



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**MISURE E SIMULAZIONI DI STOFFE
ELETTROMAGNETICAMENTE SCHERMANTI**

*Measurements and Simulations of Electromagnetic
Shielding Fabrics*

Relatore:

Prof. Franco Moglie

Correlatore:

Prof. Valter Mariani Primiani

Tesi di Laurea di:

Virginia Diamanti

A.A. 2023/2024

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1	3
Cenni di Elettromagnetismo	3
Schermatura elettromagnetica	8
CAPITOLO 2	9
Materiali Utilizzati	9
Camera Riverberante	12
Struttura della Camera Riverberante Nested	14
CAPITOLO 3	19
Set up delle misure	19
CAPITOLO 4	25
Analisi dei risultati	25
CONCLUSIONI	28
Bibliografia	30

INTRODUZIONE

Nell'era della diffusione dei dispositivi elettronici, l'esposizione ai campi elettromagnetici è in costante aumento. Le onde elettromagnetiche, emesse da dispositivi come telefoni, cellulari, router Wi-Fi, apparecchiature industriali e sistemi di telecomunicazione, possono avere effetti indesiderati sia sul funzionamento di altri dispositivi elettronici (interferenze elettromagnetiche) sia potenzialmente sulla salute dell'uomo.

Di conseguenza, lo sviluppo di materiali schermanti sta diventando sempre più un settore di grande interesse, non solo per applicazioni industriali, scientifiche ma anche per la protezione in ambito civile e personale. Tra i vari materiali per la schermatura, i tessuti schermanti rappresentano una soluzione versatile, in grado di combinare proprietà di schermatura elettromagnetica con leggerezza, flessibilità e facilità di impiego.

L'interesse per questi materiali è in crescita in diversi ambiti. Nel campo della protezione personale, l'aumento dell'esposizione alle radiazioni elettromagnetiche ha portato ad un maggiore sviluppo di soluzioni per ridurre l'assorbimento da parte del corpo umano. I tessuti schermanti possono essere quindi utilizzati nella produzione di indumenti protettivi, tende, rivestimenti per ambienti domestici e lavorativi offrendo una barriera efficace contro l'esposizione prolungata.

Anche la sicurezza informatica può trarre vantaggio da questi materiali, in particolare nella protezione dei dispositivi elettronici da possibili attacchi basati su intercettazioni elettromagnetiche. Con l'introduzione della tecnologia RFID (Radio Frequency Identification) cresce sempre più la necessità di schermare carte di credito, passaporti, e altri dispositivi elettronici da accessi non autorizzati col fine di sottrarre informazioni sensibili. L'utilizzo delle stoffe schermanti come custodie e portagli può quindi ridurre il rischio di furto di informazioni personali.

Un ulteriore ambito di applicazione è quello medico: la presenza di numerose apparecchiature sensibili alle interferenze elettromagnetiche rende fondamentale la protezione di ambienti come sale

operatorie o stanze dedicate alla risonanza magnetica. Inoltre, queste stoffe possono essere impiegate per la realizzazione di indumenti destinati a pazienti e personale sanitario, col fine di ridurre la loro esposizione a campi generati dai macchinari diagnostici.

Questo studio, condotto presso Dipartimento DII dell'Università politecnica delle Marche (UNIVPM) all'interno del laboratorio di compatibilità elettromagnetica, è stato condotto con l'obiettivo di caratterizzare le proprietà schermanti di due diversi tipi di stoffe composte da materiale conduttivo. Dopo un'introduzione iniziale riguardante i principi fondamentali dell'elettromagnetismo, per andare a definire l'efficacia di schermatura, verranno presentati i materiali, gli strumenti utilizzati, il procedimento sperimentale e i risultati ottenuti.

CAPITOLO 1

Cenni di Elettromagnetismo

L'elettromagnetismo rappresenta uno dei pilastri fondamentali della fisica moderna, descrivendo l'interazione tra campi elettrici e magnetici e il loro comportamento in presenza di cariche e correnti. La formalizzazione matematica di questi fenomeni è stata raggiunta grazie al lavoro di James Clerk Maxwell, che nel XIX secolo sintetizzò le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo in un sistema di quattro equazioni differenziali, oggi note come equazioni di Maxwell.

Queste equazioni riassumono in modo compatto e completo il comportamento dei campi elettrici (E) e magnetici (H) in diverse condizioni fisiche:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot D = \rho_v \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \end{array} \right.$$

Le equazioni di Maxwell possono essere espresse come:

1. Legge di Gauss per l'elettricità: Descrive il campo elettrico stazionario prodotto da una distribuzione di cariche elettriche.
2. Legge di Gauss per il magnetismo: Afferma che non esistono monopoli magnetici, e che il numero di linee di campo uscenti ed entranti da una superficie chiusa è sempre nullo.
3. Legge di Faraday: Mostra che un campo magnetico variabile nel tempo genera un campo elettrico indotto, principio alla base del fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

4. Legge di Ampère-Maxwell: Stabilisce una connessione tra correnti elettriche e flussi magnetici, mostrando che un campo elettrico variabile è sempre accompagnato da un campo magnetico

Queste equazioni non solo descrivono il comportamento dei campi elettrici e magnetici in condizioni statiche e dinamiche, ma permettono anche di derivare le equazioni d'onda, che descrivono la propagazione delle onde elettromagnetiche attraverso diversi mezzi.

A partire dalla legge di Faraday e dalla legge di Ampere-Maxwell, è possibile derivare l'equazione omogenea delle onde elettromagnetiche. Nonostante la dimostrazione formale non venga riportata, il risultato finale è il seguente:

$$\nabla^2 \tilde{E} - \gamma^2 \tilde{E} = 0$$

con:

$$\gamma^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_c$$

In questa espressione, $\tilde{E}$ è il fasore del campo elettrico, ma questa equazione vale analogamente anche per il campo magnetico H . Questa equazione ci permette di definire un parametro fondamentale per la propagazione delle onde in un mezzo, ovvero la costante di propagazione (γ), che essendo un numero complesso può essere espressa come:

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Dove α è il coefficiente di attenuazione del mezzo, che indica quanto l'onda si smorza propagandosi nel mezzo, valutando quindi l'assorbimento, mentre β è la costante di fase, che rappresenta la variazione di fase dell'onda durante la propagazione.

