



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in **Ingegneria Biomedica**

**Valutazione dell'efficacia di schermatura di un giubbino
antiproiettile**

Shielding evaluation of flak jacket

Relatore:

Prof. **Franco Moglie**

Correlatore:

Prof. **Valter Mariani Primiani**

Tesi di Laurea di:

Luca Iervese

A.A. 2023/2024

*Alla mia famiglia che ha
reso possibile tutto ciò.*

INDICE

INTRODUZIONE	1
---------------------------	----------

CAPITOLO 1

RICHIAMI DI ELETTROMAGNETISMO	3
--	----------

1.1 Le equazioni di Maxwell nell'elettromagnetismo	4
--	---

1.2 Onde piane nell'elettromagnetismo.....	7
--	---

1.3 Schermatura elettromagnetica.....	16
---------------------------------------	----

CAPITOLO 2

IL GIUBBOTTO ANTIPROIETTILE.....	27
---	-----------

2.1 Design e struttura del giubbotto.....	27
---	----

2.2 Certificazioni e standard	30
-------------------------------------	----

2.3 Manutenzione e sostenibilità	32
--	----

2.4 Giubbino antiproiettile in Kevlar.....	27
--	----

CAPITOLO 3

LINGUAGGIO PYTHON.....	37
-------------------------------	-----------

3.1 Introduzione	37
------------------------	----

3.2 Algoritmo per il calcolo della SE 35

3.3 Conclusioni 44

BIBLIOGRAFIA..... 45

INTRODUZIONE

I campi elettromagnetici (EM) sono fenomeni fondamentali che permeano il nostro mondo e giocano un ruolo cruciale in molteplici aspetti della vita quotidiana. La loro presenza è evidente in tecnologie che utilizziamo quotidianamente, dalle comunicazioni senza fili ai dispositivi elettronici, fino ai sistemi di trasmissione di energia. La comprensione dei campi elettromagnetici è essenziale non solo in ambito scientifico, ma anche in quello ingegneristico, poiché essi influenzano direttamente il funzionamento di molti dispositivi e sistemi.

Il concetto dei campi elettromagnetici è emerso dalle scoperte di pionieri come James Clerk Maxwell, il quale ha formulato le famose equazioni di Maxwell nel XIX secolo. Queste equazioni descrivono come i campi elettrici e magnetici interagiscano e si propaghino nello spazio. Le onde elettromagnetiche, generate da oscillazioni di cariche elettriche, possono viaggiare attraverso il vuoto e attraverso diversi materiali, permettendo la trasmissione di segnali a grande distanza.

I campi elettromagnetici sono presenti in diverse forme, dalla luce visibile alle microonde, ai raggi X, ciascuna con proprie caratteristiche e applicazioni. Ad esempio, le onde radio sono utilizzate per le comunicazioni, mentre le microonde sono impiegate nei forni e nelle tecnologie di radar. Inoltre, la

crescente preoccupazione per gli effetti dell'esposizione ai campi EM sulla salute umana ha portato a un intenso dibattito e ricerca in questo campo, rendendo necessaria una comprensione approfondita dei meccanismi coinvolti.

In questa introduzione, si intende sottolineare l'importanza dei campi elettromagnetici nel contesto scientifico e ingegneristico, esaminando le loro proprietà fondamentali e le principali applicazioni. La capacità di manipolare e sfruttare questi campi ha aperto la strada a innovazioni che hanno trasformato la nostra società, rendendo la loro comprensione una priorità. La continua evoluzione delle tecnologie EM si pone l'obiettivo di plasmare il futuro delle comunicazioni, dell'energia e della medicina, rendendo il settore dei campi elettromagnetici un'area di studio dinamica e di grande rilevanza.

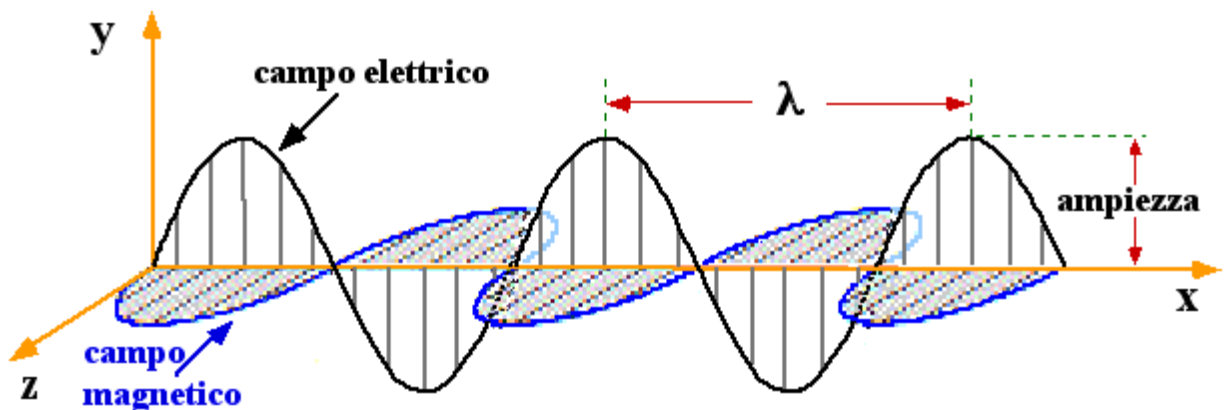
Oggetto di questo elaborato sarà analizzare il comportamento di un giubbino antiproiettile (GAP) regolarmente indossato dall'operatore sotto l'effetto di un campo elettromagnetico. In particolare, è stato creato un codice in linguaggio Python (con l'utilizzo di alcune sue librerie esterne) per valutare l'SE di tale sistema quando su di esso incide un'onda elettromagnetica. In questo modo possiamo analizzare l'efficacia di schermatura dei materiali costituenti il giubbino ed apprezzarne le caratteristiche evidenziando aspetti positivi e negativi.

CAPITOLO 1

RICHIAMI DI ELETTROMAGNETISMO

Con elettromagnetismo si intende la branca della fisica che si occupa dei fenomeni di natura elettrica e magnetica. L'elettromagnetismo studia l'interazione tra campo elettrico e campo magnetico attraverso le celebri equazioni di Maxwell.

Nella seconda metà dell'800 infatti, il fisico James Clerk Maxwell convogliò i fenomeni elettrici e magnetici in quattro equazioni differenziali in grado di raggruppare tutte le interazioni tra i suddetti campi. La teoria dell'elettromagnetismo diede luogo ad uno dei più importanti risultati scientifici di tutti i tempi: la scoperta delle onde elettromagnetiche.



1.1 Le equazioni di Maxwell nell'elettromagnetismo

Le equazioni di Maxwell, formulate da James Clerk Maxwell nel XIX secolo, rappresentano uno dei fondamenti dell'elettromagnetismo. Esse descrivono il comportamento dei campi elettrici e magnetici e le loro interazioni con la materia, offrendo una comprensione unificata dei fenomeni elettrici e magnetici. Quattro equazioni principali costituiscono il nucleo di questa teoria:

Legge di Gauss per l'elettrostatica: questa equazione afferma che il flusso elettrico attraverso una superficie chiusa è proporzionale alla carica elettrica totale all'interno di quella superficie. In forma matematica, si esprime come:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$$

$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ è il vettore induzione elettrica [C/m²]

ρ_v è la densità di carica elettrica per unità di volume

Legge di Gauss per il magnetismo: questa equazione afferma che non esistono monopoli magnetici; il flusso magnetico totale attraverso una superficie chiusa è sempre zero. Si scrive come:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ è il vettore induzione magnetica [Wb/m]

Legge di Faraday dell'induzione: essa descrive come un campo magnetico variabile nel tempo possa generare un campo elettrico. In forma matematica, si esprime come:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

\mathbf{E} è il vettore campo elettrico [V/m]

Questo principio è alla base del funzionamento di generatori elettrici e trasformatori.

