



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **Ingegneria Biomedica**

Valutazione dell'efficacia di schermatura di composti cementizi in funzione dell'invecchiamento

*Evaluation of the effectiveness of screening of cement
compounds in relation to ageing*

Relatore:
Prof. **FRANCO MOGLIE**

Tesi di Laurea di:
MARCO CAMPANA

Correlatore:
Prof. **MARIANI PRIMIANI VALTER**

A.A 2022/2023

Alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto.

Ai miei amici, sempre pronti ad aiutarmi.

A Camilla, la mia forza.

A me stesso.

INDICE

INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1 – <i>Richiami di elettromagnetismo</i>.....	7
1.1 - Equazioni di Maxwell.....	7
1.2 - Onde piane.....	10
1.3 - Propagazione onde piane in mezzi con perdite.....	14
CAPITOLO 2 – <i>Schermi Elettromagnetici</i>.....	16
2.1 - Definizione schermo elettromagnetico.....	16
2.2 - Efficacia di Schermatura (SE).....	20
2.3 - Analisi in frequenza della SE.....	24
2.4 - SE per un vetro stratificato.....	26
2.4.1 - Analisi del vetro.....	26
2.4.2 - Descrizione del modello.....	28

CAPITOLO 3 – SE dei compositi cementizi.....31

3.1 - Introduzione.....31

3.2 - Descrizione del metodo di misura.....32

3.3 - Preparazione e montaggio dei campioni.....35

CAPITOLO 4 – Risultati.....38

Conclusioni.....43

Bibliografia.....44

INTRODUZIONE

Con il passare degli anni, l'innovazione tecnologica ha contribuito alla crescita della quantità di dispositivi in grado di emettere radiazioni elettromagnetiche a nostra disposizione.

Questo comporta però ad una continua e sempre maggiore preoccupazione riguardo l'impatto che tali radiazioni potrebbero avere sul corpo umano e di conseguenza sulla nostra salute.

Quando un essere umano è immerso o è in presenza di un campo elettromagnetico, esso assorbe energia e le condizioni di equilibrio naturale subiscono un'alterazione e proprio per questo motivo è importante proteggere noi stessi dai possibili effetti a lungo termine provocati da tale assorbimento di onde elettromagnetiche.

Pertanto, è necessario minimizzare la nostra esposizione alle radiazioni elettromagnetiche e controllare che siano al di sotto dei limiti massimi consentiti, i quali sono comunque di diversa entità se parliamo di livelli di campo per le apparecchiature elettroniche o dei mezzi biologici. Livelli che non sono molto tollerabili dal corpo umano potrebbero invece creare disturbi alle apparecchiature elettroniche. Oltre agli effetti appena descritti sul corpo umano, i campi elettromagnetici possono creare disturbi ed interferenze con le apparecchiature elettroniche di uso quotidiano sia in ambito domestico che lavorativo; proprio per questo sono stati fissati dei limiti a livello europeo che ne garantiscono sicurezza e funzionalità soddisfacente.

Nel campo industriale, dove sono richiesti campi elettromagnetici di grande intensità, per proteggere sia i lavoratori che le apparecchiature nelle vicinanze è fondamentale schermarli questi campi tramite appositi sistemi.

La schermatura elettromagnetica rappresenta una tra le più quotate misure che possono essere adottate per ridurre l'esposizione ai campi elettromagnetici e si basa essenzialmente sull'utilizzo di materiali capaci di interrompere o ridurre il passaggio di tali campi.

L'efficacia di questa schermatura dipende però dal tipo di materiale utilizzato, dalla posizione del dispositivo schermante, dalla frequenza ed altri aspetti legati alle teorie dell'elettromagnetismo.

Questa soluzione viene realizzata e messa in pratica installando apposite barriere tra l'apparecchio elettronico di nostro interesse ed il corpo umano.

I materiali utilizzati per la schermatura dei campi elettromagnetici sono composti da metalli come l'alluminio, l'acciaio inossidabile, il rame e la lega di nichel.

La schermatura non sempre viene considerata efficace, proprio per questo è di fondamentale importanza valutare l'efficacia dei sistemi di schermatura per cercare di raggiungere un compromesso tra la questione legata alla protezione e quella legata alla funzionalità dei dispositivi che oggi quotidianamente utilizziamo.

In questa tesi enfatizziamo l'argomento della schermatura degli edifici, in particolare la metodologia di analisi presentata è basata sull'utilizzo di schermi stratificati, trattando il caso del vetro a più strati, dei compositi cementizi per quanto riguarda gli edifici.

Seppur a nostra insaputa, molte strutture in ambito residenziale ed industriale svolgono quotidianamente ed involontariamente questa funzione, a partire dalle pareti degli edifici.

Queste pareti attenuano la radiazione elettromagnetica entrante grazie alla presenza di elementi strutturali metallici, i quali dispongono di ottime qualità schermanti, riducendo l'esposizione dell'uomo alle onde elettromagnetiche.

Esse però presentano un contro: possono complicare la trasmissione dei segnali legati alle telecomunicazioni attenuando ad esempio, il collegamento tra stazione radio e cellulari, fino ad oltre 40 dB.

Vedremo inoltre che anche i vetri moderni utilizzati nell'edilizia possono causare problemi, in quanto contengono elementi metallici, inseriti appositamente per ridurre lo scambio termico con l'ambiente esterno, i quali però ridurranno anche il passaggio delle onde elettromagnetiche a tutte le varie frequenze.

In questo contesto, la ricerca e la progettazione di nuove soluzioni di schermatura elettromagnetica possono aiutare a garantire un equilibrio tra la protezione e la funzionalità dei dispositivi in modo da garantire una maggiore sicurezza per la salute umana.

Riassumendo, l'efficacia schermante (SE) dei materiali dipende fortemente da varie caratteristiche.

Nelle situazioni di vita reale le pareti degli edifici sono eccitate in maniera casuale, rendendo questo molto simile a quello che accade all'interno di una camera di riverberazione elettromagnetica (RC).

Questa tesi inizialmente analizza ampiamente le caratteristiche per un'efficace schermatura, descrivendo poi come misurare la SE all'interno di una RC per replicare questa situazione reale; in particolare, prendendo come campioni i compositi cementizi perché direttamente utili per la costruzione di muri e pareti edilizie.

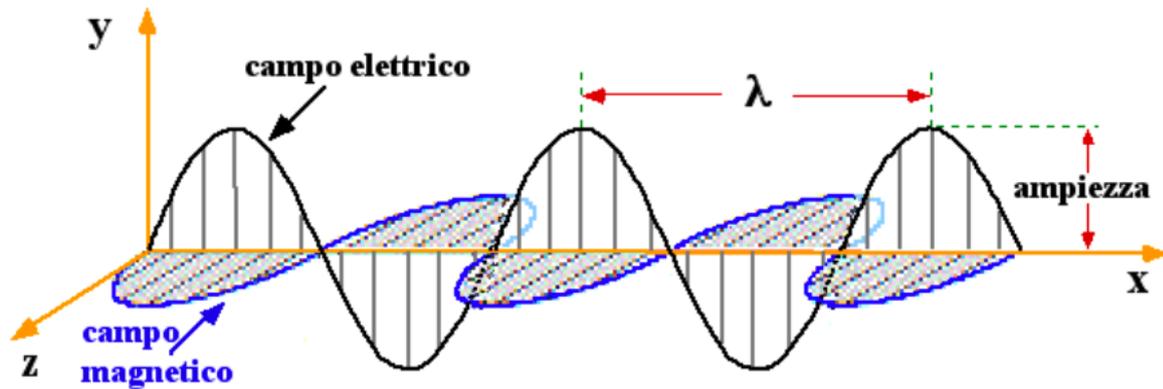
CAPITOLO 1 – Richiami di elettromagnetismo

1.1 – Equazioni di Maxwell

Con elettromagnetismo identifichiamo quella branca della fisica che si occupa dei fenomeni di natura elettrica e magnetica e delle loro correlazioni.

L'elettromagnetismo studia infatti l'interazione tra campo elettrico e campo magnetico attraverso le famose equazioni di Maxwell.

Gli scienziati si sono chiesti a lungo se le forze attrattive e repulsive dell'elettricità e del magnetismo fossero collegate e nel 1873 questi studi vennero riportati nel trattato che Maxwell pubblicò, nel quale dimostrò la prima teoria unificata di elettricità e magnetismo tramite un sistema di quattro equazioni differenziali che dedusse dalle osservazioni sperimentali riportate da Gauss, Faraday, Ampère e altri studiosi. Insieme ad altre relazioni ausiliarie, le equazioni di Maxwell costituiscono i fondamenti dell'elettromagnetismo. La teoria dell'elettromagnetismo che ne consegue diede luogo ad uno dei più importanti risultati scientifici di tutti i tempi: la scoperta delle onde elettromagnetiche.