Riprendendo invece la definizione data prima, la costante di propagazione γ può essere ulteriormente esplicitata come:

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

Con ϵ permittività complessa, composta dalla sua parte reale ϵ' e immaginaria ϵ''

$$\epsilon' = \epsilon, \quad \epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega}$$

Pertanto, la costante di propagazione γ assume la forma:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

Questa espressione mostra come la propagazione delle onde elettromagnetiche sia influenzata dalle proprietà intrinseche del materiale, in particolare la permeabilità magnetica μ , la permittività dielettrica ϵ , e la conducibilità elettrica σ .

Nel caso di materiali senza perdite, come i dielettrici ideali ($\sigma=0$), la costante di propagazione diventa:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\mu\epsilon},$$

In questa situazione, l'onda si propaga senza attenuazione ($\alpha = 0$) che implica che tutta l'energia venga trasmessa attraverso il mezzo.

Per materiali a basse perdite, cioè debolmente conduttivi ($\sigma \gg \omega\epsilon$), γ può essere approssimata come:

$$\gamma \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon} + \frac{\mu\sigma}{2\epsilon},$$

In questo caso possiamo notare un leggero smorzamento dell'onda ($\alpha > 0$), dovuto alle perdite per conduzione, che comporta una graduale attenuazione dell'energia trasmessa.

Infine, per i materiali altamente conduttivi ($\sigma \gg \omega\epsilon$), γ viene approssimata a:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$$

in questo caso, il campo elettromagnetico decade molto rapidamente all'interno del materiale (α è molto elevato). Questo fenomeno è descritto dalla profondità di penetrazione (skin depth) δ , che rappresenta la distanza oltre la quale l'intensità del campo si riduce significativamente:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

L'analisi della propagazione delle onde elettromagnetiche nei materiali conduttivi e dielettrici fornisce le basi per comprendere i fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione delle onde elettromagnetiche attraverso diversi mezzi.

Questo discorso teorico, ci permette di caratterizzare diverse tipologie di materiali in base alle loro proprietà elettromagnetiche, tuttavia l'efficacia di schermatura non dipende solo dai parametri appena citati. Per questo motivo, oltre alla teoria, è fondamentale una valutazione sperimentale diretta. Viene

quindi introdotta una grandezza specifica, nota come efficace schermatura tramite cui possiamo misurare in modo pratico la capacità di un materiale di attenuare o bloccare le onde elettromagnetiche in condizioni reali.

Schermatura elettromagnetica

L'efficacia di schermatura (SE) è un parametro che misura la capacità di un materiale di attenuare o bloccare le radiazioni elettromagnetiche. La definizione di questa grandezza deriva direttamente dalla maniera in cui viene misurata; infatti, viene definita come il rapporto tra l'intensità del campo misurata in un punto senza lo schermo e quella misurata con lo schermo interposto, è espressa in decibel (dB) e la formula è la seguente:

$$SE(db) = 20\log \left(\frac{E_{libero}}{E_{schermato}} \right)$$
$$SE(db) = 20\log \left(\frac{H_{libero}}{H_{schermato}} \right)$$

Un elevato valore di SE indica una schermatura efficace, in grado di ridurre significativamente l'intensità del campo elettromagnetico che passa attraverso il materiale.

In conclusione, l'efficacia di schermatura rappresenta una grandezza fondamentale per valutare la protezione contro le interferenze elettromagnetiche, integrando teoria e misure pratiche. La corretta progettazione di schermature elettromagnetiche è essenziale in numerosi campi applicativi, come nelle telecomunicazioni, nell'elettronica e in ambienti sensibili dove il controllo delle radiazioni elettromagnetiche è cruciale. In questo contesto, i tessuti schermanti, oggetto di questa tesi, emergono come una soluzione innovativa, offrendo una combinazione di leggerezza, flessibilità e alta capacità di attenuazione, con una gran varietà di applicazioni

CAPITOLO 2

Materiali Utilizzati

Nella vita quotidiana siamo costantemente immersi in campi elettromagnetici generati dall'uso quotidiano dei dispositivi elettronici. Questo fenomeno di esposizione elettromagnetica rappresenta una forma di inquinamento sempre più diffusa con potenziali effetti sulla salute umana soprattutto in caso di esposizione continua e prolungata. Per mitigare l'impatto di queste radiazioni, la ricerca ha sviluppato soluzioni innovative, tra i tessuti schermanti, progettati ad hoc per ridurre la penetrazione delle onde elettromagnetiche. Uno degli approcci più efficaci per ottenere questo risultato è l'impiego di materiali metallici, scelti per le loro proprietà fisiche intrinseche.

Il principio fisico che viene sfruttato è quello della gabbia di faraday, che funziona nel seguente modo: quando un'onda elettromagnetica incontra un materiale conduttivo, induce sulla sua superficie una corrente di cariche opposte a quella del campo incidente. Questa redistribuzione genera a sua volta un campo elettrico inverso, che neutralizza l'onda originale. Nei tessuti schermanti, questo principio viene applicato incorporando fibre metalliche o sottili strati di materiali conduttivi all'interno della trama del tessuto, creando una barriera efficace contro le radiazioni.

I materiali utilizzati per ottenere tale protezione sono scelti in base alle loro proprietà elettromagnetiche. I metalli possono essere classificati in base al loro comportamento in presenza di campi magnetici: i materiali ferromagnetici, come il nichel, mostrano un'elevata permeabilità magnetica e possono concentrare le linee di flusso, facilitando l'assorbimento dei campi; i materiali diamagnetici, come il rame, tendono a respingere i campi magnetici, contribuendo anch'essi alla schermatura; infine, i materiali paramagnetici offrono un contributo intermedio e vengono impiegati in particolari configurazioni per esigenze specifiche di frequenza e intensità del segnale. In questa tesi sono stati analizzati due tessuti schermanti che sfruttano queste proprietà.

Il primo è un tessuto di protezione Gorgecraft da poliestere, rame e nichel, con uno spessore di circa 0,1 mm. La combinazione di rame, materiale dotato di elevata conducibilità e comportamento diamagnetico, e di nichel, che possiede caratteristiche ferromagnetiche e resistenza alla corrosione, garantisce un'efficace riduzione delle radiazioni elettromagnetiche, rendendolo ideale per applicazioni che spaziano dalla protezione di dispositivi elettronici alla prevenzione del furto di informazioni.



