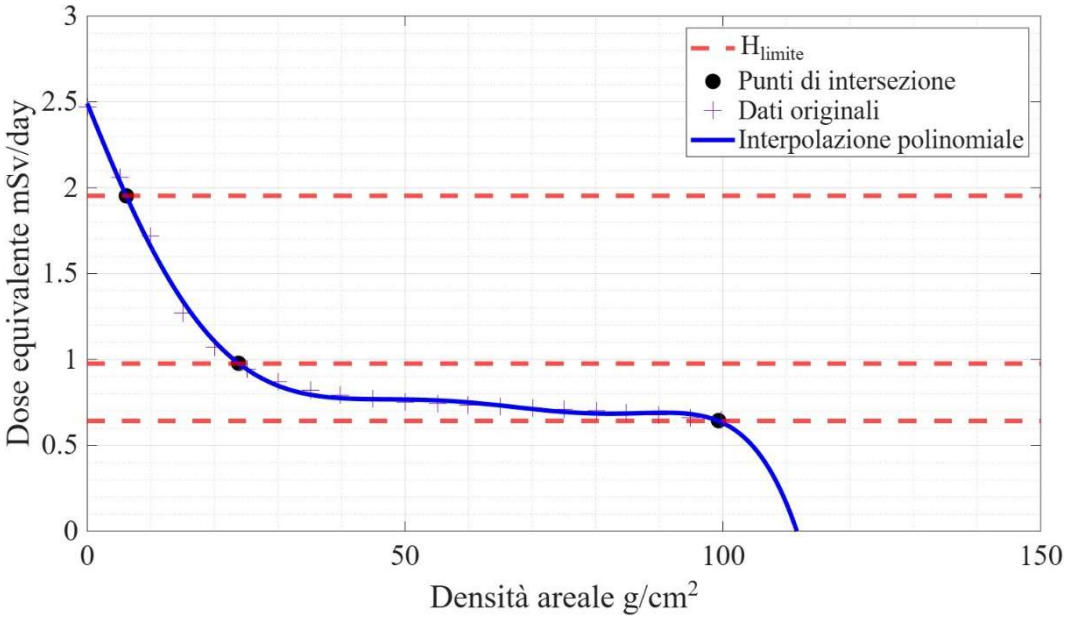


Figura 4-12: intersezioni tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione.

Dall'analisi dei dati in tabella 4-10 e dalla figura 4-12 si nota come, l'andamento della dose equivalente è fortemente decrescente fino a densità areali di 25-35 g/cm^2 per poi diventare sostanzialmente costante ed uguale a 0.75 mSv/day per densità superiori. Questo ha effetti rilevanti sugli spessori al variare della durata della carriera, in quanto oltre i 240 giorni di missione gli spessori aumenterebbero molto per stare al di sotto del limite, come dimostrato dal caso di missione di un anno.

Inoltre, dalla figura 4-12 risulta importante tener conto, in successive analisi, del contributo allo spessore dovuto all'elettronica, ai computer, ai serbatoi e alle strutture secondarie per stivaggio o per altri scopi in quanto, queste aumentano lo spessore totale ma, essendo la curva monotona decrescente questo aumento avrebbe solo effetti positivi.

4.4.2 Analisi durante una SPE (solo polietilene)

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-27, curva del polietilene, è stata fatta un'analisi per scegliere il numero N di esponenziali nell'equazione riportata nella tabella 4-6.

Tabella 4-11 valori per la scelta del numero N di esponenziali.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
1	1.256	0.822	$3.50*10^0$
2	0.233	0.995	$4.77*10^0$
3	0.029	0.999	$3.92*10^1$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.2 e dai valori riportati nella tabella 4-11, è stato effettuato il fit tri-esponenziale su Matlab.

Si è ottenuta l'equazione (4.7)

$$H(\sigma) = 1.05 * 10^6 * e^{-2.32*\sigma} + 1.71 * 10^4 * e^{-0.33*\sigma} + 1.20 * 10^3 * e^{-0.12*\sigma} \quad (4.7)$$

Dalla figura 4-13, che riporta la funzione esponenziale (4.7) ottenuta, si nota che l'andamento è monotono decrescente all'aumentare dello spessore, ciò è dovuto all'assenza di ioni pesanti che producono radiazione secondaria.

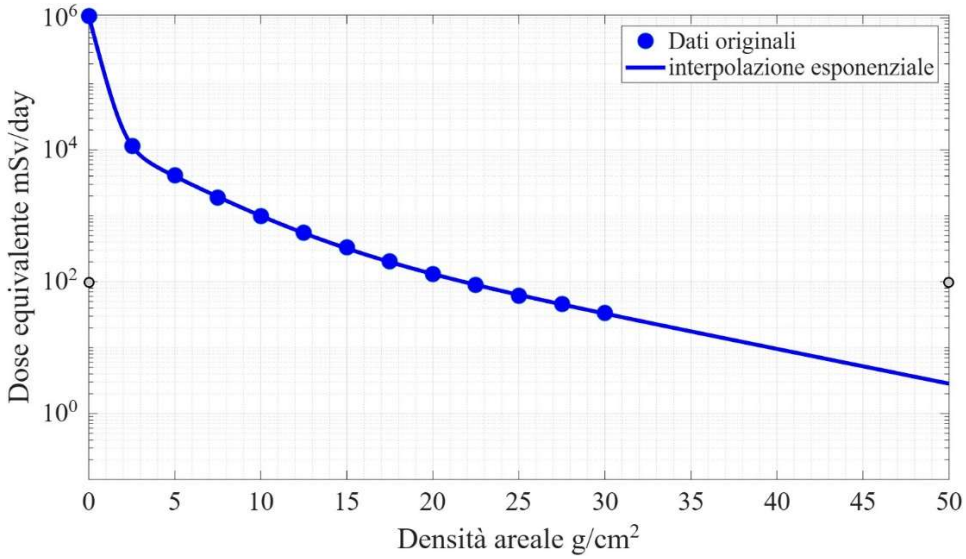


Figura 4-13: interpolazione esponenziale con i dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.2.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono sotto riportati e graficati nella figura 4-14.

$$H_{limite\ SPE} = 97.66\ mSv$$

$$\sigma_{SPE} = 21.91\ \frac{g}{cm^2}$$

$$s_{SPE} = 18.73\ cm$$

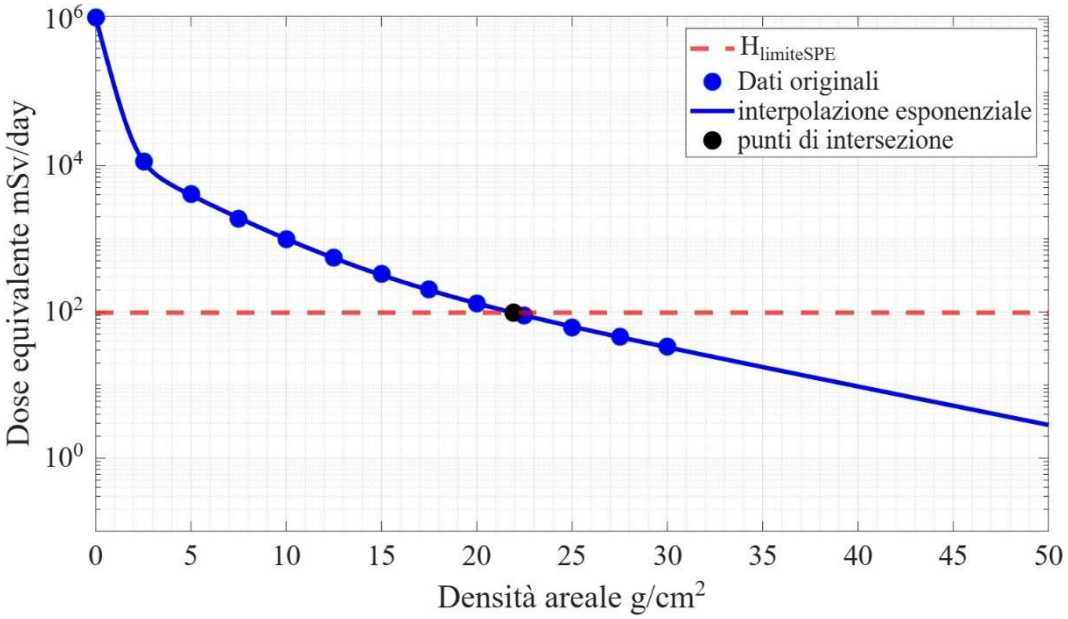


Figura 4-14: intersezione tra il limite di dose equivalente e l'interpolazione.

Come si evince dal risultato lo spessore risulta essere molto maggiore rispetto al caso precedente. Non conviene utilizzare gli spessori in caso di SPE, a meno di programmare missioni più lunghe di un anno, perché questi sono eventi sporadici, rari e limitati nel tempo, nel caso si verificasse una situazione pericolosa si possono studiare delle protezioni temporanee come quelle viste nel capitolo 2 od in alternativa, si può progettare un'area maggiormente schermata da utilizzare per le emergenze, che però non appesantiscano l'intera struttura.

4.5 Alluminio e acqua

4.5.1 Analisi durante il minimo solare del 2010

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-25, curva rossa del grafico alluminio-acqua, è stata fatta un'analisi per scegliere il grado N dell'equazione riportata nella tabella 4-12.

Tabella 4-12 valori per la scelta del grado N d'interpolazione.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
3	0.306	0.979	$1.36*10^6$
5	0.067	0.999	$1.42*10^{10}$
6	0.067	0.999	$1.42*10^{12}$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.1 e dai valori riportati nella tabella 4-4, è stato effettuato il fit polinomiale su Matlab di quinto grado, in quanto per N=3 i dati non sono ben rappresentati e per N>5 il numero di condizionamento peggiora significativamente senza grandi miglioramenti di precisione, come nel caso di N=6; i gradi non riportati indicano che la curva tende all'infinito.

Si è ottenuta l'equazione (4.8)

$$H(\sigma) = 2.46 - 1.26 * 10^{-1} * \sigma + 3.80 * 10^{-3} * \sigma^2 - 5.81 * 10^{-5} * \sigma^3 + 4.39 * 10^{-7} * \sigma^4 - 1.31 * 10^{-9} * \sigma^5 \quad (4.8)$$

Dalla figura 4-15, che riporta la funzione polinomiale (4.8) ottenuta, si evince un comportamento monotono decrescente dovuto alla ridotta produzione di radiazioni secondarie grazie al ridotto numero atomico complessivo.