Le cariche elettriche inducono campi elettrici, mentre le correnti elettriche inducono campi magnetici. Tuttavia, la conseguenza di cariche e correnti che variano nel tempo non è soltanto la variazione corrispondente dei campi: i campi elettrici e magnetici diventano interconnessi e il loro accoppiamento genera onde elettromagnetiche in grado di propagarsi attraverso lo spazio libero e nei mezzi materiali. Per studiare i fenomeni elettromagnetici tempo-invarianti bisogna ricorrere quindi alle equazioni di Maxwell e in particolare è necessario considerare l'accoppiamento che esiste tra i due campi.

Le equazioni, scritte in forma differenziale, sono:

i. Legge di Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$
ii. Legge di Faraday	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
iii. Legge del magnetismo di Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
iv. Legge di Ampère-Maxwell	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$

Dove:

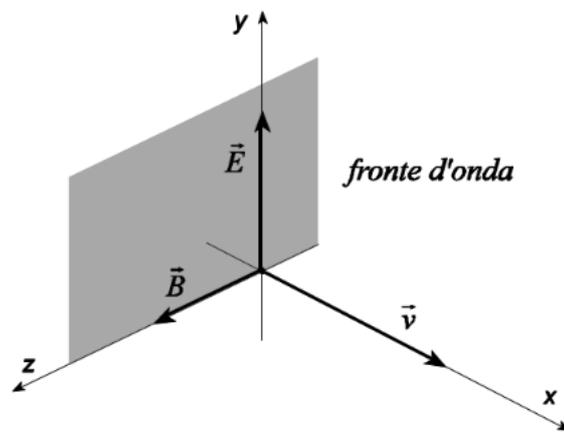
- $\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ è il vettore induzione elettrica [C/m^2];
- $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$ è il vettore induzione magnetica [Wb/m];
- \mathbf{E} è il vettore campo elettrico [V/m];
- \mathbf{H} è il vettore campo magnetico [A/m];
- \mathbf{J} è la densità superficiale di corrente elettrica [A/m^2];
- ρ_v è la densità volumica di carica elettrica [C/m^3];

e μ_0 permeabilità magnetica del vuoto, μ_r permeabilità magnetica relativa del mezzo, ϵ_0 costante dielettrica del vuoto e ϵ_r costante dielettrica relativa del mezzo.

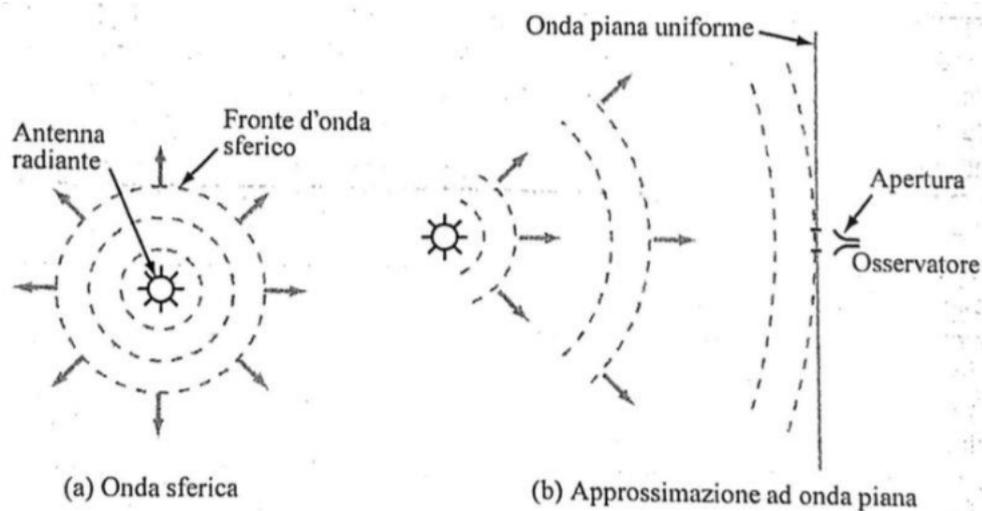
Nel caso in cui la derivata fatta rispetto al tempo sia nulla, ovvero nel caso statico, nessuna delle grandezze che compaiono è funzione del tempo e ciò accade quando tutte le cariche sono fisse nello spazio o si muovono ad una velocità costante. Sotto queste ipotesi, il campo elettrico e quello magnetico non sono più legati uno all'altro e le quattro equazioni si separano in due sistemi di equazioni, uno che riguarda i campi elettrici \mathbf{E} e \mathbf{D} , l'altro che riguarda i campi magnetici \mathbf{B} e \mathbf{H} . Ciò consente di studiare i fenomeni elettrici e magnetici come casi distinti (in questo caso si parlerà di elettrostatica e magnetostatica) fino a quando la distribuzione di carica e il flusso rimangono costanti nel tempo.

1.2 – Onde piane

Quanto appena visto ci permette di affermare che Maxwell ha dedotto che il suo insieme di equazioni ammette come soluzione delle onde trasversali, ovvero onde tali che il campo elettrico e quello magnetico oscillano su piani perpendicolari all'asse x , che rappresenta la direzione di propagazione.



Inoltre, come visto con le leggi di Maxwell, un campo elettrico variabile genera un campo magnetico e viceversa, questo comportamento ciclico genera delle onde elettromagnetiche capaci di propagarsi in qualunque mezzo, compreso il vuoto. Le onde che vengono irradiate da una sorgente elettromagnetica, presentano fronti d'onda sferici, i quali appariranno piani a grande distanza dal punto di emissione dell'onda. Le onde piane sono dunque onde elettromagnetiche che si propagano lungo una direzione e rimangono inalterate nelle altre due, ovvero che non subiscono variazioni nelle direzioni perpendicolari a quella di propagazione.



Le onde piane possono dunque essere definite come una particolare soluzione delle equazioni di Maxwell nei mezzi omogenei. Esse sono ovviamente un'astrazione ma sono utili per approssimare il comportamento del campo elettromagnetico quando la sorgente si trova a grande distanza e risultano utili per dimostrare che in un mezzo omogeneo qualunque campo è esprimibile come combinazione lineare di onde piane.

Maxwell dimostrò inoltre che i campi elettrico e magnetico soddisfano l'equazione delle onde nota come equazione di D'Alembert, un'equazione differenziale alle derivate parziali che descrive e sintetizza tutti i fenomeni ondulatori:

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{E} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

Equazione d'onda per il campo elettrico

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{H} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}$$

Equazione d'onda per il campo magnetico

Con un riferimento cartesiano x,y,z , supponendo un'onda piana ed analizzando per semplicità l'equazione relativa al campo elettrico con ipotesi di direzione di

propagazione lungo l'asse z e che il campo elettrico abbia componente solo lungo x (onda piana uniforme), l'equazione diventa:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}_x}{\partial z^2} = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}_x}{\partial t^2}$$

L'equazione del campo elettrico può essere scritta anche nel dominio della frequenza assumendo tale forma:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}_x}{\partial z^2} = -\omega^2 \varepsilon\mu \mathbf{E}_x$$

Cioè un'equazione differenziale di secondo grado, omogenea, a coefficienti costanti la cui soluzione generale ha la forma:

$$\mathbf{E}_x(z) = E_x^+ e^{-jkz} + E_x^- e^{jkz}$$

Dove:

- $v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$ è la velocità di propagazione dell'onda
- $k = \frac{\omega}{v} = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ $\left[\frac{1}{m}\right]$ è la costante di propagazione dell'onda

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

Analogamente possiamo determinare l'espressione del campo magnetico dell'onda piana uniforme, a partire dalla conoscenza del campo elettrico tramite l'equazione di Maxwell del rotore:

$$H_x(z) = H_y(z) = 0$$

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

Dove:

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

1.3 – Propagazione onde piane in mezzi con perdite

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

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

Dove:

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

Poiché γ è complessa, si può esprimere come $\gamma = \alpha + j\beta$, con α costante di attenuazione del mezzo e β costante di fase. Queste due costanti sono esprimibili come:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [\text{Np/m}] \quad (1.1)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu\varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad [\text{rad/m}] \quad (1.2)$$

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

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

ed ammette come soluzioni

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

Mentre il campo magnetico è

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

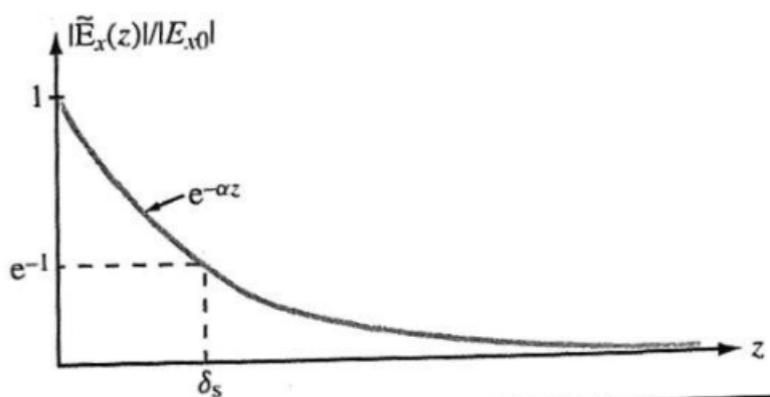
Dove $\eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma}$ rappresenta l'impedenza intrinseca del mezzo ed è una variabile complessa.

