



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

**Variazione dell'efficacia di schermatura in funzione
dell'invecchiamento di composti cementizi**

Variation in shielding effectiveness with the aging of
cementitious compounds

Relatore

Prof. Valter Mariani Primiani

Laureanda

Lucrezia Mariolita Vellucci

Correlatore

Prof. Franco Moglie

Anno accademico 2023/24

INDICE

Introduzione.....	pag.1
CAPITOLO 1: Materiali impiegati.....	pag.4
1.1. Cemento.....	pag.4
1.2. Acqua.....	pag.7
1.3. Fibre metalliche.....	pag.8
1.4. Carbonio.....	pag.10
1.4.1. Ossido di grafene	pag.11
CAPITOLO 2: Elettromagnetismo e schermi.....	pag.12
2.1. Onde elettromagnetiche.....	pag.14
2.1.1. Onde piane.....	pag.16
2.2. Equazioni di Maxwell.....	pag.18
2.3. Schermatura elettromagnetica.....	pag.21
2.3.1. Efficacia di schermatura.....	pag.23
CAPITOLO 3: Strumentazione.....	pag.27
3.1. Camera riverberante.....	pag.27
3.1.1. Nested Reverberation Chamber.....	pag.30
3.2. Mescolatori modali.....	pag.34
3.3. Antenna.....	pag.36
3.4. Analizzatore di rete.....	pag.38
CAPITOLO 4: Campioni e misure.....	pag.39
4.1. Descrizione.....	pag.40
4.2. Set-up misure.....	pag.43
4.3. Dynamic Range.....	pag.45

CAPITOLO 5: Analisi dei risultati e discussione.....pag.50

CAPITOLO 6: Conclusioni.....pag.59

Bibliografia.....pag.61

INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'evoluzione inarrestabile delle tecnologie nel settore elettrico ed elettronico, ci troviamo di fronte a una crescente sfida rappresentata dalle interferenze elettromagnetiche (EMI). Questo fenomeno trova la sua origine nella generazione di correnti elettriche di intensità variabile e nell'emissione di onde elettromagnetiche da parte di tutti i circuiti elettronici durante il loro funzionamento, che avvengono sia in modo intenzionale che involontario.

Tali onde possono evolversi in autentiche sorgenti di disturbo quando interferiscono con il corretto funzionamento di dispositivi situati nelle vicinanze dei circuiti, mettendo così a repentaglio le loro prestazioni.

Queste problematiche, legate alle interferenze elettromagnetiche, si manifestano in modo più evidente nell'ambito medico, dove dispositivi ad alta emissione di radiazioni, possono mettere a rischio la sicurezza sia dei professionisti sanitari che dei pazienti, e causare potenziali danni alle attrezzature mediche. Questa situazione comporta anche considerazioni di natura economica, in quanto è collegata al deterioramento degli strumenti medici.

Nel contesto medico, in particolare, dove apparecchiature come pacemaker, defibrillatori e bisturi elettrici dipendono in modo significativo dai campi

elettromagnetici per il loro corretto funzionamento, la compatibilità elettromagnetica rimane un elemento critico. Le interferenze elettromagnetiche possono avere conseguenze gravi sulla salute dei pazienti e del personale sanitario, oltre a rappresentare un rischio economico dovuto ai danni potenziali alle apparecchiature. Pertanto, è di importanza fondamentale valutare e garantire la protezione da campi elettromagnetici negli ambienti medici.

La ricerca in questo settore è in costante evoluzione, con un crescente interesse per l'impiego di materiali alternativi in grado di offrire una migliore schermatura elettromagnetica, soprattutto a alte frequenze. In questo contesto, il presente lavoro di tesi si propone di valutare l'efficacia di schermatura elettromagnetica di composti a matrice cementizia, concentrandosi in particolare sull'evoluzione nel tempo delle loro capacità di schermatura.

La compatibilità elettromagnetica (**EMC**) assume un ruolo fondamentale quando ci si riferisce alla capacità di un'apparecchiatura di funzionare correttamente senza produrre disturbi elettromagnetici e di resistere alle interferenze causate da altre apparecchiature nelle vicinanze. Al fine di garantire una protezione efficace contro le onde elettromagnetiche, sono state sviluppate tecniche di schermatura che fanno uso di specifici dispositivi noti come "schermi". Questi schermi hanno una duplice funzione: da un lato, consentono all'apparecchiatura di essere compatibile con l'ambiente

circostante, prevenendo così interferenze con altre apparecchiature elettriche, e dall'altro, agiscono come barriere protettive, salvaguardando l'apparecchio da eventuali emissioni provenienti da dispositivi elettronici nelle vicinanze.

Per raggiungere l'obiettivo di questa tesi, sono stati presi in esame campioni di cemento prodotti circa sette anni fa presso il laboratorio di Materiali Pesanti del Dipartimento SIMAU dell'Università Politecnica delle Marche. Questi campioni sono stati sottoposti a misurazioni a intervalli di tempo variabili, inizialmente con frequenza elevata che si è progressivamente allungata nel corso degli anni. Le prove di schermatura elettromagnetica sono state condotte presso il laboratorio di compatibilità elettromagnetica EMC del dipartimento DII dell'Università Politecnica delle Marche. A distanza di cinque anni dalla prima serie di misurazioni, è stato effettuato un nuovo set di test, tenendo in considerazione anche l'influenza dell'emergenza Covid-19 sullo svolgimento della ricerca.

L'analisi delle capacità di schermatura di materiali cementizi già esaminati in passato e ora oggetto di una seconda fase di studio, offre l'opportunità di riflettere sull'evoluzione delle prestazioni di schermatura in contesti ospedalieri, spesso caratterizzati dall'uso esteso del cemento nella loro costruzione. Tale valutazione è essenziale per comprendere i rischi associati all'esposizione a campi elettromagnetici per il personale medico e i pazienti.

CAPITOLO 1: MATERIALI IMPIEGATI

1.1 Cemento

Il cemento è un legante idraulico che, quando mescolato con acqua, crea composti in grado di aderire a materiali e solidificare gradualmente, persino in assenza di esposizione all'aria. Questi composti si consolidano in strutture compatte che mantengono la loro integrità in presenza di acqua e dimostrano notevole resistenza meccanica.

La ricerca di materiali in grado di conferire solidità alle costruzioni e di funzionare come leganti durevoli, è una ricerca che risale a tempi remoti. La "pozzolana," che può essere considerata una forma primitiva del cemento, è una soluzione rudimentale composta da fango e roccia vulcanica di Pozzuoli. L'approccio scrupoloso dei Romani nella scoperta di materiali innovativi è testimoniato dalla persistente robustezza di questa miscela, visibile negli edifici antichi risalenti all'epoca romana. I Romani si sono costantemente impegnati per soddisfare standard sempre più elevati in termini di resistenza meccanica e di resistenza al deterioramento nel breve termine.

Il cemento deriva da materie prime di origine naturale che, previa frantumatura, formano una miscela composta principalmente dall'80% di calcare e dal restante 20% di argilla. Questa miscela subisce ulteriori processi di macinazione per ottenere il prodotto grezzo, il quale, esposto a temperature vicine ai 1500°C in forni rotativi, subisce reazioni chimiche che lo trasformano in clinker.



Figura 1.1 Preparazione del cemento

Questo clinker, successivamente finemente macinato e talvolta arricchito con gesso e componenti aggiuntivi che influenzano le proprietà del prodotto finale, si trasforma nel cemento. Le specifiche dei vari tipi di cemento prodotti sono conformi ai regolamenti nazionali.

La qualità della matrice cementizia e, di conseguenza, delle strutture compositive come la malta e il calcestruzzo, dipende principalmente dalle proporzioni di acqua e cemento utilizzate nella fase di miscelazione. Un

rapporto acqua/cemento ridotto è essenziale per ottenere calcestruzzo ad alte prestazioni, poiché favorisce la formazione di una matrice cementizia con caratteristiche fisico-meccaniche superiori. Tuttavia, anche a parità di rapporto acqua/cemento e di altri parametri, come il tipo e la granulometria dell'aggregato, il rapporto aggregato/cemento, l'uso di additivi e la qualità del processo di stagionatura, le prestazioni del calcestruzzo possono variare notevolmente in base al tipo di cemento impiegato. I differenti tipi di cemento presentano prestazioni differenziate.

1.2 Acqua

L'acqua è un elemento chiave nella produzione del calcestruzzo, avendo il ruolo fondamentale di creare il composto cementizio. Quando il cemento indurisce, l'acqua, utilizzata per amalgamare i componenti del cemento, rimane intrappolata all'interno della struttura, e durante il processo di evaporazione, lascia dei vuoti che contribuiscono a rendere la struttura porosa. Pertanto, una minore quantità di acqua si traduce in una porosità ridotta del calcestruzzo. Oltre a svolgere il suo ruolo principale nell'unire gli ingredienti per ottenere un impasto modellabile, l'acqua agisce anche come legante e partecipa attivamente alle reazioni di presa e indurimento del cemento.

Le acque naturali possono presentare varie concentrazioni di sali minerali e di sostanze organiche o inorganiche disciolte, le quali possono influenzare negativamente la lavorabilità del calcestruzzo. Questi effetti comprendono sia l'accelerazione che il ritardo del processo di presa, la possibile corrosione delle armature e la creazione di deterioramenti fisico-chimici, come disgregazioni o la formazione di cavità nel calcestruzzo.

Nel contesto di questa tesi, ci proponiamo di esaminare l'efficacia della schermatura (SE) elettromagnetica in campioni di cemento, focalizzandoci sull'impatto della perdita di acqua nel tempo sul calcolo del fattore di schermatura elettromagnetica.

1.3 Fibre metalliche

Le fibre metalliche vengono prodotte tramite un processo di trafilatura a freddo e possono assumere diverse forme, come strisce corte, piegate o lunghe. Questi materiali metallici vantano eccellenti proprietà strutturali, che si riflettono nei vantaggi offerti dal calcestruzzo fibro-rinforzato rispetto a quello tradizionale.

Il materiale risultante è composto da strisce metalliche con una struttura amorfa, non cristallina, costituita principalmente da ferro e cromo, tipica della ghisa. Il processo particolare di fabbricazione delle fibre metalliche conferisce loro notevoli proprietà di resistenza meccanica, elasticità, termica e resistenza alla corrosione. Tuttavia, l'aggiunta di queste fibre comporta una riduzione della lavorabilità del materiale cementizio.

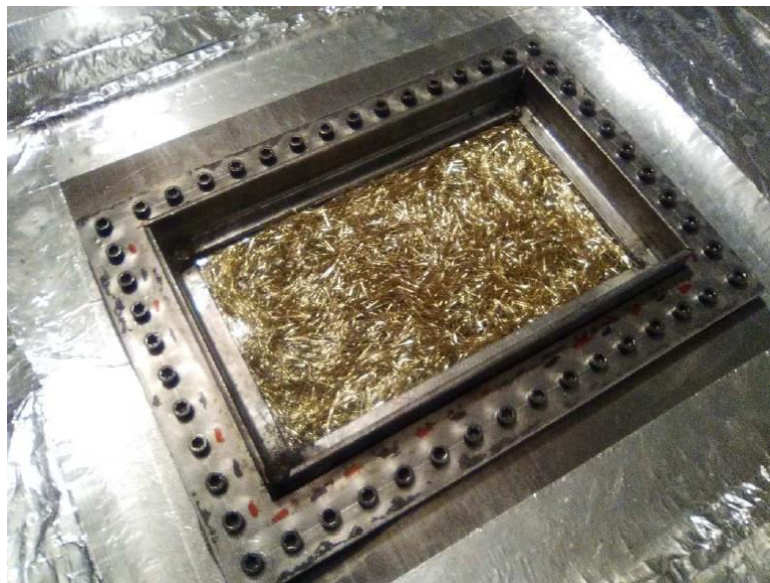


Figura 1.3 Fibre metalliche

Sono due le categorie principali di fibre metalliche:

1. Fibre rinforzanti rigide;
2. Fibre rinforzanti flessibili.

Tuttavia, a seguito dei test effettuati nei lavori di tesi precedenti, l'idea di utilizzare fibre rinforzanti rigide è stata abbandonata e sostituita dall'impiego di fibre rinforzanti flessibili, le quali rendono la miscela cementizia molto più maneggevole.