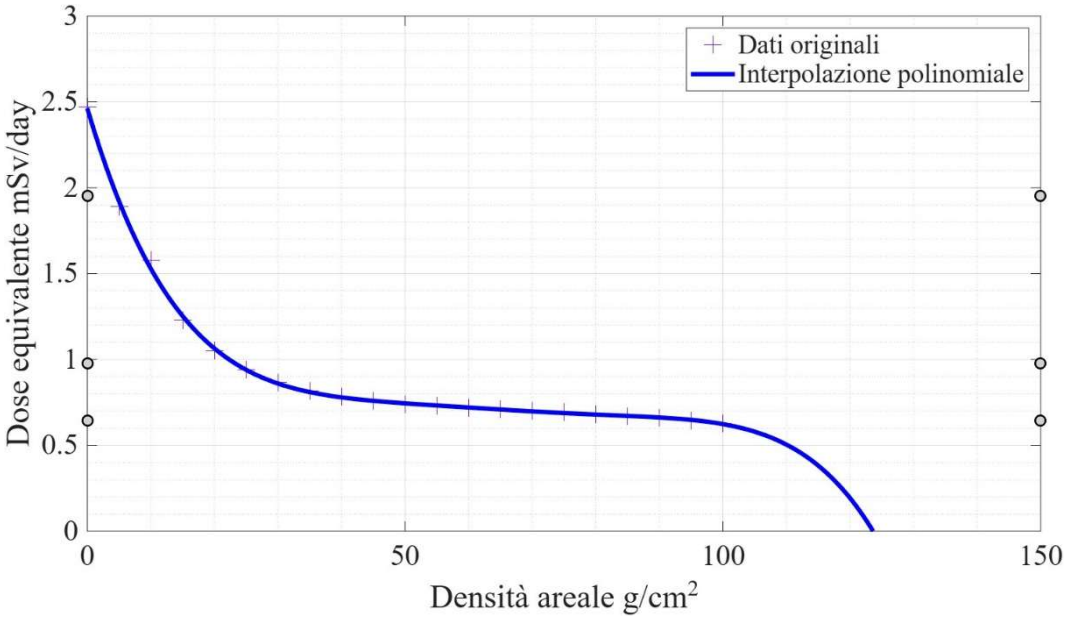


Figura 4-15: interpolazione polinomiale con i dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.1.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono riportati nella tabella 4-13 e graficati nella figura 4-16.

Tabella 4-13 densità areali e spessori al variare della durata della missione.

t carriera [day]	H limite [mSv/day]	Densità areale [g/cm^2]	Spessore [cm]
30	7.81	-	-
60	3.91	-	-
120	1.95	4.66	3.98
240	0.98	23.28	19.90
365	0.64	96.52	82.50

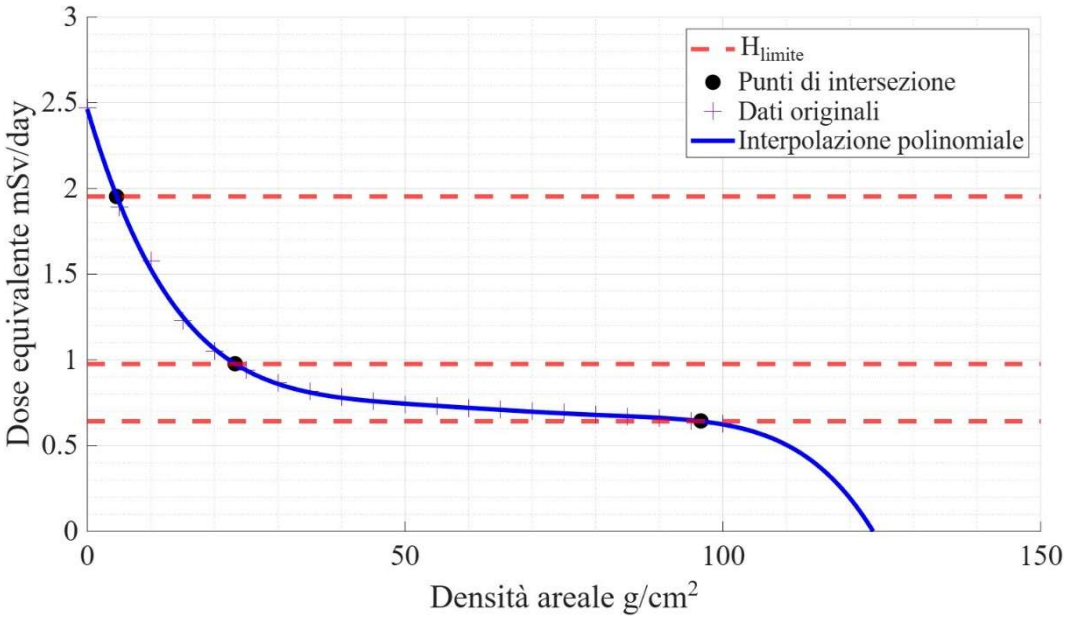


Figura 4-16: intersezione tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione.

Dall'analisi dei dati in tabella 4-13 e dalla figura 4-16 si nota come, l'andamento della dose equivalente è fortemente decrescente fino a densità areali di 20-40 g/cm^2, la presenza di ossigeno amplia la curva per via del suo numero atomico più elevato, per poi diventare sostanzialmente costante ed uguale a 0.7 mSv/day per densità superiori. Questo ha effetti rilevanti sugli spessori al variare della durata della carriera, in quanto oltre i 240 giorni di missione gli spessori aumenterebbero molto per stare al di sotto del limite, come dimostrato dall'esempio di missione di un anno.

Inoltre, dalla figura 4-16 risulta importante tener conto, in successive analisi, del contributo allo spessore dovuto all'elettronica, ai computer, ai serbatoi e alle strutture secondarie per stivaggio o per altri scopi in quanto, queste aumentano lo spessore totale ma, essendo la curva monotona decrescente questo aumento avrebbe solo effetti positivi.

4.5.2 Analisi durante una SPE (solo acqua)

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-27, curva dell'acqua, è stata fatta un'analisi per scegliere il numero N di esponenziali nell'equazione riportata nella tabella 4-14.

Tabella 4-14 valori per la scelta del numero N di esponenziali.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
1	1.249	0.815	$3.49*10^0$
2	0.233	0.995	$4.75*10^0$
3	0.024	0.999	$4.06*10^1$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.2 e dai valori riportati nella tabella 4-14, è stato effettuato il fit tri-esponenziale su Matlab.

Si è ottenuta l'equazione (4.9)

$$H(\sigma) = 1.12 * 10^6 * e^{-2.42*\sigma} + 1.82 * 10^4 * e^{-0.32*\sigma} + 1.24 * 10^3 * e^{-0.11*\sigma} \quad (4.9)$$

Dalla figura 4-17, che riporta la funzione esponenziale (4.9) ottenuta, si nota che l'andamento è monotono decrescente all'aumentare dello spessore, ciò è dovuto all'assenza di ioni pesanti che producono radiazione secondaria.

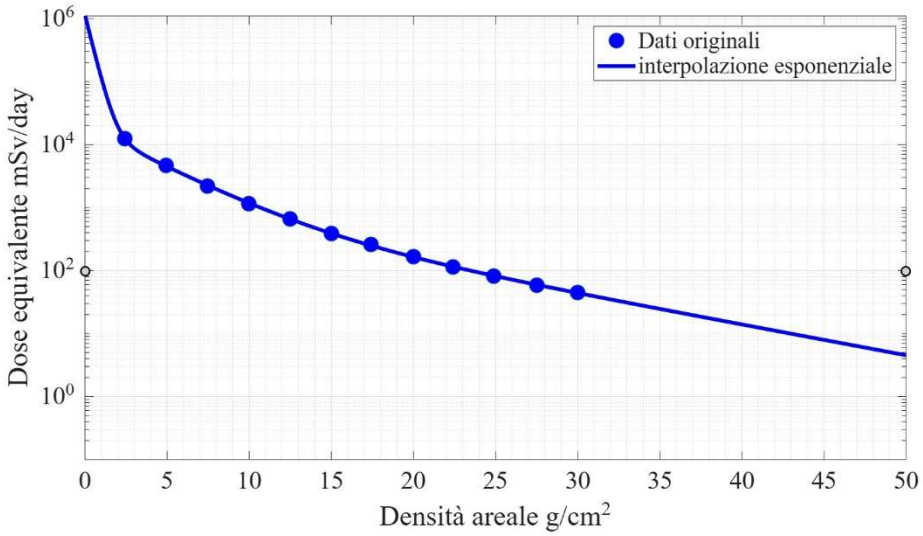


Figura 4-17: interpolazione esponenziale con i dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.2.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono sotto riportati e graficati nella figura 4-18.

$$H_{limite\ SPE} = 97.66\ mSv$$

$$\sigma_{SPE} = 23.64\ \frac{g}{cm^2}$$

$$s_{SPE} = 20.20\ cm$$

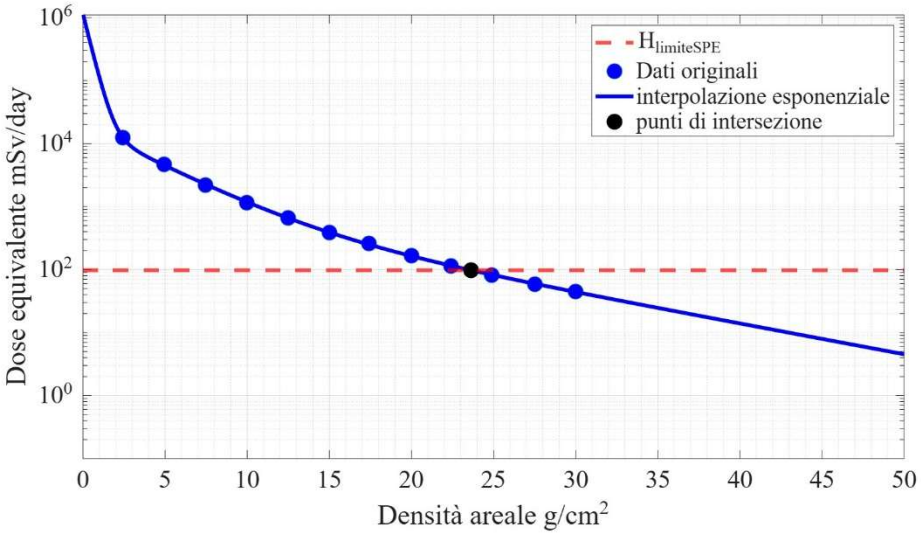


Figura 4-18: intersezione tra il limite di dose equivalente d l'interpolazione.

Come si vede dal risultato e dalla figura 4-18 lo spessore risulta essere maggiore rispetto al caso precedente. Non conviene utilizzare gli spessori in caso di SPE, a meno di missioni dalla durata superiore ai 240 giorni, perché questi sono eventi sporadici, rari e limitati nel tempo, nel caso si verificasse una situazione pericolosa si possono studiare delle protezioni temporanee come quelle viste nel capitolo 2 od in alternativa, si può progettare un'area maggiormente schermata da utilizzare per le emergenze, che però non appesantiscano l'intera struttura.

4.6 Alluminio e nitruro di boro (+ 20wt% idrogeno)

4.6.1 Analisi durante il minimo solare del 2010

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-25, curva rossa del grafico alluminio-nitruro di boro, è stata fatta un'analisi per scegliere il grado N dell'equazione riportata nella tabella 4-15.