Legge di Ampère-Maxwell: questa equazione estende la legge di Ampère, includendo anche l'effetto di un campo elettrico variabile nel tempo. Essa afferma che la circolazione del campo magnetico attorno a un circuito è proporzionale alla corrente che attraversa il circuito e al cambiamento del flusso elettrico. Si scrive come:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

\mathbf{J} è la densità superficiale di corrente elettrica [A/m²]

\mathbf{H} è il vettore campo magnetico [A/m] ;

Mentre gli altri valori indicano:

μ_0 permeabilità magnetica del vuoto

μ_r permeabilità magnetica relativa del mezzo,

ϵ_0 costante dielettrica del vuoto e ϵ_r costante dielettrica relativa del mezzo.

Nel caso statico invece, dove $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, nessuna delle grandezze che compaiono è funzione del tempo; questo accade quando tutte le cariche sono fisse nello spazio o si muovono ad una velocità costante. Con questa premessa il campo elettrico e quello magnetico non sono più legati l'uno all'altro e le quattro equazioni si separano in due sistemi di equazioni, uno che riguarda i campi elettrici E e D mentre il secondo i campi magnetici B e H. Questo ci consente di studiare i fenomeni elettrici e magnetici come casi distinti (elettrostatica e magnetostatica) fino a quando la distribuzione di carica e il flusso rimangono costanti nel tempo.

Queste equazioni non solo spiegano i fenomeni elettromagnetici, ma permettono anche di dedurre l'esistenza delle onde elettromagnetiche. Infatti, dalle equazioni si può dimostrare che un campo elettrico variabile genera un campo magnetico variabile, dando origine a onde che si propagano nel vuoto alla velocità della luce.

1.2 Onde piane nell'elettromagnetismo

Introduzione alle onde piane

Le onde piane rappresentano una delle soluzioni più semplici e fondamentali nell'ambito dell'elettromagnetismo e della fisica in generale. Esse possono essere descritte come onde che si propagano in uno spazio tridimensionale, mantenendo una forma costante nel tempo e con superfici d'onda piane. Le onde piane possono essere sia onde elettromagnetiche sia onde acustiche, ma in questa trattazione ci concentreremo principalmente sulle onde elettromagnetiche.

Definizione e caratteristiche

Le principali caratteristiche delle onde piane includono:

- **Ampiezza:** l'ampiezza determina l'intensità dell'onda. Onde con ampiezze maggiori trasmettono più energia.
- **Lunghezza d'onda:** è la distanza tra due punti consecutivi in fase ed è inversamente proporzionale alla frequenza.
- **Frequenza:** rappresenta il numero di oscillazioni complete che si verificano in un secondo, ed è espressa in hertz (Hz).

Propagazione e interazione

Le onde piane si propagano in una direzione specifica e la loro velocità di propagazione dipende dal mezzo in cui si muovono. Nel vuoto, la velocità delle onde elettromagnetiche è pari alla velocità della luce ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s). Quando le onde piane interagiscono con i materiali, possono verificarsi fenomeni come riflessione, rifrazione e assorbimento.

La riflessione avviene quando un'onda incontra un confine tra due mezzi diversi e parte dell'energia dell'onda viene riflessa indietro. La rifrazione si verifica quando l'onda passa da un mezzo a un altro con una diversa densità ottica, causando un cambiamento nella direzione di propagazione. L'assorbimento, invece, avviene quando l'onda perde energia a causa delle interazioni con le particelle del mezzo, trasformando l'energia dell'onda in calore.

Onde piane e teoria elettromagnetica

Nell'ambito dell'elettromagnetismo, le onde piane sono di particolare importanza perché rappresentano una soluzione ideale delle equazioni di Maxwell. Queste onde possono essere polarizzate, il che significa che la direzione del campo elettrico può variare, dando origine a diverse modalità di propagazione. La polarizzazione lineare, circolare e ellittica sono le forme più comuni di polarizzazione delle onde piane.

La capacità di descrivere le onde elettromagnetiche come onde piane semplifica notevolmente l'analisi di sistemi complessi, come le antenne e i circuiti radio. Ad esempio, nelle antenne, si considera frequentemente l'emissione e la ricezione di onde piane, poiché questo approccio consente di applicare facilmente le teorie di radiazione e propagazione.

Applicazioni delle onde piane

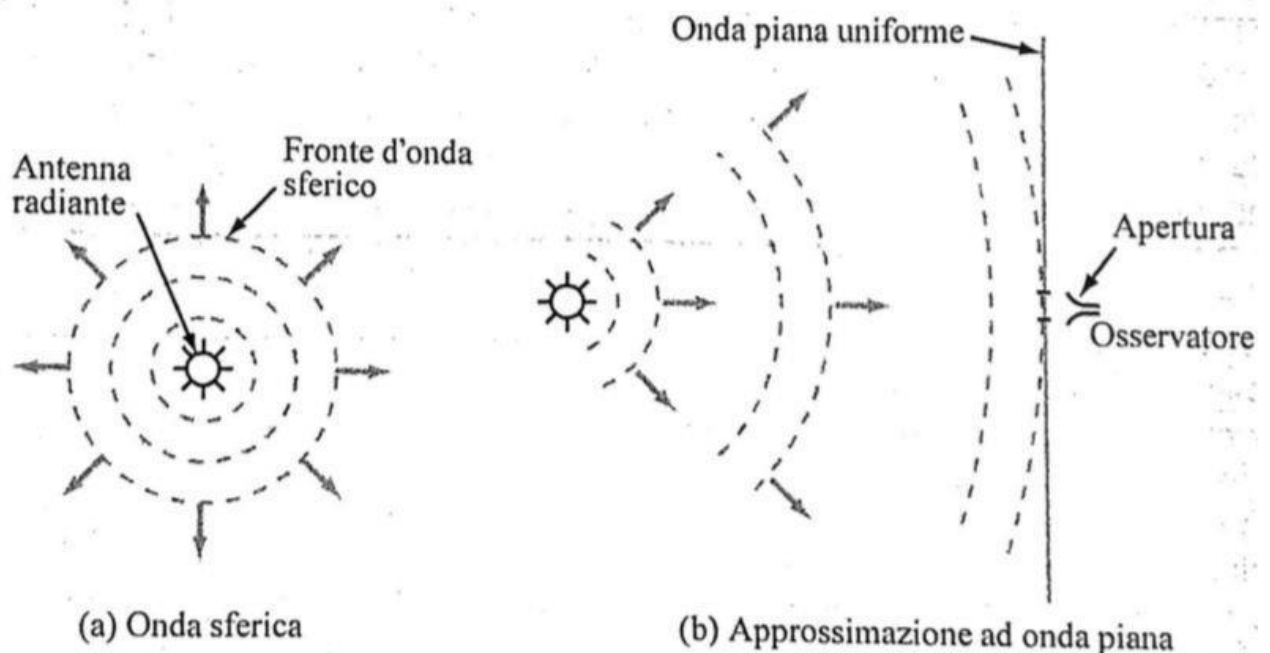
Le onde piane trovano numerose applicazioni pratiche in vari settori. Nelle comunicazioni senza fili, le onde piane sono fondamentali per la trasmissione di segnali radio e microonde. In questo contesto, la comprensione delle proprietà delle onde piane permette di ottimizzare le antenne e migliorare la qualità del segnale.