Figura 1. Stoffa Gorgecraft in rame e nichel

Il secondo materiale esaminato è un tessuto costituito da una rete estremamente fitta di acciaio inox, con una densità di 200 mesh e un diametro dei fori di circa 0,75 mm. Pur possedendo una conducibilità inferiore rispetto a quella di rame e nichel, la struttura compatta e la robustezza intrinseca dell'acciaio



Figura 2. Tessuto in acciaio Inox

inossidabile garantiscono una schermatura duratura e affidabile, rendendolo ideale in contesti in cui è richiesta una protezione robusta e resistente nel tempo.

L'analisi dei materiali impiegati per la schermatura mette in evidenza come la scelta delle componenti metalliche si ha cruciale per ottenere le prestazioni più adatte alle nostre esigenze. La combinazione di rame e nichel offre un equilibrio tra alta conducibilità e proprietà magnetiche, risulta evidente come quindi possa essere utile per applicazioni che richiedono non solo la riduzione delle radiazioni ma anche una buona resistenza meccanica nel tempo. D'altra parte, l'acciaio inox, con una struttura compatta e duratura, può essere una soluzione ideale per situazioni che richiedono produzione più robuste.

Come già citato nel primo capitolo, infatti la conducibilità gioca un ruolo determinante nella schermatura elettromagnetica, ma non essendo l'unico fattore ad influenzarla, la sua efficacia è determinata anche dalle proprietà magnetiche e dalla morfologia del materiale. I test sperimentali condotti nella camera riverberante, descritti nei capitoli successivi, forniranno una valutazione quantitativa dell'efficacia schermante dei materiali, confermando come le proprietà fisiche e magnetiche, influenzino direttamente le loro capacità di attenuare le radiazioni.

Camera Riverberante

Le camere riverberanti (RC) sono strumenti fondamentali nella caratterizzazione delle proprietà elettromagnetiche dei materiali, in particolare per la valutazione della compatibilità elettromagnetica, per l'analisi degli apparati wireless, e nel nostro caso per la misurazione dell'efficacia di schermatura. In contesti reali, l'esposizione di un oggetto ai campi elettromagnetici avviene in condizioni altamente variabili, infatti il comportamento irregolare delle onde, le cui direzioni di propagazione sono aleatorie e estremamente variabile, rende difficilmente prevedibile la distribuzione del campo. Per caratterizzare il comportamento di materiali e dispositivi considerando quindi le possibili direzioni di incidenza delle onde è essenziale disporre di un ambiente di prova dove si possa replicare al meglio tali condizioni reali, e le RC adempiono pienamente a questo compito.

Le RC, infatti, consistono in uno spazio chiuso con pareti riflettenti, solitamente in alluminio, che permettono una distribuzione randomica, rispondendo quindi all'esigenza di creare un campo diffuso e statisticamente uniforme. Queste condizioni sono rese possibili grazie ad un processo di stirring (o mescolamento), ovvero la variazione controllata delle condizioni del campo all'interno della camera in grado di modificare casualmente l'accoppiamento modale della cavità. Lo stirring può essere effettuato in varie modalità come il rimescolamento meccanico (MS) tramite dispositivi rotanti, il rimescolamento in frequenza (FS) basato sulla variazione della frequenza del segnale trasmesso all'interno della camera, e il rimescolamento della posizione della sorgente (SPS). Grazie a questo processo il campo assumerà un comportamento statisticamente isotropo e omogeneo e privo di polarizzazione ed è questo il motivo che rende le RC gli strumenti ideali per testare l'efficacia di schermatura dei tessuti in esame poiché permettono di valutare le loro prestazioni nella maniera più realistica possibile rispetto ad altre metodologie.



Figura 3. Foto dell'interno della camera riverberante

Uno sviluppo particolare di questa tecnologia è rappresentato dalla camera riverberante annidata, basata sull'uso di una camera riverberante più piccola all'interno della più grande al fine di migliorare il controllo del campo elettromagnetico e ampliare la capacità del test.

Struttura della Camera Riverberante Nested

Come accennato sopra, la camera riverberante annidata (Nested Reverberation Chamber) è un particolare tipo di camera riverberante che si distingue per la presenza di due volumi distinti: una camera di grandi dimensioni (4,0x6.0x2.5) al cui interno è posta camera più piccola (1,9x0,9x0,8) che ha un'apertura rettangolare sulla parete superiore.

Sebbene l'apertura tra le due camere abbia dimensioni relativamente piccole rispetto all'intera struttura (270x170 mm) essa può essere considerata grande elettricamente poiché le sue dimensioni sono significativamente maggiori rispetto alla lunghezza d'onda dei segnali utilizzati. Ciò permette