Tabella 4-15 valori per la scelta del grado N d'interpolazione.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
3	0.389	0.967	$1.36*10^6$
5	0.140	0.996	$1.42*10^{10}$
7	0.094	0.998	$1.40*10^{14}$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.1 e dai valori riportati nella tabella 4-15, è stato effettuato il fit polinomiale su Matlab di quinto grado, in quanto per N=3 i dati non sono ben rappresentati e per N>5 il numero di condizionamento peggiora significativamente senza grandi miglioramenti di precisione, come dimostrato da N=7; i gradi non riportati indicano che la curva tende all'infinito.

Si è ottenuta l'equazione (4.10)

$$H(\sigma) = 2.42 - 1.4 * 10^{-1} * \sigma + 4.9 * 10^{-3} * \sigma^2 - 8.71 * 10^{-5} * \sigma^3 + 7.75 * 10^{-7} * \sigma^4 - 2.52 * 10^{-9} * \sigma^5 \quad (4.10)$$

Dalla figura 4-19, che riporta la funzione polinomiale (4.10) ottenuta, si evince un comportamento monotono decrescente dovuto alla ridotta produzione di radiazioni secondarie grazie alle proprietà del boro che non produce radiazione secondaria.

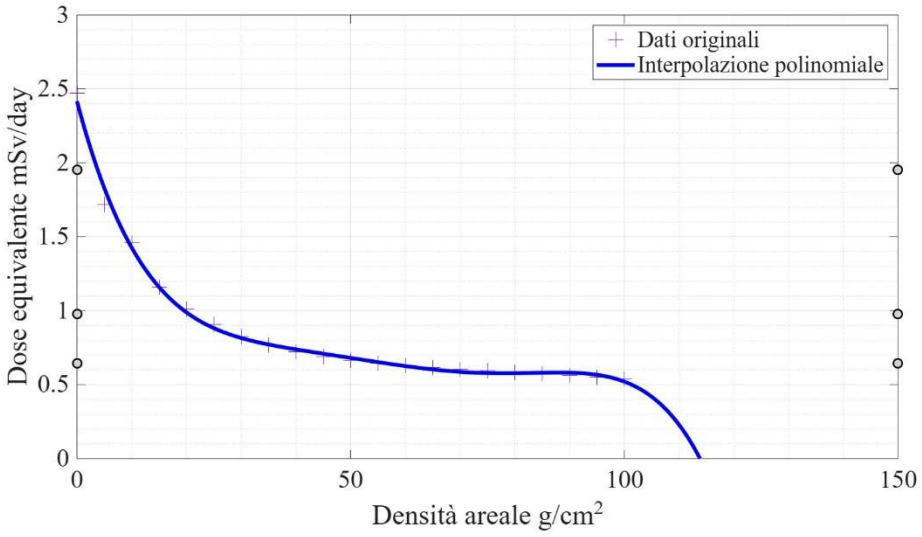


Figura 4-19: interpolazione polinomiale dei dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.1.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono riportati nella tabella 4-16 e graficati nella figura 4-20.

Tabella 4-16 densità areali e spessori al variare della durata della missione.

t carriera [day]	H limite [mSv/day]	Densità areale [g/cm^2]	Spessore [cm]
30	7.81	-	-
60	3.91	-	-
120	1.95	3.78	1.75
240	0.98	20.45	9.48
365	0.64	56.81	26.30

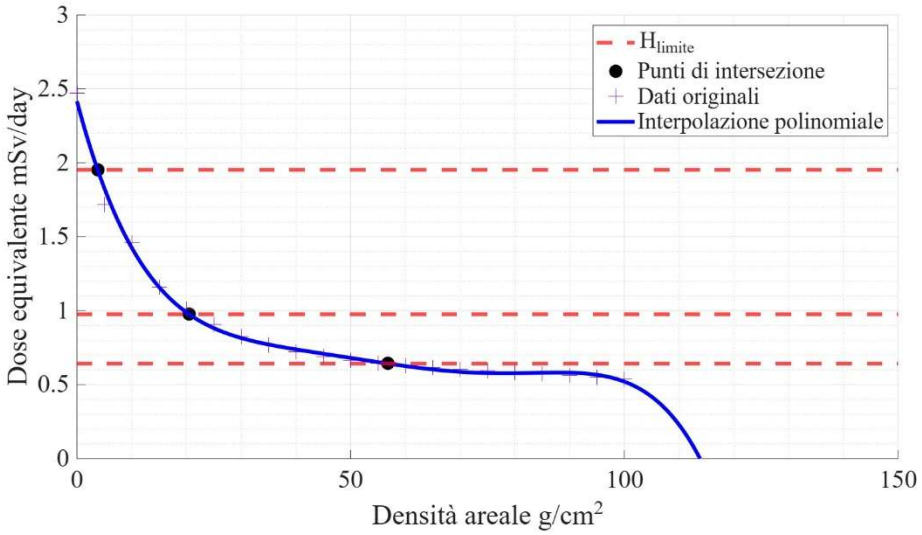


Figura 4-20: intersezioni tra i limiti di dose equivalente e l'interpolazione.

Dall'analisi dei dati in tabella 4-16 e dalla figura 4-20 si nota come, l'andamento della dose equivalente è fortemente decrescente fino a densità areali di 20-45 g/cm^2, l'elevata densità amplia il raggio della curva, per poi diventare sostanzialmente costante ed uguale a 0.6 mSv/day per densità superiori. Questo ha effetti rilevanti sugli spessori al variare della durata della carriera, in quanto oltre i 240 giorni di missione gli spessori aumenterebbero per stare al di sotto del limite, come dimostrato dal caso di missione di un anno, anche se l'aumento è meno marcato rispetto ai materiali studiati precedentemente.

Inoltre, dalla figura 4-20 risulta importante tener conto, in successive analisi, del contributo allo spessore dovuto all'elettronica, ai computer, ai serbatoi e alle strutture secondarie per stivaggio o per altri scopi in quanto, queste aumentano lo spessore totale ma, essendo la curva monotona decrescente questo aumento avrebbe solo effetti positivi.

4.6.2 Analisi durante una SPE (solo BN + 20wt% H_2)

Ottenuti i valori numerici della dose equivalente dalla figura 2-27, curva del nitruro di boro, è stata fatta un'analisi per scegliere il numero N di esponenziali nell'equazione riportata nella tabella 4-6.

Tabella 4-17 valori per la scelta del numero N di esponenziali.

N	Norma relativa	R^2	Numero di condizionamento
1	1.290	0.826	$3.50*10^0$
2	0.237	0.995	$4.76*10^0$
3	0.030	0.999	$3.76*10^1$

Quindi, per quanto detto nel paragrafo 3.2 e dai valori riportati nella tabella 4-17, è stato effettuato il fit tri-esponenziale su Matlab.

Si è ottenuta l'equazione (4.11)

$$H(\sigma) = 1.10 * 10^6 * e^{-2.38*\sigma} + 1.62 * 10^4 * e^{-0.34*\sigma} + 1.15 * 10^3 * e^{-0.13*\sigma} \quad (4.11)$$

Dalla figura 4-21, che riporta la funzione esponenziale (4.11) ottenuta, si nota che l'andamento è monotono decrescente all'aumentare dello spessore, ciò è dovuto all'assenza di ioni pesanti che producono radiazione secondaria.

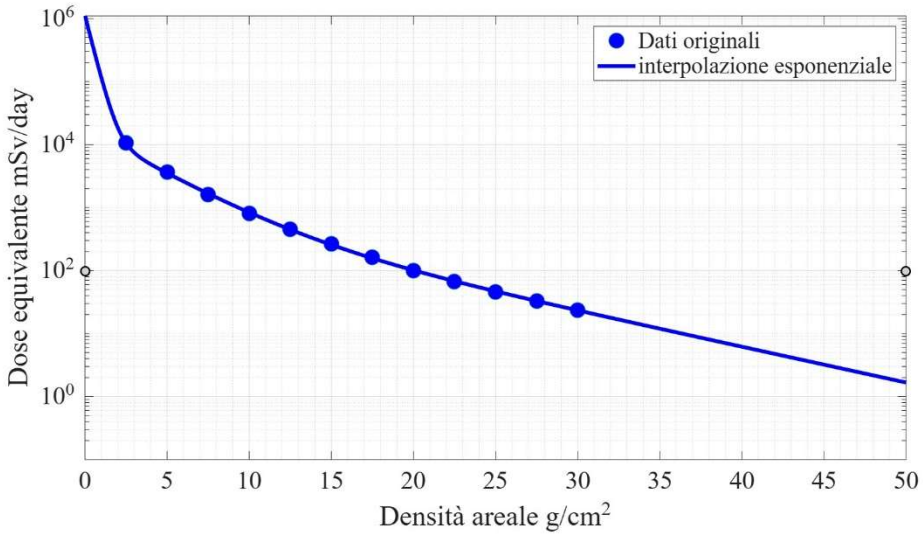


Figura 4-21: interpolazione esponenziale con i dati originali.

Quindi si è svolta l'analisi riportata nella seconda parte del paragrafo 3.2.

Le densità areali e gli spessori così ottenuti sono sotto riportati e graficati nella figura 4-22.

$$H_{limite\ SPE} = 97.66\ mSv$$

$$\sigma_{SPE} = 20.23\ \frac{g}{cm^2}$$

$$s_{SPE} = 9.36\ cm$$

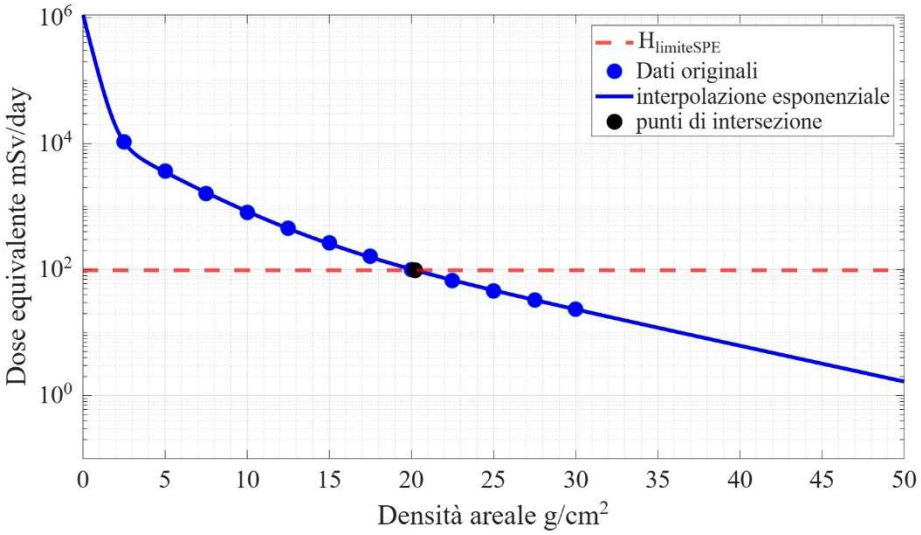


Figura 4-22: intersezioni tra il limite di dose equivalente e l'interpolazione.