In campo medico, le onde piane sono utilizzate nella tecnologia di imaging, come l'ecografia. La capacità di modellare le onde sonore come onde piane facilita l'analisi delle onde riflesse dai tessuti, consentendo di ottenere immagini dettagliate del corpo umano.

Inoltre, le onde piane sono utilizzate nello studio delle proprietà dei materiali. Ad esempio, quando un'onda piana viene incanalata in un materiale, le sue

interazioni possono rivelare informazioni sui parametri ottici e meccanici del materiale stesso.

Un'onda piana si può definire come un'onda il cui fronte d'onda è un piano infinito e uniforme e che si propaga in una direzione specifica.



Queste onde sono ovviamente un'astrazione e semplificazione matematica che non corrisponde ad alcun fenomeno della realtà, tuttavia sono utili ad approssimare il comportamento dei campi quando la sorgente si trova a grande distanza.

Maxwell sviluppò uno studio che descrive come campo elettrico e campo magnetico soddisfano l'equazione di D'Alembert. Quindi un'equazione differenziale alle derivate parziali che sintetizza tutti i fenomeni ondulatori e ne descrive i suoi comportamenti.

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{E} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \text{Equazione d'onda per il campo elettrico}$$

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{H} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad \text{Equazione d'onda per il campo magnetico}$$

Partendo da un sistema di riferimento cartesiano, dando per ipotesi di avere a che fare con un'onda piana ed esaminando solo l'equazione relativa al campo elettrico, supponiamo che l'onda si propaghi lungo l'asse z e che il campo elettrico abbia una componente solo sull'asse x (onda piana uniforme), l'equazione diventa:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2}$$

Inoltre l'equazione del campo elettrico può essere definita anche nel dominio della frequenza e diventa:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = -\omega^2 \varepsilon\mu E_x$$

La soluzione di questa equazione differenziale di secondo grado, omogenea, a coefficienti costanti assume la forma di:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = E_x^+ e^{-jkz} + E_x^- e^{jkz}$$

Dove:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{è la velocità di propagazione dell'onda}$$

$$k = \frac{\omega}{v} = \omega\sqrt{\epsilon\mu} \quad \left[\frac{1}{s} \right] \quad \text{è la costante di propagazione dell'onda}$$

Il primo termine dell'equazione contenente l'esponente negativo rappresenta un'onda di ampiezza E_x^+ che viaggia nella direzione delle z positive. Il secondo termine rappresenta un'onda di ampiezza E_x^- che viaggia nella direzione delle z negative.

Allo stesso modo si può determinare l'espressione del campo magnetico dell'onda piana uniforme, a partire dalla conoscenza del campo elettrico tramite l'equazione del rotore di Maxwell:

$$H_X(z) = H_Y(z) = 0$$

$$H_Y(z) = \frac{j}{\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{1}{\eta} (E_x^+ e^{-jkz} + E_x^- e^{jkz})$$

Dove:

$$\eta = \frac{\omega\mu}{k} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad [\Omega] \text{ è l'impedenza intrinseca del mezzo}$$

Propagazione onde piane in mezzi con perdite

Nel caso in cui l'onda si propaghi in un mezzo conduttore con conducibilità σ , si definisce la costante di propagazione γ come:

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu (\varepsilon' - j\varepsilon'')$$

Dove:

$$\varepsilon' = \varepsilon$$

$$\varepsilon'' = \sigma/\omega$$

Dato che γ è complessa possiamo esprimerla come la somma di: $\gamma = \alpha + j\beta$, con α costante di attenuazione del mezzo e β costante di fase. Queste due costanti sono esprimibili nelle equazioni 1.1 e 1.2 come:

$$- \alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [\text{Np/m}]$$

$$- \beta = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [\text{rad/m}]$$

Rimanendo nell'ipotesi in cui il campo elettrico ha come unica componente E_x , l'equazione delle onde assume la forma:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \gamma^2 E_x$$

Ed ammette soluzioni:

$$E_x(z) = E_x^+ e^{-\gamma z} + E_x^- e^{\gamma z}$$

Mentre il campo magnetico è:

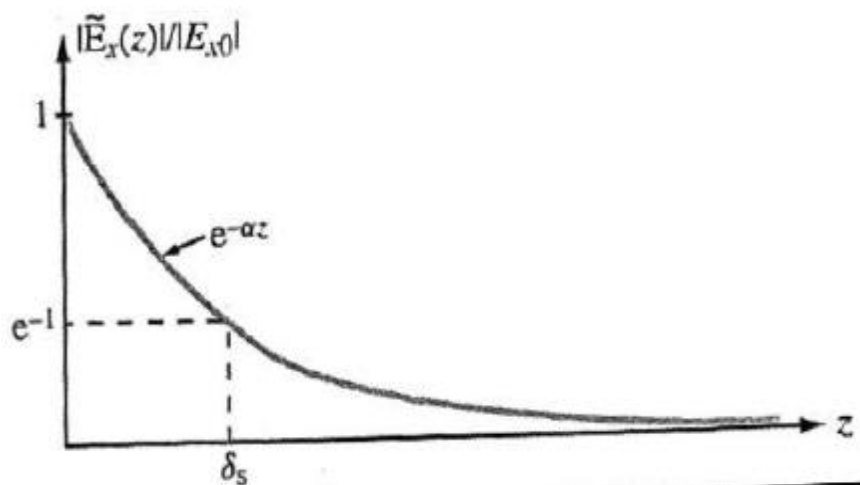
$$H_y(z) = \frac{1}{\eta} (E_x^+ e^{-\gamma z} + E_x^- e^{\gamma z})$$

Dove $\eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma}$ che indica l'impedenza intrinseca del mezzo ed è una variabile complessa. Dopo una determinata distanza $z = \delta_s$ tale che:

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha}$$

l'ampiezza dell'onda decrescerà di e^{-1} rispetto al valore iniziale in $z=0$. La distanza in oggetto viene definita come spessore di penetrazione del mezzo e rappresenta quanto un'onda può penetrare nel mezzo conduttore.

L'ampiezza dei campi decresce esponenzialmente al crescere della distanza e si riduce a e^{-1} quando $z=\delta_s$.



In un dielettrico ideale si ha $\sigma = 0$ per cui anche $\alpha = 0$ e $\delta s = \infty$, in questo caso nel vuoto l'onda piana può propagarsi senza dispersioni. Diversamente, se il mezzo è un conduttore con $\sigma = \infty$, l'utilizzo della ε'' nella (1.1) porta ad $\alpha = \infty$ e quindi $\delta s = 0$. Con un dielettrico perfetto ($\sigma = 0$) le espressioni sopracitate 1.1 e 1.2 si riducono al caso senza perdite. Se consideriamo, invece, un mezzo con perdite apparirà in tutte le espressioni il rapporto $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ che sarà di fondamentale importanza per la stima delle perdite.

Se questo rapporto sarà molto più piccolo di 1 il mezzo è definito “dielettrico a basse perdite” mentre se sarà molto più grande di 1 il mezzo è definito come “un ottimo conduttore”.

1.3 Schermatura elettromagnetica

Introduzione

La schermatura elettromagnetica è un fenomeno fondamentale nella protezione e nel controllo delle interferenze elettromagnetiche (EMI) in vari dispositivi e sistemi. Con l'aumento dell'uso di apparecchiature elettroniche e di comunicazione, la necessità di proteggere circuiti e dispositivi dalla radiazione elettromagnetica indesiderata è diventata sempre più rilevante. La schermatura elettromagnetica si basa su principi fisici e materiali specifici per attenuare i

campi elettromagnetici, riducendo l'influenza di segnali indesiderati e migliorando le prestazioni complessive dei sistemi elettronici.