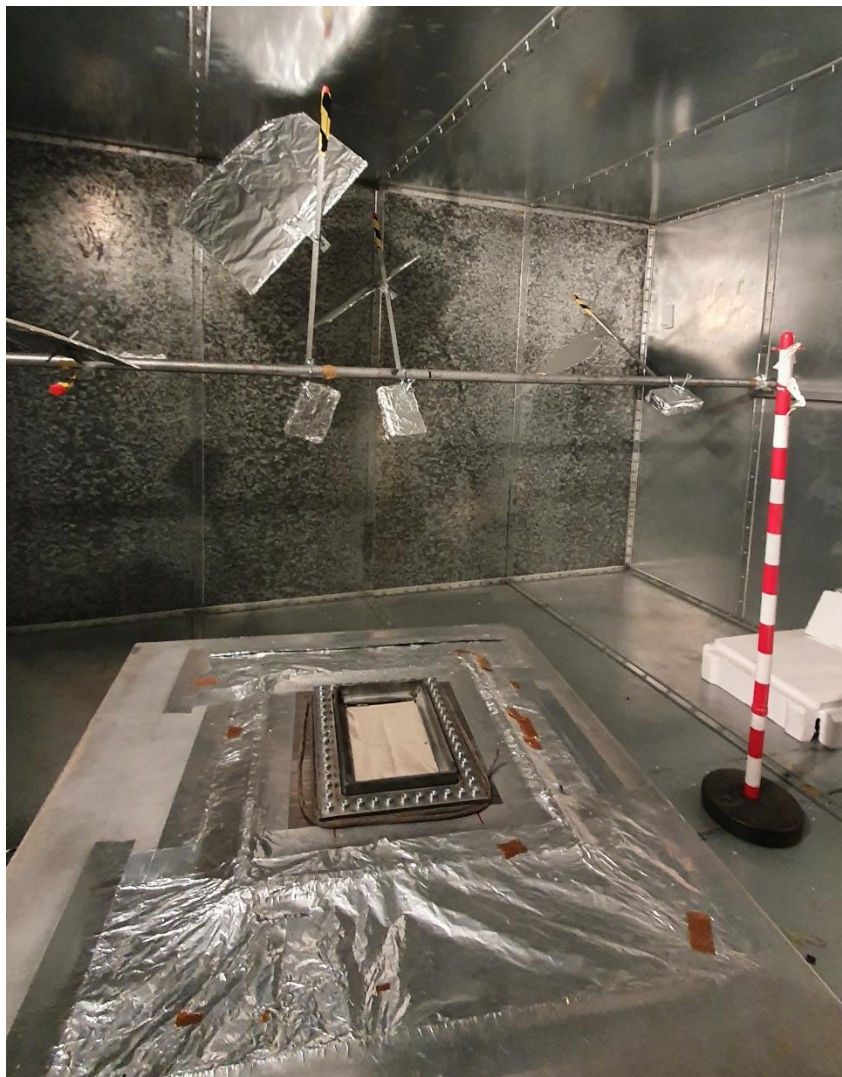


Figura 4. Foto dell'interno della camera riverberante con apertura con campione fissato in primo piano

un efficace accoppiamento tra le due camere riverberanti rendendolo lo spazio perfetto per posizionare il campione in esame.

Invece, per agitare il campo EM in maniera meccanica viene utilizzato uno Stirrer orizzontale, posizionato all'interno della camera più grande. Questo è costituito da quattro palette metalliche rotanti rivestite da uno strato di fogli di alluminio per incrementarne l'efficienza. Il motore che aziona lo Stirrer è controllato esternamente da un computer, che permette di comandare separatamente la rotazione di ciascuna palette.



Figura 5. Stirrer Orizzontale

Per la misurazione e l'analisi del campo, all'interno dell'impianto sono presenti quattro antenne poste come in figura [Fig. 6]. In questa rappresentazione schematizzata è presente uno stirrer verticale che, nonostante fosse presente nella RC, non è stato utilizzato per questo studio.

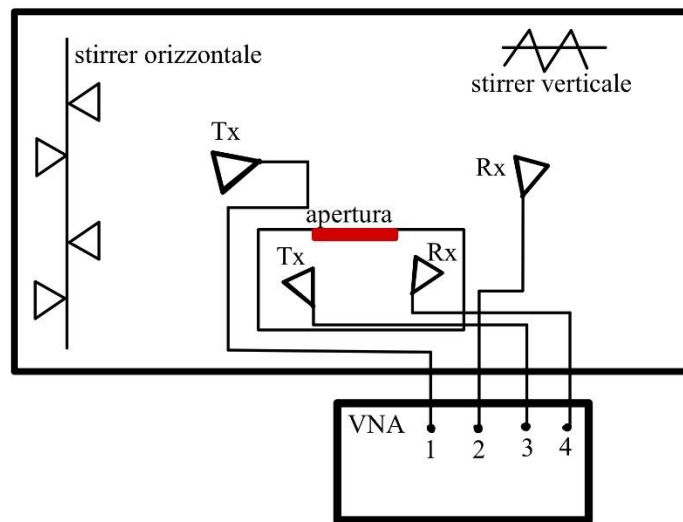


Figura 6. Schematizzazione camera riverberante con componenti principali

Sono state utilizzate due antenne di tipo Quad-Ridge nella camera esterna e due di tipo Double-Ridge in quella interna. Le antenne Quad-Ridge sono progettate con una struttura a quattro creste che permette una larghezza di banda più ampia rispetto alle Double-Ridge, strutturate invece a due creste. Le antenne 1 e 2 sono posizionate all'esterno della camera, rispettivamente in ricezione e in trasmissione. Analogamente, le antenne 3 e 4 si trovano all'interno della camera, con la 3 in trasmissione e la 4 in ricezione, come illustrato nella Figura 6.



Figura 7. Antenne Double Ridge



Figura 8. Antenna Quad Ridge

Una volta definite le antenne utilizzate nel sistema è necessario disporre di uno strumento in grado di analizzare il comportamento dei segnali elettromagnetici e monitorare le variazioni introdotte dall'inserimento del campione.

A questo scopo, viene impiegato un Vector Network Analyzer (VNA) a quattro porte, questo è posizionato esternamente alla camera ed è collegato alle antenne tramite cavi coassiali.

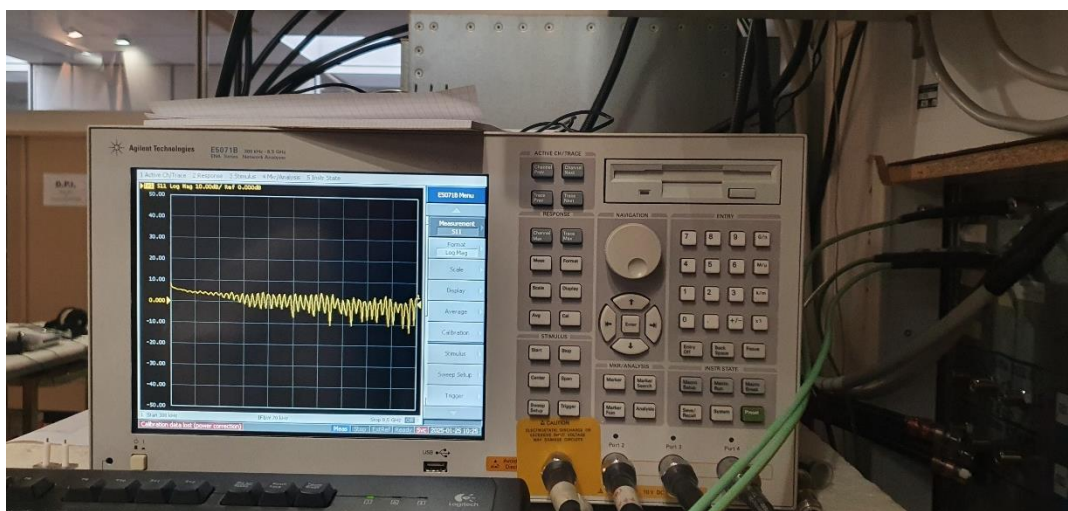


Figura 9. Vector Network Analyzer (VNA)

Il VNA consente di misurare i coefficienti di trasmissione tra le antenne presenti nelle due camere. L'efficacia di schermatura (SE) viene determinata confrontando i coefficienti di trasmissione misurati con e senza il campione, in particolare, il SE è espresso come:

$$SE = 10 \log \frac{\langle |S_{31}^u|^2 \rangle}{\langle |S_{31}^m|^2 \rangle} + 10 \log \frac{\langle |S_{21}^m|^1 \rangle}{\langle |S_{21}^u|^2 \rangle} + 10 \log \frac{\langle |S_{43}^m|^2 \rangle}{\langle |S_{43}^u|^2 \rangle}$$

Dove “m” e “u” significano rispettivamente campione montato e non montato (unmounted), il simbolo $\langle \cdot \rangle$ sta a significare la media sulle bande dello stirring in frequenza.