Come si vede dal risultato e dalla figura 4-22 lo spessore risulta essere maggiore rispetto al caso precedente. Non conviene utilizzare gli spessori in caso di SPE, a meno di missioni più lunghe di un anno, perché questi sono eventi sporadici, rari e limitati nel tempo, nel caso si verificasse una situazione pericolosa si possono studiare delle protezioni temporanee come quelle viste nel capitolo 2 od in alternativa, si può progettare un'area maggiormente schermata da utilizzare per le emergenze, che però non appesantiscano l'intera struttura.

4.7 Confronto tra i materiali analizzati

Le analisi sviluppate nei paragrafi precedenti consentono di confrontare le soluzioni considerate in termini di densità areale e di spessore geometrico necessari per rispettare i limiti assunti. Il confronto deve tuttavia essere interpretato come una valutazione preliminare: i valori derivano dalla digitalizzazione e dall'interpolazione di curve disponibili in letteratura e non da una simulazione eseguita sulla geometria completa del rover. Inoltre, per i GCR le configurazioni con materiale idrogenato sono costituite da uno strato fisso di 10 g/cm² (corrispondenti a 3.7 cm di spessore) di alluminio seguito dal materiale indicato,

mentre il caso dell'alluminio è stato ricavato da una curva distinta. Le densità areali riportate per i materiali aggiuntivi non comprendono quindi lo strato strutturale fisso di alluminio e, ai fini di una futura valutazione della massa totale, dovranno essere sommate ad esso.

Per questo motivo non è opportuno interpretare i risultati come una graduatoria assoluta valida per ogni missione. Essi permettono, invece, di individuare le tendenze principali e di distinguere le soluzioni più favorevoli dal punto di vista della massa areale da quelle più vantaggiose per ingombro, maturità tecnologica o multifunzionalità.

4.7.1 Confronto in condizioni GCR

La tabella 4-18 riunisce i risultati ottenuti per il minimo solare del 2010. Per le durate di 30 e 60 giorni non è stato ricavato uno spessore aggiuntivo, poiché il rateo di dose delle configurazioni considerate risulta già inferiore alla soglia giornaliera adottata nell'analisi. Tale risultato non implica l'assenza di un requisito di schermatura in senso generale, ma indica soltanto che, nelle condizioni e con le approssimazioni utilizzate, non è stata individuata un'intersezione positiva necessaria a rispettare il limite.

Tabella 4-18 Confronto tra densità areale e spessore richiesti in condizioni GCR al minimo solare del 2010.

Materiale / configurazione	120 giorni σ [g/cm²] / s [cm]	240 giorni σ [g/cm²] / s [cm]	365 giorni σ [g/cm²] / s [cm]
Alluminio	10,37 / 3,84 35,70 / 13,22 122,90 / 45,53	132,39 / 49,03	134,58 / 49,84
Al + H_2 liquido	4,16 / 12,60	15,17 / 45,97	22,51 / 68,20
Al + CH_4 liquido	9,37 / 13,58	24,40 / 35,36	99,41 / 144,10
Al + polietilene	6,13 / 5,24	23,84 / 20,38	99,27 / 84,84
Al + acqua	4,66 / 3,98	23,28 / 19,90	96,52 / 82,50
Al + BN + 20 wt% H_2	3,78 / 1,75	20,45 / 9,48	56,81 / 26,30

Il comportamento dell'alluminio è differente da quello delle configurazioni contenenti materiali leggeri. A 120 giorni la curva presenta tre intersezioni, conseguenza della sua non monotonia: all'aumentare della densità areale la dose inizialmente diminuisce, ma può successivamente risalire per il build-up di neutroni e particelle leggere secondarie. Ne deriva che un aumento non controllato dello spessore metallico non garantisce un miglioramento continuo della protezione. Per

durate di 240 e 365 giorni le intersezioni utili si collocano oltre 132 g/cm², corrispondenti a quasi 50 cm di alluminio, valori non compatibili con una schermatura distribuita di un rover mobile. L'alluminio mantiene quindi un ruolo essenzialmente strutturale e non dovrebbe essere assunto come unico materiale di protezione.

L'idrogeno liquido fornisce le minori densità areali richieste tra le configurazioni analizzate: 4,16 g/cm² a 120 giorni, 15,17 g/cm² a 240 giorni e 22,51 g/cm² a 365 giorni. Questo risultato conferma l'elevata efficacia per unità di massa dei materiali ricchi di idrogeno. La densità molto bassa del fluido determina però spessori geometrici rispettivamente pari a 12,60 cm, 45,97 cm e 68,20 cm, ai quali si aggiungono i requisiti di contenimento, isolamento e gestione criogenica. L'idrogeno liquido risulta quindi interessante soprattutto qualora sia già necessario come risorsa di bordo o propellente e possa essere disposto intorno alle zone occupate; appare invece poco realistico come materiale schermante dedicato per una parete estesa.

Il metano liquido mostra un comportamento intermedio a 120 e 240 giorni, ma diventa poco competitivo per una permanenza di un anno, per la quale sono richiesti circa 99,41 g/cm² e 144,10 cm. Anche in questo caso l'eventuale vantaggio può derivare principalmente dalla multifunzionalità, cioè dall'impiego di una massa già presente a bordo, mentre la realizzazione di uno schermo dedicato comporterebbe un ingombro e una complessità impiantistica elevati.

Polietilene e acqua presentano risultati molto simili alle durate più lunghe. A 240 giorni richiedono rispettivamente 23,84 e 23,28 g/cm², con spessori prossimi a 20 cm; a 365 giorni i valori aumentano a circa 99,27 e 96,52 g/cm². Il polietilene offre il vantaggio di essere un materiale solido, stabile, lavorabile e già ampiamente studiato in ambito spaziale. L'acqua, pur richiedendo contenitori e sistemi capaci di evitare perdite e variazioni eccessive nella distribuzione durante il consumo, possiede un elevato indice di multifunzionalità perché è comunque necessaria al supporto vitale. La vicinanza delle prestazioni radiologiche rende quindi decisivo il modo in cui tali materiali vengono integrati nel layout.

La configurazione costituita da nitruro di boro con il 20% in massa di idrogeno fornisce il miglior compromesso geometrico tra i materiali analizzati. Lo spessore richiesto è pari a 1,75 cm a 120 giorni, 9,48 cm a 240 giorni e 26,30 cm a 365 giorni; anche la densità areale risulta inferiore a quella di polietilene, acqua e metano alle durate considerate. La presenza combinata di elementi leggeri e boro permette di associare rallentamento delle particelle e controllo della componente neutronica. Il risultato è promettente, ma deve essere bilanciato con la minore maturità tecnologica della soluzione, con la necessità di garantire un contenuto stabile di idrogeno e con la verifica delle proprietà meccaniche, termiche e produttive del materiale reale.

Nel complesso, per l'esposizione cronica ai GCR emergono due classifiche differenti. Se il parametro principale è la massa areale, l'idrogeno liquido è la soluzione più efficace; se il parametro principale è l'ingombro, la configurazione BN + 20 wt% H_2 è la più favorevole. Considerando invece disponibilità, sicurezza e maturità, polietilene e acqua costituiscono le alternative più realistiche nel breve periodo. Questa distinzione dimostra che il materiale da selezionare dipende dalla

figura di merito adottata e che una soluzione ottimale per il rover deve combinare più materiali e funzioni.

4.7.2 Confronto in condizioni SPE

Per lo SPE di riferimento dell'agosto 1972, il confronto è effettuato rispetto alla dose totale integrata sull'evento. La soglia è quindi unica e non viene ridotta o aumentata in funzione della durata della missione. La tabella 4-19 riporta la densità areale e lo spessore corrispondenti all'intersezione con il limite adottato. Il metano non è incluso, poiché nel capitolo non è stata sviluppata un'analisi SPE dedicata a tale materiale.

Tabella 4-19 Confronto tra densità areale e spessore richiesti per lo SPE dell'agosto 1972.

Materiale	Densità areale σ [g/cm²]	Spessore s [cm]	Indicazione principale
Alluminio	32,02	11,86	Maggiore massa areale richiesta
Idrogeno liquido	10,30	31,22	Minore massa, maggiore ingombro
Polietilene	21,91	18,73	Soluzione solida e matura
Acqua	23,64	20,20	Buona multifunzionalità
BN + 20 wt% H_2	20,23	9,36	Minore spessore geometrico

Anche nello scenario SPE l'idrogeno liquido è il materiale più efficiente in termini di massa areale, richiedendo 10,30 g/cm², ma il suo basso valore di densità porta allo spessore maggiore, pari a 31,22 cm. La configurazione BN + 20 wt% H_2 richiede invece 20,23 g/cm² ma solamente 9,36 cm, risultando la soluzione più compatta. Polietilene e acqua occupano una posizione intermedia e presentano valori comparabili; la loro maggiore maturità e la possibilità di integrarli nella cabina li rendono candidati particolarmente credibili per una protezione di emergenza. L'alluminio raggiunge il limite con uno spessore relativamente contenuto grazie alla maggiore densità, ma richiede la più elevata massa areale tra i casi confrontati.

Il dimensionamento per SPE non dovrebbe tuttavia essere applicato uniformemente all'intera scocca. Poiché gli eventi sono sporadici e la soglia considerata riguarda la dose totale dell'evento, la soluzione più efficiente consiste nel concentrare la massa in un volume di rifugio di dimensioni limitate, rapidamente accessibile e circondato da materiali a basso numero atomico. Il polietilene può costituire un rivestimento stabile, mentre acqua, alimenti, indumenti e altri consumabili possono essere distribuiti intorno al rifugio per incrementarne la densità areale senza

introdurre una massa esclusivamente schermante. Materiali avanzati contenenti boro e idrogeno potrebbero essere aggiunti come strati funzionali, una volta dimostrate la loro producibilità e durabilità.

4.7.3 Sintesi qualitativa e indicazioni progettuali

Il confronto conferma che nessuna soluzione è contemporaneamente ottimale per massa, volume, maturità e integrazione. Una configurazione realistica per l'LPR dovrebbe pertanto utilizzare l'alluminio solo nella quantità richiesta dalle funzioni strutturali e ambientali, aggiungere internamente materiali solidi ricchi di idrogeno, distribuire acqua e consumabili in modo radiologicamente favorevole e concentrare la protezione aggiuntiva in una zona rifugio. I materiali a base di boro e idrogeno rappresentano una prospettiva particolarmente interessante per ridurre l'ingombro, ma richiedono una fase di qualificazione ulteriore. Questa architettura ibrida permette di sfruttare la massa già necessaria al veicolo e limita l'impiego di materiali dedicati, in accordo con il principio ALARA e con i vincoli di mobilità del rover.