Principi di schermatura

La schermatura elettromagnetica si basa sull'interazione tra i campi elettrici e magnetici e i materiali utilizzati per schermare. Esistono principalmente due meccanismi attraverso cui si realizza la schermatura:

1. **Assorbimento:** i materiali schermanti, come i metalli, assorbono parte dell'energia delle onde elettromagnetiche incidenti. Questo avviene grazie alla conducibilità elettrica del materiale, che genera correnti indotte in risposta ai campi elettrici. L'energia assorbita si dissipa sotto forma di calore.
2. **Riflessione:** un altro meccanismo di schermatura è la riflessione, dove una parte dell'onda incidente viene riflessa dalla superficie del materiale schermante. I materiali altamente conduttivi, come il rame e l'alluminio, sono particolarmente efficaci in questo processo, poiché la loro alta conducibilità consente una riflessione efficace delle onde elettromagnetiche.

L'efficacia di un materiale schermante è misurata dal suo valore di attenuazione, espresso in decibel (dB). Maggiore è il valore di attenuazione, migliore è la capacità di schermatura del materiale.

Materiali per la schermatura elettromagnetica

I materiali utilizzati per la schermatura possono variare a seconda delle frequenze da schermare e delle applicazioni specifiche. Tra i materiali più comuni si trovano:

- **Metalli:** rame, alluminio, acciaio inossidabile e ferro sono tra i materiali più utilizzati per la schermatura. Grazie alla loro alta conducibilità, sono in grado di riflettere e assorbire le onde EM in modo efficace.
- **Materiali compositi:** questi materiali possono includere una combinazione di metalli e materiali non conduttivi, come polimeri e ceramiche. I materiali compositi offrono vantaggi in termini di peso e flessibilità, rendendoli adatti per applicazioni in cui è richiesta una forma specifica.
- **Film conduttivi:** i film sottili di materiali conduttivi, come il carbonio o il grafene, stanno guadagnando attenzione per le loro proprietà di schermatura in applicazioni di elettronica flessibile e indossabile.

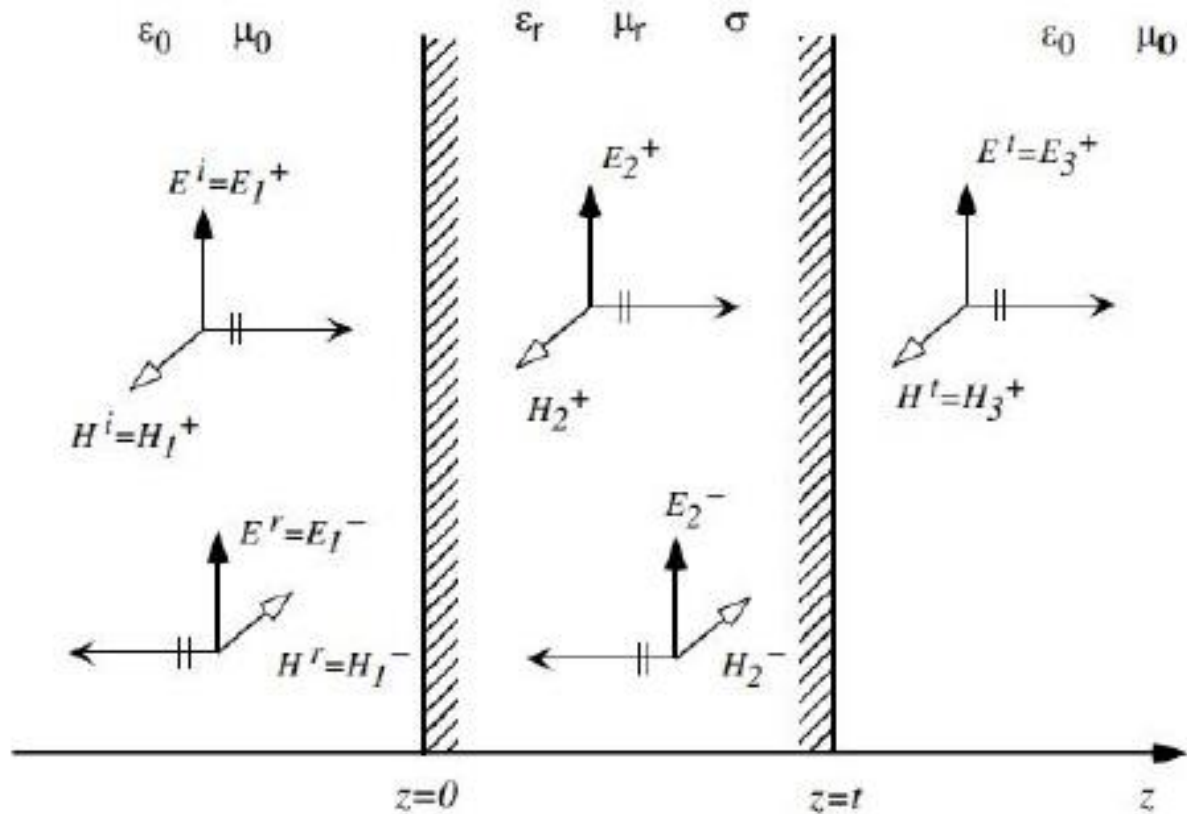
L'efficacia di uno schermo elettromagnetico viene definito con la cosiddetta "Shielding Effectiveness" definita come il rapporto tra l'ampiezza del campo elettrico in assenza di schermo e l'ampiezza del campo elettrico trasmesso attraverso lo schermo.

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\left| \frac{E^i}{E^t} \right| \right)$$

Analogamente possiamo definire l'equazione per i campi magnetici:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\left| \frac{H^i}{H^t} \right| \right)$$

Per una descrizione più precisa ci serviremo dell'illustrazione seguente:



Esempio di scomposizione di un'onda incidente su schermo metallico

L'aria sarà il primo mezzo (caratteristiche dielettriche ϵ_0 e μ_0) con campo incidente che verrà in parte trasmesso attraverso lo schermo e parzialmente riflesso grazie alla presenza dello stesso che sarà identificato come secondo mezzo con caratteristiche elettriche ϵ_r , μ_r e σ . Nel secondo mezzo quindi avremo un'onda diretta ed un'onda riflessa, mentre nel terzo mezzo (aria) ci sarà solo l'onda diretta.

Si verificheranno, di conseguenza, tre fenomeni che contribuiranno alla diminuzione del campo incidente:

- **Riflessione** che si ottiene quando il campo incidente colpisce la lastra metallica.
- **Assorbimento** del campo permeato attraverso lo schermo, strettamente dipendente dalle caratteristiche fisiche del metallo costituente lo schermo.
- **Riflessioni** multiple all'interno dello schermo.