Dopo una certa distanza $z = \delta_s$ tale che

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

l'ampiezza dell'onda decrescerà di un fattore e^{-1} rispetto al suo valore in $z = 0$. Questa distanza δ_s è chiamata *spessore di penetrazione* del mezzo ed indica proprio quanto un'onda elettromagnetica può penetrare in un mezzo conduttore.

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



In un dielettrico perfetto si ha $\sigma = 0$ per cui anche $\alpha = 0$ e $\delta_s = \infty$, così nel vuoto un'onda piana può propagarsi senza perdite. Al contrario, se il mezzo è un conduttore con $\sigma = \infty$, l'utilizzo della ϵ'' nella (1.1) porta ad $\alpha = \infty$ e quindi $\delta_s = 0$.

Le espressioni (1.1) e (1.2), se il mezzo è un dielettrico perfetto in cui $\sigma = 0$, si riducono al caso senza perdite. Per un mezzo con perdite invece, appare in tutte le espressioni il rapporto $\frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ che gioca un ruolo importante per stabilire l'entità delle perdite.

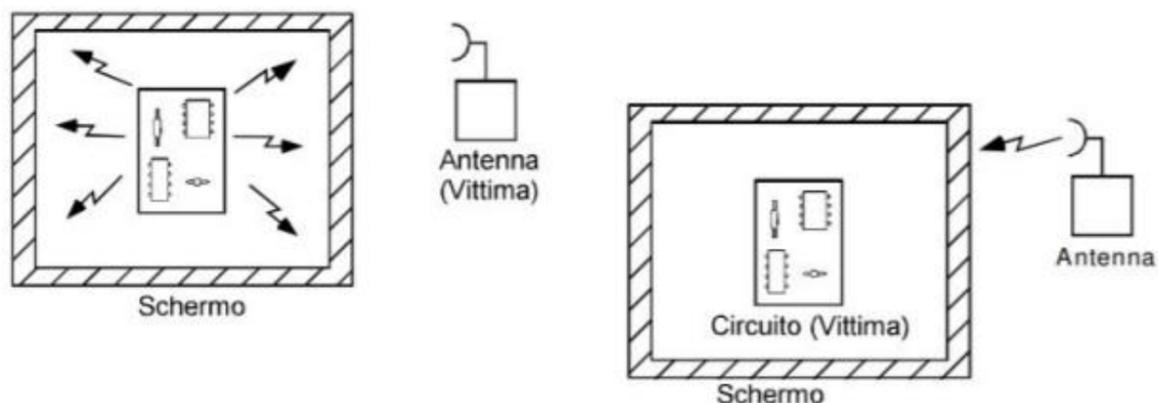
Se $\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \ll 1$ il mezzo è detto *dielettrico a basse perdite*, se invece $\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \gg 1$ il mezzo è definito come un *buon conduttore*.

CAPITOLO 2 – Schermi elettromagnetici

2.1 – Definizione di schermo elettromagnetico

Uno schermo elettromagnetico è una barriera alla trasmissione dei campi elettromagnetici, proprio per tale motivo si interpone tra un campo elettromagnetico, prodotto da una determinata sorgente e una zona dello spazio in cui si vuole impedire o limitare la sua azione.

Si è soliti riferirsi ad uno schermo come ad un involucro che racchiude completamente un apparato elettronico o anche solo una sua parte. Se all'interno dello schermo viene posizionato un apparato elettronico è possibile impedire che esso venga colpito da interferenze radiate. Allo stesso modo se l'apparato elettronico è posizionato esternamente allo schermo, possiamo evitare che il dispositivo preso in esame emetta dei disturbi danneggiando altri apparati. L'inserimento di uno schermo, però, non risulta sempre così facile, infatti, per avere l'efficacia ideale è necessario che il dispositivo elettronico, sia totalmente racchiuso al suo interno ed inoltre lo schermo non deve presentare vie d'accesso esterne come fori o aperture.



Uno schermo elettromagnetico costituisce dunque una barriera/contenitore che racchiude completamente o in parte una apparecchiatura elettromagnetica per limitare l'esposizione elettromagnetica.

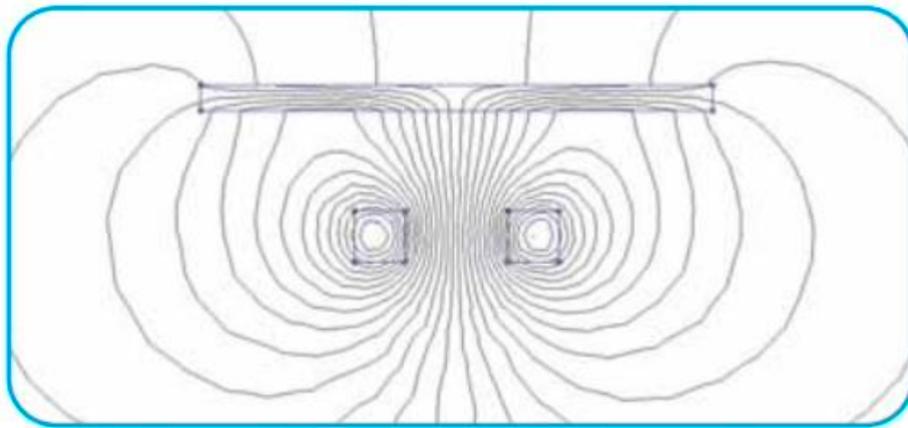
Realizzato solitamente con materiali metallici, lo schermo si differenzia in base alla tipologia della sorgente da schermare, con particolare riferimento alla frequenza dello spettro elettromagnetico generato dalla sorgente. Si distinguono in schermi a bassa frequenza (da 0 fino a 100kHz) e schermi ad alta frequenza (oltre i 100 kHz).

A bassa frequenza il campo elettrico e quello magnetico possono essere considerati come l'uno dipendente dall'altro; dunque, in questo caso le prestazioni dello schermo vengono determinate attraverso l'efficacia di schermatura, un parametro che analizzeremo in seguito. A frequenze elevate, invece, campo magnetico ed elettrico vanno considerati come due cose distinte; pertanto, l'efficacia di schermatura viene definita in termini di flusso di potenza.

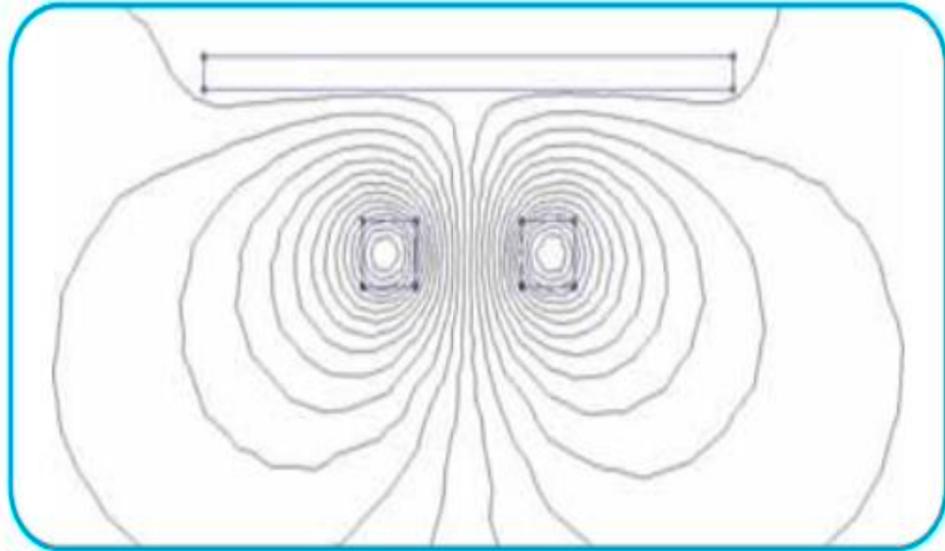
I principali materiali che vengono utilizzati per la schermatura di campi elettromagnetici sono:

- Materiali ad alta permeabilità magnetica;
- Materiali ad alta conducibilità elettrica.

Il materiale ad alta permeabilità magnetica permette l'abbattimento dell'induzione magnetica mediante l'assorbimento del campo magnetico presente. Il suo comportamento schermante simile ad un "ombrello" di protezione può essere molto intenso vicino allo schermo, tendendo poi a decadere allontanandosi dal medesimo.



Nel caso dello strato di materiale ad elevata conducibilità elettrica, il principio di funzionamento si basa sulla legge dell'induzione magnetica (Legge di Faraday), in presenza di un campo magnetico variabile (campo induttore) diventa sede di correnti di circolazione, le quali generano a loro volta un campo magnetico di reazione (campo indotto). L'effetto combinato dei campi, indotto e induttore, si traduce in un abbattimento complessivo del campo magnetico totale.



La combinazione dei due materiali, ferromagnetico e conduttivo, permette di realizzare uno schermo con ottime capacità schermanti, sia vicino allo schermo grazie alla parte ferromagnetica, sia lontano dallo schermo grazie a quella conduttiva.