Un ulteriore elemento da considerare è che la densità areale non coincide con la massa totale del sistema. Per una superficie schermata A, la massa aggiunta è direttamente proporzionale al prodotto σ*A; di conseguenza, una soluzione che risulti accettabile su un pannello locale può diventare proibitiva se estesa a tutta la cabina. La scelta finale dovrà quindi essere effettuata insieme alla geometria del rover, alla distribuzione delle postazioni di guida e riposo e alla posizione dei serbatoi, verificando il contributo di ciascuna direzione di irraggiamento e non soltanto uno spessore piano ideale.

I risultati indicano inoltre che l'incremento marginale della protezione diminuisce per densità areali elevate. Per permanenze fino a 120 giorni le soluzioni idrogenate consentono di rispettare la soglia con spessori relativamente contenuti; a 240 giorni il requisito diventa più impegnativo ma ancora compatibile con una schermatura localizzata e multifunzionale. Nel caso di permanenze prossime a un anno, gli spessori richiesti da polietilene, acqua e metano diventano difficilmente compatibili con un rover mobile, mentre anche le soluzioni più efficaci richiedono una valutazione di sistema. Per tali durate il rispetto dei limiti non può essere affidato alla sola schermatura passiva, ma deve essere associato alla fase del ciclo solare, alla pianificazione della missione, alla storia dosimetrica dell'equipaggio e alle procedure operative.

Capitolo 5

5. Conclusioni

Il presente lavoro ha affrontato in modo preliminare il problema della protezione dalle radiazioni per un rover lunare pressurizzato, partendo dalla caratterizzazione dell'ambiente radiativo e proseguendo con l'analisi delle tecnologie sviluppate nei settori medico, nucleare, della ricerca scientifica e aerospaziale. Il percorso svolto ha permesso di evidenziare che la schermatura di un sistema abitato sulla superficie lunare non può essere ridotta alla scelta del materiale con il maggiore coefficiente di attenuazione, ma richiede un compromesso tra prestazioni radiologiche, massa, volume, produzione di radiazione secondaria, funzione strutturale, sicurezza e integrazione nel layout.

La distinzione tra raggi cosmici galattici ed eventi di particelle solari risulta determinante. I GCR costituiscono una sorgente cronica, altamente penetrante e caratterizzata dalla presenza di ioni pesanti; il loro trasporto nella materia produce frammenti e neutroni secondari che limitano l'efficacia dell'aumento indiscriminato dello spessore. Gli SPE sono invece eventi sporadici e dominati principalmente da protoni, per i quali una densità areale localizzata può ridurre in modo molto più efficace la dose totale dell'evento. Ne consegue che la strategia per la protezione cronica non coincide con quella richiesta per le emergenze solari.

L'analisi dei settori terrestri ha fornito criteri progettuali trasferibili al caso lunare. Il settore medico dimostra l'importanza dello spettro, della geometria e della posizione dello schermo e mostra che metriche sintetiche come l'equivalenza al piombo non sono sufficienti se non vengono associate alle condizioni di misura. Il settore nucleare evidenzia la necessità di progettare sistemi multistrato per campi misti, considerando anche attivazione, calore, manutenzione e discontinuità geometriche. Gli acceleratori e le infrastrutture di ricerca confermano il ruolo dei materiali idrogenati, degli assorbitori neutronici, dei labirinti e della verifica mediante codici di trasporto. Il settore aerospaziale aggiunge infine i vincoli decisivi di massa e multifunzionalità e orienta la scelta verso materiali a basso numero atomico e ricchi di idrogeno.

Alcuni materiali e tecnologie provenienti dagli altri settori rimangono di interesse per sviluppi futuri. I compositi flessibili impiegati nei grembiuli o nelle protezioni personali suggeriscono la possibilità di realizzare tende, pannelli o tute integrate, purché vengano riformulati per lo spettro spaziale e senza ricorrere a elevate quantità di elementi pesanti. I vetri borati possono essere studiati per finestrini o zone trasparenti, dove è necessario un compromesso tra visibilità e protezione. Il carburo di boro, i compositi polimerici con h-BN o Gd_2O_3 e le schiume metalliche riempite rappresentano potenziali strati funzionali per il controllo neutronico o per

schermature locali, ma i dati disponibili sono stati ottenuti in campi radiativi terrestri e non possono essere trasferiti direttamente all'ambiente lunare.

Al contrario, calcestruzzi ordinari o pesanti e leghe metalliche pesanti (Pb, W, Cs, Bi e altre) non risultano adatti come schermature primarie distribuite per un rover mobile. La loro efficacia nei settori nucleare e medico è legata alla possibilità di impiegare masse elevate e a campi dominati da fotoni o neutroni di energia più contenuta. Nel caso spaziale la loro densità, la massa necessaria e la possibile produzione di secondari li rendono sfavorevoli. Essi non devono comunque essere considerati inutilizzabili in senso assoluto: piccoli inserti ad alto numero atomico o vetri pesanti potrebbero avere un ruolo locale per componenti elettronici o apparecchiature specifiche, purché il beneficio venga verificato mediante un'analisi di trasporto dedicata.

La metodologia applicata nel capitolo 3 ha trasformato le curve disponibili in letteratura in funzioni utilizzabili per determinare le intersezioni con i limiti di dose assunti. L'impiego della densità areale ha consentito di confrontare materiali con densità differenti e di collegare direttamente la protezione alla massa da distribuire sulla superficie del rover.

Le analisi hanno tuttavia anche mostrato il limite di una valutazione basata sul solo spessore: nel caso dell'alluminio la curva in condizioni GCR è non monotona, poiché oltre determinati valori la produzione di secondari può compensare o superare il beneficio dell'attenuazione delle particelle primarie. L'alluminio rimane indispensabile per la struttura, ma i risultati confermano che non è opportuno aumentarlo indiscriminatamente con finalità radioprotezionistiche.

Tra i materiali analizzati quantitativamente, l'idrogeno liquido ha fornito la migliore efficienza in termini di densità areale sia per GCR sia per SPE. Tale vantaggio è accompagnato da spessori geometrici elevati e da requisiti criogenici e di sicurezza che ne limitano l'impiego come schermatura dedicata. Il metano liquido presenta un vantaggio minore e, alle durate più lunghe, richiede volumi molto elevati; può quindi essere considerato soltanto se già previsto come risorsa funzionale del veicolo.

Il polietilene e l'acqua rappresentano le soluzioni più credibili nel breve periodo. Il polietilene è un materiale solido, a basso numero atomico, stabile e facilmente integrabile come rivestimento o pannello modulare. L'acqua offre prestazioni comparabili e permette di trasformare una massa necessaria al supporto vitale in una funzione schermante; la progettazione deve però assicurare che il consumo e la movimentazione del fluido non riducano la protezione nelle direzioni più importanti. La configurazione BN + 20 wt% H_2 è risultata la più compatta e ha mostrato prestazioni promettenti soprattutto per durate elevate, ma richiede ulteriori verifiche sulla maturità, sulla produzione, sul contenimento dell'idrogeno e sulle proprietà strutturali.

Sulla base dei risultati, la soluzione preliminare più coerente per un LPR non è costituita da una barriera uniforme monomateriale. L'architettura proposta prevede una scocca esterna in alluminio dimensionata in base ai requisiti strutturali e ambientali, uno o più strati interni a basso Z, la distribuzione di acqua e consumabili intorno alle aree di permanenza prolungata e un volume di rifugio dedicato agli SPE. Il rifugio dovrebbe essere piccolo, rapidamente accessibile e circondato dalla

massima densità areale disponibile. In questo modo la massa schermante viene concentrata dove produce il maggiore beneficio, evitando di penalizzare eccessivamente mobilità, baricentro e abitabilità del rover.

I risultati ottenuti devono essere letti alla luce delle approssimazioni introdotte. Le curve sono state digitalizzate da figure di letteratura e interpolate con modelli scelti in base alla norma relativa, al coefficiente R^2 e al condizionamento numerico. Il confronto con il limite di dose efficace è stato ricondotto a dose equivalente mediante un'ipotesi semplificativa di irradiazione uniforme. Inoltre, le analisi non comprendono ancora la geometria tridimensionale del rover, le penetrazioni, la distribuzione reale dei sistemi, l'albedo neutronica del suolo, la posizione degli astronauti, la variazione del contenuto dei serbatoi e le proprietà meccaniche e termiche delle configurazioni proposte. I valori ricavati devono pertanto essere considerati indicazioni di ordine progettuale e non spessori definitivi di qualifica.

Gli **sviluppi successivi** dovranno includere una simulazione completa della geometria dell'LPR con codici di trasporto adatti ai campi misti spaziali, valutando separatamente dose assorbita, dose equivalente, dose agli organi e contributo delle particelle secondarie. Sarà necessario integrare il modello radiologico con il bilancio di massa, il centro di gravità, la struttura pressurizzata, la gestione termica e il layout del supporto vitale. Le soluzioni più promettenti dovranno inoltre essere sottoposte a prove sperimentali su fasci rappresentativi di protoni e ioni pesanti, a verifiche di invecchiamento nel vuoto e ai cicli termici e a valutazioni di sicurezza per l'uso in cabina.

In conclusione, il lavoro conferma che la protezione radiologica di un rover lunare pressurizzato è un problema di sistema. La scelta più promettente consiste nel combinare una struttura metallica contenuta, materiali idrogenati, massa funzionale e schermatura localizzata, riservando ai compositi avanzati il ruolo di migliorare progressivamente compattezza e controllo dei secondari. Una simile strategia non elimina completamente il rischio associato ai GCR, ma permette di ridurlo compatibilmente con i vincoli di un veicolo mobile e di garantire una protezione efficace durante gli SPE. La metodologia sviluppata costituisce quindi una base per le successive fasi di progettazione e per la selezione quantitativa della configurazione schermante dell'LPR.

6. Appendice A

Codice Matlab, riportante la metodologia descritta nel capitolo 3, utilizzato per ottenere i risultati riportati nel capitolo 4.