Di conseguenza la relazione dell'efficacia di schermatura definita in base ai suddetti fenomeni può essere rappresentata come:

$$SE_{dB} = R_{dB} + M_{dB} + A_{dB}$$

R = perdita dovuta alla riflessione

A = perdita dovuta all'assorbimento

M = valore negativo riferito alle riflessioni multiple

Applicazioni della schermatura elettromagnetica

La schermatura elettromagnetica trova applicazione in una vasta gamma di settori. Alcuni degli usi più comuni includono:

- **Elettronica di consumo:** dispositivi come smartphone, computer e televisori utilizzano tecniche di schermatura per ridurre le interferenze e migliorare la qualità del segnale. La schermatura è particolarmente importante per i circuiti radio e per i dispositivi che operano a frequenze elevate.
- **Apparecchiature mediche:** in campo medico, la schermatura è essenziale per proteggere i dispositivi di imaging, come risonanze magnetiche e ultrasuoni, dalle interferenze esterne. La schermatura garantisce che i segnali acquisiti siano accurati e privi di distorsioni.
- **Industria aerospaziale e automobilistica:** in questi settori, la schermatura elettromagnetica è fondamentale per garantire il funzionamento affidabile dei sistemi di comunicazione e di navigazione. Gli aerei e le automobili moderne integrano diverse tecnologie elettroniche che richiedono protezione dalle interferenze elettromagnetiche.

L'efficacia della schermatura elettromagnetica

L'efficacia della schermatura elettromagnetica è un aspetto cruciale nella progettazione e nell'implementazione di sistemi elettronici e di comunicazione. Con l'aumento dell'uso di tecnologie wireless e della miniaturizzazione dei componenti elettronici, la necessità di proteggere i dispositivi dalle interferenze elettromagnetiche (EMI) è diventata sempre più urgente. La capacità di una schermatura di attenuare i campi elettromagnetici indesiderati non solo influisce sulla prestazione del dispositivo, ma ha anche importanti implicazioni per la sicurezza e l'affidabilità.

Fattori che influenzano l'efficacia della schermatura

L'efficacia di una schermatura elettromagnetica dipende da vari fattori, tra cui il materiale utilizzato, la geometria della schermatura, le frequenze da schermare e le modalità di propagazione delle onde.

Materiali di schermatura

La scelta del materiale è fondamentale per l'efficacia della schermatura. I materiali conduttivi, come il rame, l'alluminio e l'acciaio, sono comunemente utilizzati per la loro alta conducibilità elettrica e capacità di riflessione. La conducibilità determina la capacità del materiale di generare correnti indotte che assorbono l'energia delle onde elettromagnetiche. Ad esempio, il rame ha una conducibilità molto elevata, rendendolo altamente efficace nella schermatura.

Tuttavia, non solo la conducibilità, ma anche lo spessore del materiale e la sua configurazione geometrica influenzano l'efficacia della schermatura. Schermature più spesse tendono a offrire una migliore attenuazione, ma possono anche aumentare il peso e il costo del dispositivo.

Frequenze e lunghezze d'onda

L'efficacia della schermatura varia in base alla frequenza delle onde elettromagnetiche. Ogni materiale ha una risposta diversa alle varie frequenze, il che significa che un materiale che funziona bene a basse frequenze potrebbe non essere altrettanto efficace a frequenze elevate. Questo è particolarmente rilevante nel contesto delle comunicazioni wireless e delle tecnologie emergenti, come il 5G, dove le frequenze utilizzate possono variare notevolmente.

Inoltre, la lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche gioca un ruolo significativo. Onde con lunghezze d'onda più lunghe possono facilmente diffondersi attraverso piccole aperture, rendendo necessarie soluzioni di schermatura più sofisticate. Al contrario, onde con lunghezze d'onda più corte possono essere più facilmente riflessi o assorbiti.

Geometria della schermatura

La forma e la configurazione della schermatura possono influenzare notevolmente la sua efficacia. Una schermatura continua e ben progettata è generalmente più efficace rispetto a una schermatura con aperture o giunture, che possono consentire il passaggio di onde EM. La forma della schermatura deve essere progettata per massimizzare la riflessione e l'assorbimento, minimizzando al contempo le aperture che potrebbero compromettere l'integrità del sistema.

Metodi di valutazione dell'efficacia

La valutazione dell'efficacia della schermatura elettromagnetica può avvenire attraverso vari metodi, tra cui test di laboratorio e simulazioni. I test possono includere misurazioni di attenuazione in laboratorio, utilizzando strumenti specializzati per quantificare quanto una schermatura riduce l'intensità delle onde EM.

Misurazioni di attenuazione

L'attenuazione, espressa in decibel (dB), è il parametro principale per valutare l'efficacia della schermatura. Essa rappresenta il rapporto tra l'intensità dell'onda incidente e quella dell'onda trasmessa attraverso il materiale schermante. Un valore di attenuazione più elevato indica una schermatura più

efficace. I test possono essere condotti a diverse frequenze per determinare la risposta del materiale in un intervallo di frequenze, fornendo un profilo completo delle prestazioni.

In aggiunta ai test pratici, le simulazioni computazionali possono offrire preziose informazioni sull'efficacia della schermatura. Software avanzati di simulazione elettromagnetica possono modellare la propagazione delle onde EM attraverso materiali e geometrie complesse, consentendo di ottimizzare le configurazioni prima della realizzazione fisica.

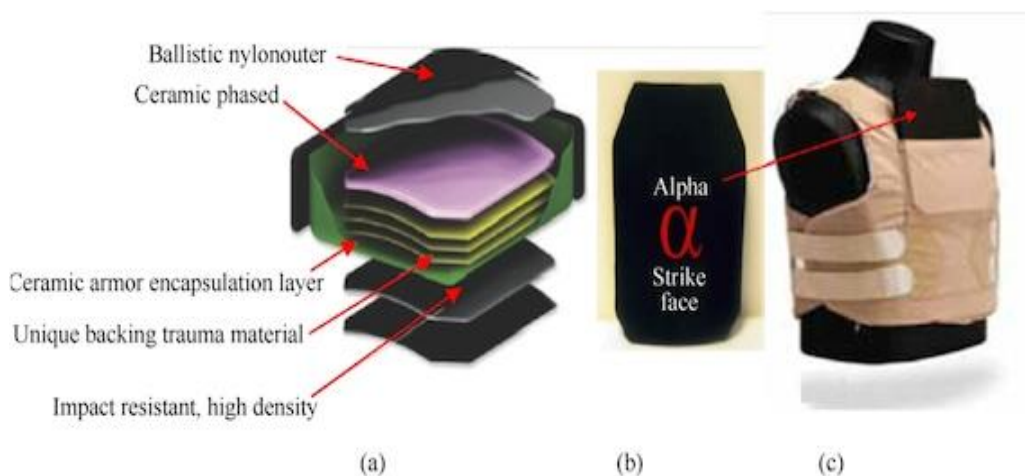
Andremo a determinare il comportamento di un giubbotto antiproiettile, indossato dall'operatore, sottoposto ad un campo elettromagnetico. Definiremo i vari strati attraversati dal campo elettromagnetico e quanto il giubbino schermanà l'operatore da eventuali campi magnetici. I GAP presi in considerazione saranno quelli in Kevlar e in Carbonio e Kevlar in modo da evidenziare i comportamenti del materiale costituente lo strato intermedio del giubbotto.

CAPITOLO 2

IL GIUBBOTTO ANTIPROIETTILE

2.1 Design e struttura del giubbotto

Il giubbotto antiproiettile è un dispositivo di protezione personale progettato per assorbire e disperdere l'energia cinetica dei proiettili e di altri oggetti pericolosi. Il design di un giubbino antiproiettile in Kevlar è frutto di un attento studio ergonomico. La costruzione prevede un rivestimento esterno, spesso in tessuti resistenti all'acqua, che protegge il Kevlar dagli agenti atmosferici e dall'usura. Il giubbino è composto da strati sovrapposti di Kevlar, disposti in modo strategico per ottimizzare la protezione. La forma anatomica del giubbino, con spallacci regolabili e cinghie di supporto, assicura un fit comodo e sicuro. Inoltre, alcuni modelli possono includere inserti rigidi in ceramica o poliuretano, per migliorare la protezione contro proiettili di calibro più elevato.