Tra i vari materiali che possono essere utilizzati per la realizzazione di tale schermo troviamo: l'alluminio, l'acciaio inossidabile e una lega composta da entrambi.

L'utilizzo di alluminio e acciaio è più efficace per schermature a frequenza elevate, soprattutto nei confronti del campo elettrico.

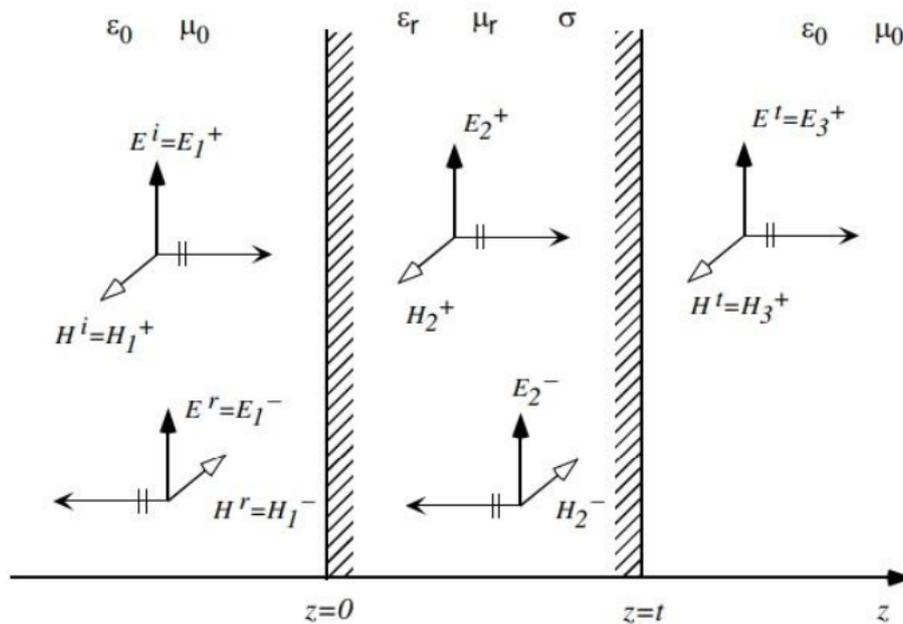
Alle basse frequenze, invece, è maggiormente indicato l'acciaio, grazie al suo elevato valore di permeabilità magnetica.

Per risolvere il problema della corrosione, che comporta un abbassamento della conducibilità dovuto alla formazione di uno strato di ossido, si proteggono le superfici mediante l'uso di vernici protettive o, nel caso dell'alluminio, con la tecnica dell'anodizzazione.

2.2 – Efficacia di schermatura

Per valutare numericamente la “bontà” di uno schermo elettromagnetico introduciamo l’efficacia di schermatura (Shielding Effectiveness), definita come il rapporto tra l’ampiezza del campo elettrico che si avrebbe in assenza dello schermo e l’ampiezza del campo elettrico che viene trasmesso attraverso lo schermo. Un’analoga definizione potrebbe essere data per i corrispondenti campi magnetici.

Per spiegare il principio di funzionamento di uno schermo, consideriamo l’esempio riportato nella figura sottostante:



Scomposizione dell’onda incidente su uno schermo metallico.

Nel primo mezzo (aria), con caratteristiche dielettriche ϵ_0 e μ_0 , è presente un campo incidente che viene in parte riflesso per la presenza dello schermo, ovvero il mezzo 2

con proprie caratteristiche dielettriche ϵ_r , μ_r e σ ed in parte trasmesso attraverso lo schermo. Nel secondo mezzo ci sarà quindi la presenza di un'onda diretta ed una riflessa mentre nel terzo mezzo (aria) ci sarà solo l'onda diretta.

Si verificano quindi tre fenomeni che contribuiscono alla diminuzione del campo incidente nel corso dell'attraversamento della barriera:

1. Riflessione che il campo incidente subisce colpendo la superficie esterna del mezzo 2 (metallico). Si presenta alla prima discontinuità aria-metallo;
2. Assorbimento del campo che è penetrato attraverso lo schermo, che dipende dalle caratteristiche del metallo di cui è costituito lo schermo;
3. Riflessioni multiple all'interno dello schermo stesso.

In formule, l'efficacia di schermatura può essere riscritta in relazione ai fenomeni appena descritti come segue:

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

dove R rappresenta la perdita dovuta alla riflessione, A quella dovuta all'assorbimento e M è il contributo dovuto alle riflessioni multiple. Il fattore di perdita per le riflessioni multiple M è un numero negativo, mentre gli altri due sono numeri positivi.

Se si suppone che la sorgente di campo sia posta ad una distanza tale per cui l'onda incidente possa essere considerata piana, i campi elettrico e magnetico possono essere espressi come:

- Nel mezzo 1 (aria):

$$\mathbf{E}_1(z) = E_1^+ e^{-jk_0 z} \mathbf{x} + E_1^- e^{jk_0 z} \mathbf{x} \quad \mathbf{H}_1(z) = \frac{E_1^+}{\eta_0} e^{-jk_0 z} \mathbf{y} + \frac{E_1^-}{\eta_0} e^{jk_0 z} \mathbf{y}$$

- Nel mezzo 2 (metallo con spessore t):

$$\mathbf{E}_2(z) = E_2^+ e^{-j\gamma_2 z} \mathbf{x} + E_2^- e^{j\gamma_2 z} \mathbf{x} \quad \mathbf{H}_2(z) = \frac{E_2^+}{\eta_2} e^{-j\gamma_2 z} \mathbf{y} + \frac{E_2^-}{\eta_2} e^{j\gamma_2 z} \mathbf{y}$$

- Mezzo 3 (aria) si ha solo campo trasmesso:

$$\mathbf{E}_3(z) = E_3^+ e^{-jk_0 z} \mathbf{x} \quad \mathbf{H}_3(z) = \frac{E_3^+}{\eta_0} e^{-jk_0 z} \mathbf{y}$$

Imponendo le condizioni di continuità all'interfaccia, cioè che le componenti tangenziali del campo elettrico e del campo magnetico siano uguali si ottiene:

$$E_1|_{z=0} = E_2|_{z=0} \quad \text{da cui} \quad E_1^+ + E_1^- = E_2^+ + E_2^-$$

$$H_1|_{z=0} = H_2|_{z=0} \quad \text{da cui} \quad \frac{E_1^+}{\eta_0} - \frac{E_1^-}{\eta_0} = \frac{E_2^+}{\eta_2} - \frac{E_2^-}{\eta_2}$$

$$E_2|_{z=t} = E_3|_{z=t} \quad \text{da cui} \quad E_2^+ e^{-j\gamma_2 t} + E_2^- e^{j\gamma_2 t} = E_3^+ e^{-jk_0 t}$$

$$H_2|_{z=t} = H_3|_{z=t} \quad \text{da cui} \quad \frac{E_2^+}{\eta_2} e^{-j\gamma_2 t} - \frac{E_2^-}{\eta_2} e^{j\gamma_2 t} = \frac{E_3^+}{\eta_0} e^{-jk_0 t}$$

Non esplicitando i vari passaggi analitici otteniamo la seguente espressione, la quale esprime il rapporto tra il campo incidente e quello trasmesso:

$$\frac{E^i}{E^t} = \frac{E_1^+}{E_3^+} = \frac{(\eta_0 + \eta_2)^2}{4\eta_0\eta_2} \left[1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta_2}{\eta_0 + \eta_2} \right)^2 e^{-2t/\delta} e^{-2jt/\delta} \right] e^{t/\delta} e^{jt/\delta} e^{-jk_0 t}$$

Quindi la SE in dB diventa:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\left| \frac{(\eta_0 + \eta_2)^2}{4\eta_0\eta_2} \right| \right) + 20 \log_{10} \left(\left| 1 - \left(\frac{\eta_0 - \eta_2}{\eta_0 + \eta_2} \right)^2 e^{-2t/\delta} e^{-2jt/\delta} \right| \right) + 20 \log_{10} (|e^{t/\delta} e^{jt/\delta} e^{-jk_0 t}|)$$

In questa espressione: il primo termine è relativo al contributo di riflessione R, il secondo termine alle riflessioni multiple M mentre l'ultimo termine al contributo di assorbimento A.

Inoltre, possiamo notare che se lo schermo è un buon conduttore ($\eta_0 \gg \eta_2$) e $t \gg \delta$ (dove δ è la profondità di penetrazione dell'onda nel metallo) allora M espresso in dB può essere trascurato, infatti:

- Se $t \gg \delta$ allora $M_{dB} \cong 0 \rightarrow$ fattore unitario nell'argomento del logaritmo
- Se $t \ll \delta$ allora $M_{dB} < 0 \rightarrow$ le riflessioni multiple riducono la SE dello schermo

2.3 – Analisi in frequenza della SE

Come visto precedentemente, l'efficacia di schermatura può essere vista come la composizione di soli due termini, uno relativo alla riflessione e uno relativo all'attenuazione:

$$SE_{dB} = R_{dB} + A_{dB} = 20 \log_{10} \left(\left| \frac{\eta_0}{4\eta_2} \right| \right) + 20 \log_{10} (|e^{t/\delta}|)$$

Poniamo ora tale equazione in funzione della frequenza:

L'impedenza intrinseca di un materiale con conducibilità σ elevata, ossia un buon conduttore, è data da:

$$\eta = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}} \sqrt{\frac{1}{1 + \omega\epsilon/\sigma}} \cong \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma}}$$

Con μ costante di permeabilità magnetica e ϵ permittività dielettrica.