Di conseguenza, il calcestruzzo fibro-rinforzato con fibre flessibili dimostra un notevole miglioramento in termini di efficienza di schermatura rispetto alla versione con fibre metalliche rigide. Questo è dovuto al fatto che le fibre flessibili si distribuiscono in modo più omogeneo e compatto all'interno del calcestruzzo.

1.4 Carbonio

Nell'affascinante mondo dei materiali, il carbonio gioca un ruolo di primaria importanza. Questo elemento chimico, noto per la sua straordinaria versatilità, svolge un ruolo chiave in numerose applicazioni che plasmano la nostra società moderna. Il carbonio si manifesta in una vasta gamma di forme, da sostanze inorganiche come quelle che costituiscono piante e animali, fino a strutture più complesse in cui il carbonio si lega ad altri elementi chimici o si presenta in forma pura, come nel caso del diamante o della grafite.

Tra le sue numerose incarnazioni, il carbonio si trova sotto una forma particolarmente affascinante: le fibre di carbonio. Queste sottili e leggere strisce di carbonio, prodotte attraverso un processo industriale che coinvolge temperature elevate e polimeri precursori, rappresentano un materiale con caratteristiche straordinarie. Le fibre di carbonio si distinguono per la loro eccezionale resistenza meccanica, la bassa densità, la capacità di isolamento termico e la resistenza a variazioni di temperatura e sostanze chimiche. Inoltre, presentano buone proprietà ignifughe.

1.4.1 Ossido di grafene

L'ossido di grafene, comunemente abbreviato come GO (dall'inglese "Graphene Oxide"), rappresenta un composto di particolare interesse sia nell'ambito scientifico che tecnologico. La sua struttura è basata su un reticolo lamellare costituito principalmente da atomi di carbonio, ma con significative quantità di ossigeno e in minor misura di idrogeno. Questo composto conserva una struttura lamellare simile a quella della grafite, ma si distingue per la presenza di gruppi funzionali legati all'ossigeno, conferendo al materiale proprietà chimiche e fisiche uniche. L'ossido di grafene è noto per la sua abilità nel creare connessioni tra le strutture grafeniche, consentendo la dispersione di sottili fogli di grafene in una vasta gamma di matrici, tra cui polimeri e materiali ceramici. Questa caratteristica rende l'ossido di grafene un materiale di supporto ideale per migliorare le proprietà di diverse matrici, inclusa la conducibilità elettrica e termica.

I risultati dei campioni contenenti ossido di grafene sottoposti ad analisi all'interno della camera riverberante del laboratorio di compatibilità elettromagnetica EMC, presso il Dipartimento DII dell'Università Politecnica delle Marche, sono trattati nella tesi di Eleonora Puca “Valutazione dell’efficacia di schermatura di mezzi non omogenei”.

CAPITOLO 2: ELETTRICITÀ E MAGNETISMO E SCHERMI

L'elettromagnetismo è una disciplina fondamentale della fisica che si concentra sullo studio dei fenomeni e delle interazioni legate ai campi elettrici e magnetici. Queste interazioni giocano un ruolo determinante nella nostra comprensione del mondo fisico e hanno un impatto significativo nella tecnologia moderna. Tra i concetti chiave dell'elettromagnetismo, ci sono i campi elettromagnetici, che sono campi di forze generati da cariche elettriche in movimento. Questi campi si propagano attraverso lo spazio sotto forma di onde elettromagnetiche, che sono fondamentali in una vasta gamma di applicazioni, tra cui la trasmissione delle onde radio, la luce visibile, le microonde e molti altri.

Un aspetto fondamentale dell'elettromagnetismo è la comprensione e la gestione dei campi elettromagnetici, in particolare quando è necessario impedire o limitare la loro diffusione. In questo contesto, gli schermi elettromagnetici svolgono un ruolo essenziale. Gli schermi sono dispositivi progettati per bloccare o attenuare l'interazione tra campi elettromagnetici e le regioni circostanti. Questi schermi possono essere utilizzati in una vasta gamma di applicazioni, dalle apparecchiature elettroniche sensibili che richiedono protezione da interferenze esterne, ai dispositivi di comunicazione che necessitano di evitare le emissioni non desiderate di campi elettromagnetici.

Nel contesto di questa tesi, ci concentreremo sull'analisi delle capacità schermanti di diversi materiali e configurazioni contro campi elettromagnetici. Esploreremo come l'uso di materiali specifici e design adeguati possono influenzare l'efficacia degli schermi elettromagnetici e la riduzione dell'interferenza elettromagnetica. Il nostro obiettivo è contribuire a una migliore comprensione di come i materiali e i dispositivi schermanti possano essere utilizzati per migliorare la protezione da campi elettromagnetici indesiderati in diverse applicazioni.

2.1 Onde elettromagnetiche

Nel contesto di una ricerca sulle onde elettromagnetiche e sulle loro influenze, è imprescindibile acquisire una solida comprensione dei fondamenti di questo fenomeno fisico, che permea la nostra vita moderna. Le onde elettromagnetiche costituiscono una componente essenziale dell'elettromagnetismo e costituiscono la base di una vasta gamma di tecnologie e applicazioni, tra cui le comunicazioni wireless, la trasmissione di segnali radio e televisivi e la radiazione elettromagnetica emessa da dispositivi elettronici e lampade.

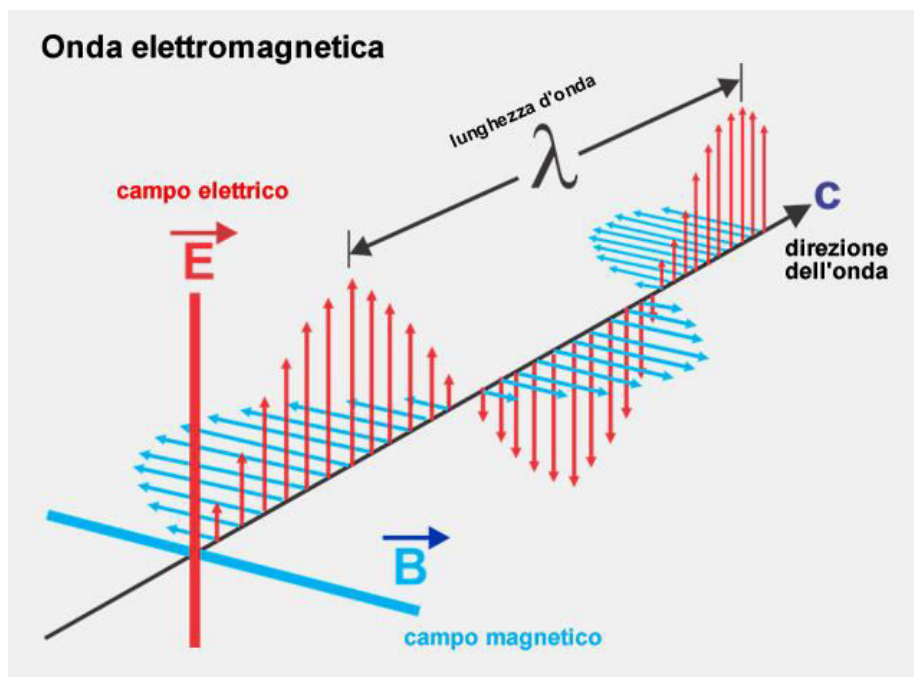


Figura 2.1 Propagazione di un'onda elettromagnetica

Queste onde sorgono dalle oscillazioni di cariche elettriche e si diffondono attraverso lo spazio sotto forma di campi elettrici e magnetici in costante

oscillazione e orientati ortogonalmente tra loro, avanzando a una velocità costante, ovvero la velocità della luce. Sono caratterizzate da diverse proprietà, come la frequenza e la lunghezza d'onda, che determinano il loro comportamento e la loro interazione con la materia. Inoltre, l'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche può variare significativamente in base alla loro frequenza, creando un ampio spettro di radiazioni, che vanno dalle onde radio alle microonde, dalla luce visibile ai raggi X e oltre. La comprensione di tali onde e delle loro applicazioni costituisce un prerequisito essenziale per lo sviluppo e l'utilizzo delle moderne tecnologie e per il loro impiego futuro.

2.1.1 Onde piane

Nel contesto delle onde elettromagnetiche, le onde piane rappresentano una categoria particolare di queste onde. Le onde piane sono caratterizzate da campi elettrici e magnetici che variano uniformemente nello spazio, formando un profilo d'onda regolare e costante. Questo significa che la forma dell'onda, sia per il campo elettrico che per quello magnetico, rimane invariata lungo tutto il percorso di propagazione. Le onde piane sono fondamentali in molti aspetti delle comunicazioni e delle trasmissioni, in quanto offrono un modello di propagazione relativamente semplice da analizzare e prevedere.

La velocità di propagazione è descritta dalla seguente legge:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Eq. 2.1.1.a Velocità di propagazione

Dove:

- ε : costante dielettrica;
- μ : permeabilità magnetica.

Mentre nel vuoto risulta:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \approx 2,99 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}$$

Eq.2.1.1.b Velocità di propagazione nel vuoto

Sono definite "piane" poiché il fronte d'onda appare come un piano geometrico uniforme, trasmettendo energia lungo una direzione specifica. La loro struttura semplice e uniforme consente di analizzare e comprendere meglio le proprietà delle onde elettromagnetiche. Le onde piane vengono utilizzate come base per comprendere fenomeni più complessi, quali la propagazione delle onde in ambienti diversi e il funzionamento di dispositivi e apparecchiature elettromagnetiche, essendo un modello semplificato ma essenziale per comprendere il funzionamento di molte applicazioni pratiche e teoriche legate all'elettromagnetismo.

Le equazioni che descrivono le onde piane sono le seguenti:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \nabla^2 \mathbf{B} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0$$

Eq. 2.1.1.c Onde piane

Dove:

- \mathbf{E} è il campo elettrico;
- \mathbf{B} è il vettore induzione magnetica.

2.2 Equazioni di Maxwell

Le equazioni di Maxwell rappresentano il cardine fondamentale nella comprensione dell'elettromagnetismo e delle sue interazioni con il mondo fisico che ci circonda. Sviluppate nel XIX secolo da James Clerk Maxwell, queste equazioni costituiscono un insieme di quattro leggi che sintetizzano l'interazione tra campi elettrici e magnetici in regioni con assenza di sorgenti.

