



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Validazione elettromagnetica di tamponature con accumulo elettrico integrato

Leonardo Sandrolini e Mattia Simonazzi

Report RdS/PTR2021/136

Validazione elettromagnetica di tamponature con accumulo elettrico integrato

Leonardo Sandrolini e Mattia Simonazzi (Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione "Guglielmo Marconi", DEI)

Con il contributo di: Fabiani Davide, Palmieri Fabrizio – Università di Bologna

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto 1.5: - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti

Work package 3: Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici

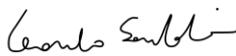
Linea di attività 3.20: Verifiche elettromagnetiche sperimentali

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Ing. Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Caratterizzazione elettromagnetica di tamponature per edilizia con accumulo energetico integrato"

Responsabile scientifico: prof. Leonardo Sandrolini



Responsabile scientifico ENEA: ing. Marcello Artioli

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	10
2.1 PRINCIPI DI SCHERMATURA.....	10
2.1.1 <i>Efficienza di schermatura</i>	10
2.1.2 <i>Parametri di scattering</i>	10
2.2 MISURE SPERIMENTALI	11
2.2.1 <i>Misura sul singolo prototipo di tamponatura: allestimento setup di misura e misura della dinamica</i>	11
2.2.2 <i>Misura sul singolo prototipo di tamponatura: misura della SE del Prototipo 1</i>	16
2.2.3 <i>Misura sul singolo prototipo di tamponatura: risultati delle misure sul Prototipo 1</i>	19
2.2.4 <i>Misura sul singolo prototipo di tamponatura: misura della SE del Prototipo 2</i>	20
2.2.5 <i>Misura sul singolo prototipo di tamponatura: risultati delle misure sul Prototipo 2</i>	22
2.2.6 <i>Misura sulla parete modulare: allestimento setup di misura e misura della dinamica</i>	23
2.2.7 <i>Misura sulla parete modulare: esecuzione delle misure</i>	25
2.2.8 <i>Misura sulla parete modulare: risultati delle misure</i>	26
2.2.9 <i>Discussione dei risultati delle misure sul singolo prototipo di tamponatura: Prototipo 2</i>	27
2.2.10 <i>Discussione dei risultati delle misure sulla parete modulare</i>	28
3 CONCLUSIONI	29
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	29
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	30
6 APPENDICE.....	30

Sommario

L'attività di ricerca ha riguardato l'individuazione, la definizione e la messa a punto di un setup sperimentale (comprendente la strumentazione necessaria, la configurazione di prova e le modalità di esecuzione della prova) per la validazione elettromagnetica delle tamponature con accumulo elettrico integrato, consistente nella misura dell'efficienza di schermatura della tamponatura e di una parete modulare ottenuta assemblando più tamponature. Le misure eseguite hanno consentito di validare il modello elettromagnetico della tamponatura messo a punto nell'ambito dell'attività LA3.19 del presente progetto. Le misure dell'efficienza di schermatura sul singolo prototipo di tamponatura sono state eseguite con riferimento alla normativa IEEE Std 299:2006, mentre quelle sulla parete modulare con riferimento al rapporto NIST "Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials" del 1997. Le misure sono state eseguite tra 800 MHz e 3.6 GHz sia con una coppia di antenne log-periodiche sia con una coppia di antenne horn. Per la maggiore direttività, si sono scelti come riferimento i risultati delle misure ottenute con la coppia di antenne horn. Il confronto dell'efficienza di schermatura misurata con quella calcolata mediante le simulazioni elettromagnetiche eseguite nell'ambito della LA3.19 mostra andamenti simili per quanto riguarda in particolare la polarizzazione verticale delle antenne. Inoltre, i valori ottenuti sperimentalmente sono compatibili con quelli ottenuti dalle simulazioni. Il basso valore di SE, specialmente per frequenze maggiori di 1.5 GHz, può essere giustificato considerando che sono presenti spazi tra l'involucro dell'accumulatore KEMET e la struttura contenitiva della tamponatura (che non presenta caratteristiche schermanti). Infine, all'interno dell'accumulatore il condensatore non occupa interamente il volume. Tutti questi spazi rappresentano aperture in cui il campo elettromagnetico alle frequenze considerate può penetrare efficacemente, da cui i bassi valori di efficienza di schermatura riscontrati.