In questa equazione S_{21} , S_{31} e S_{43} sono i parametri di scattering acquisiti dal VNA, i cui il primo pedice identifica l'antenna ricevente mentre il secondo pedice quella che trasmette. Le frequenze analizzate in questo studio vanno da 0,4 a 8,4 GHz con intervalli di frequenza di 1,6 GHz. L'analisi statistica è stata fatta considerando 3 angoli dello Stirrer orizzontale.

Nel prossimo capitolo verranno descritti nel dettaglio i procedimenti utilizzati nelle acquisizioni dei dati.

CAPITOLO 3

Set up delle misure

In questa sezione verrà descritto il procedimento di come sono avvenute le misurazioni, effettuate nello stesso modo per entrambi i materiali.

Prima di procedere con la misurazione vera e propria, è stato necessario sistemare la camera in modo adeguato alla sperimentazione. Sono state quindi posizionate le antenne come mostrato in figura e sono state collegate all'analizzatore tramite cavi coassiali. Le antenne, situate all'interno della camera riverberante, sono state connesse all'analizzatore posto all'esterno attraverso porte situate sulla parete della camera, che garantiscono la continuità elettrica tra l'interno e l'esterno.

Per collegare in modo corretto il cavo coassiale ai vari componenti, è stata utilizzata una chiave dinamometrica. Questo strumento è progettato per applicare una coppia di serraggio precisa ai collegamenti, assicurando che siano tutti fissati in modo uniforme. La chiave è dotata di un meccanismo interno, a molla o a scatto, che misura la coppia applicata.



Figura 10. A sinistra viti presenti in laboratorio, a destra chiave dinamometrica

Il primo step è stato tagliare il materiale della dimensione corretta per essere posizionato sull'apertura posta sulla parete della camera interna, che come accennato in precedenza è finalizzata al posizionamento del campione. Tuttavia, prima di procedere al fissaggio del campione, è stato necessario un ulteriore passaggio: il campione è stato ricoperto con una sottile lamina di alluminio, come illustrato in figura, in modo che coprisse un solo lato del tessuto mentre incorniciava l'altro.

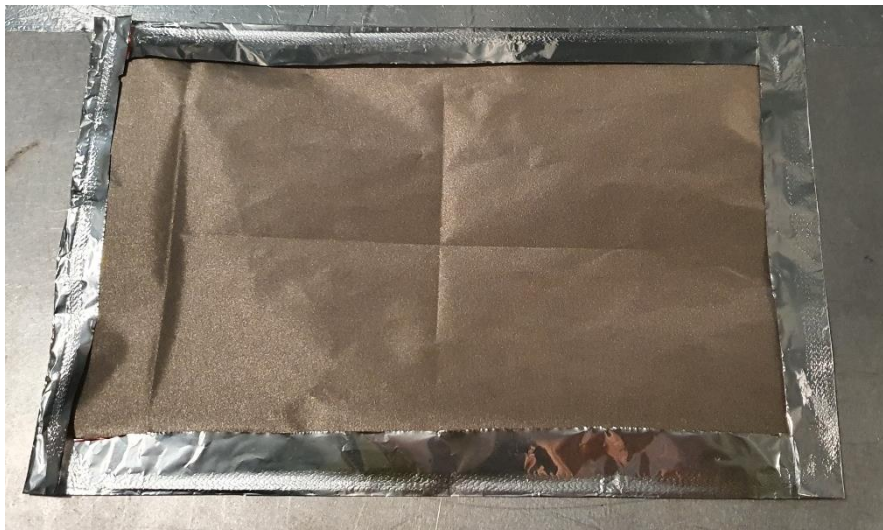


Figura 11. Tessuto Gorgecraft con lamina di alluminio applicata

Misurando il campione con il film sottile di alluminio sovrapposto andiamo a determinare il Dynamic Range e il livello di fondo. Il Dynamic Range rappresenta l'intervallo tra il più grande e il più piccolo segnale che il sistema è in grado di rilevare, in particolare il livello minimo è quello che viene definito “fondo” ed è l'oggetto del nostro interesse; infatti, quando il campione è coperto con la lamina di alluminio durante la misurazione, si crea una condizione in cui il passaggio di segnali attraverso l'apertura è ridotta al minimo.

Ogni misurazione è stata effettuata prima con la copertura in alluminio e successivamente rimuovendola. Una volta pronto il campione, prima del suo fissaggio nell'apertura, è stato necessario un altro passaggio. Sul perimetro dell'apertura della camera più piccola sono presenti dei fori circolari in cui vengono inserite le viti durante il montaggio del campione. Questi fori possono rappresentare una potenziale fonte di perdita di segnale, per questo motivo è stato utilizzato un nastro adesivo di

materiale conduttivo, nello specifico un nastro in rame. Poiché il nastro in rame risultava poco aderente, è stato ulteriormente fissato con un secondo nastro adesivo in alluminio. Questa cornice di nastro è stata applicata sulla superficie interna della camera più piccola, in corrispondenza delle fenditure. Ogni volta che veniva applicato un nuovo campione, è stato controllato con cura che la cornice fosse ben aderente alle pareti. Nella foto seguente [Fig. 12] è mostrato il nastro appena rimosso dopo l'applicazione.



Figura 12. Nastro adesivo in rame e nastro di alluminio

A questo punto si è passati al fissaggio vero e proprio del campione sull'apertura, utilizzando un telaio metallico con fori allineati a quelli dell'apertura, dove verranno inserite le viti. Per ridurre al minimo la perdita di segnale sul perimetro inizialmente è stata collocata sotto il campione una guarnizione metallica, per sigillare il più possibile la giunzione tra le due superfici.