Notoriamente conosciute come:

- Legge di Gauss elettrica: stabilisce che il flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa è proporzionale alla carica elettrica totale contenuta all'interno della superficie. In altre parole, essa lega il campo elettrico alle cariche elettriche.
- Legge di Gauss magnetica: afferma che non esistono poli magnetici isolati, cioè non possono esistere monopoli magnetici (magnetismo con un solo polo, nord o sud). Il flusso magnetico attraverso una superficie chiusa è sempre zero. In altre parole, il magnetismo è sempre il risultato di correnti elettriche circolari.
- Legge di Faraday: enuncia che la variazione di flusso di un campo magnetico attraverso una superficie induce la generazione di una forza

elettromotrice (f.e.m.) o di una tensione elettrica in un circuito. È la base dei trasformatori e dei generatori elettrici.

- Legge di Ampère-Maxwell: lega le correnti elettriche e la variazione del campo elettrico a una variazione del campo magnetico. Introduce anche il concetto di correnti di spostamento, che sono una correzione necessaria per far combaciare la teoria elettromagnetica con l'elettrodinamica. È fondamentale per la comprensione delle onde elettromagnetiche.

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{E} & = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} & = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} & = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} & = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{cases}$$

Eq. 2.2 Equazioni di Maxwell in assenza di sorgenti

Esse descrivono le relazioni tra cariche elettriche, campi elettrici, campi magnetici e correnti elettromagnetiche, fornendo una base matematica per comprendere come tali fenomeni si influenzino a vicenda.

Le equazioni di Maxwell permettono di prevedere e spiegare i fenomeni dell'induzione elettromagnetica, la propagazione delle onde elettromagnetiche e molti altri processi fondamentali che si verificano nell'elettromagnetismo. Il

loro ruolo nella fisica moderna è imprescindibile, poiché sono alla base di molte tecnologie e applicazioni: dalle comunicazioni wireless all'elettronica, dall'ottica moderna alla trasmissione dei segnali. La loro unificazione dei fenomeni elettromagnetici ha svolto un ruolo cruciale nello sviluppo della fisica moderna e delle scienze dell'ingegneria.

2.3 Schermatura elettromagnetica

La schermatura elettromagnetica rappresenta un sistema essenziale per la riduzione del campo elettromagnetico generato da una specifica sorgente in una determinata area dello spazio. Questo sistema è ampiamente impiegato per proteggere dispositivi elettronici, contribuendo a minimizzare le interferenze e i disturbi che possono verificarsi durante la trasmissione dei segnali.

La schermatura elettromagnetica può essere suddivisa in diverse categorie, principalmente in base alla tipologia della sorgente da schermare, con particolare attenzione alla frequenza dello spettro elettromagnetico generato da tale sorgente. La principale distinzione si effettua tra schermature per basse frequenze (da 0 fino a 100 kHz) e alte frequenze (oltre i 100 kHz). Nelle basse frequenze, sia i campi elettrici che magnetici sono trattati separatamente, e vengono utilizzate schermature specifiche per ciascun tipo di campo.

I campi elettromagnetici a basse frequenze sono generati principalmente da correnti elettriche, con le principali fonti che includono sistemi elettrici per la generazione, il trasporto, la distribuzione e l'utilizzo dell'energia elettrica. L'obiettivo delle schermature in questo contesto è quello di mantenere i livelli di induzione magnetica, utilizzati per valutare l'esposizione umana, al di sotto dei limiti definiti dagli standard nazionali e internazionali.

Le schermature magnetiche operano attraverso due principi fisici distinti.

Il primo principio si basa sulla legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday, in cui un campo magnetico variabile, noto come campo induttore, induce correnti indotte all'interno di un materiale conduttore. Queste correnti indotte generano un campo magnetico opposto al campo induttore, riducendone l'intensità. Questo approccio richiede materiali con elevate proprietà di conducibilità elettrica, come rame o alluminio.

Il secondo principio sfrutta la deviazione delle linee del campo magnetico attraverso l'interposizione di un materiale ferromagnetico tra la sorgente e l'area da proteggere. La caratteristica fisica chiave in questo caso è la permeabilità magnetica relativa. Materiali come le leghe ferro-silicio o ferro-nichel sono comunemente utilizzati come schermi ferromagnetici. La prestazione di tali schermi è influenzata dall'angolo di incidenza del campo magnetico e dalla distanza dalla sorgente. Le schermature magnetiche conduttive e ferromagnetiche hanno solitamente uno spessore di alcuni millimetri (2-5 mm).

Queste schermature sono fondamentali per garantire un ambiente elettromagneticamente compatibile e per proteggere dispositivi sensibili da interferenze indesiderate. La scelta tra materiali conduttivi e ferromagnetici dipende dalle esigenze specifiche e dalle caratteristiche dell'applicazione.

2.3.1 Efficacia di schermatura

L'efficacia della schermatura elettromagnetica (SE) rappresenta un aspetto di cruciale importanza nel campo della protezione dai campi elettromagnetici indesiderati. Questo parametro misura la capacità del sistema di schermatura nel ridurre o eliminare l'interferenza elettromagnetica tra una sorgente e una zona da proteggere ed è direttamente influenzata dalla potenza dell'onda elettromagnetica incidente, ovvero la quantità di energia portata dalla sorgente. Inoltre è legata alla potenza trasmessa, cioè l'energia che riesce a superare la schermatura e a raggiungere l'area protetta.

L'SE è solitamente espressa in decibel (dB) e rappresenta il rapporto tra la potenza dell'onda elettromagnetica incidente e la potenza trasmessa o riflessa attraverso la schermatura. Maggiore è il valore in dB, maggiore è l'efficacia della schermatura. Una schermatura efficace riduce notevolmente la potenza trasmessa attraverso di essa, garantendo una migliore protezione contro le interferenze elettromagnetiche.

$$SE_{dB} = 10 \log \left(\frac{\text{Potenza incidente}}{\text{Potenza trasmessa}} \right)$$

Eq. 2.3.1 Efficacia di schermatura

Essa può variare in base a numerosi fattori, tra cui la frequenza del campo elettromagnetico, il materiale e la geometria della schermatura, nonché la distanza tra la sorgente e l'area da proteggere. La frequenza è un elemento critico poiché determina la profondità di penetrazione del campo elettromagnetico nel materiale di schermatura. A basse frequenze, la schermatura efficace richiede materiali conduttivi ad alta conducibilità elettrica, mentre a alte frequenze, i materiali ferromagnetici possono essere più efficaci.

La scelta del materiale di schermatura è fondamentale per ottenere il massimo livello di protezione. Materiali come il rame, alluminio, o leghe ferro-silicio e ferro-nichel vengono spesso utilizzati per le loro proprietà conduttive e ferromagnetiche. Inoltre, la geometria della schermatura, inclusi spessore e forma, svolge un ruolo importante nell'efficacia del sistema di schermatura.

La distanza tra la sorgente e l'area da proteggere è un altro fattore critico. Più ci si allontana dalla sorgente, più l'intensità del campo elettromagnetico diminuisce, il che può influire sull'efficacia complessiva della schermatura.

Nella figura 2.3.1 può essere schematizzato lo schermo.

Nel primo ambiente, l'aria, si manifesta un campo incidente, parte del quale viene riflesso a causa della presenza di una schermatura composta dal secondo

mezzo con determinate proprietà elettriche (ϵ_r , μ_r , σ). Allo stesso tempo, una parte dell'onda incidente riesce a passare attraverso lo schermo. La quantità di onde riflesse e trasmesse è direttamente influenzata dallo spessore della schermatura. Di conseguenza, nel secondo ambiente, si osservano sia un'onda diretta che un'onda riflessa, mentre nel terzo ambiente, l'aria, si manifesta solo l'onda diretta.

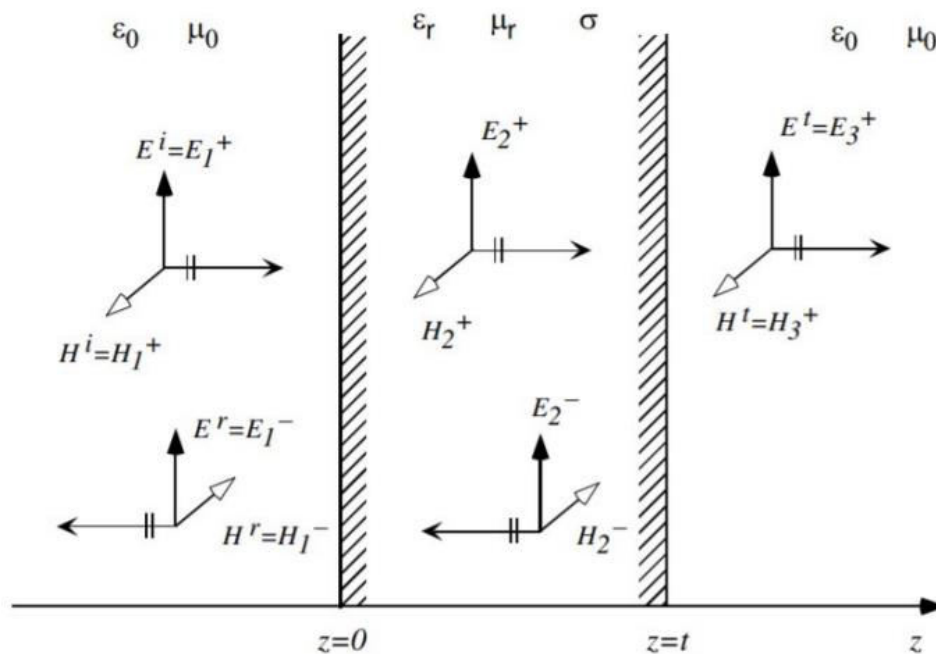


Figura 2.3.1 Schematizzazione di uno schermo

Definiamo allora efficacia di schermatura SE (shielding effectiveness) il rapporto:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} | E_i / E_t |$$

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} | H_i / H_t |$$

Se il campo incidente E_i è un'onda piana e il mezzo è uniforme sia a destra che a sinistra dello schermo, allora le due definizioni coincidono. In caso contrario, possono variare. La SE ha un valore numerico che è influenzato da diversi fenomeni. Il primo fenomeno è la riflessione che si verifica alla prima discontinuità, ossia la singola riflessione R_{dB} , quando l'onda passa dall'aria al metallo. Il secondo effetto è causato dall'assorbimento del metallo, che ha una conducibilità finita, noto come mezzo con perdite A_{dB} . Il terzo effetto deriva dalle molteplici riflessioni che avvengono all'interno dello schermo, noto come M_{dB} , e il loro effetto complessivo è un aumento del campo a destra dell'interfaccia.

In formule:

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

Per quanto M è un valore negativo in dB e riduce in generale la SE.

CAPITOLO 3: STRUMENTAZIONE

3.1 Camera riverberante

Le sperimentazioni per valutare l'efficacia di schermatura dei materiali cementizi sono state condotte all'interno della camera riverberante presso il laboratorio di compatibilità elettromagnetica EMC del dipartimento DII dell'Università Politecnica delle Marche.

La camera riverberante (**RC**) rappresenta una cavità multimodale elettricamente ampia, caratterizzata da pareti metalliche ad alta conducibilità, generalmente realizzate in alluminio, e comunemente adottando una configurazione rettangolare.

L'aspetto distintivo di questa struttura è legato al campo elettromagnetico che si sviluppa al suo interno, il quale presenta proprietà statistiche fondamentali, tra cui omogeneità, isotropia, incoerenza e depolarizzazione.