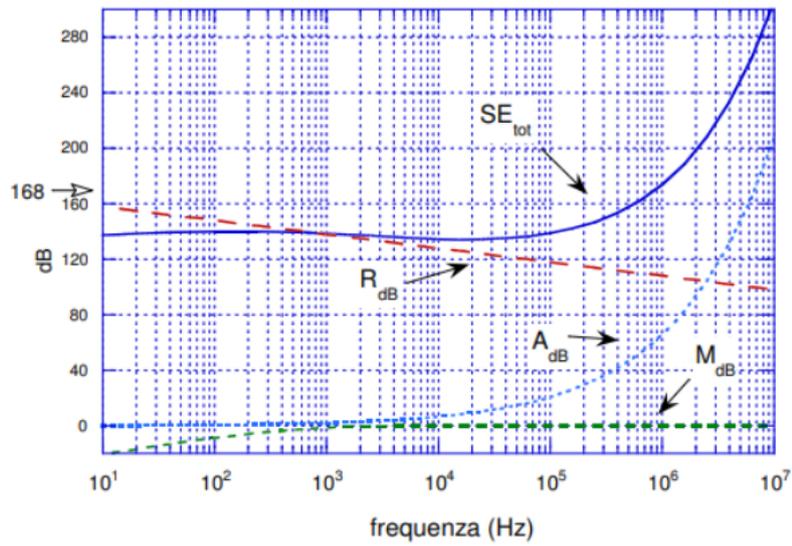
Possiamo quindi riscrivere la perdita per riflessione in questo modo:

$$R_{dB} = 20 \log_{10} \left(\left| \frac{\eta_0}{4\eta_2} \right| \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu_R\epsilon_0}} \right)$$

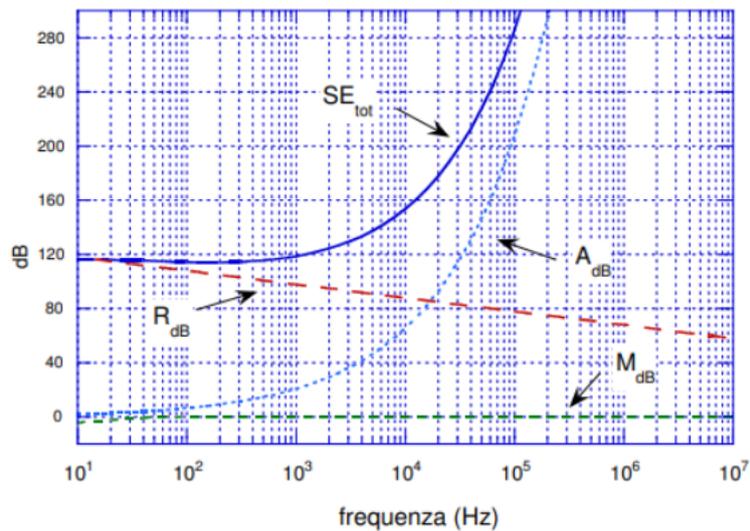
In questa equazione vengono usate: la relazione $\mu = \mu_0\mu_R$ per la permeabilità magnetica assoluta che viene scomposta nelle sue due componenti, a vuoto e relativa; la relazione $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ dell'impedenza intrinseca del vuoto.

Le perdite per assorbimento, invece, dipendono dalla profondità di penetrazione dell'onda elettromagnetica e dalla conducibilità.

Riportiamo qui sotto un grafico che descrive l'andamento dei due termini.



Si nota come in definitiva a bassa frequenza prevalgono le perdite per riflessione, mentre ad alta frequenza prevalgono quelle per assorbimento.



In questo secondo grafico è riportato l'andamento della SE per uno schermo di acciaio.

Il termine di riflessione in questo caso è importante solo fino a 20 kHz. Questo indica che le perdite per riflessione sono importanti a bassa frequenza sia per materiali ferrosi che non ferrosi. Ad alta frequenza i materiali ferrosi presentano una perdita per assorbimento maggiore e quindi una SE globalmente migliore.

2.4 – SE per un mezzo stratificato

2.4.1 – Analisi del vetro

AGC sta per *Asahi Glass Company* ed è azienda leader a livello mondiale per la produzione di vetro piano, specializzata nella produzione e nella lavorazione di vetro piano per l'edilizia, per quella automobilistica, per le applicazioni solari e per altre industrie specializzate.

La valutazione della SE è stata studiata sperimentalmente su di un campione di vetro composito soggetto ad onde piane.

Il vetro utilizzato è un vetro basso emissivo, ovvero a isolamento termico che permette di limitare la dispersione termica all'interno degli edifici, infatti, secondo l'azienda AGC, nelle abitazioni in media un quarto di calore viene disperso attraverso i muri e fino ad un 40% tramite le finestre.

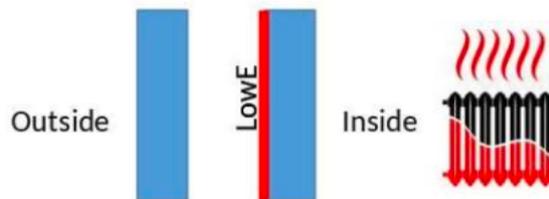
Questo tipo di vetro è stato appunto progettato per prevenire la dissipazione di calore verso l'ambiente esterno e viceversa. Questa proprietà del vetro viene ottenuta applicando su di esso un rivestimento termico costituito da strati di ossido di metallo (coating) che riduce notevolmente il trasferimento di calore. Questo rivestimento

risulta trasparente alle bande elettromagnetiche del visibile, ma risulta in grado di controllare le onde infrarosse che entrano ed escono da una stanza.

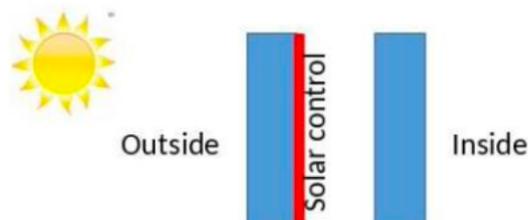
Individuiamo due tipi di rivestimento:

- *Rivestimenti Low-E* che sono stati progettati per trattenere il calore all'interno degli edifici in inverno e vengono posti sul lato interno del doppio vetro (DGU);
- *Rivestimenti solar control* (a controllo solare) sono stati progettati invece per limitare la quantità di calore solare che li attraversa in modo da mantenere l'ufficio più fresco in estate e per ridurre quindi il consumo di energia legato alla climatizzazione. Questo tipo di rivestimento viene posto sul lato esterno del doppio vetro.

Low E - keep heat inside



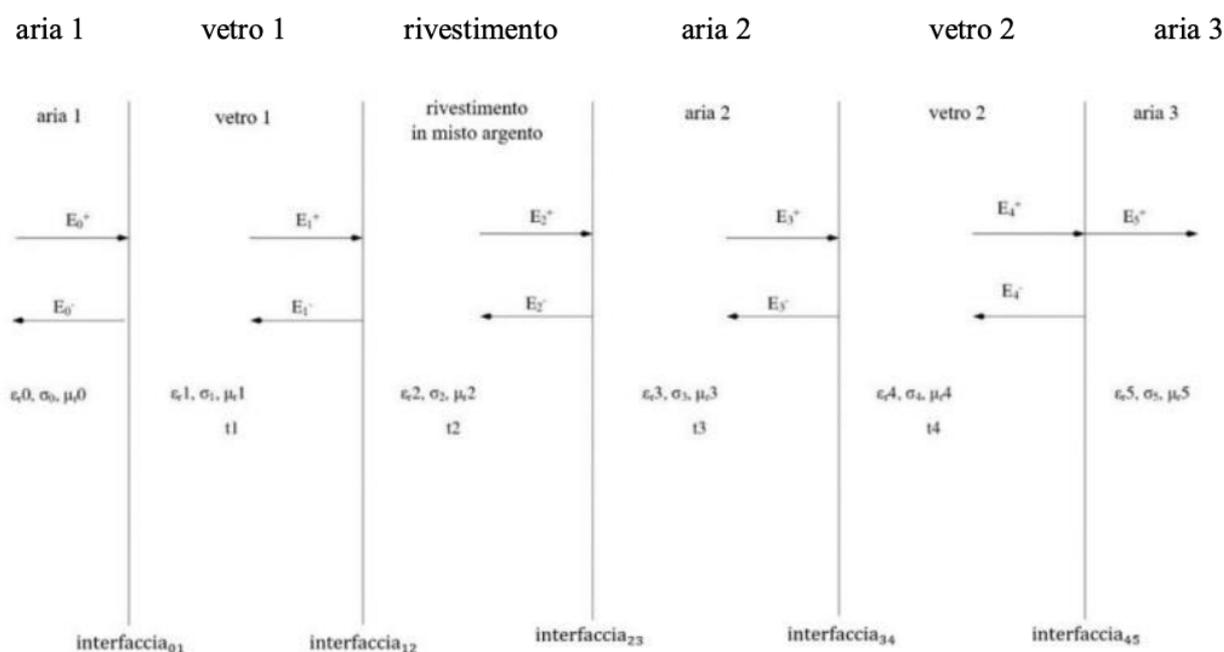
Solar control -avoid overhear inside building



L'utilizzo del doppio vetro (DGU) con rivestimento impedisce al segnale di entrare negli edifici, in particolare blocca la penetrazione delle onde radio al loro interno proprio perché è costituito da un rivestimento a base di metallo per l'isolamento termico. Una doppia vetrata con rivestimento attenua infatti il segnale di 30 dB, il che significa che solo lo 0,1% del segnale riesce a penetrare all'interno dell'edificio, mentre un vetro senza rivestimento riesce a far penetrare il 50% del segnale attenuandolo solo di 3 dB.