Figura 13. Telaio con forature

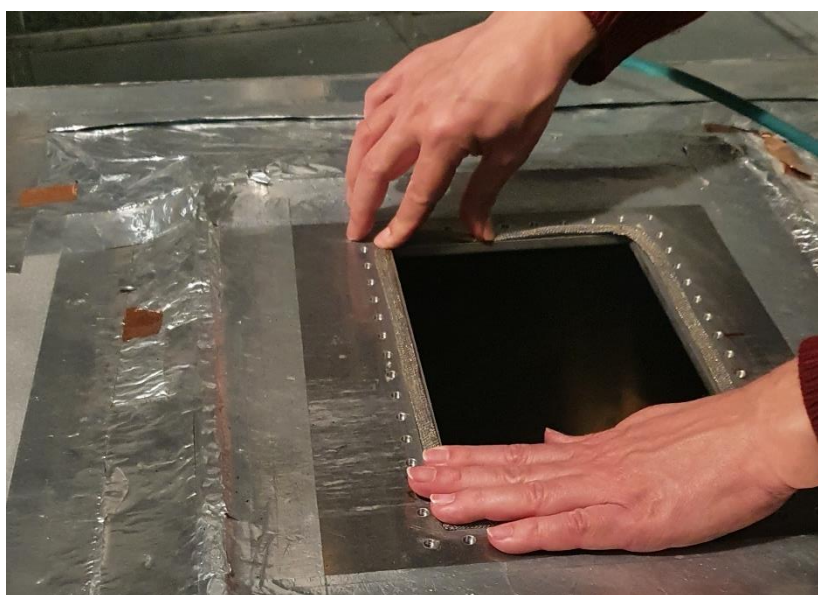


Figura 14. Foto applicazione della guarnizione in calza metallica

Dopo aver serrato saldamente le viti con un trapano, assicurandosi che il campione fosse ben stabilizzato, si è proceduto con l'avvio delle misurazioni.

Le prime analisi sono state effettuate con questo settaggio, ma è stata riscontrata una perdita di segnale troppo elevata in determinate bande di segnale. Per questo motivo sono stati adottati alcuni accorgimenti per ridurre la dispersione che abbiamo ipotizzato fosse causata dalla dissipazione delle radiazioni attraverso le forature adibite all'inserimento delle viti.



Figura 15. Fissaggio delle viti con trapano

È stata inserita una cornice di supporto perimetrale come strato inferiore al telaio metallico per garantire una migliore adesione del campione sulla superficie della camera, inoltre attorno ai supporti è stato aggiunto un ulteriore strato di calza metallica posto come in figura per coprire efficacemente i fori. Questi ultimi passaggi descritti sono stati fondamentali per garantire l'affidabilità dei dati, poiché un fissaggio non corretto potrebbe compromettere la precisione delle acquisizioni.



Figura 16. Campione fissato con foglio di alluminio superficiale

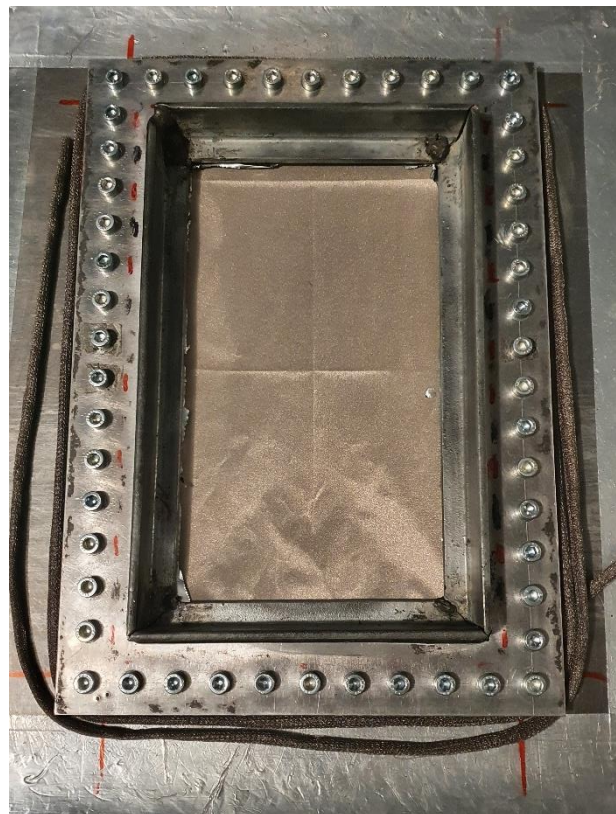


Figura 17. Campione fissato fotografato dopo la rimozione dello strato di alluminio

CAPITOLO 4

Analisi dei risultati

In questo capitolo verranno presentati e analizzati i grafici ottenuti dalle misurazioni descritte nel capitolo precedente. L'attenzione sarà focalizzata sull'interpretazione dei risultati, confrontando le prestazioni dei due materiali testati. I test sono stati effettuati in una banda di frequenze che vanno da 0.4 a 8.4 GHz con intervalli di 1.6 GHz.

In questo primo grafico vediamo rappresentati i Dynamic Range considerando i livelli di fondo dei due campioni (ottenuti con l'applicazione della lamina di alluminio) con il frame di supporto e la calza metallica aggiuntiva citati nel capitolo precedente, a confronto con il fondo misurato senza tali accorgimenti.