L'*omogeneità* statistica implica che tutte le posizioni spaziali a una distanza adeguata dalle superfici metalliche sono equivalenti. L'*isotropia* indica che il campo elettromagnetico è uniforme in ogni direzione in una specifica posizione all'interno della camera. L'*incoerenza* sottolinea la significativa variazione della distribuzione del campo rispetto a piccole perturbazioni. La

depolarizzazione, infine, suggerisce che la relazione di fase tra le componenti polarizzate è casuale.

Per ottenere tali proprietà, è essenziale ricorrere alla tecnica di rimescolamento meccanico dei modi della cavità attraverso l'impiego di "agitatori metallici". Questi dispositivi, operando con rotazioni continue (modalità Stirrer) o discrete (modalità Tuned), mescolano i modi della cavità, alterando contemporaneamente le condizioni al contorno e costringendo i campi a configurarsi in un nuovo set di modi permessi.

Un elemento cruciale per le camere riverberanti è il Fattore di Qualità (Q, dall'inglese "quality factor"), il quale influisce sulla potenza necessaria in ingresso per conseguire un determinato livello di campo all'interno del volume di test, ed è indicato da:

$$Q = \omega \frac{U}{P_d}$$

Eq. 3.1 Fattore di qualità

L'ambiente elettromagnetico dentro la camera riverberante è caratterizzato da determinismo, come enunciato dal Teorema di Unicità il quale afferma che, una volta specificata la sorgente e le condizioni al contorno, la soluzione di un problema elettromagnetico in una determinata area dello spazio è unica.

Nonostante ciò, a causa della natura stocastica del campo, si adotta un approccio statistico per delineare le caratteristiche della camera, considerando i campi come variabili casuali.

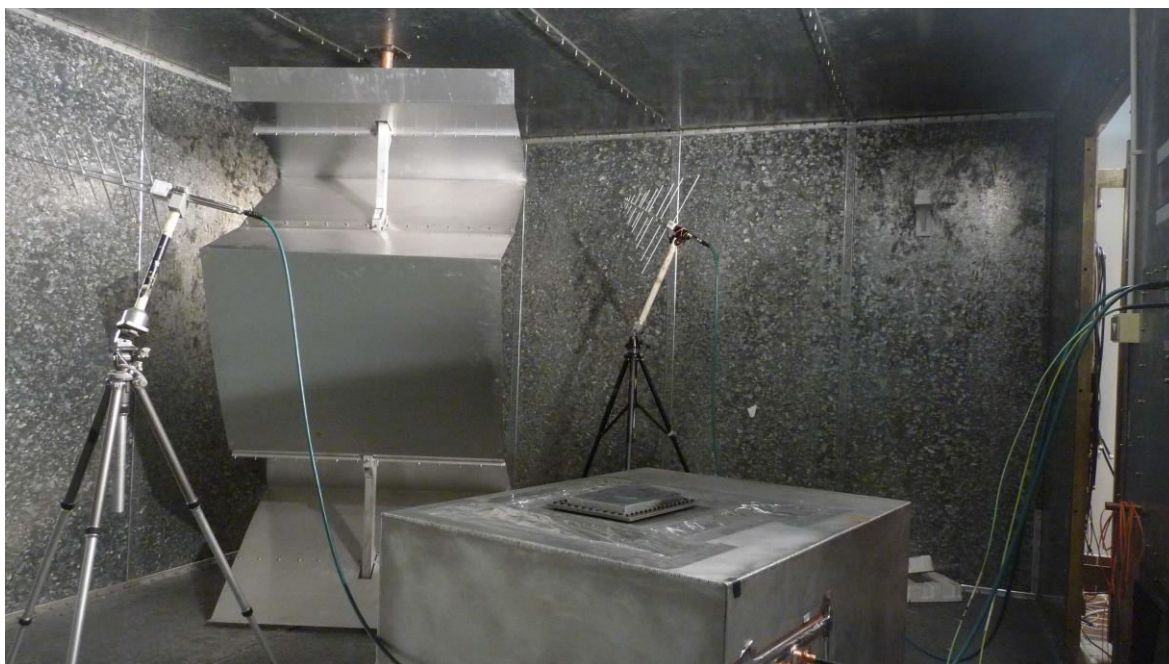


Figura 3.1 Configurazione della camera riverberante con antenne, agitatore e camera nested

3.1.1 Nested Reverberation Chamber

La Nested Reverberation Chamber (NRC) rappresenta una metodologia di misurazione fondata sulla teoria delle camere riverberanti esposta nel capitolo precedente. Questa tecnica è stata identificata come un innovativo contesto di misurazione particolarmente idoneo per determinare le proprietà schermanti di materiali sottili.

Nel campo della compatibilità elettromagnetica, l'efficienza di schermatura (Shielding Effectiveness, SE) emerge come il parametro chiave per sintetizzare e quantificare tali proprietà schermanti dei materiali. Tale efficienza è comunemente definita come il rapporto, espresso in decibel (dB), tra la potenza incidente sulla superficie del campione e la potenza trasmessa attraverso di esso sul lato opposto.

Per implementare questo metodo in modo pratico è necessario elaborare una procedura operativa che garantisca l'isolamento tra i campi ai lati del campione. Tale isolamento può essere ottenuto mediante l'utilizzo di due camere riverberanti strettamente accoppiate, in cui l'accoppiamento avviene tramite l'inserimento di una camera riverberante di dimensioni ridotte (Inner Chamber) all'interno del volume di lavoro (WV) di una camera riverberante di dimensioni maggiori (External Chamber).

Entrambe le camere riverberanti devono presentare un'ampia larghezza di banda elettrica, essere dotate di un mescolatore di modi e operare in modalità stirred. La Inner Chamber è equipaggiata con un'apertura rettangolare elettricamente ampia, destinata all'inserimento del campione in fase di prova. Le proprietà schermanti del campione possono essere misurate prima, in assenza del campione sull'apertura, al fine di rilevare la potenza trasmessa all'interno della Inner Chamber. Successivamente, coprendo l'apertura con il campione, è possibile misurare la potenza filtrata attraverso di esso.

Il rapporto tra le due quantità misurate fornisce l'efficienza di schermatura del campione in esame.

Per calcolare l'efficacia di schermatura viene impiegata la seguente formula, la quale tiene conto della presenza del campione che modifica il fattore di merito delle due camere.

$$SE = 10\log \frac{\langle |S_{31}^{su}|^2 \rangle}{\langle |S_{31}^{sm}|^2 \rangle} + 10\log \frac{\langle |S_{21}^{sm}|^2 \rangle}{\langle |S_{21}^{su}|^2 \rangle} + 10\log \frac{\langle |S_{43}^{sm}|^2 \rangle}{\langle |S_{43}^{su}|^2 \rangle}$$

Eq. 3.1.1.a Efficacia di schermatura nella NRC

Con *su* e *sm* si fa riferimento alla misura dei parametri di diffusione effettuata rispettivamente senza campione e con campione, mentre i valori all'interno delle parentesi angolari indicano i valori attesi delle misurazioni. Nel caso in cui il mescolatore modale della camera esterna operi in modalità stirred, è

essenziale che anche il mescolatore interno segua la medesima modalità di funzionamento. Questa procedura è necessaria per garantire che il campione venga esposto a un campo elettromagnetico omogeneo in ogni punto dello spazio.

Nella pratica è possibile che il mescolatore modale interno venga sostituito da una serie di strutture metalliche statiche e geometricamente molto irregolari. Queste strutture possono essere posizionate in modi diversi, compromettendo qualsiasi forma di simmetria dei modi. Nei casi delle camere di dimensioni ridotte, l'inserimento di piattaforme rotanti o assi servo-comandati risulta complesso, non solo a causa delle limitazioni di spazio, ma anche per ragioni elettromagnetiche; per questo motivo, un meccanismo che richiede controlli esterni, inevitabilmente comporta aperture che consentono il passaggio di cavi o elementi idraulici. Tali aperture possono fungere da antenne efficaci in virtù dell'equazione di continuità della corrente elettrica:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Eq. 3.1.1.b Equazione di continuità della corrente

Per affrontare le sfide discusse precedentemente, una soluzione praticabile deriva dalla teoria delle strutture guida. L'uso di guide d'onda può essere una risposta efficace per condurre cavi e altri dispositivi all'interno della camera, a

condizione che tali guide operino al di sotto delle frequenze rilevanti per l'esperimento. Allo stesso modo, un'alternativa consiste nell'introdurre sorgenti o sonde metalliche tramite transizioni a connettore, evitando così la necessità di praticare aperture sulle superfici dell'Inner Chamber.

Queste considerazioni non sono affatto triviali. Il cuore di questo lavoro consiste nel quantificare l'Efficienza di Schermatura (SE) di un materiale e nel convalidarla attraverso l'impiego della Nested Reverberation Chamber (NRC). Se non si riesce a isolare con precisione la camera interna da fonti esterne di campo, sarà praticamente impossibile dedurre le proprietà schermanti del campione.

Le fonti di disturbo menzionate includono contributi spesso imprevedibili, come la resistenza caratteristica del cavo inserito nei connettori, l'effetto capacitivo delle guarnizioni presenti nei coperchi e persino il filtraggio di potenza dovuto al contatto imperfetto tra il materiale e l'alloggiamento in rame.

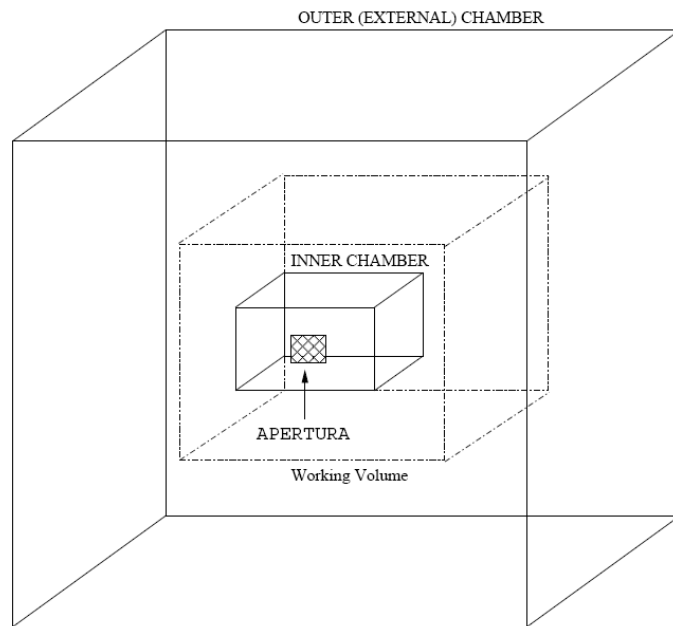


Figura 3.1.1 Disposizione geometrica della NRC

3.2 Mescolatori modali

I mescolatori modali, comunemente noti come stirrer, rivestono un ruolo primario nelle camere riverberanti, svolgendo la fondamentale funzione di promuovere la completa mescolanza dei modi elettromagnetici all'interno dell'ambiente di misura. Questi dispositivi contribuiscono in modo significativo a garantire l'omogeneità del campo elettromagnetico in tutta la camera, consentendo un'efficiente distribuzione delle onde elettromagnetiche all'interno dello spazio di prova. Un aspetto essenziale di tali mescolatori è la loro capacità di ridurre la dipendenza spaziale e temporale dei modi elettromagnetici, facilitando così la realizzazione di condizioni di prova uniformi.