1 Introduzione

L'attività di ricerca ha riguardato l'individuazione, la definizione e la messa a punto di un setup sperimentale per la validazione elettromagnetica delle tamponature con accumulo elettrico integrato, consistente nella misura delle prestazioni schermanti della tamponatura, ovvero dell'efficienza di schermatura (SE), definita nella prossima sezione, e di una parete modulare ottenuta da più tamponature assemblate. Poiché esistono molte tecniche di prova per valutare le prestazioni di schermatura di guarnizioni, materiali per finestre e altre configurazioni di sistema progettati per fornire una schermatura, nella prima fase della ricerca è stato condotto uno studio dello stato dell'arte al fine di individuare i metodi e le tecniche di misura più adatte per la caratterizzazione elettromagnetica delle tamponature dal punto di vista schermante.

La ricerca bibliografica svolta ha consentito di mettere in evidenza alcune tipologie di metodi di misura principalmente considerati in letteratura: metodi di misura per campioni piani di materiale di piccole dimensioni [1]–[4], metodi di misura per involucri e contenitori [5]–[8] e metodi di misura per materiali da costruzione (mattoni, calcestruzzo, cemento armato, pannelli di legno truciolare e massello, vetri) [9]. I metodi di misura per involucri e contenitori sono stati anche adattati per la misura di campioni planari di materiale di grandi dimensioni [10]–[14]. In generale, molte misure di efficienza di schermatura sono note per la loro mancanza di ripetibilità e la loro difficoltà di confronto tra un'installazione e l'altra. Alcune di queste discrepanze possono essere attribuite alla tecnica di prova, altre all'elemento in prova. Molti fattori, quali le condizioni di accoppiamento delle superfici e l'applicazione di diverse coppie di serraggio agli elementi di fissaggio possono influenzare notevolmente la ripetibilità delle misure SE.

I metodi di misura per campioni piani di materiale di piccole dimensioni fanno uso di celle coassiali a sezione circolare composte di due flange tra le quali viene collocato un campione sottile del materiale da valutare. Una delle due flange viene collegata a un generatore di segnale, mentre l'altra a uno strumento ricevitore. La misura della SE consiste in due fasi: in una prima fase viene eseguita la misura detta di "riferimento" in cui un campione del materiale, sagomato a forma di corona circolare e di piccolo disco, viene collocato tra le flange in modo che siano coperte solo le flange e il conduttore interno, lasciando così libero lo spazio tra il conduttore interno e il conduttore esterno della cella coassiale; in una seconda fase si esegue la misura cosiddetta di "carico" disponendo tra le flange un campione del materiale a forma di disco, di diametro grande quanto il diametro esterno delle flange. I setup di misura per le misure di riferimento e di carico sono mostrati in Fig. 1. La misura della SE è data dalla differenza tra le potenze ricevute nella misura di riferimento e nella misura di carico. Tuttavia, i metodi di misura di questo tipo non sono applicabili alla tamponatura con accumulo elettrico integrato oggetto di indagine, mostrata in Fig. 2 nelle due implementazioni fornite da ENEA, che presenta uno sviluppo tridimensionale non trascurabile (le dimensioni dell'involucro contenitivo sono 26.9 cm x 15.5 cm x 21.7 cm).