L'immagine ci permette di apprezzare un GAP generico in tutte le sue sezioni

Materiali di base:

- **Fibra aramidica:** materiali come il Kevlar e il Twaron sono comunemente utilizzati per le loro proprietà di alta resistenza alla trazione e leggerezza. Questi tessuti vengono intrecciati in modo tale da creare una rete di fibre che disperde l'impatto.
- **Polietilene ad alta densità:** Utilizzato in alcuni giubbini per la sua resistenza agli impatti e la leggerezza, spesso impiegato in combinazione con altri materiali.
- **Materiali compositi:** Alcuni giubbini moderni utilizzano combinazioni di materiali per migliorare la protezione e ridurre il peso, come l'uso di schiume avanzate in strati.

Strati di protezione:

- I giubbini antiproiettile sono generalmente composti da più strati. Il numero e il tipo di strati variano in base alla classificazione del giubbino (ad esempio, livello IIA, II, IIIA secondo la norma NIJ).
- **Strati esterni:** progettati per resistere all'abrasione e alle condizioni ambientali. Spesso realizzati in tessuti sintetici resistenti all'acqua e ai raggi UV.

- **Strati intermedi:** questi strati sono responsabili della cattura e della dispersione dell'energia dei proiettili. Il loro spessore e composizione variano in base al livello di protezione desiderato.

Sistema di ritenzione:

- Il giubbino deve rimanere in posizione durante l'uso. Le cinghie di regolazione, le chiusure a strappo e le fibbie sono elementi cruciali per garantire una vestibilità sicura e comoda.

Design ergonomico

Vestibilità e comfort:

- Un giubbino antiproiettile deve essere progettato per consentire una buona mobilità. Le cuciture, i pannelli elastici e le forme anatomiche sono elementi chiave nel design. I giubbini possono includere aree rinforzate per il supporto e la flessibilità, come l'area delle spalle e delle braccia, che sono cruciali per garantire la libertà di movimento.

Ventilazione:

- Considerare il comfort termico è fondamentale. Molti giubbini moderni sono dotati di sistemi di ventilazione e aree in mesh che permettono la circolazione dell'aria, riducendo l'accumulo di calore.

Accessori e modularità:

- I giubbini possono includere tasche e sistemi modulari per accessori, come porta caricatori e tasche per radio, aumentando la funzionalità del giubbino.

2.2 Certificazioni e standard

I giubbini antiproiettile devono rispettare rigorosi standard di sicurezza. Negli Stati Uniti, il National Institute of Justice (NIJ) stabilisce le classificazioni di protezione. Ogni giubbino deve essere testato per la resistenza a diversi tipi di proiettili e condizioni ambientali.

Il design e la struttura di un giubbino antiproiettile rappresentano un equilibrio tra protezione, comfort e funzionalità. Attraverso l'uso di materiali avanzati e tecniche di progettazione ergonomica, i giubbini moderni offrono una protezione efficace per chi opera in ambienti ad alto rischio, assicurando al

contempo una vestibilità confortevole e una buona mobilità. Con il continuo sviluppo della tecnologia dei materiali, possiamo aspettarci ulteriori innovazioni nel design di questi dispositivi di protezione personale.

I giubbini antiproiettile devono conformarsi a normative specifiche per garantire la sicurezza degli utenti. Negli Stati Uniti, il National Institute of Justice (NIJ) stabilisce standard di performance per i giubbini antiproiettile, classificandoli in vari livelli di protezione (da I a IV). Il livello II A, ad esempio, è progettato per proteggere contro proiettili di calibro 9 mm, mentre il livello III A può fermare proiettili di calibro 44 Magnum. La certificazione implica rigorosi test in laboratorio per verificare l'efficacia e la resistenza del giubbino. Devono essere considerati questi standard durante la progettazione e la produzione, assicurando che ogni giubbino rispetti le normative vigenti.

NIJ Standard - 0108.01 BALLISTIC RESISTANT PROTECTIVE MATERIALS						
ARMOR TYPE	WEAPON	TEST AMMUNITION	NOMINAL BULLET MASS	SUGGESTED BARREL LENGTH	REQUIRED BULLET VELOCITY	REQUIRED HITS PER ARMOR SPECIMEN
I		22 LRHV Lead 38 Special RN Lead	2.6 g 40 gr 10.2 g 158 gr	15 to 16.5 cm 6 to 6.5 in 15 to 16.5 cm 6 to 6.5 in	320 ± 12 m/s 1050 ± 40 ft/s 259 ± 15 m/s 850 ± 50 ft/s	5 5
II-A		357 Magnum JSP 9 mm FMJ	10.2 g 158 gr 8.0 g 124 gr	10 to 12 cm 4 to 4.75 in 10 to 12 cm 4 to 4.75 in	381 ± 15 m/s 1250 ± 50 ft/s 332 ± 12 m/s 1090 ± 40 ft/s	5 5
II		357 Magnum JSP 9 mm FMJ	10.2 g 158 gr 8.0 g 124 gr	15 to 16.5 cm 6 to 6.5 in 10 to 12 cm 4 to 4.75 in	425 ± 15 m/s 1395 ± 50 ft/s 358 ± 12 m/s 1175 ± 40 ft/s	5 5
III-A		44 Magnum Lead SWC Gas Checked 9 mm FMJ	15.55 g 240 gr 8.0 g 124 gr	14 to 16 cm 5.5 to 6.25 in 24 to 26 cm 9.5 to 10.25 in	426 ± 15 m/s 1400 ± 50 ft/s 426 ± 15 m/s 1400 ± 50 ft/s	5 5
III		7.62 mm 308 Winchester FMJ	9.7 g 150 gr	56 cm 22 in	838 ± 15 m/s	5
IV		30-06 AP	10.8 g 166 gr	56 cm 22 in	838 ± 15 m/s 2850 ± 50 ft/s	1

Mentre in Europa troviamo un altro tipo di classificazione molto simile alla scala americana ma più contenuta.

(EN) EUROPEAN BALLISTIC STANDARDS						
LEVEL	WEAPON	PROJECTILE			SPEED ±10 (m/sec)	SHOTS ±10 (mm)
		CALIBER (mm)	MASS (g) ±0.1	TYPE		
FB / BR4		9 mm Luger	8.0	FJ ¹ / RN / SC	400	3 on a 120 mm Δ
		0.357 Magnum	10.2	FJ ¹ / CB / SC	430	
		0.44 rem. Magnum	15.6	FJ ² / FN / SC	440	
FB / BR4+		7.62x39*	8.0	FJ ¹ / PB / SC	710	3 on a 120 mm Δ
FB / BR5		5.56x45**	4.0	FJ ² / PB / SCP1	950	3 on a 120 mm Δ
FB / BR6		7.62x51***	9.5	FJ ¹ / PB / SC	830	3 on a 120 mm Δ
FB / BR7		7.62x51***	9.8	FJ ² / PB / HC1	820	3 on a 120 mm Δ

Legend: L – Armor Piercing
 CB – Coned Bullet
 FJ – Full Metal Jacket Bullet
 FN – Flat Nose
 HC1 – Steel Hard Core Mass
 Mass 3.7 ±0.1g HRC 63+

PB – Pointed Bullet
 RN – Round Nose
 SC – Soft Core (Lead)
 SCP1 – Soft Core
 (Lead & Steel Penetrator SS109)

1) Full Steel Jacket Plated
 2) Full Steel Jacket

* Not an official EN standard, falls between B4 and B5
 ** Twisted length 178mm
 *** Twisted length 254mm

Classificazione europea dei giubbini antiproiettili

2.3 Manutenzione e sostenibilità

La manutenzione del giubbino antiproiettile è cruciale per garantirne la longevità e l'efficacia. È importante seguire le istruzioni del produttore, che generalmente raccomandano lavaggi delicati e l'evitamento di esposizione a sostanze chimiche aggressive. L'uso di fibre riciclate o biodegradabili, insieme a processi di produzione a basso impatto ambientale, rappresenta una direzione promettente per il futuro. L'integrazione di tecnologie smart, come sensori di

rilevamento di impatti o comunicazione integrata, potrebbe rendere i giubbini ancora più funzionali e versatili.