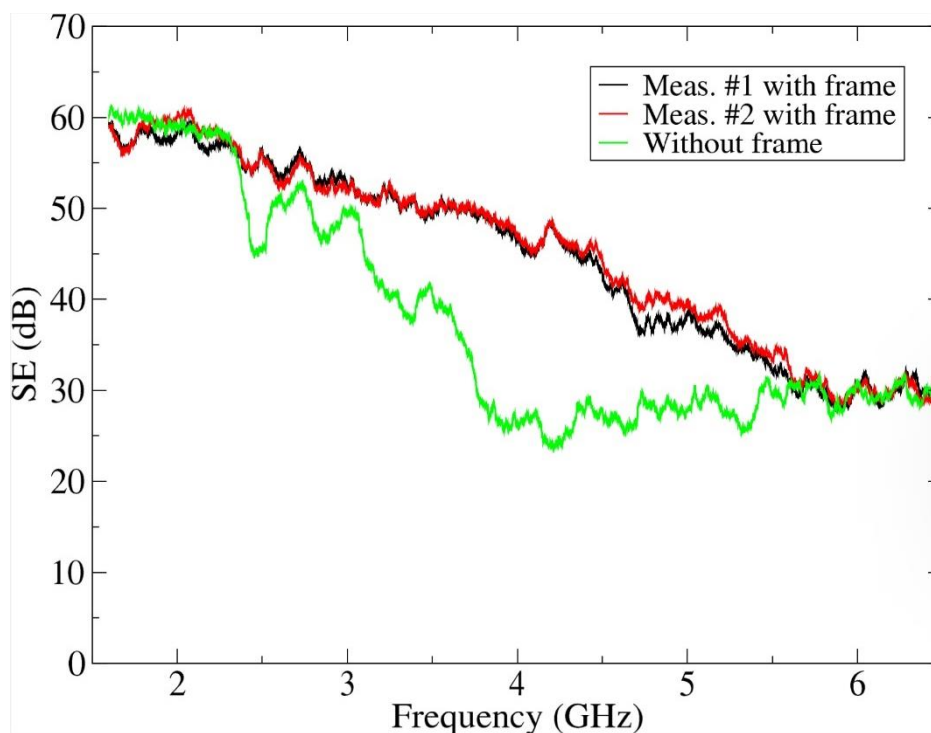


Figura 18. Grafico di confronto tra fondi con e senza cornice di supporto

Si osserva chiaramente l'abbassamento del livello di fondo in assenza del supporto, soprattutto nella banda compresa tra 2,5 GHz ai 5,5 GHz. L'andamento del grafico rosso e nero dimostra invece l'efficacia degli accorgimenti introdotti nel ridurre le perdite indesiderate. Infatti, con le dovute

precauzioni, il livello di fondo dei due campioni si mantiene coincidente e questi risultati confermano la validità delle misure adottate per minimizzare le dispersioni.

In questo secondo grafico invece è rappresentato il Dynamic Range del tessuto Gorgecraft in rame e nichel indicato in nero, messo a confronto con la sua effettiva efficacia di schermatura, indicata in rosso.

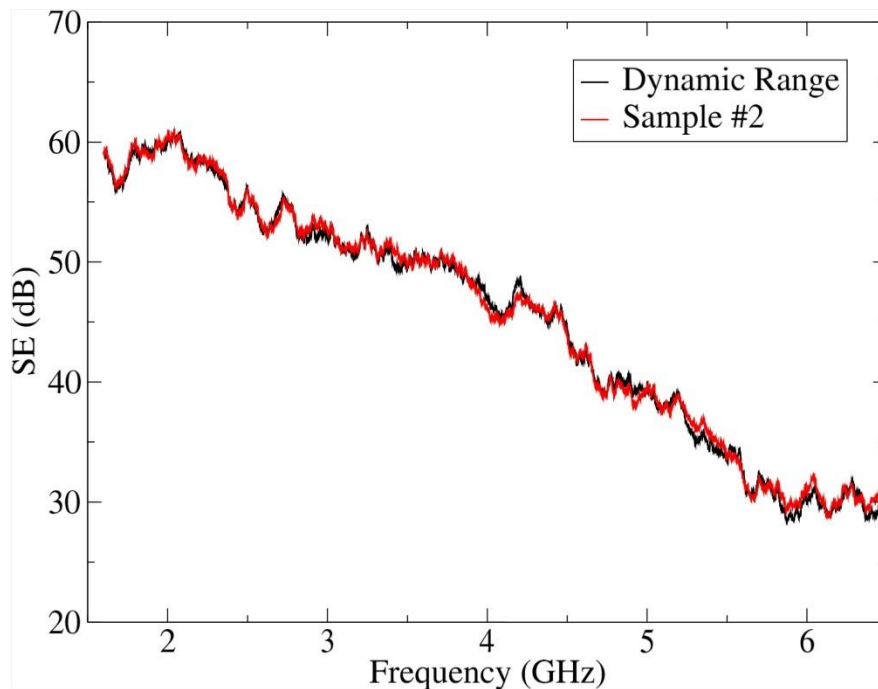


Figura 19. Grafico efficacia di schermatura della stoffa Gorgecraft

Il fatto che il tessuto mostri valori di SE molto vicini a quelli del livello del fondo indica che il materiale è estremamente efficace nel bloccare il passaggio dei segnali elettromagnetici. L'SE risulta molto elevato con valori che raggiungono circa i 60 dB di schermatura alle frequenze più basse e che si mantengono intorno ai 30 dB quelle più alte. Questo comportamento conferma una buona qualità del tessuto. Si possono notare dei piccoli discostamenti tra i valori del fondo e quelli del campione in alcune bande di frequenza, ma tali differenze sono minime e possono essere attribuite a normali incertezze di misura piuttosto che a variazioni significative nelle proprietà schermanti.

Nell'ultimo grafico è rappresentato il Dynamic Range del tessuto in acciaio inox in nero, confrontato con la sua efficacia di schermatura in rosso.