In questo caso è riportato il caso dell'alluminio puro, per le altre casistiche il codice è analogo, cambiano esclusivamente i dati di densità ed i valori delle matrici GCR e SPE.

```
clc
clear all
close all
%% Dati generali

rho=2.7; % [g/cm^3] densità
E_lim_c=600; % [mSv/t_carriera] Dose efficacie limite per carriera
E_lim_SPE=250; % [mSv] Dose efficace in caso di SPE
t_carriera=[30 60 120 240 365]; % [day] tempo della carriera espressa in
giorni
w_T=[0.12*ones(1,19) 0.08 0.04*ones(1,4) 0.01*ones(1,4)]; % coefficiente di
sensibilità degli organi alle radiazioni
n_organi=length(w_T);

%% Calcolo E_lim al giorno

w_T_medio=sum(w_T)/n_organi; % coefficiente di sensibilità degli organi alle
radiazioni medio
H_lim_c=E_lim_c/(w_T_medio*n_organi); % [mSv/t_carriera] Dose equivalente
limite per carriera GCR
H_lim_d=H_lim_c./t_carriera; % [mSv/day] Dose equivalente limite per giorno
GCR
H_lim_SPE=E_lim_SPE/(w_T_medio*n_organi); % [mSv/t_carriera] Dose equivalente
limite per SPE

%% Plot H_lim_d al variare dei giorni
figure (1);
plot(t_carriera,H_lim_d, 'ko', 'MarkerSize',12, 'MarkerFaceColor', 'b');

%% Punti dose efficace GCR

GCR=[0.26 904.18
1.13 877.00
2.05 849.23
2.88 826.33
4.13 804.16
5.13 779.40
6.32 759.00
7.65 737.28
9.39 711.06
11.12 696.98
12.86 689.37
14.59 686.56
16.33 682.61
18.20 679.91
19.76 675.79
21.15 672.42
23.28 676.83
```

```
43 25.01 680.44
44 26.75 683.93
45 28.49 687.82
46 30.23 691.83
47 31.96 698.24
48 33.70 704.76
49 35.44 711.06
50 37.18 717.93
51 38.91 724.23
52 40.65 731.21
53 42.39 738.88
54 44.13 745.86
55 45.86 752.04
56 47.60 760.06
57 49.34 767.39
58 51.08 774.71
59 52.88 780.41
60 54.51 785.13
61 56.29 794.90
62 58.03 802.53
63 59.77 813.87
64 61.50 819.36
65 63.24 824.72
66 64.95 829.64
67 67.98 835.73
68 69.72 838.42
69 71.45 846.04
70 73.19 850.27
71 74.93 857.25
72 76.67 861.15
73 78.40 869.24
74 80.20 874.77
75 81.88 876.83
76 83.62 882.78
77 85.35 887.36
78 87.09 892.86
79 88.83 898.24
80 90.57 903.05
81 92.30 908.09
82 94.04 912.78
83 95.78 917.93
84 97.52 923.31
85 99.25 927.66]; % [g/cm^2] densità areale | [mSv/year] Dose efficacie annua
86 a=GCR(:,2)/365; % [mSv/day] Dose efficacie giornaliera
87 GCR_day=[GCR(:,1) a]; % [g/cm^2] densità areale | [mSv/day] Dose efficacie
giornaliera
88
89 %% Estrapolazione funzione H GCR
90
91 x=linspace(0, 150, 1000); % [g/cm^2]
92 xq=linspace(min(GCR_day(:,1)), max(GCR_day(:,1)), 60); % Punti
d'interpolazione
93 [p,S]=polyfit(GCR_day(:,1), GCR_day(:,2), 5); % Coefficienti del polinomio
94 f_H=polyval(p,x); % Funzione H
95
96 %% Determinazione delle intersezioni per tutti i valori di H_lim_d
97
98 n_lim = numel(H_lim_d);
99 x_int = cell(n_lim,1);
100 for i = 1:n_lim
101     % Copia dei coefficienti del polinomio
102     p_i = p;
103     % Risoluzione di f(x) - H_lim_d(i) = 0
```

```
104     p_i(end) = p_i(end) - H_lim_d(i);
105     % Calcolo delle radici
106     r = roots(p_i);
107     % Mantiene solamente le radici reali
108     toll = 1e-10;
109     r = real(r(abs(imag(r)) < toll));
110     % Mantiene solamente le intersezioni nel dominio considerato
111     r = r(r >= 0 & r <= 150);
112     % Ordina le intersezioni
113     x_int{i} = sort(r);
114 end
115
116 %% Plot per GCR
117 figure (2);
118 for i = 1:n_lim
119     % Retta orizzontale relativa al limite
120     yline(H_lim_d(i), 'r--', 'LineWidth', 3);
121     hold on
122     % Punti di intersezione
123     if ~isempty(x_int{i})
124             plot(x_int{i}, H_lim_d(i)*ones(size(x_int{i})), 'ko',
                'MarkerSize',10, 'MarkerFaceColor','k');
125     end
126     hold on
127 end
128 hold on;
129 % Original data points
130 plot(GCR_day(:,1), GCR_day(:,2), '+', 'MarkerSize',12, 'MarkerFaceColor',
'b');
131 hold on;
132 % interpolazine
133 plot(x, f_H, 'b-', 'LineWidth', 3);
134 hold on;
135 xlim([0 150]);
136 ylim([0 8]);
137 xlabel('Densità areale g/cm^2');
138 ylabel('Dose equivalente mSv/day');
139 legend('H_l_i_m_i_t_e', '','','','','Punti di intersezione','','', 'Dati
originali', 'Interpolazione polinomiale'); %
140 grid on;
141 grid minor;
142 hold off;
143
144 %% Struttura risultati GCR
145 risultati_GCR=struct();
146 % Salvataggio dei risultati in struttura
147 risultati_GCR.normr=S.normr;
148 risultati_GCR.R2=S.rsquared;
149 risultati_GCR.cond=cond(S.R);
150 for i = 1:numel(p)
151     coef = sprintf('coef_%d',i);
152     risultati_GCR.(coef) = p(i);
153 end
154 for i = 1:numel(t_carriera)
155     t_car = sprintf('t_car_%d',i);
156     risultati_GCR.(t_car) = t_carriera(i);
157 end
158 for i = 1:numel(H_lim_d)
159     H_l_d = sprintf('H_lim_d_%d',i);
160     risultati_GCR.(H_l_d) = H_lim_d(i);
161 end
162 for i = 1:numel(x_int)
163      x_in = sprintf('dens_ar_%d',i);
```

```
164     risultati_GCR.(x_in) = x_int{i};
165 end
166 for i = 1:numel(x_int)
167     x_in = sprintf('s_%d',i);
168     risultati_GCR.(x_in) = x_int{i}./rho;
169 end
170 
171 %% Punti dose efficace SPE
172 
173 SPE=[0.02 1049630.97
174 2.50 20858.28
175 5.02 8520.21
176 7.51 4229.93
177 10.01 2430.78
178 12.50 1466.68
179 14.98 944.42
180 17.50 638.50
181 19.99 438.75
182 22.49 306.44
183 24.98 224.72
184 27.48 167.49
185 30.00 126.88]; % [g/cm^2] densità areale | [mSv] Dose efficacie
186 
187 %% Estrapolazione funzione H SPE
188 
189 x_SPE=linspace(0, 150, 1000); % [g/cm^2]
190 xq_SPE=linspace(min(SPE(:,1)), max(SPE(:,1)), 13); % Punti d'interpolazione
191 
192 %% Fit esponenziale in scala logaritmica
193 % % Modello originale:
194 % % y = A1*exp(-mu1*x)
195 % % Il fit viene effettuato su log(y), in modo che il primo punto non domini
completamente la minimizzazione.
196 % ft = fittype(['log(A1*exp(-mu1*x))'], ...
197 % 'independent', 'x', 'coefficients', {'A1','mu1'});
198 %
199 % opts = fitoptions(ft);
200 % % Valori iniziali scelti considerando le tre regioni di decadimento
201 % opts.StartPoint = [1.0e6 2.2];
202 % % Tutte le ampiezze e i coefficienti di attenuazione devono essere
positivi
203 % opts.Lower = [1e-12 1e-9];
204 % opts.Upper = [Inf 20];
205 % opts.MaxIter = 20000;
206 % opts.MaxFunEvals = 20000;
207 % opts.Display = 'Off';
208 %
209 % % Fit di log(y)
210 % [f_log, gof2, output] = fit(SPE(:,1), log(SPE(:,2)), ft, opts);
211 % % Estrazione dei coefficienti
212 % A1 = f_log.A1;
213 % mu1 = f_log.mu1;
214 %
215 % % Function handle nella scala originale
216 % f_H_SPE = @(x) A1.*exp(-mu1.*x);
217 
218 %% Fit bi-esponenziale in scala logaritmica
219 % % Modello originale:
220 % % y = A1*exp(-mu1*x) + A2*exp(-mu2*x)
221 % % Il fit viene effettuato su log(y), in modo che il primo punto non domini
completamente la minimizzazione.
222 % ft = fittype(['log(A1*exp(-mu1*x) + ' 'A2*exp(-mu2*x))'], ...
223 % 'independent', 'x', 'coefficients', {'A1','mu1','A2','mu2'});
```

```
%
% opts = fitoptions(ft);
% % Valori iniziali scelti considerando le tre regioni di decadimento
% opts.StartPoint = [1.0e6 2.2 3.0e4 0.33];
% % Tutte le ampiezze e i coefficienti di attenuazione devono essere
positivi
% opts.Lower = [1e-12 1e-9 1e-12 1e-9];
% opts.Upper = [Inf 20 Inf 20];
% opts.MaxIter = 20000;
% opts.MaxFunEvals = 20000;
% opts.Display = 'Off';
%
% % Fit di log(y)
% [f_log, gof2, output] = fit(SPE(:,1), log(SPE(:,2)), ft, opts);
% % Estrazione dei coefficienti
% A1 = f_log.A1;
% mu1 = f_log.mu1;
% A2 = f_log.A2;
% mu2 = f_log.mu2;
%
% % Function handle nella scala originale
% f_H_SPE = @(x) A1.*exp(-mu1.*x) + A2.*exp(-mu2.*x);

%% Fit tri-esponenziale in scala logaritmica
% Modello originale:
% y = A1*exp(-mu1*x) + A2*exp(-mu2*x) + A3*exp(-mu3*x)
% Il fit viene effettuato su log(y), in modo che il primo punto non domini
completamente la minimizzazione.
ft = fittype(['log(A1*exp(-mu1*x) + ' 'A2*exp(-mu2*x) + ' 'A3*exp(mu3*x))'],
'independent', 'x', 'coefficients', {'A1','mu1','A2','mu2','A3','mu3'});

opts = fitoptions(ft);
% Valori iniziali scelti considerando le tre regioni di decadimento
opts.StartPoint = [1.0e6 2.2 3.0e4 0.33 4.0e3 0.12];
% Tutte le ampiezze e i coefficienti di attenuazione devono essere positivi
opts.Lower = [1e-12 1e-9 1e-12 1e-9 1e-12 1e-9];
opts.Upper = [Inf 20 Inf 20 Inf 20];
opts.MaxIter = 20000;
opts.MaxFunEvals = 20000;
opts.Display = 'Off';

% Fit di log(y)
[f_log, gof2, output] = fit(SPE(:,1), log(SPE(:,2)), ft, opts);
% Estrazione dei coefficienti
A1 = f_log.A1;
mu1 = f_log.mu1;
A2 = f_log.A2;
mu2 = f_log.mu2;
A3 = f_log.A3;
mu3 = f_log.mu3;

% Function handle nella scala originale
f_H_SPE = @(x) A1.*exp(-mu1.*x) + A2.*exp(-mu2.*x) + A3.*exp(-mu3.*x);
%% Determinazione densità areale [g/cm^2] per SPE

x_int_SPE=fzero(@(x) f_H_SPE(x) - H_lim_SPE, [10 50]);

%% Plot per SPE
figure (3);
% Limite di dose
yline(H_lim_SPE, 'r--', 'LineWidth', 3);
hold on;
% Original data points
```

```
285 plot(SPE(:,1), SPE(:,2), 'o', 'MarkerSize', 12,'MarkerFaceColor', 'b');
286 hold on;
287 % interpolation
288 plot(x_SPE, f_H_SPE(x_SPE), 'b-', 'LineWidth', 3);
289 hold on;
290 % punti d'intersezione
291 plot(x_int_SPE, H_lim_SPE*ones(size(x_int_SPE)), 'ko', 'MarkerSize', 12,
'MarkerFaceColor', 'k');
292 set(gca, 'YScale', 'log');
293 xlim([0 150]);
294 ylim([1 1.1e6]);
295 xlabel('Densità areale g/cm^2');
296 ylabel('Dose equivalente mSv/day');
297 legend('H_l_i_m_i_t_e_S_P_E', 'Dati originali', 'interpolazione
esponenziale', 'punti di intersezione');
298 grid on;
299 grid minor;
300 hold off;
301
302 % Calcolo numero di condizionamento
303 J = full(output.Jacobian);
304 norme_colonne = sqrt(sum(J.^2, 1));
305 J_scaled = J ./ max(norme_colonne, eps);
306 s_scaled = svd(J_scaled, 'econ');
307 tol_scaled = max(size(J_scaled)) * eps(max(s_scaled));
308 rank_J_scaled = sum(s_scaled > tol_scaled);
309 if rank_J_scaled < size(J_scaled,2)
310    cond_J_scaled = Inf;
311 else
312    cond_J_scaled = s_scaled(1)/s_scaled(end);
313 end
314
315 %% Struttura risultati SPE
316 risultati_SPE=struct();
317 % Salvataggio dei risultati in struttura
318 risultati_SPE.normr=gof2.rmse;
319 risultati_SPE.R2=gof2.rsquare;
320 risultati_SPE.cond=cond_J_scaled;
321 risultati_SPE.A1 = A1;
322 risultati_SPE.mu1 = mu1;
323 risultati_SPE.A2 = A2;
324 risultati_SPE.mu2 = mu2;
325 risultati_SPE.A3 = A3;
326 risultati_SPE.mu3 = mu3;
327 risultati_SPE.H_lim = H_lim_SPE;
328 risultati_SPE.dens_ar = x_int_SPE;
329 risultati_SPE.x = x_int_SPE/rho;
```