2.4 Giubbino antiproiettile in Kevlar

Il Kevlar è una fibra aramidica caratterizzata da una straordinaria resistenza alla trazione e alla lacerazione. A livello molecolare, il Kevlar è composto da catene polimeriche che conferiscono alla fibra un'elevata rigidità e stabilità termica. Questo materiale ha un modulo di elasticità di circa 130 GPa, che lo rende 5 volte più resistente dell'acciaio a parità di peso. Queste proprietà rendono il Kevlar particolarmente efficace nel fermare proiettili di calibro ridotto, come quelli delle pistole. Inoltre, la sua leggerezza (circa 1.44 g/cm³) consente di realizzare giubbini che non compromettono la mobilità dell'utente.



Sviluppato negli anni '60 dalla DuPont, è diventato uno dei materiali più utilizzati in applicazioni che richiedono un elevato grado di protezione e prestazioni meccaniche superiori.

Le sue proprietà meccaniche sono:

1. **Resistenza alla Trazione:** il Kevlar ha una resistenza alla trazione fino a cinque volte superiore a quella dell'acciaio, il che lo rende ideale per applicazioni che richiedono materiali leggeri ma estremamente forti.
2. **Leggerezza:** nonostante la sua robustezza, il Kevlar è sorprendentemente leggero. Questo lo rende adatto per l'uso in settori in cui il peso è un fattore critico, come l'industria aerospaziale e automobilistica.
3. **Resistenza al Calore:** il Kevlar è resistente a temperature elevate, con un punto di fusione che supera i 400°C. Questa caratteristica lo rende utile in applicazioni che richiedono resistenza al calore, come l'abbigliamento protettivo per i vigili del fuoco e i piloti.
4. **Resistenza agli Impatti:** grazie alla sua struttura molecolare, il Kevlar assorbe e disperde l'energia degli impatti, rendendolo un materiale ideale per giubbotti antiproiettile e altre forme di protezione personale.

5. **Resistenza Chimica:** il Kevlar è resistente a molti agenti chimici, il che lo rende adatto per l'uso in ambienti industriali e in applicazioni in cui è esposto a sostanze aggressive.
6. **Stabilità Dimensionale:** non si deforma facilmente, mantenendo la sua forma e dimensione anche sotto stress, una caratteristica essenziale in applicazioni tecniche.

Applicazioni del Kevlar

Le proprietà uniche del Kevlar lo rendono un materiale versatile, utilizzato in diversi settori:

- **Settore Militare e della Sicurezza:** utilizzato per la produzione di giubbotti antiproiettile, elmetti e altre attrezzature protettive.
- **Sport e Tempo Libero:** in abbigliamento tecnico per sport estremi e accessori come guanti e scarpe, dove la protezione e la leggerezza sono fondamentali.
- **Industria Aerospaziale:** utilizzato in componenti strutturali per aerei e veicoli spaziali, dove la resistenza e il basso peso sono cruciali.
- **Automotive:** impiegato in parti di veicoli ad alte prestazioni, come freni e rinforzi strutturali.

- **Settore Medicale:** utilizzato in dispositivi medici e protesi, dove la forza e la biocompatibilità sono necessarie.

CAPITOLO 3

LINGUAGGIO PYTHON

3.1 Introduzione

Python è un linguaggio di programmazione di alto livello ideato nei primi anni novanta dall' olandese Guido Van Rossum. Grazie alla sua semplice sintassi e alla grande disponibilità di librerie, gli ambiti di applicazione sono tra i più disparati, infatti Python viene utilizzato regolarmente per lo sviluppo di siti o applicazioni web, realizzazione di interfacce grafiche, amministrazione di sistema, database, giochi, grafiche 3D e molto altro.

Ciò che spinge l'utente ad utilizzare questo programma è soprattutto la facile fruibilità che possiede, infatti il programma è gratuito ed è possibile utilizzarlo e distribuirlo senza restrizioni. Inoltre supporta sia la programmazione che fa uso di funzioni sia la programmazione ad oggetti.

È un linguaggio che può essere usato sulle più disparate piattaforme come: Linux, Windows, DOS fino ad Android ed IOS. Questo è reso possibile dalla capacità dei codici di Python di essere eseguiti su qualsiasi piattaforma alla sola condizione che sia presente l'interprete Python.

Il meccanismo di *garbage collection* automaticamente si occupa della gestione della memoria, di conseguenza il programmatore ha la facoltà di utilizzare variabili senza dover dichiararle o definire spazi di memoria manualmente.

Per realizzare il programma oggetto di questo studio in Python si è scelto di installare il software JupyterLab, questo rappresenta l'ambiente di sviluppo che contiene tutto quello di cui abbiamo bisogno per l'esecuzione del codice sorgente che ci permetterà di calcolare l'SE.

Per la scrittura del codice sono state installate ed utilizzate tre librerie che saranno di fondamentale ausilio al programma in quanto permettono di aggiungere nuove funzionalità al codice grazie alla vasta quantità di funzioni e programmi che contengono.

Le librerie prese in considerazione sono:

- NumPy è una libreria fondamentale su cui si basano la maggior parte delle librerie di elaborazione dati Python; aggiunge supporto a grandi matrici e array multidimensionali insieme a una vasta collezione di funzioni matematiche di alto livello per poter operare efficientemente su queste strutture dati.

- SciPy è una collezione di algoritmi matematici ed altre funzioni particolarmente utilizzate in ambito scientifico. SciPy è costruita sulla base di NumPy.
- Matplotlib è invece la libreria per la creazione di grafici per il linguaggio Python.

3.2 Algoritmo per il calcolo della SE

Per il calcolo dell'efficacia di schermatura di un giubbotto antiproiettile, è stato creato un codice in linguaggio Python sulla base di quello sviluppato nella tesi di Lisa Trovarelli e precedentemente sviluppato in linguaggio C nella tesi di Tomasz De Clerico.

Sistema multistrato considerato: Giubbotto antiproiettile in kevlar

Il sistema multistrato considerato nello studio è un giubbotto antiproiettile con imbottitura in kevlar, la seguente tabella ci fornirà tutti i valori inseriti nel codice relativi ad ogni materiale che compone il giubbotto:

	ϵ_r	μ_r	σ	δ
ARIA	1	1	0	0
NYLON	5	1	0.0001	0.003
KEVLAR	2	1	0.0005	0.01
CERAMICA	3.4	1	1^{-6}	0.005
NYLON	5	1	0.0001	0.003
PELLE	41	1	0.9	0.002
GRASSO	5.45	1	0.54	0.01
MUSCOLO	55	1	0.98	0

Con le seguenti variabili:

ϵ_r = Permettività dielettrica relativa

μ_r = Permettività magnetica relativa

σ = Conducibilità elettrica (S/m)

δ = Spessore dello strato (mt)

I valori di pelle, grasso e muscolo in tabella si intendono ad 1GHz.