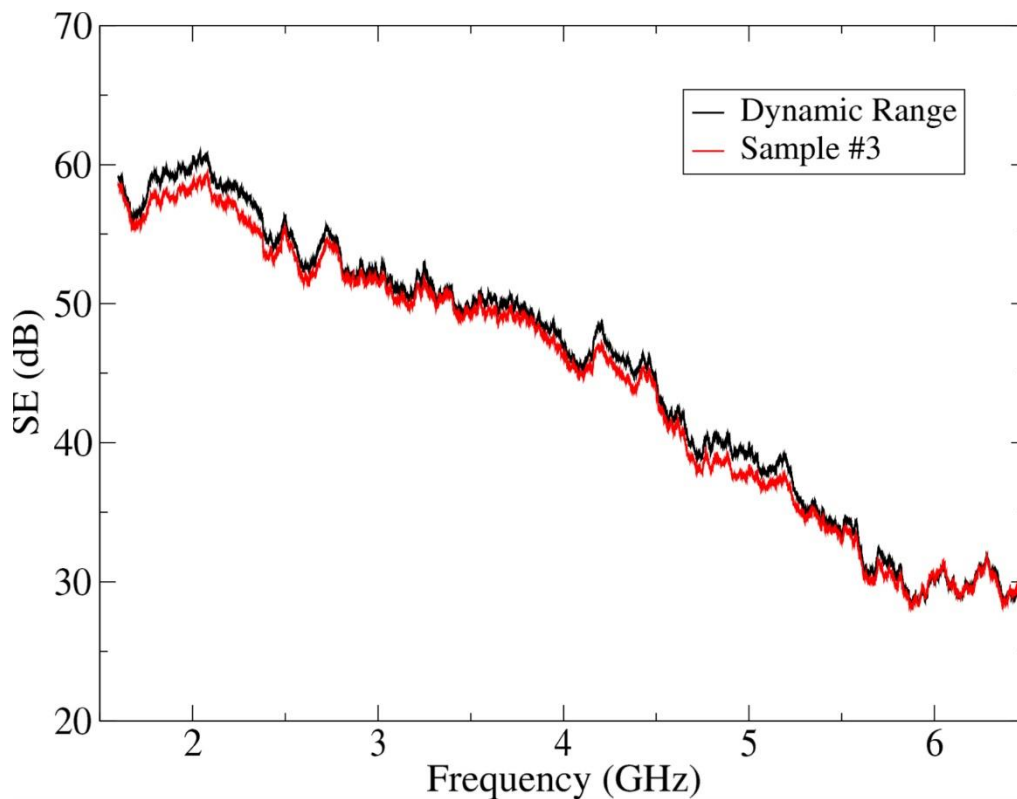


Figura 20. Grafico efficacia di schermatura della retina in acciaio inox.

Anche in questo caso l'efficacia di schermatura risulta elevata con valori molto alti, simili al tessuto precedente. Si nota un leggero discostamento tra il grafico del fondo e del campione a basse frequenze, nella banda che va da 1,5 a 2,5 GHz, dove si osserva un lieve abbassamento dell'efficacia di schermatura del campione, nonostante ciò, le curve rimangono così vicine che non possiamo escludere l'ipotesi che tale differenza sia dovuta all'incertezza di misura.

CONCLUSIONI

L'obiettivo di questa tesi era analizzare l'efficacia di diversi materiali schermanti, valutandone le prestazioni in un ampio intervallo di frequenze comprese tra gli 0,4 e gli 8,4 GHz.

Questa banda di frequenza è utilizzata in una vasta gamma di applicazioni. alle frequenze più basse troviamo ad esempio le trasmissioni televisive, le radiocomunicazioni aeronautiche e marittime e le reti radiomobili che operano fino a circa 1GHz. Salendo tra 1 GHz e 2 GHz troviamo segnali fondamentali come quelli del GPS per la navigazione e la geolocalizzazione, e il Bluetooth, impiegato per la comunicazione tra dispositivi a corto raggio. Tra i 2 GHz e i 3GHz invece operano le reti di telefonia 3G, il Wi-Fi a 2,4 GHz e persino i forni a microonde che possono generare interferenze con altri dispositivi elettronici.

Nella banda più alta, tra i 3 GHz e gli 8,4 GHz, troviamo invece le tecnologie più recenti e avanzate, come le reti Wi-fi a 5G e Wi-fi 6E che operano rispettivamente nelle bande dei 5-6 GHz. Queste reti offrono una maggiore velocità di connessione e minori interferenze rispetto a tecnologie precedenti appartenuti a bande più basse. Oltre al Wi-fi, queste frequenze sono occupate da applicazioni radar civili e militari utilizzate ad esempio per il controllo del traffico aereo o per le comunicazioni satellitari.

Dall'analisi dei risultati si osserva che i materiali testati sono altamente efficaci per le frequenze più basse; quindi, saranno particolarmente adatti a bloccare interferenze provenienti da segnali come il GPS e il Bluetooth, risultando utili per proteggere dispositivi elettronici sensibili in contesti industriali, militari e civili. In particolare, questi materiali potrebbero essere impiegati nella realizzazione di accessori protettivi per dispositivi RFID, in quanto questi segnali occupano la banda che va da circa 125 kHz fino a 13,56 MHz per le basse frequenze, e fino a 2,45 GHz per le applicazioni ad alta frequenza.

Tuttavia, l'efficacia di schermatura si riduce progressivamente ad alta frequenza, e questo calo di prestazione rende i materiali meno adatti per applicazioni che operano nelle bande più alte come

quelli sopra citati. Nonostante i materiali offrono ancora un certo livello di schermatura a queste frequenze, non raggiungono l'efficacia osservata nelle bande più basse.

Per questo motivo, per le future ricerche, potrebbe essere utile focalizzarsi sullo sviluppo di materiali schermanti che contengano un'elevata efficacia anche alle frequenze maggiori. Raggiungere questo obiettivo potrebbe richiedere la modifica delle composizioni dei materiali, l'introduzione di nuove tecniche di fabbricazione, o la combinazione di diversi strati schermanti, ma sarà fondamentale bilanciare queste soluzioni con la necessità di mantenere la flessibilità, la durabilità e la leggerezza dei materiali.

Bibliografia

- F. Ulaby, U. Ravaioli, Fondamenti di campi elettromagnetici, ottava edizione, Milano: Pearson, 2021
- A. Bochicchio G. Giambartolomei. “Lezioni di Compatibilità Elettromagnetica”, Pitagora Editrice Bologna: Bologna, 1993
- X. Radu, M. Brusaglia, D. Micheli, L. Bastianelli, F. Moglie, e V. M. Primiani, “Shielding Effectiveness Controlling of Coated Glass Assembly in Mobile and Positioning GPS Frequency Bands,” AGC Glass Europe SA e Università Politecnica delle Marche, Louvain-La-Neuve, Belgium e Ancona, Italy.
- J.-S. Roh, Y.-S. Chi, T. J. Kang, and S.-W. Nam, "Electromagnetic shielding effectiveness of multifunctional metal composite fabrics," *Textile Research Journal*, Aug. 2008
https://www.researchgate.net/publication/249785740_Electromagnetic_Shielding_Effectiveness_of_Multifunctional_Metal_Composite_Fabrics
- L. Bastianelli, F. Moglie, e V. Mariani Primiani, “Shielding effectiveness of randomly distributed conductive elements: Experimental analysis and simplified model,” *Proc. 2018 Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC Europe)*, Amsterdam, The Netherlands, Aug. 27–30, 2018
- D. Micheli, A. Vricella, R. Pastore, A. Delfini, F. Moglie, V. Mariani Primiani, A. Giusti, M. Albano, and M. Marchetti, “Ballistic and electromagnetic shielding behaviour of multifunctional Kevlar fiber reinforced epoxy composites modified by carbon nanotubes,” *Carbon*, 2016