7. Bibliografia

[1] ICRP, «ICRP pubblication 123. Assessment of radiation exposure of astronauts in space.,» *Annals of the ICRP,* vol. 42, n. 4, 2013.

[2] M. Clowdley, *Protecting Astronauts from Space Radiation on the Lunar Surface,* NASA Langley Reserach Center, 2021.

[3] G. e. a. Reitz, «Radiation exposure in the Moon enviroment,» *Planetary and Space Science,* vol. 74, n. 1, pp. 78-83, 2012.

[4] L. W. T. e. a. John W. Wilson, NASA RP1257 Transport Metods and Interactions for Space Radiations, Hampton: NASA Langley Research Center, 1991.

[5] S. e. a. Zhang, «First mesuraments of the radiation dose on the Lunar surface,» *Science Advances,* vol. 6, n. 39, 2020.

[6] ICRP, «ICRP publication 60. 1990 Recomandation of the Internationel Commision on Radiological Protection,» *Annals of the ICRP,* vol. 21, n. 1-3, 1990.

[7] W. e. a. Rühm, «System of Radiological Protection: Towards a Consistent Framework on Earth and in Space.,» *Zeitschrift Für Medizinische Physik,* vol. 34, n. 1, pp. 4-13, 2024.

[8] L. H. e. a. L. Walsh, «European astronaut radiation related cancer risk assessment using dosimetric calculation of organ dose equivalents.,» *Z Med Phys,* n. 34, pp. 92-99, 2024.

[9] ICRP, «ICRP publication 103. The 2007 Recomandation of the International Commission on Radiological Protection.,» *Annals of the ICRP,* vol. 37, n. 2-4, 2007.

[10] NASA, «NASA-STD-3001 Crew health,» *NASA TECHNICAL STANDARD,* vol. 1, n. B, 2022.

[11] E. S. e. a. M. Shavers, «Space agency-specific standards for crew dose and risk assessment of ionising radiation exposures for the International Space Station.,» *Z Med Phys,* n. 34, pp. 14-30, 2024.

[12] T. B. e. a. U. Straube, «Operational radiation protection for astronauts and cosmonauts and correlated activities of ESA Medical Operations,» *Acta Astronautica,* vol. 66, n. 7-8, pp. 963-973, 2010.

[13] M. D. D. Boscolo, «Dose Limits and Countermeasures for Mitigation Radiation Risk in Moon and Mars Exploration,» *Physics,* n. 4, pp. 172-184, 2022.

[14] ICRP, «ICRP pubblication 102. Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT),» *Annals of the ICRP,* vol. 37, n. 1, 2007.

[15] H. S. e. a. J. P. McCaffrey, «Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments.,» *Medical Physics,* vol. 34, n. 2, pp. 530-537, 2007.

[16] International Atomic Energy Agency, IAEA, Radiation protectoion aspects of design for nuclear power plants, Vienna: IAEA Library Cataloguing, 2024.

[17] M. T. Simnad, «Nuclear Reactors: Shielding Materials,» in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2001, pp. 6376-6384.

[18] J. Vollaire, *Radiation Protection and Radiation Safety for Particle Accelerator Facilities,* 2026.

[19] Nuclear Eergy Agency, Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities – SATIF-14, Gyeongju: Nuclear Science, 2018.

[20] N. Z. e. a. M.R. Shavers, «Implementation of ALARA radiation protection on the ISS through polyethylene shielding augmentation of the Service Module Crew Quarters,» *Advances in Space Research,* vol. 34, pp. 1333-1337, 2004.

[21] C. Z. e. a. S. Guetersloh, «Polyethylene as a radiation shielding standard in simulated cosmic-ray environments,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,* vol. B, n. 252, pp. 319-332, 2006.

[22] S. F. A. e. a. Sami S Alshowiman, «Principles of Radiation Protection for Patients and Medical Staff,» *Biomed J Sci & Tech Res,* vol. 54, n. 2, pp. 45700-45708, 2023.

[23] World Health Organization, «www.who.int,» 27 July 2023. [Online]. Available: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects. [Consultato il giorno 08 june 2026].

[24] V. D. e. a. O.P. Lakhwani, «Radiation protection and standardization,» *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma,* vol. 10, pp. 738-743, 2019.

[25] F. T. e. a. J. P. McCaffrey, «Radiation shielding materials and radiation scatter effects for interventional radiology (IR) physicians,» *Medical Physics,* vol. 39, n. 7, pp. 4537-4546, 2021.

[26] Versant Physics, «www.versantphysics.com,» 20 april 2022. [Online]. Available: https://www.versantphysics.com/2022/04/20/radiation-shielding-in-medicine/. [Consultato il giorno 08 june 2026].

[27] M. M. e. a. Emmanuel G. Christodoulou, «Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter,» *Medical Physics,* vol. 30, n. 6, pp. 1033-1038, 2003.

[28] E. M.-H. e. a. J. P. McCaffrey, «Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers,» *Mediacl Physics,* vol. 36, n. 12, pp. 5586-5594, 2009.

[29] C.-Y. T. e. Bow Wang, «Bismuth Pelvic X-Ray Shielding Reduces Radiation Dose Exposure in Pediatric Radiography,» *BioMed Research International,* vol. 2021, pp. 1-7, 2021.

[30] H. O. Man-Sung Yim, «Radiation Dose Management in Nuclear Power Plants,» *Progress in Nuclear Energy,* vol. 339, n. 1, pp. 31-51, 2001.

[31] B. Y. Y.Q. Chen, «The technology of shielding design for nuclear reactor: A review,» *Progress in Nuclear Energy,* vol. 161, 2023.

[32] D. R. McAlister, «Neutron Shielding Materials,» 2016.

[33] D. R. McAlister, *Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials,* 2018.

[34] Nuclear Energy Agency, «Radiation Protection Aspects of Primary Water Chemistry and Source-term Management,» 2014.

[35] U. S. Atomic Energy Commision, Reactor shielding for nuclear engineers, 1973.

[36] T. Piotrowski, «Neutron shielding evaluation of concretes and mortars: A review,» *Construction and Building Materials,* vol. 277, 2021.

[37] A. B. e. a. Osman Gencel, «Determination and calculation of gamma and neutron shielding characteristics of concretes containing different hematite proportions,» *Annals of Nuclear Energy,* vol. 38, pp. 2719-2723, 2011.

[38] C. I. e. a. Eyüp Zorla, «Radiation shielding properties of high performance concrete reinforced with basalt fibers infused with natural and enriched boron,» *Nuclear Engineering and Design,* vol. 313, pp. 306-318, 2017.

[39] E. L. M.A.N. Giménez, «Tungsten Carbide compact primary shielding for Small Medium Reactor,» *Annals of Nuclear Energy,* vol. 116, pp. 210-223, 2018.

[40] M. E.-S. e. a. A.M. Osman, «Studying the shielding properties of lead glass composites using neutrons and gamma rays,» *Annals of Nuclear Energy,* vol. 78, pp. 146-151, 2015.

[41] A. K. e. a. G. Lakshminarayana, «Binary B2O3 e Bi2O3 glasses: scrutinization of directly and indirectly ionizing radiations shielding abilities,» *journal of materials research and technology,* vol. 9, n. 6, pp. 14549-14567, 2020.

[42] K. S. e. a. Parminder Kaur, «Investigation of bismuth borate glass system modified with barium for structural and gamma-ray shielding properties,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* vol. 206, pp. 367-377, 2019.

[43] J. L. W. J. Beren R. Evans, «Evaluation of shielding performance for newly developed composite materials,» *Annals of Nuclear Energy,* vol. 116, pp. 1-9, 2013.

[44] M. D. e. a. Oussama Mehelli, «Development of lightweight and highly efficient fast neutrons composites shields based on epoxy, UHMWPE fibres and boron carbide particles,» *Radiation Physics and Chemistry,* vol. 193, pp. 1-5, 2022.

[45] Z. A. e. a. Chaitali V. More, «Polymeric composite materials for radiation shielding: a review,» *Environmental Chemistry Letters,* vol. 19, pp. 2057-2090, 2021.

[46] D. S. e. a. R.S.Keshavamurthy, «Experimental Measurements of Neutron Attenuation in the Advanced Shield Material Ferro Boron in KAMINI Reactor,» *Energy Procedia,* vol. 7, pp. 273-278, 2011.