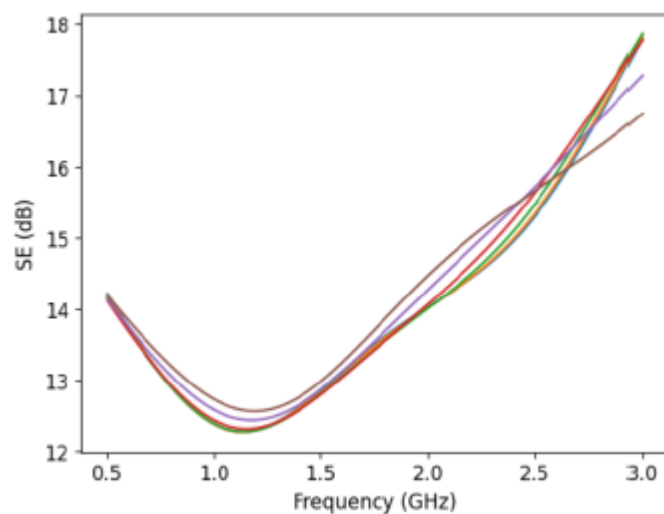
Nell'immagine seguente verrà riportato una parte di codice che ci aiuterà nella comprensione del programma sviluppato. Sono definiti in ordine gli strati coinvolti nell'esame con le proprie variabili prese in esame.

```

nstrati=8
theta_iniziale=85/180*np.pi
n=[0]*nstrati
gamma=[0]*nstrati
eta=[0]*nstrati
theta_m=[0]*nstrati
theta_m[0]=theta_iniziale
tt=[0]*(nstrati-1)
rho=[0]*(nstrati-1)
e_p=[0]*nstrati
e_m=[0]*nstrati
strati = [("Aria 1",1,1,0,0),
          ("Fibra di Nylon",5,1,0.0001,0.003),
          ("Kevlar",2,1,0.0005,0.01),
          ("Ceramica",3.4,1,1e-6,0.005),
          ("Fibra di Nylon",5,1,0.0001,0.003),
          ("Pelle",41,1,0.9,0.002),
          ("Grasso",5.45,1,0.54,0.01),
          ("Muscolo",55,1,0.98,0)]

```

La prossima immagine descrive la schermatura elettromagnetica del giubbotto analizzata in diverse angolazioni, con un angolo di incidenza da 0° a 67.5° .



Dovute sono le considerazioni in merito: è evidente che il giubbotto antiproiettile in kevlar possiede una schermatura minima in presenza di un campo elettromagnetico, ciò è dovuto alle scarse caratteristiche schermanti del kevlar.

In conclusione avremo un giubbotto altamente performante dal punto di vista meccanico e di resistenza all'impatto con proiettili di calibri più disparati, ma poco efficace dal punto di vista della schermatura elettromagnetica. Questo rappresenta un importante deficit di questo tipo di giubbotto soprattutto se l'operatore è nelle vicinanze o utilizzatore di un cannone anti UAV, in quanto la prolungata esposizione potrebbe causare dei danni a tessuti e organi.

Ora andiamo ad analizzare un giubbotto antiproiettile identico al precedente però con l'aggiunta di uno strato di carbonio.

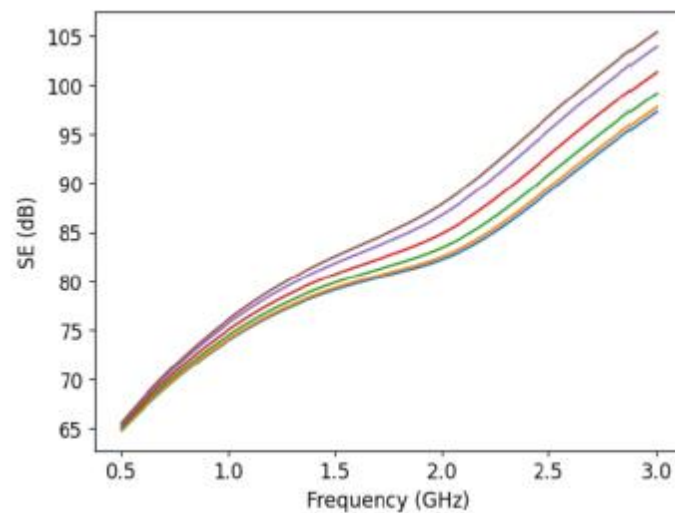
	ϵ_r	μ_r	σ	δ
CARBONIO	5	1	1000	0.002

```

nstrati=9
theta_iniziale=85/180*np.pi
n=[0]*nstrati
gamma=[0]*nstrati
eta=[0]*nstrati
theta_m=[0]*nstrati
theta_m[0]=theta_iniziale
tt=[0]*(nstrati-1)
rho=[0]*(nstrati-1)
e_p=[0]*nstrati
e_m=[0]*nstrati
strati = [{"Aria 1",1,1,0,0},
          {"Fibra di Nylon",5,1,0.0001,0.003},
          {"Kevlar",2,1,0.0005,0.008},
          {"Fibra Carbonio",5,1,1000,0.002},
          {"Ceramica",3.4,1,1e-6,0.005},
          {"Fibra di Nylon",5,1,0.0001,0.003},
          {"Pelle",41,1,0.9,0.002},
          {"Grasso",5.45,1,0.54,0.01},
          {"Muscolo",55,1,0.98,0}]

```

Come si evince dall'immagine il sistema multistrato ora è composto da 9 strati dopo l'aggiunta del carbonio. Quest'ultimo andrà a reagire in maniera positiva con il campo elettromagnetico in quanto la schermatura risulterà di gran lunga maggiore rispetto alla precedente. Il grafico seguente ci permetterà di apprezzarne le specifiche.



Come notiamo la schermatura ora risulterà di gran lunga maggiore in tutte le angolazioni.

3.3 Conclusioni

In definitiva con questa analisi si è potuto apprezzare il diverso comportamento di due materiali che sono di ampio utilizzo nel campo dell'industria bellica, in particolar modo abbiamo visto come evolve la schermatura di Carbonio e Kevlar in presenza di campi elettromagnetici (microonde). Abbiamo notato come giubbotti considerati ottimi siano poco efficienti dal punto di vista schermante, ciò non toglie che il settore bellico in un futuro non troppo lontano potrà progettare equipaggiamenti che garantiscano una protezione schermante oltre che balistica per tutelare al massimo la salute degli operatori impiegati in contesti operativi più disparati.

BIBLIOGRAFIA

Tesi di Laurea di Trovarelli Lisa

Articoli divulgazione scientifica (Kevlar, Giubbotto antiproiettile) - Stefano Gandelli – Martina Miele

Application prepared by Daniele Andreuccetti, Roberto Fossi and Caterina Petrucci, based on the parametric model for the calculation of the dielectric properties of body tissues developed by C.Gabriel and colleagues at the Brooks Air Force Base, U.S.A.

Fondamenti di campi elettromagnetici ottava edizione – Fawwaz Ulaby – Umberto Ravaioli - Pearson

Ballistic and electromagnetic shielding behaviour of multifunctional Kevlar fiber reinforced epoxy composites modified by carbon nanotubes
D. Micheli, A. Vricella, R. Pastore, A. Delfini, A. Giusti, M. Albano, Marchetti, F. Moglie, V. Mariani Primiani