I mescolatori modali sono spesso progettati per lavorare in modalità stirred: un processo dinamico che agisce sulla completa distribuzione delle onde elettromagnetiche in modo continuo e controllato. Questa modalità di funzionamento è particolarmente rilevante in ambienti di misura di dimensioni ridotte, dove l'introduzione di piattaforme rotanti o assi servo-comandati potrebbe essere limitata. La corretta implementazione dei mescolatori modali è fondamentale per ottenere risultati precisi e riproducibili nelle camere riverberanti, garantendo così la validità e l'affidabilità delle misurazioni effettuate su materiali sottili e schermanti.

Per la ricerca in oggetto, è stato impiegato uno stirrer orizzontale composto da quattro pannelli orientati in maniera non definita, con dimensioni di 52 cm x 102 cm, posizionato contro la parete. La durata approssimativa di ogni sessione di prova per la schermatura di ciascun campione è stata di circa 3 ore, durante le quali lo stirrer ha attraversato solitamente 9 posizioni.

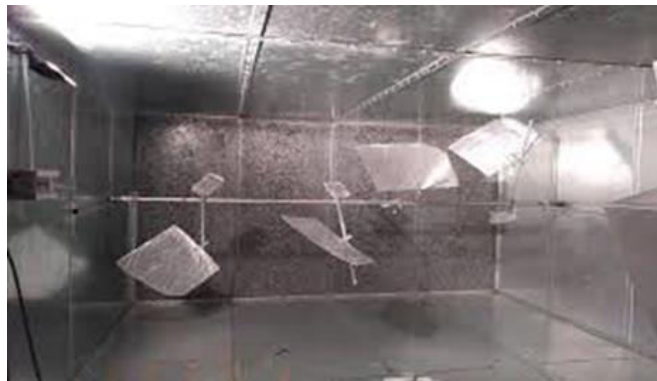


Figura 3.2.1 Stirrer orizzontale



Figura 3.2.2 Stirrer verticale

3.3 Antenna

In questa ricerca sperimentale sono state impiegate quattro antenne, di cui due posizionate nella camera esterna. Una di queste è un'antenna log-periodica trasmittente Schwarzback USLP 9143, mentre l'altra è un'antenna log-periodica ricevente Schwarzback USLP 9143, entrambe situate all'esterno della Inner Chamber. Le restanti due antenne, entrambe double ridge EMCO 3115, fungono da trasmettitori e ricevitori all'interno della camera annidata.

La disposizione delle antenne esterne è stata attentamente orchestrata per evitare la formazione di simmetrie; in particolare sono state orientate verso gli spigoli delle pareti della camera riverberante, consentendo così alla potenza di diffondersi uniformemente in tutto il volume. Questa configurazione è stata adottata non solo per garantire una distribuzione ottimale del campo elettromagnetico ma anche per evitare l'irradiazione diretta del campione.

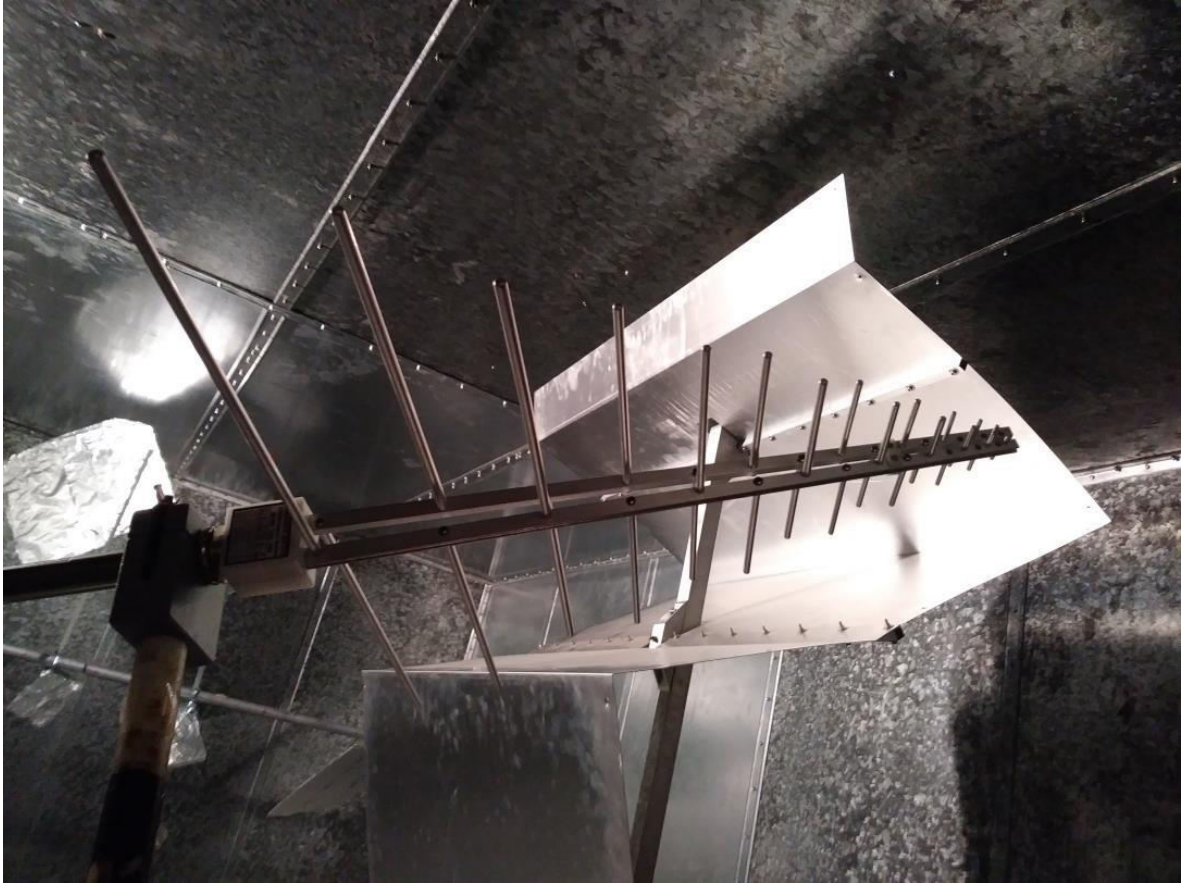


Figura 3.3.1 Antenna log-periodica esterna



Figura 3.3.2 Antenna interna

3.4 Analizzatore di rete

Come evidenziato nella Figura 3.4, nell'ambito di questa indagine è stato impiegato un analizzatore di rete della marca AGILENT E5071B. Questo strumento svolge un ruolo essenziale alimentando le quattro antenne coinvolte nello studio. Il dispositivo presenta quattro porte, tutte attivate quando si utilizzano quattro antenne nell'ambito della configurazione sperimentale. In alternativa, per misurazioni che coinvolgono solo due antenne, saranno attive solamente due porte. In particolare, la porta Forward (FWD) eroga la potenza immessa nella Outer Chamber, mentre la porta Reverse (RVD) riceve la potenza che riesce a penetrare nella Inner Chamber.

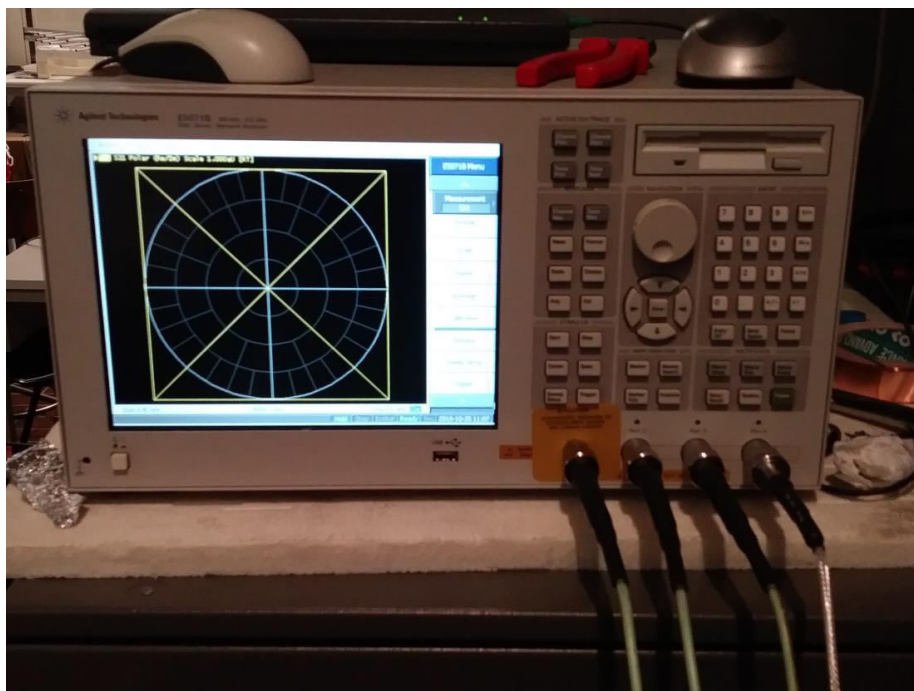


Figura 3.4 Analizzatore di rete

CAPITOLO 4: CAMPIONI E MISURE

Nel prosieguo di questa tesi, ci concentreremo sulla descrizione delle caratteristiche di ciascun campione utilizzato nel contesto delle nostre indagini. Inoltre esploreremo il processo dettagliato di come sono state effettuate le misurazioni, mettendo in evidenza le metodologie adottate per garantire la precisione dei risultati. Questa sezione sarà fondamentale per comprendere a pieno il contesto delle prove sperimentali condotte e per valutare in modo critico l'influenza delle proprietà intrinseche dei campioni sulle misurazioni di efficienza di schermatura.

4.1 Descrizione

Nella cornice di questo lavoro sono stati impiegati campioni di cemento datati sette anni. L'utilizzo di materiali con una storia temporale così definita è fondamentale per esplorare le dinamiche elettromagnetiche e le proprietà di schermatura in materiali che hanno subito un processo di invecchiamento significativo nel corso degli anni.

Abbiamo concentrato la nostra attenzione su un subset specifico di campioni, approfondendo l'analisi di quelli esaminati nell'articolo di riferimento di L. Bastianelli et al., pubblicato nel 2018. L'obiettivo primario di questo lavoro è investigare come il processo di invecchiamento di un materiale impatti sull'Efficienza di Schermatura (SE).

Di seguito è presentata una tabella che stabilisce le corrispondenze tra i campioni selezionati e i pattern dei grafici discussi nell'articolo in questione. Questo approccio mira a fornire una chiara connessione tra i dati esaminati in questa tesi e le scoperte rilevanti già presenti nella letteratura scientifica.

Reference	2
A	1
B	4
C	7
D	13
E	14
Dynamic Range	13-14

- Campione 1: solo cemento;
- Campione 2: solo cemento ed è di riferimento;
- Campione 4: cemento e ossido di grafene;
- Campione 7: cemento e fibre metalliche ripiegate;
- Campione 13: cemento e fibre di carbonio (4g);
- Campione 14: cemento, fibre metalliche corte e ossido di grafene.



Figura 4.1.1 Campione 7



Figura 4.1.2 Campione 2

4.2 Set-up misure

Nel contesto delle misurazioni effettuate sul campione cementizio all'interno della camera riverberante, il set-up è stato attentamente progettato per garantire accuratezza e riproducibilità. Il campione di cemento, incorniciato da una struttura metallica quadrata, è posizionato sull'apertura della camera riverberante nested.