[47] H. T. e. a. M.I. Sayyed, «Shielding features of concrete types containing sepiolite mineral: Comprehensive study on experimental, XCOM and MCNPX results,» *Results in Physics,* vol. 11, pp. 40-45, 2018.

[48] A. A. W. e. a. Ş. Gözde İrim, «Physical, mechanical and neutron shielding properties of h-BN/Gd2O3/HDPE ternary nanocomposites,» *Radiation Physics and Chemistry,* vol. 144, pp. 434-443, 2018.

[49] b. L. G. e. a. Hui Jing a, «Research progress of rare earth composite shielding materials,» *Journal of Rare Earths,* vol. 41, pp. 32-41, 2023.

[50] Q. Z. e. a. Junjie Zhou, «Research on the shielding performance and optimization of new type foam metal matrix composite shielding materials,» *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research,* vol. 516, pp. 31-37, 2022.

[51] J. D. C. Sayed H. Rokni, «Radiation Shielding at High-Energy Electron and Proton Accelerators,» *Fermilab Pubblication,* vol. 7, 2008.

[52] «Accelerator shielding and radiation,» in *Chapter 8*, 2008.

[53] F. O. e. a. A.J. Lopez-Revelles, «Shielding optimization to reduce the radiation field in the accelerator systems of IFMIF-DONES,» *Fusion Engineering and Design,* vol. 202, 2024.

[54] M. Silari, *Radiation protection at medium- and high-energy particle accelerators,* 2025.

[55] J. S. e. a. Taranjot Kaur, «Review on scope of metallic alloys in gamma rays shield designing,» *Progress in Nuclear Energy,* vol. 113, pp. 95-113, 2019.

[56] G. Y. e. a. Ying Shang, «Multilayer polyethylene/ hexagonal boron nitride composites showing high neutron shielding efficiency and thermal conductivity,» *Composites Communications,* vol. 19, pp. 147-153, 2020.

[57] M. S. e. a. Kawa M. Kakya, «Physical, structural, optical and gamma radiation attenuation properties of germanate-tellurite glasses for shielding applications,» *Journal of Non-Crystalline Solids,* vol. 545, 2020.

[58] T. B. Daniel Matthiä, «Radiation Exposure and Shielding Effects on the Lunar Surface,» *Space Weather,* vol. 22, 2024.

[59] M. Durante, «Space radiation protection: Destination Mars,» *LifeSciencesinSpaceResearch,* vol. 1, pp. 2-9, 2014.

[60] S. G. e. a. C. Zeitlin, «Measurements of materials shielding properties with 1 GeV/nuc 56Fe,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,* vol. B, n. 252, pp. 308-318, 2006.

[61] A. A. B. e. a. Tony C. Slaba, «Optimal shielding thickness for galactic cosmic ray environments,» *Life Sciences in Space Research,* vol. 12, pp. 1-15, 2017.

[62] R. M. Ankit Gohel, «Multi-layered shielding materials for high energy space radiation,» *Radiation Physics and Chemistry,* vol. 197, 2022.

[63] C. C. F. Sheila A. Thibeault, «Radiation Shielding Materials Containing Hydrogen, Boron, and Nitrogen: Systematic Computational and Experimental Study - Phase I,» NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, 2012.

[64] R. T. e. a. S. Kodaira, «Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters,» *Advances in Space Research,* vol. 53, pp. 1-7, 2014.

[65] S. O. e. a. Daniela Iguchi, «Development of Hydrogen-Rich Benzoxazine Resins with Low Polymerization Temperature for Space Radiation Shielding,» *ACS Omega,* vol. 3, p. 11569−11581, 2018.

[66] M. C. e. a. P. Spillantini, «Shielding from cosmic radiation for interplanetary missions: Active and passive methods,» *Radiation Measurements,* vol. 42, pp. 14-23, 2007.

[67] P. Spillantini, «Active shielding for long duration interplanetary manned missions,» *Advances in Space Research,* vol. 45, pp. 900-916, 2010.

[68] «WebPlotDigitizer,» [Online]. Available: https://automeris.io/wpd/.

[69] K. O. e. a. Y. Takano, «Experimental and Theoretical Studies on Radiation Protective Effect of a Lighter Non-lead Protective Apron,» *Japanese Journal of Radiological Technology,* vol. 61, n. 7, pp. 1027-1033, 2005.

[70] E. Á.-T. e. a. Angel Acevedo-Del-Castillo, «A Brief Review on the High-Energy Electromagnetic Radiation-Shielding Materials Based on Polymer Nanocomposites,» *International Journal of Molecular Sciences,* vol. 22, n. 9079, pp. 1-20, 2021.

[71] S. E. e. Farouk, «Assesment of awereness and practice of ionizing radiation protection procedures among exposed health care workers,» *Egyptian Journal of Occupational Medicine,* vol. 44, n. 1, pp. 529-544, 2020.

[72] S. M. R. e. a. Mohit Hemath, «A comprehensive review on mechanical, electromagnetic radiation shielding, and thermal conductivity of fibers/inorganic fillers reinforced hybrid polymer composites,» *Polymer Composites,* vol. 41, pp. 3940-3965, 2020.

[73] Nuclear Lead Co. Inc., «www.nuclearlead.com,» 2026. [Online]. Available: https://www.nuclearlead.com/blog/radiation-shielding-materials/. [Consultato il giorno 26 may 2026].

[74] G. L. e. a. M.I. Sayyeda, «Investigation on gamma and neutron radiation shielding parameters for BaO/SrO–Bi2O3–B2O3 glasses,» *Radiation Physics and Chemistry,* vol. 145, pp. 26-33, 2018.

[75] E. AL-Sarray, «shielding of ionic radiation,» *Journal Port Science Research,* vol. 1, 2018.

[76] A. M. e. a. O.I. Sallama, «Mass stopping power and nuclear shielding behavior of lead borate glasses: Influence of gamma irradiation on physical properties,» *Journal of Alloys and Compounds,* vol. 926, 2022.

[77] N. M. e. a. Shakaib Arslan Gursal, «On the neutron shielding efficacy of flexible silicone infused with CdO nanoparticles,» *Radiation Physics and Chemistry,* vol. 202, 2023.

[78] B. E. e. a. M.I. Sayyeda, «Radiation shielding properties of pentaternary borate glasses using MCNPX code,» *Journal of Physics and Chemistry of Solids,* vol. 121, pp. 17-21, 2018.

[79] N. M. B. Vishwanath P. Singh, «Shielding Efficiency of Lead Borate and Nickel Borate Glasses for Gamma Rays and Neutrons,» *Glass Physics and Chemistry,* vol. 41, n. 3, pp. 276-283, 2015.

[80] M. Haydon, «www.raybloc.com,» 29 July 2024. [Online]. Available: https://raybloc.com/shielding-solutions-for-nuclear-power-plants/. [Consultato il giorno 26 May 2026].

[81] F. A. e. a. A. Ibarra, «The European approach to the fusion-like neutron source: the IFMIF-DONES project,» *IAEA Nuclear Fusion,* vol. 59, 2019.

[82] J. I. M. e. a. Oriol Nomen, «Detailed mechanical design of the LIPAc beam dump radiological shielding,» *Fusion Engineering and Design,* vol. 88, pp. 2723-2727, 2013.

[83] G. A. e. a. Gerald Pintsuk, «Materials for in-vessel components,» *Fusion Engineering and Design,* vol. 174, 2022.

[84] Nuclear Energy Agency, Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities – SATIF-11 Workshop Proceedings, Tsukuba: Nuclear Science, 2012.

[85] W. B. e. a. R. Battiston, «INFN-12-15/PG, Active radiation shield for space exploration missions,» SIDS–Pubblicazioni, Perugia, 2012.

[86] J. H. K. e. a. Sheila A. Thibeault, «Nanomaterials for radiation shielding,» *MRS BULLETIN,* vol. 40, pp. 836-841, 2015.

[87] C. C. Schiavone, «Polymeric Radiation Shielding for Applications in Space: Polyimide Synthesis and Modeling of Multi-layered Polymeric Shields,» College of William and Mary, Winchester, Virginia, 2013.

[88] J. E. N. Lisa C. Simonsen, «NASA TP 3079, Radiation Protection for Human Missions to the Moon and Mars,» Langley Research Center, Hampton, Virginia, 1991.

[89] J. M. J. W. Wilson, «NASA CP 3360, Shielding Strategies for Human Space Exploration,» in *NASA Conference Publication*, Hampton, Virginia, 1997.

[90] M. J. O. Kristina Rojdev, «The Effect of Dose Rate on Composite Durability When Exposed to a Simulated Long-Term Lunar Radiation Environment,» NASA Johnson Space Center, Madison, WI, 2011.

Ringraziamenti

Giunti alla fine di questo percorso vorrei ringraziare le persone che mi hanno accompagnato durante questi anni in università, aiutandomi a raggiungere traguardi irraggiungibili con le mie sole forze.

Il primo grande ringraziamento va ai miei genitori: siete stati l'esempio migliore che potessi ricevere. Grazie per avermi sempre stimolato e per aver sempre creduto nelle mie capacità. Grazie ai nonni, per tutti i pranzi preparati e per l'affetto che non mi avete mai fatto mancare. Grazie ai miei cugini e ai miei zii, per essermi stati vicini e aver condiviso con me questo percorso.

Un ringraziamento speciale va a Vale, Simo, Giulia, Betta, Eli, Fede, Ale e Leo: ci conosciamo da tutta la vita, letteralmente, eppure non ci siamo mai stancati di passare del tempo insieme, grazie per tutte le volte che avete sopportato le mie lezioni di astronomia sotto le stelle. In questo momento di difficoltà non posso non ringraziare Cristina, Roberto, Iaia, Davi e Mone per tutto quello che mi avete dato, siete una famiglia meravigliosa ed un esempio vero delle parole "prendersi cura degli altri".

Grazie allo scautismo, che mi è entrato fino al midollo. La mia caccia è iniziata nel lontano 2009 e, lungo la strada, tante persone hanno lasciato la propria traccia, contribuendo a educare la persona che sono oggi.

Grazie alla famiglia Papa, senza di voi e senza quei gelati prima delle sessioni probabilmente avrei ancora diversi esami da dare.

Ai compagni del Politecnico, grazie per aver reso questi anni molto più di una successione di lezioni ed esami. Il confronto, l'aiuto reciproco e le risate hanno reso più leggere le difficoltà e più belle le soddisfazioni.

Ringrazio i miei relatori per la disponibilità, il tempo dedicato e i consigli che mi hanno accompagnato nello sviluppo della tesi. Un grazie anche ai professori che hanno saputo trasmettermi passione e curiosità, aiutandomi a guardare oltre le formule e a comprendere il senso di ciò che studiavo.

Infine, grazie a tutti gli altri amici che ho incontrato lungo il percorso. Grazie per avermi ascoltato, incoraggiato e per aver condiviso il meglio di voi.

Questo traguardo porta anche qualcosa di ciascuno di voi. Grazie per aver camminato al mio fianco.