2.4.2 – Descrizione del modello

La vetrata è un'unità a doppio vetro e può essere assimilata ad uno schermo elettromagnetico multistrato come in figura:



Il primo strato rappresenta l'aria esterna all'edificio da cui parte un'onda elettromagnetica che incide normalmente, il segnale poi andrà ad incidere sui successivi strati che sono nell'ordine: lastra di vetro, rivestimento, lo strato di aria interposto tra i due vetri, una seconda lastra di vetro ed infine l'aria presente all'interno dell'edificio. Non essendoci un'interfaccia successiva a quella tra *vetro 2* e *aria 3*, nell'ultimo mezzo non si ha un'onda riflessa ma solo un'onda trasmessa.

L'efficacia di schermatura SE del multistrato può essere calcolata come:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\left| \frac{E_0^+}{E_5^+} \right| \right)$$

Dove E_0^+ è l'ampiezza del campo elettrico incidente sull'unità a doppio vetro mentre E_5^+ è l'ampiezza del campo che si propaga nell'aria (interno dell'edificio).

Di seguito riportiamo i valori delle ampiezze dei campi presenti negli stati intermedi:

- $E_0^+ = \frac{1}{\tau_{01}} (E_1^+ e^{j\gamma_1 t_1} + \Gamma_{01} E_1^- e^{-j\gamma_1 t_1})$ $E_0^- = \frac{1}{\tau_{01}} (\Gamma_{01} E_1^+ e^{j\gamma_1 t_1} + E_1^- e^{-j\gamma_1 t_1})$

Dove $\Gamma_{01} = \frac{\eta_1 - \eta_0}{\eta_1 + \eta_0}$ è il coefficiente di riflessione e $\tau_{01} = 1 + \Gamma$ il coefficiente di trasmissione.

- $E_1^+ = \frac{1}{\tau_{12}} (E_2^+ e^{j\gamma_2 t_2} + \Gamma_{12} E_2^- e^{-j\gamma_2 t_2})$ $E_1^- = \frac{1}{\tau_{12}} (\Gamma_{12} E_2^+ e^{j\gamma_2 t_2} + E_2^- e^{-j\gamma_2 t_2})$
- $E_2^+ = \frac{1}{\tau_{23}} (E_3^+ e^{j\gamma_3 t_3} + \Gamma_{23} E_3^- e^{-j\gamma_3 t_3})$ $E_2^- = \frac{1}{\tau_{23}} (\Gamma_{23} E_3^+ e^{j\gamma_3 t_3} + E_3^- e^{-j\gamma_3 t_3})$
- $E_3^+ = \frac{1}{\tau_{34}} (E_4^+ e^{j\gamma_4 t_4} + \Gamma_{34} E_4^- e^{-j\gamma_4 t_4})$ $E_3^- = \frac{1}{\tau_{34}} (\Gamma_{34} E_4^+ e^{j\gamma_4 t_4} + E_4^- e^{-j\gamma_4 t_4})$
- $E_4^+ = \frac{1}{\tau_{45}} (E_5^+ e^{j\gamma_5 t_5})$ $E_4^- = \frac{1}{\tau_{45}} (\Gamma_{45} E_5^+ e^{j\gamma_5 t_5})$

A partire da queste relazioni e assumendo che $E_5^+ = 1 \text{ V/m}$, si può ricavare l'ampiezza del campo incidente sull'unità a doppio vetro e quindi calcolare la SE:

$$E_0^+ = \frac{1}{\tau_{45} \tau_{34} \tau_{23} \tau_{12} \tau_{01}} E_5^+$$

CAPITOLO 3 – SE dei compositi cementizi

3.1 – Introduzione

Come abbiamo già accennato nei capitoli precedenti, l'efficacia schermante SE dipende fortemente dalle caratteristiche del campo, polarizzazione, angolo di incidenza, impedenza d'onda. Nelle situazioni di vita reale le pareti degli edifici sono eccitate in modo casuale, rendendo questo molto simile a quello che accade all'interno di una camera di riverberazione elettromagnetica (RC).

L'efficacia di schermatura SE dei compositi cementizi viene appunto analizzata mediante il metodo della camera di riverbero annidata. Questa caratteristica viene valutata in funzione del tempo al fine di stimare gli effetti dell'invecchiamento.

Successivamente andremo ad analizzare come misurare la SE all'interno di una RC per replicare questa situazione reale, nella quale verrà inserito un campione che sarà opportunamente eccitato.

Vengono considerate diverse miscele cementizie e inserite fibre carbonio/metalliche all'interno della malta per migliorare l'efficacia di schermatura, considerando la banda di frequenza da 0,8 GHz fino a 8,4 GHz.

Infine, presenteremo i risultati per concentrazione di diversi materiali di riempimento del calcestruzzo.

3.2 – Descrizione del metodo di misura

Il metodo di misura si basa sull'uso di una camera annidata in cui viene inserito il campione, situata all'interno di una più grande per eccitare il campione.

Prima di descrivere il metodo di misura, precisiamo che la SE delle pareti e degli ambienti può dipendere fortemente dalla polarizzazione dell'onda d'urto e dall'angolo di incidenza. D'altra parte, nelle situazioni di vita reale il segnale può arrivare senza una polarizzazione preferenziale e/o un angolo di arrivo, rendendo così priva di significato l'adozione di pochi casi nei test SE di laboratorio. L'adozione di una camera di riverberazione (RC) è una soluzione adatta perché crea un campo elettromagnetico statisticamente uniforme nel volume di lavoro, con una polarizzazione e un angolo di incidenza che sono equamente distribuiti tra tutti i valori possibili. Più precisamente, adottiamo il metodo della camera di riverbero annidata che è molto interessante per la caratterizzazione di campioni cementizi non piccoli rispetto alla lunghezza d'onda.

Il metodo è brevemente illustrato nella Figura 1.

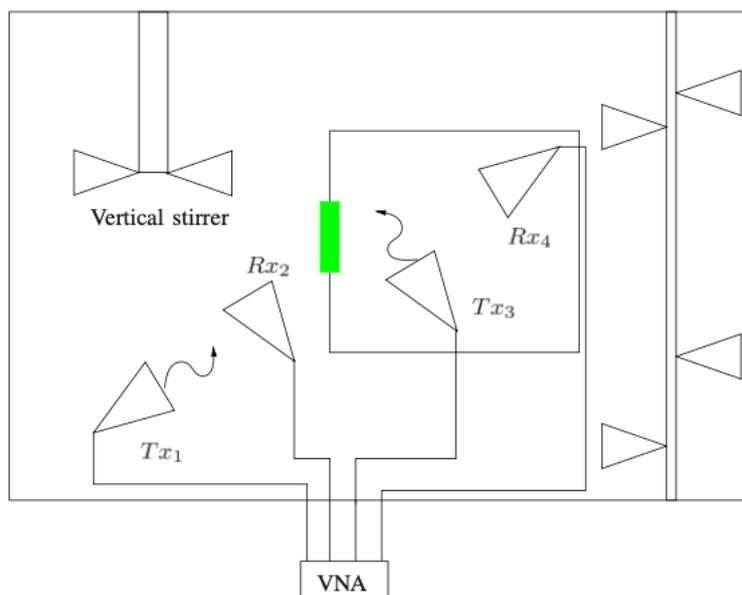


Figura 1.

La figura qui sopra rappresenta uno schizzo del set-up di misurazione.

Sono raffigurate le due camere (scatole nere), le antenne, gli agitatori e l'apertura (scatola verde).

Tx1 e Tx3 sono le antenne di trasmissione, mentre Rx2 e Rx4 rappresentano le antenne riceventi della camera interna e di quella esterna.

La camera esterna ha dimensioni $6.0 \times 4.0 \times 2.5$ metri cubi considerando che quella interna ha dimensioni $1.2 \times 0.9 \times 0.8$ metri cubi.

L'apertura della camera interna che permette l'accoppiamento tra le due camere ha dimensione 27×17 cm quadrati.