Affinché il collegamento tra il campione e la camera interna sia ben isolato, impedendo perdite di energia elettromagnetica lungo i bordi del campione, si è ricorso a una ghiera bucherellata. Questo componente svolge un ruolo cruciale nel garantire un'aderenza precisa e stabile del campione, assicurando un contatto efficace e minimizzando dispersioni di energia.

Il processo di preparazione tra un campione e l'altro è stato reso efficiente grazie all'uso di un avvitatore. Prima di inserire il nuovo campione, vengono rimossi tutti i bulloni dalla ghiera. Successivamente, il nuovo campione viene posizionato accuratamente e ciascun bullone viene riposizionato e avvitato nuovamente con l'ausilio dell'avvitatore.

L'insieme di queste componenti e procedure costituisce il set-up di misure per il campione cementizio nella camera riverberante, garantendo un ambiente controllato e una procedura standardizzata per le misurazioni di efficienza di schermatura elettrica.



Figura 4.2.1 Campione e ghiera smontati che rivelano l'apertura della camera



Figura 4.2.2 Campione fissato con i bulloni sulla ghiera

4.3 Dynamic Range

Il Dynamic Range riveste un ruolo di primaria importanza nel garantire la precisione delle nostre misurazioni, focalizzandosi sia sulle potenze incidenti che su quelle trasmesse attraverso il campione cementizio.

La misurazione del Dynamic Range, o fondo, costituisce un processo particolarmente laborioso e accurato. Inizialmente, tale misurazione rappresenta ciò che la camera nested registrerebbe in assenza del campione. Il metodo adottato prevede l'impiego di un campione, rivestito di alluminio per renderlo invisibile alla misurazione.

La preparazione di questa fase è stata eseguita con grande attenzione per evitare che durante l'avvitatura si verificasse la rottura dello strato di alluminio. Sebbene si sia verificato questo inconveniente, si è prontamente intervenuti applicando del nastro adesivo di rame, risolvendo efficacemente la situazione. Questa fase meticolosa di preparazione, nonostante le sfide, è fondamentale per garantire l'integrità del processo di misurazione e la coerenza dei dati ottenuti nel valutare il dynamic range del nostro sistema.

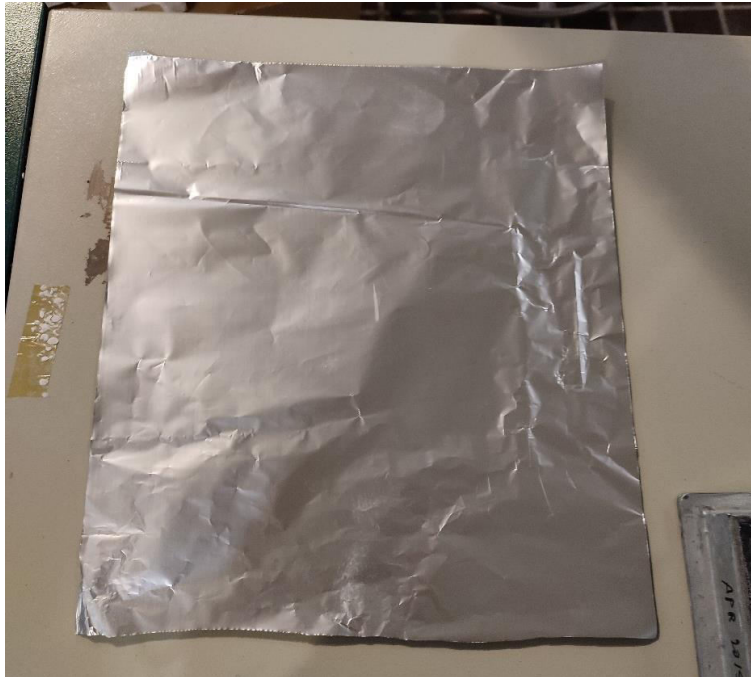


Figura 4.3.1 Alluminio usato per rivestire i campioni



Figura 4.3.2 Campione pronto per la misura del fondo ricoperto da alluminio



Figura 4.3.3 Montaggio della ghiera



Figura 4.3.4 Serraggio delle viti per la preparazione della misura di fondo

Nonostante i tentativi adottati, le interferenze durante le misurazioni persistevano. Pertanto, abbiamo preso la decisione di inserire una calza metallica tra la ghiera e la cornice metallica del campione. L'obiettivo di questa aggiunta era eliminare qualsiasi spazio residuo tra l'apertura della camera nested che collega la camera interna e esterna.

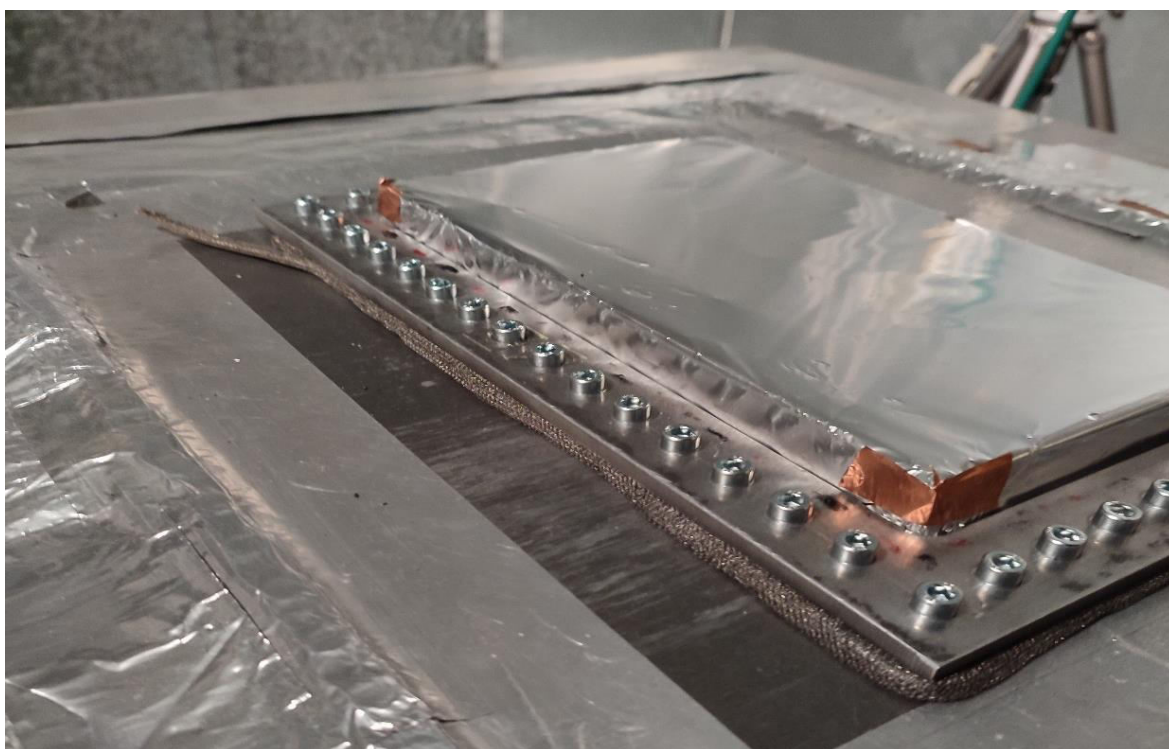


Figura 4.3.5 Campione pronto per la misura di fondo con calza

Successivamente, la misurazione vera e propria viene effettuata rimuovendo semplicemente lo strato di alluminio, riportando il campione sottostante alla condizione di pronto per la misura.



Figura 4.3.6 Rimozione del foglio di alluminio (con pezzi di nastro adesivo di rame)

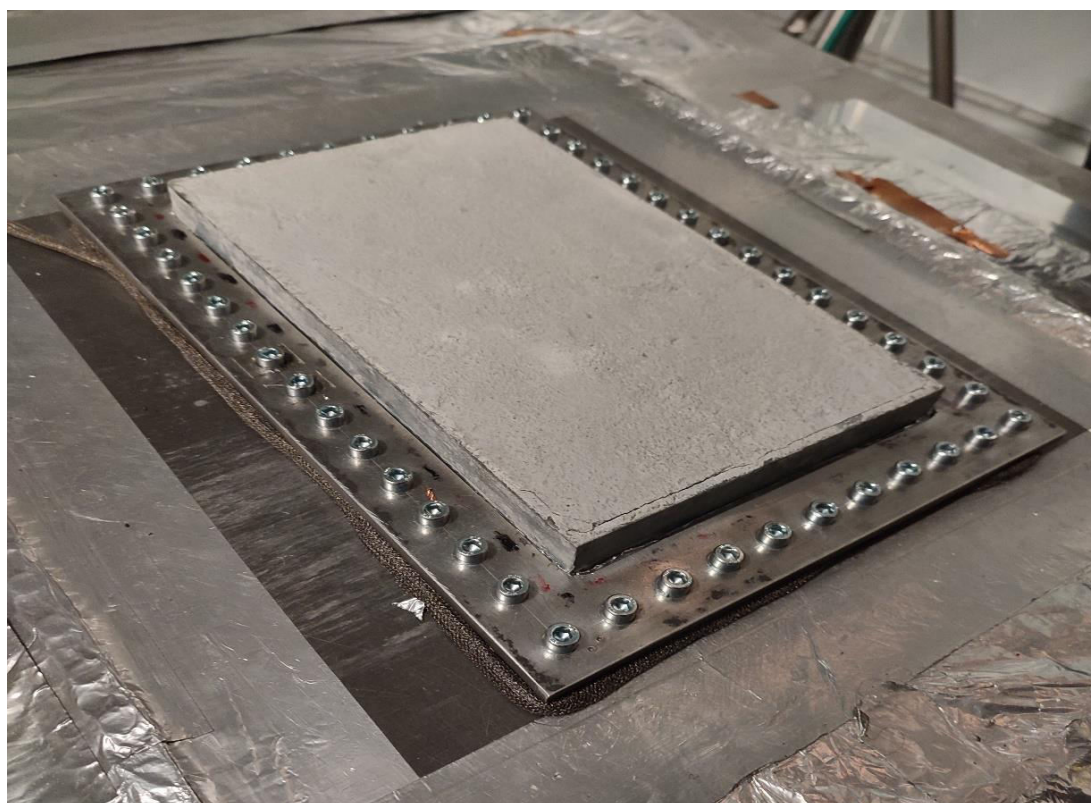


Figura 4.3.7 Campione pronto per una nuova misurazione

CAPITOLO 5: ANALISI DEI RISULTATI E

DISCUSSIONE

Nel presente capitolo esamineremo attentamente i risultati ottenuti dai campioni di cemento fibro-rinforzati, analizzando la loro risposta alle misurazioni di efficienza di schermatura elettromagnetica dopo sette anni. L'obiettivo è esplorare come questi materiali, nel corso del tempo, abbiano mantenuto o modificato le loro proprietà di schermatura. Particolare attenzione sarà dedicata alla coerenza delle prestazioni rispetto al periodo di invecchiamento e all'utilizzo della stessa strumentazione, consentendo una valutazione accurata della stabilità nel tempo di tali caratteristiche elettromagnetiche.