Il campione in esame (SUT) è montato su una grande apertura posta su una parete di una camera più piccola, anche se ben riverberante, situata all'interno di una camera più grande Figura 2. In questo modo il SUT è illuminato da un campo statisticamente casuale, e l'energia che passa attraverso il campione rappresenta la fonte per il campo all'interno della RC interna.



Figura 2.

Le quattro antenne permettono di acquisire i parametri di scattering (S_{ij}) dove la i indica le antenne riceventi, la j indica invece le antenne di trasmissione.

Il campo all'interno delle due RC può essere agitato mediante palette rotanti o mediante un'agitazione di frequenza se per motivi di praticità non è consentita l'adozione di una paletta rotante nella camera più piccola. Un analizzatore di rete vettoriale a quattro porte (VNA) è impiegato per misurare i coefficienti di trasmissione tra la camera esterna e quella interna e il coefficiente di trasmissione tra le antenne in ciascuna camera utile per tenere conto delle variazioni del fattore di qualità dovute all'energia assorbita dall'SUT.

Il valore SE corretto può essere quindi rappresentato tramite questa equazione:

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

Trattandosi di misure in RC, questa formula, rispetto alla precedente tiene conto di come il campione fa variare il fattore di merito delle due camere.

Dove $\langle . \rangle$ denota una media insieme sulla banda di frequenza agitazione (FSB), “su” indica “sample unmounted” (campione non montato), mentre invece “sm” denota “sample mounted” (campione montato).

Abbiamo studiato una gamma di frequenze che va da 0,8 GHz a 8,4 GHz, con un passo di frequenza di 250 kHz. L'FSB adottato è di 100 MHz. L'analisi statistica è stata effettuata considerando 9 posizioni dell'agitatore ed entrambi gli agitatori (verticali e orizzontali) sono stati utilizzati in modo sincrono.

3.3 – Preparazione e montaggio dei campioni

Mixture (g/l)	Reference	#A	#B	#C	#D	#E
CEM I 52.5 R	500	680	270	500	500	500
Silica sand 115	680	680	680	680	680	680
Silica sand 105	270	270	270	270	270	270
Calcium oxide	–	40	40	40	–	–
Water	264	264	264	264	220	220
Graphene oxide (GO)	–	–	50	–	–	–
Carbon fibers	–	–	–	–	4	–
Metallic fibers	–	–	–	–	—	150

Tabella 1.

Sono state studiate sei diverse miscele: una malta di riferimento e altre cinque con aggiunta di ossido di calcio, ossido di grafene (GO), fibre di carbonio o fibre di acciaio. Le proporzioni di materiali utilizzati nella composizione della miscela sono elencate nella Tabella 1. Cemento misto commerciale Portland-calcare tipo CEM I 52.5 R secondo le norme europee EN-197/1 e, come aggregato, due tipi di sabbia silicea (dimensioni delle particelle di 0 - 1 mm e 0,5 - 1,5 mm) sono stati utilizzati.

In alcune miscele sono state aggiunte particelle GO con l'ausilio di vibrazioni ultrasoniche per ottenere la soluzione acquosa GO uniformemente dispersa. Le particelle GO sono state fornite da Garmor Inc. La loro produzione è ottenuta macinando polveri di grafite con un agente ossidante utilizzando condizioni che ottimizzano le forze di taglio e minimizzano le forze di collisione. La dimensione

nominale delle particelle, come indicato dal fabbricante, deve essere compresa tra 500 nm e 800 nm di diametro. Nella Miscela E sono state aggiunte fibre di acciaio (lunghezza 12 mm e diametro 0,16 mm) mentre nella Miscela D sono state utilizzate fibre di carbonio corte con lunghezza media di 6 mm.

Particolare attenzione è stata posta durante l'aggiunta delle fibre, per evitare problemi di agglomerazione (vedi Figura 3).



Figura 3.

Il posizionamento e l'orientamento tra le fibre (metalliche/carbonio) assumono un comportamento casuale, cioè non presentano un telaio geometrico/fisso all'interno dei compositi. Dopo la preparazione, il SUT è stato posto su una struttura metallica con dimensioni interne pari a $260 \times 160 \times 30$ mm cubi (Figura 4).



Figura 4.

Questo supporto ci consente di facilitare il contatto tra la malta e il telaio metallico e di garantire un buon contatto del campione sull'apertura. A tal fine, viene utilizzato un telaio multi-foro per forzare il campione sopra l'apertura. Il campione è stato curato in laboratorio (20° C, 70% RH) per 28 giorni prima della prova.

Un esempio del campione finale ottenuto è riportato nella Figura 5 sotto riportata, dove è visibile anche il supporto del campione pronto per il montaggio.



Figura 5.

CAPITOLO 4 – Risultati

È stata valutata l'efficacia di schermatura per diversi SUT, come riportato nella Tabella 1 sopra rappresentata, ed è stata inoltre valutata a intervalli regolari, con la prima misurazione effettuata dopo 4 settimane dalla sua fabbricazione.

Il processo di essiccazione è stato effettuato a temperatura ambiente, evitando così un tempo di essiccazione troppo breve per il cemento, il quale potrebbe essere causa di una rapida diminuzione della proprietà meccanica del cemento.

La figura 6 rappresenta e sottolinea il confronto dell'efficacia di schermatura dei campioni analizzati.

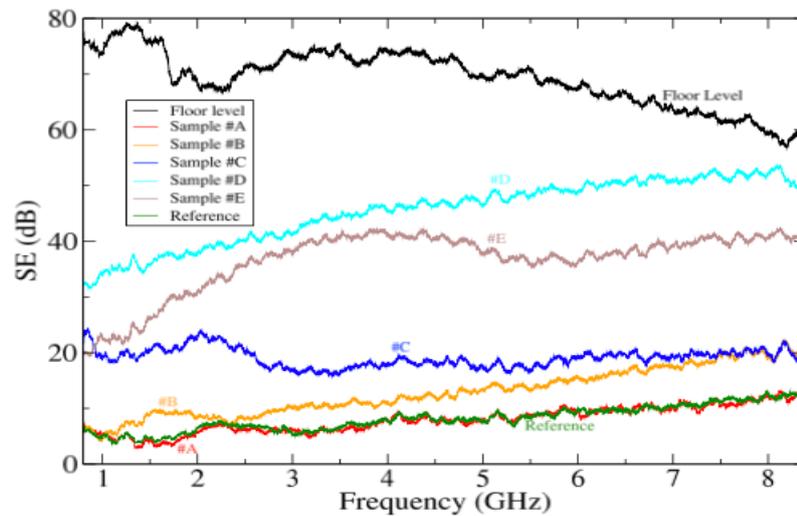


Fig. 6. Shielding effectiveness of the analyzed samples.

La curva nera indica la SE massima raggiungibile in questa campagna di misurazione, ottenuta coprendo l'apertura mediante un foglio di alluminio, come già visto in Figura 4. L'aggiunta di fibre metalliche migliora la SE della malta, ma l'uso di fibre di carbonio garantisce la massima SE. Più precisamente, le fibre di carbonio presentano un impatto maggiore per la valutazione SE, fino a 50 dB oltre 5 GHz, fornendo un impatto minore sul peso del campione.



Fibre metalliche usate nei campioni.

Il campione GO (#B) ha un SE più alto a bassa frequenza (massimo 20 dB) rispetto al riferimento e ai campioni #A, #B. L'aggiunta di ossido di calcio nei campioni #A non migliora le proprietà elettromagnetiche (SE), infatti esibisce la stessa SE del campione di riferimento.

Le Figure 7, 8, 9, 10, 11 mostrano il trend di invecchiamento dei SUT.

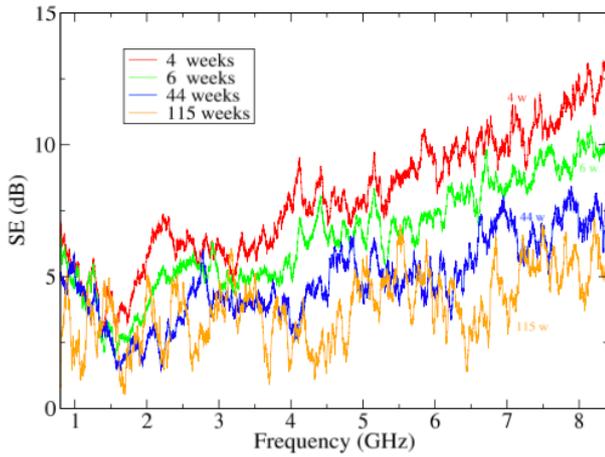


Fig. 7. Shielding effectiveness aging of the sample #A. The first evaluation was done after 4 weeks.