Attraverso un'analisi dei dati raccolti con la stessa strumentazione, esamineremo le variazioni nelle proprietà elettromagnetiche dei campioni di cemento fibro-rinforzati nel corso degli anni. La continuità della metodologia di misurazione fornirà una base solida per comprendere la resilienza e la coerenza delle prestazioni di schermatura di questi materiali nel lungo periodo. Questo capitolo rappresenta quindi un passo significativo nel nostro sforzo di approfondire la comprensione delle dinamiche di invecchiamento dei materiali fibro-rinforzati sotto l'aspetto della compatibilità elettromagnetica.

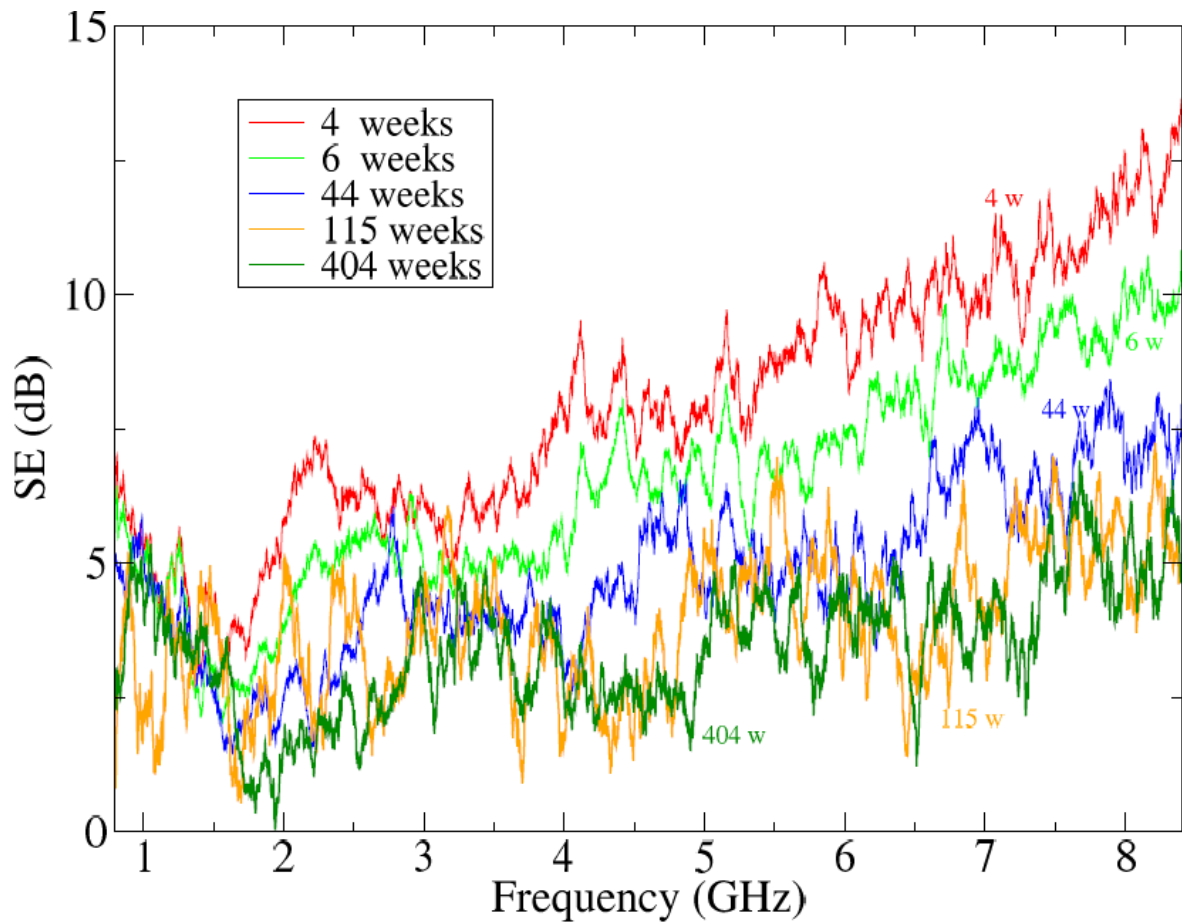


Figura 5.1 Schermatura dei campioni 1 e 2

Nel diagramma presente sopra e in quelli seguenti, l'asse delle ascisse (x) rappresenta la frequenza espressa in GHz, mentre l'asse delle ordinate (y) indica l'efficacia di schermatura espressa in decibel. Questa rappresentazione grafica consente di visualizzare in modo chiaro e immediato la relazione tra la frequenza delle onde elettromagnetiche e l'efficacia di schermatura dei campioni esaminati.

I campioni 1 e 2, come precedentemente spiegato nel capitolo 4, sono costituiti esclusivamente da cemento, di conseguenza il loro comportamento è analogo.

Entrando nella discussione del grafico soprastante in figura 5.1, si nota un notevole declino tra le curve rossa, verde chiaro e blu, rispettivamente 4w, 6w e 44w, mentre l'abbassamento tra la curva a 115w (gialla) e quella a 404w (verde scuro) è significativamente minore. Questa variazione può essere attribuita al contenuto iniziale di acqua nel cemento nei primi anni, rendendolo più schermante grazie ai minerali disciolti che lo rendono una sostanza elettrolitica. Tuttavia, a partire dal secondo anno di vita del campione, si osserva un consolidamento con le proprietà schermanti che variano in misura molto limitata nel tempo.

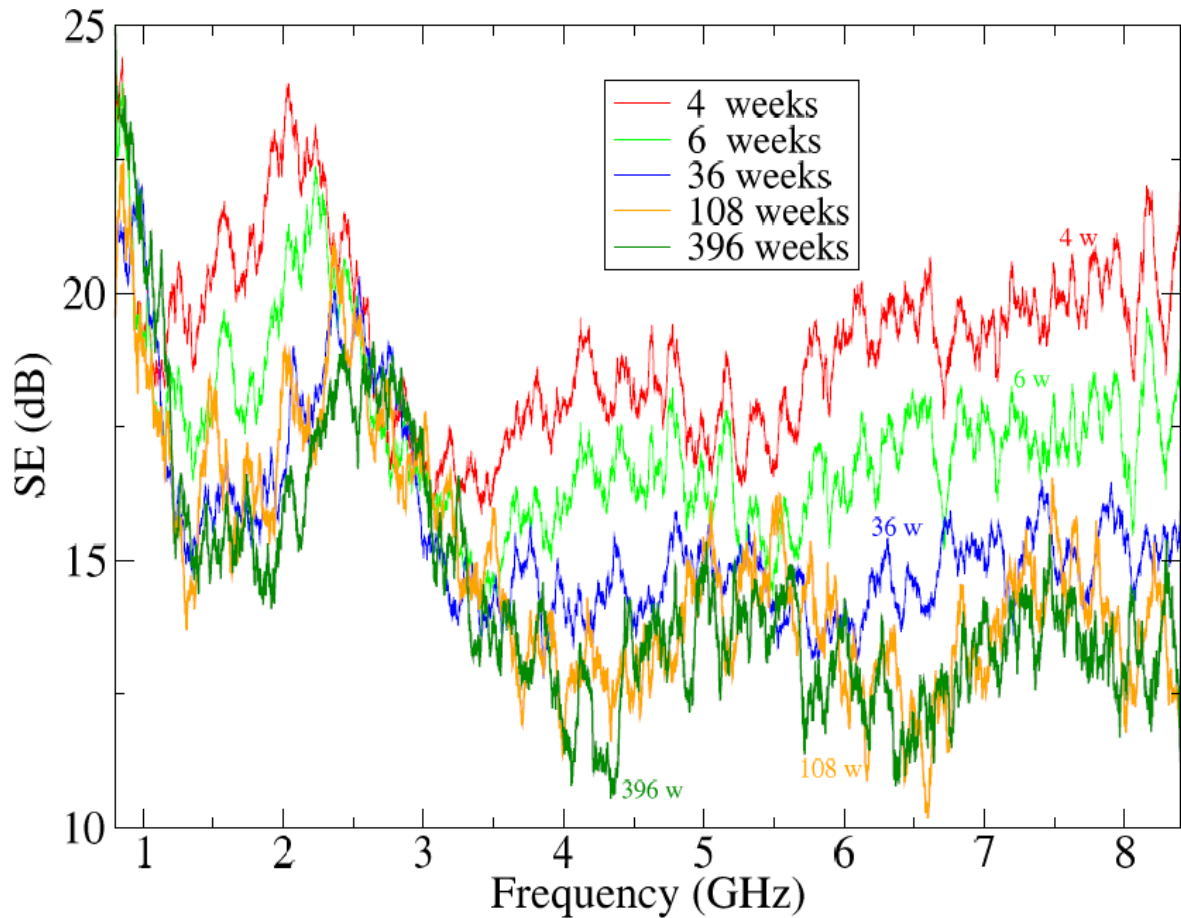


Figura 5.2 Schermatura del campione 7

Il campione 7, costituito da cemento fibro-rinforzato, presenta delle caratteristiche peculiari che emergono chiaramente dalle analisi effettuate. Le parti del grafico in discesa possono essere attribuite alla perdita di acqua nel tempo, evidenziando l'effetto dell'evaporazione su alcune regioni del campione. Queste variazioni temporali sono riconducibili al naturale processo di invecchiamento del materiale. D'altro canto, le parti discendenti del grafico sono influenzate esclusivamente dalla presenza delle fibre, le quali mantengono la loro efficacia inalterata nel tempo.

È interessante notare che a basse frequenze, l'effetto delle fibre non è percepibile, ma tale influenza diventa evidente quando ci si sposta verso alte frequenze. A queste ultime, le fibre simulano un reticolo che si mette in conduzione, generando un aumento dell'efficienza di schermatura.

Queste osservazioni offrono una comprensione dettagliata delle dinamiche elettromagnetiche del campione 7 e contribuiscono alla valutazione delle sue proprietà nel contesto della compatibilità elettromagnetica.

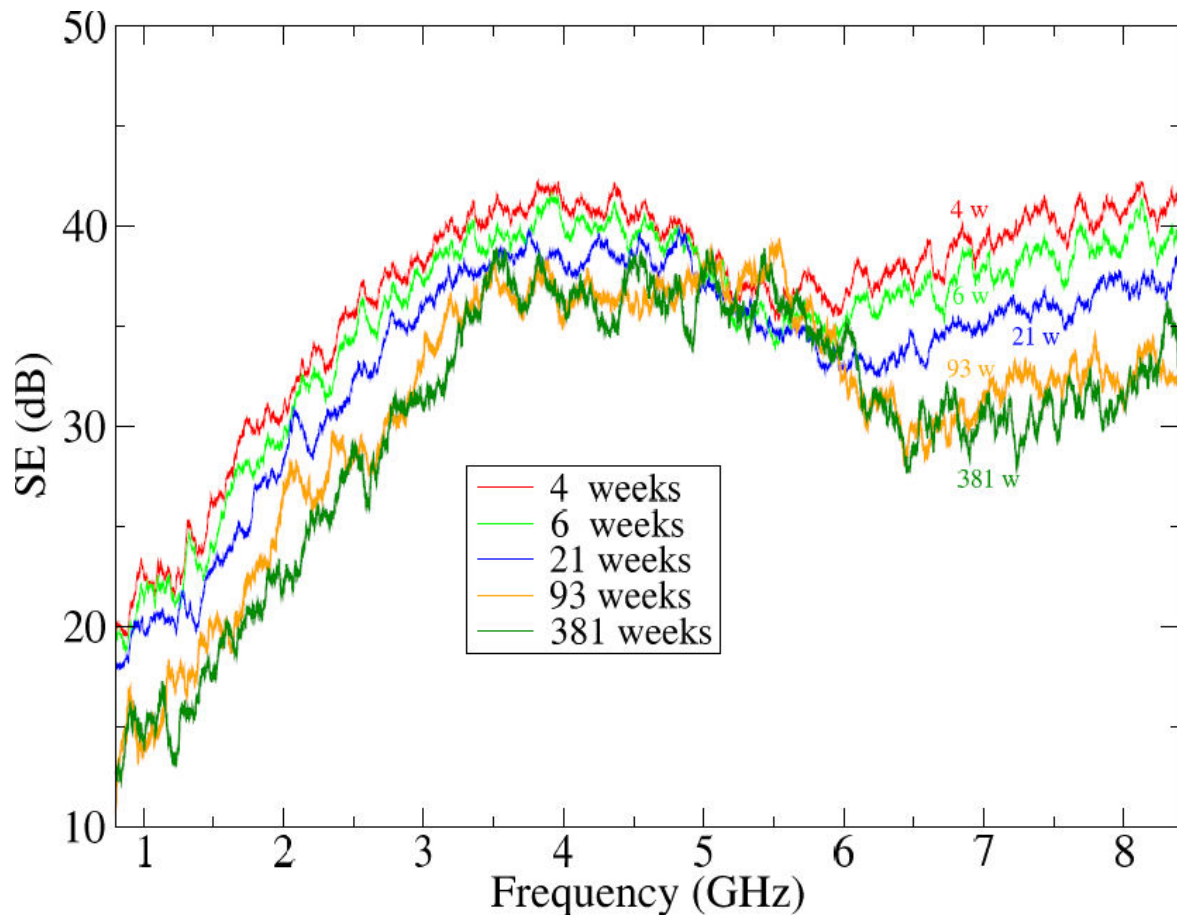


Figura 5.3 Schermatura del campione 14

Il campione 14 è composto da una combinazione di cemento, ossido di grafene e fibre metalliche corte. È rilevante evidenziare come l'introduzione di fibre di carbonio conduca a un aumento dell'efficacia di schermatura all'aumentare della frequenza, mentre l'inclusione di fibre metalliche genera una diminuzione del grafico con l'aumentare della frequenza.

Analizzando la Figura 5.3 è possibile determinare la predominanza dell'ossido di grafene e delle fibre metalliche in ciascun intervallo di frequenza. Da circa 0,25 GHz a 3,5 GHz, si osserva un predominio degli effetti legati al grafene,

poiché a basse frequenze le fibre metalliche non sono in contatto tra loro e di conseguenza non contribuiscono alla conducibilità.

Nel segmento centrale, si manifesta un effetto combinato di grafene e fibre metalliche. Con l'incremento della frequenza, le particelle metalliche vicine si mettono in conduzione, creando un reticolo. Tra 3,5 GHz e 5,5 GHz, la curva a 381w mostra un tratto quasi orizzontale a causa dell'annullamento reciproco degli effetti delle due componenti. D'altra parte, tra 5,5 GHz e 6,5 GHz, prevale l'effetto delle fibre metalliche sul grafene.

L'ultimo segmento è caratterizzato dall'effetto predominante del solo ossido di grafene.

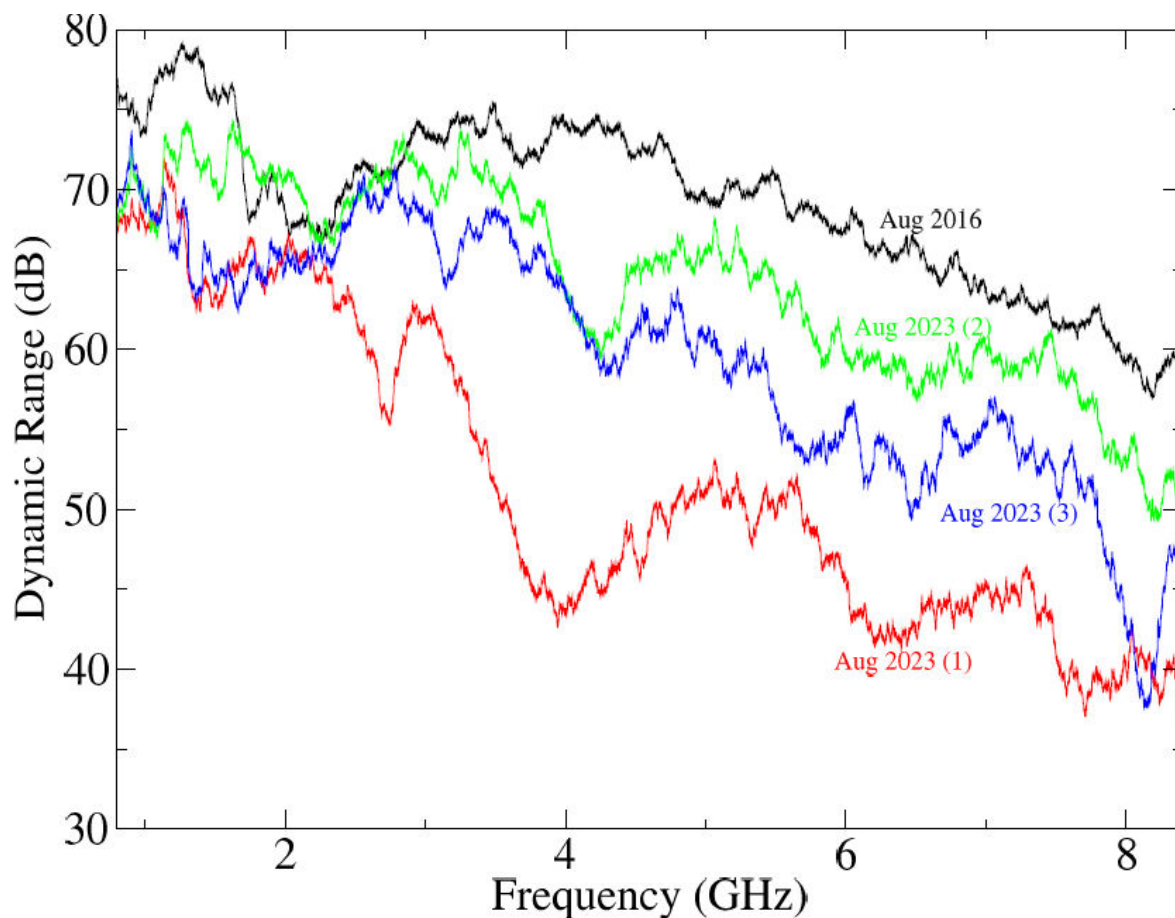


Figura 5.4 Schermatura Dynamic Range dei campioni 13 e 14

Nella Figura 5.4 sono confrontate le misurazioni effettuate nell'agosto 2023 con quelle della prima eseguita nel 2016. Ciò che emerge come aspetto più significativo in questo grafico è l'impatto positivo dei numerosi accorgimenti adottati per eliminare le interferenze sull'andamento complessivo. Nonostante la natura sperimentale di queste misurazioni, è importante notare che a basse frequenze persistono ancora alcune interferenze, forse associate alla schermatura dei cavi. Tuttavia, confrontando la curva rossa (misura di fondo eseguita senza calza metallica e senza la riparazione del guscio tramite nastro

adesivo di rame) con la curva blu (dynamic range misurato con il campione 14 utilizzando la calza metallica) e la curva verde (dynamic range calcolato con il campione 13 e l'aggiunta della calza metallica), si rileva un miglioramento sostanziale.

Particolarmente interessante è l'aumento di circa 10 dB tra il grafico rosso e quello blu a circa 8,5 GHz, mentre tra le curve agosto 2023(1) e agosto 2023(2) si registra un aumento di circa 13 dB. Questi risultati evidenziano l'efficacia delle strategie adottate nel migliorare la qualità delle misurazioni, contribuendo significativamente all'affidabilità complessiva dei dati ottenuti.

CAPITOLO 6: CONCLUSIONI

Nel corso di questa ricerca abbiamo condotto un'analisi approfondita delle proprietà di schermatura elettromagnetica di campioni di cemento, cemento con l'aggiunta di ossido di grafene e cemento fibro-rinforzato. L'obiettivo principale era valutare come l'invecchiamento del materiale e la presenza di componenti aggiuntive influissero sull'efficienza di schermatura, utilizzando una Nested Reverberation Chamber (NRC) come ambiente di misura.

I risultati ottenuti sono stati eterogenei e ricchi di sfumature. Nel caso del cemento, abbiamo osservato una variazione significativa delle proprietà di schermatura in relazione al contenuto d'acqua e all'invecchiamento del materiale.

La presenza di fibre metalliche nei campioni ha mostrato un impatto rilevante, specialmente ad alte frequenze, simulando un reticolo conduttivo che ha contribuito positivamente all'efficienza di schermatura, risultando così meno sensibile all'invecchiamento.

L'aggiunta di ossido di grafene al cemento ha introdotto una dimensione innovativa alla nostra indagine. In particolare, abbiamo notato una sensibile miglioria dell'efficienza di schermatura ad alte frequenze, probabilmente attribuibile alle proprietà conduttive dell'ossido di grafene. Tuttavia, è emerso

che a frequenze più basse, l'ossido di grafene potrebbe non avere contribuito in modo significativo all'efficienza di schermatura, ma ciò può essere causato dai disturbi dovuti molto probabilmente alla schermatura dei cavi.

In conclusione, questa ricerca ha fornito una panoramica dettagliata delle proprietà di schermatura elettromagnetica di campioni di cemento e materiali correlati. Le variazioni osservate a diverse frequenze, l'effetto dell'invecchiamento e l'influenza delle componenti aggiuntive, hanno contribuito a una comprensione più approfondita delle prestazioni di schermatura di tali materiali. Questi risultati hanno implicazioni rilevanti per il campo della compatibilità elettromagnetica e possono informare lo sviluppo di materiali avanzati per applicazioni specifiche.

BIBLIOGRAFIA

F. Paganini, “Ottimizzazione di miscele cementizie contenenti fibre metalliche per schermatura elettromagnetica”, Università Politecnica delle Marche, 2015/2016.

L. Marinaro, “Efficacia di schermatura di vetri compositi per la protezione di ambienti e persone da campi elettromagnetici”, Università Politecnica delle Marche, 2020/2021.

I. Pizzichelli, “Efficacia di schermatura elettromagnetica alle alte frequenze di materiali a base cementizia di tipo DSP caricati con polvere di grafite e fibre metalliche”, Università Politecnica delle Marche, 2007/2008.

E. Puca, “Variazione dell’efficacia di schermatura di mezzi non omogenei”, Università Politecnica delle Marche, 2022/2023.

E. Arcangeli, “Focalizzazione di campi elettromagnetici in ambienti riverberanti per l’esposizione di corpi biologici”, Università Politecnica delle Marche, 2018/2019.

L. Bastianelli, F. Moglie and V. Mariani Primiani, "Shielding Effectiveness of Randomly Distributed Conductive Elements: Experimental Analysis and Simplified Model," *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Amsterdam, Netherlands, 2018, fig.5

Fawwaz T. Ulaby, “Fondamenti di campi elettromagnetici. Teoria e applicazioni” (a cura di Stefano Selleri), McGraw-Hill Education, 2006, pagg. 11-20, 145-146.