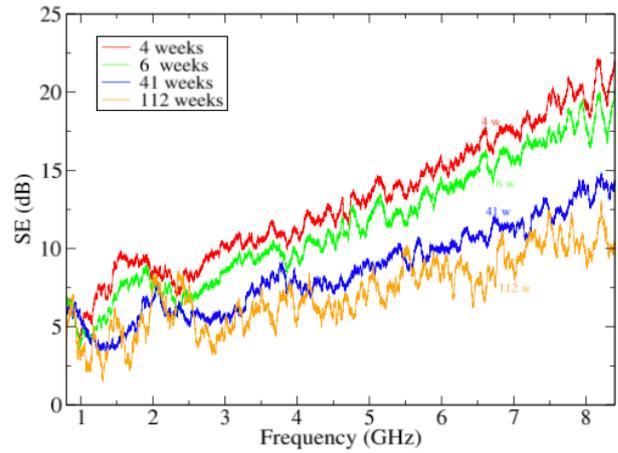


Fig. 8. Shielding effectiveness aging of the sample #B. The first evaluation was done after 4 weeks.

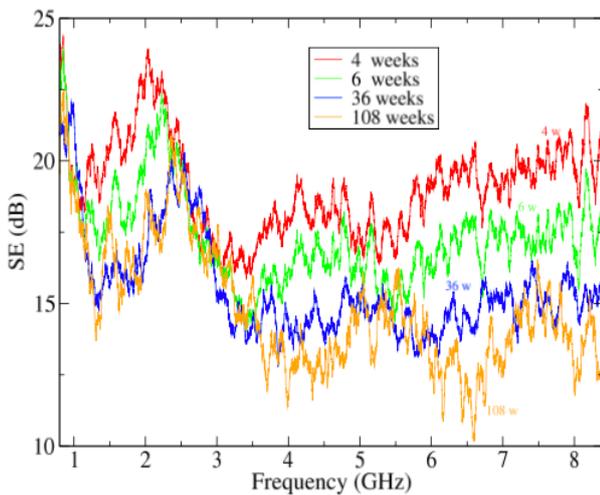


Fig. 9. Shielding effectiveness aging of the sample #C. The first evaluation was done after 28 days.

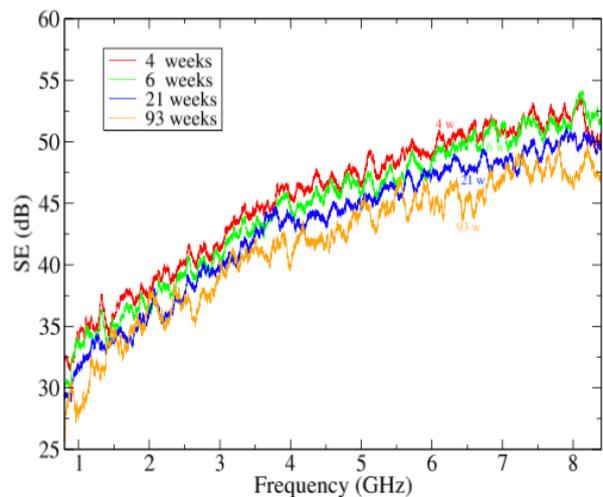


Fig. 10. Shielding effectiveness aging of the sample #D. The first evaluation was done after 28 days.

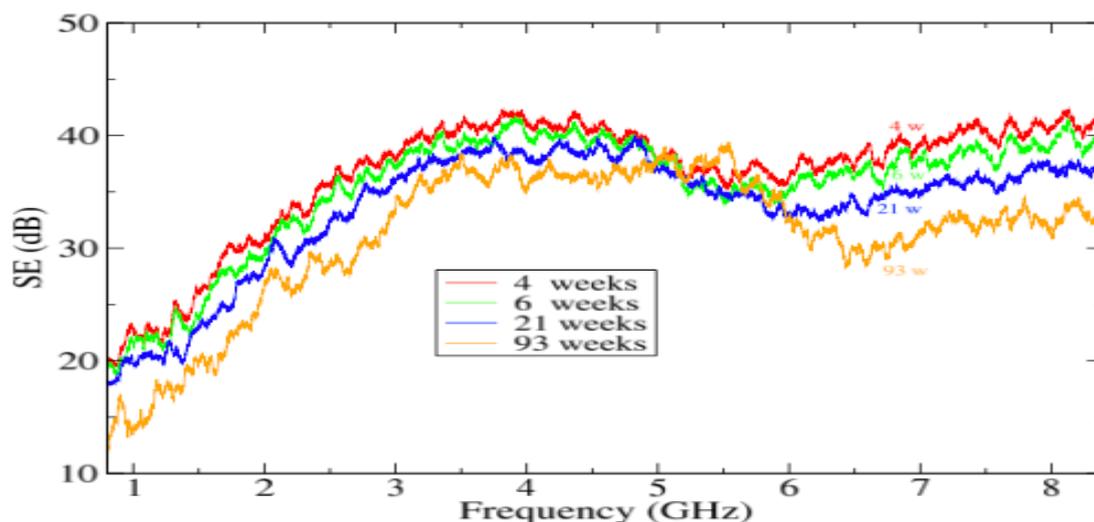


Fig. 11. Shielding effectiveness aging of the sample #E. The first evaluation was done after 28 days.

Possiamo notare che il SE diminuisce in funzione del tempo. In particolare, dopo 4 settimane dalla sua creazione. In seguito, non ci sono abbassamenti significativi del SE fino a 40 settimane.

Mantenendo le misurazioni possiamo notare una continua diminuzione della SE. Questo effetto potrebbe essere spiegato considerando due fenomeni.

Prima di tutto, il processo di essiccazione determina un minore contenuto di acqua nella miscela che riduce progressivamente la polarizzabilità all'interno del composito causando meno valori di proprietà dielettriche efficaci (permittività e perdita tangente). Inoltre, il processo di essiccazione degrada il contatto tra la malta e il telaio metallico adottato per il suo montaggio, migliorando così l'effetto di perdita intorno al bordo del campione.

Altri fattori ambientali possono influenzare l'area di contatto, ad esempio la dilatazione termica nel sito esposto al sole. Quest'ultimo aspetto merita un'ulteriore indagine perché potrebbe rappresentare un problema pratico quando molti campioni sono uniti insieme per fare una grande parete o quando i compositi sono collegati ai telai metallici

di finestre e porte schermate. Oltre alle tecniche di montaggio appropriate, anche la scelta della forma del porta campioni ondulato potrebbe aiutare a controllare le lacune di contatto. Al momento le misurazioni recenti sono state effettuate a una distanza di 106 settimane dalla creazione dei campioni.

CAPITOLO 5 – Conclusioni

Il sistema di misurazione è stato adottato per analizzare l'invecchiamento dei campioni cementizi in termini di efficacia di schermatura (SE).

L'adozione della tecnica della camera di riverbero (RC) annidata consente una valutazione statistica per la SE mediante un'eccitazione casuale.

Il progressivo restringimento dell'essiccazione della malta può aver causato una riduzione della qualità dell'interfaccia tra malta e telaio metallico e quindi una minore efficacia di schermatura, la quale risulta ben visibile dopo molto tempo dalla creazione di campioni cementizi.

L'aggiunta di fibre metalliche, distribuite casualmente all'interno della miscela, migliora la SE e nel frattempo riesce a mantenere un peso accettabile dell'intero campione.

Per quanto riguarda, invece, il risultato dell'analisi dei vetri stratificati abbiamo già visto ampiamente nell'introduzione e nel capitolo 2, gli effetti che hanno in termini di schermatura elettromagnetica.

Le attività future riguarderanno lo studio dell'impatto del processo di essiccazione sul contatto tra la malta e i telai metallici, un problema che potrebbe avere implicazioni nell'unire i campioni per formare grandi pareti o per collegarlo con serramenti metallici.

Bibliografia

- Tesi di Lisa Trovarelli, *“Un codice python per l’ottimizzazione di uno schermo elettromagnetico stratificato per ridurre al minimo l’esposizione umana.”*
- Tesi di Eleonora Bianchi, *“Minimizzazione dell’esposizione elettromagnetica tramite schermi stratificati con un codice in Python.”*
- Tesi di Ilaria Hoxhalli, *“Sviluppo di un codice in Python per l’ottimizzazione dell’efficacia di schermatura di materiali stratificati.”*
- Tesi di Niccolò Raniero Costarelli, *“Sviluppo di un codice in Python per l’analisi di schermi stratificati con incidenza obliqua e polarizzazione normale.”*
- Moglie Franco, *dispense del corso Fondamenti di Elettromagnetismo, univpm.*
- Fawwaz T. Ulaby, *Fondamenti di campi elettromagnetici.*
- C. L. Holloway, D. A. Hill, J. Ladbury, G. Koepke, and R. Garzia, “Shielding effectiveness measurements of materials using nested reverberation chambers,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 45, no. 2, pp. 350–356, May 2003.
- L. Bastianelli, V. Mariani Primiani, F. Moglie, J. Donnini, A. Mazzolli, V. Corinaldesi, G. Gradoni, and D. Micheli, “Experimental analysis of the aging effects on shielding effectiveness of cementitious composites,” in 2018 IEEE Symp. Electromagn. Compat. and Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI PI), Long Beach, CA, USA, Jul. 2018, pp. 71–75.
- Moglie Franco, Primiani Mariani Valter, Bastianelli Luca, 2021, articolo *“Shielding effectiveness Controlling of Coated Glass Assembly in Mobile and Positioning GPS Frequency Bands.”*