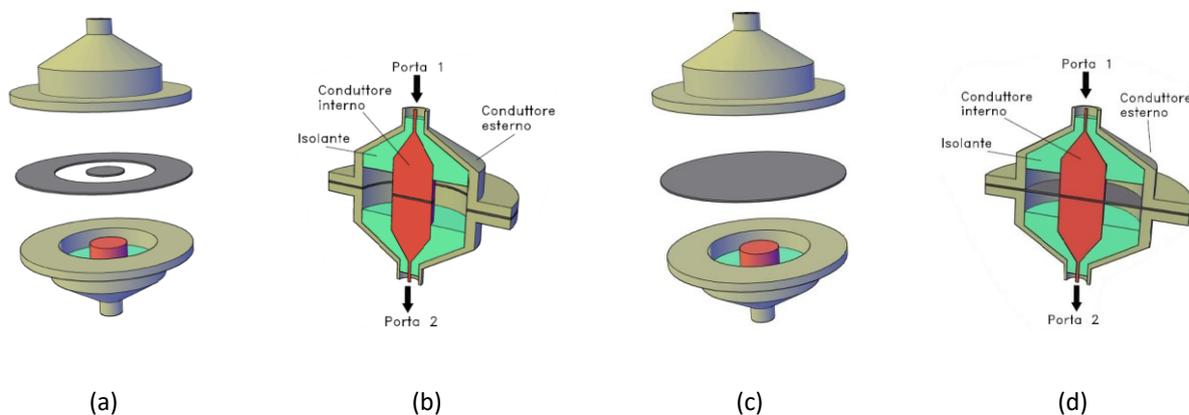


Fig. 1. Setup di prova del tipo ASTM D4935:2018: vista esplosa (a) e vista assemblata (b) della cella di prova per la misura di "riferimento"; vista esplosa (c) e vista assemblata (d) della cella di prova per la misura di "carico".



Fig. 2. Prototipo di blocco accumulatore con struttura contenitiva e tubolari metallici a sezione quadrata per assemblaggio. a) Prototipo 1: struttura contenitiva in legno compensato, b) Prototipo 2: struttura contenitiva in fibre di canapa.

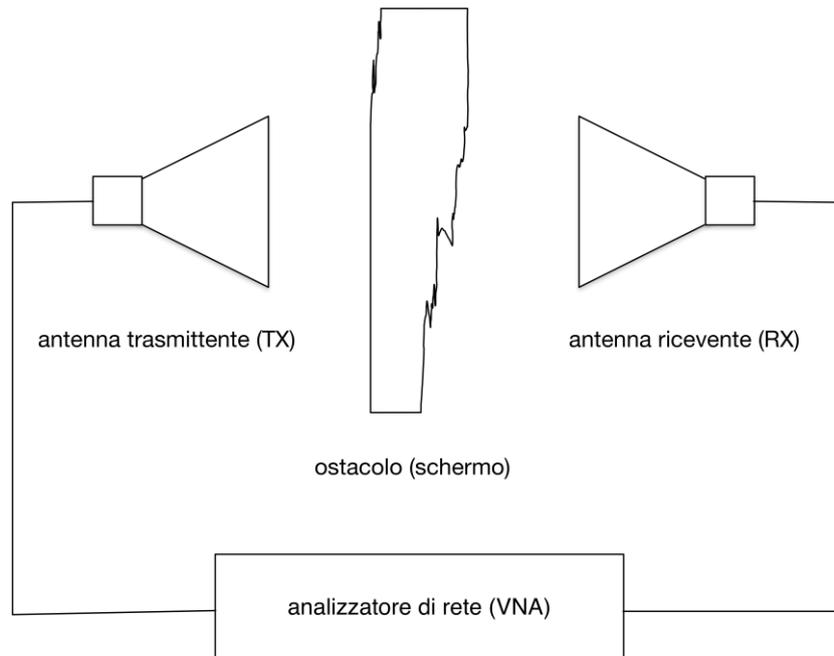


Fig. 3. Schema di principio di un sistema per la misura delle prestazioni di uno schermo.

L’attenzione è stata così incentrata sui metodi di misura per involucri e contenitori e su quelli per materiali da costruzione. Tipicamente, i metodi di questo tipo fanno uso di due antenne, una trasmittente (TX) e una ricevente (RX), e una misura di SE consiste nel confronto tra il campo elettromagnetico misurato in una certa regione di spazio con e senza la schermatura in esame in posizione. Uno schema di principio per la misura di SE è mostrato in Fig. 3. Un’antenna TX viene usata per generare nell’intervallo di frequenze di interesse un campo elettromagnetico, che viene ricevuto da un’antenna RX posta dalla parte opposta dello schermo (ostacolo) in esame. Si può così caratterizzare lo schermo in termini della “perdita di inserzione” causata dallo stesso frapposto tra l’antenna TX e quella RX. Una tecnica di questo tipo è descritta in [9], rapporto del NIST (National Institute of Standards and Technology), ente di ricerca americano con sede a Boulder, Colorado, USA. In questo documento la tecnica è applicata alla misura della SE di materiali da costruzione (mattoni, calcestruzzo, cemento armato, pannelli di legno truciolare e massello, vetri) aventi differenti caratteristiche e composizione fino alla frequenza di 8 GHz. Il campione del materiale da costruzione da testare (blocco o porzione di “muro” di dimensioni tipiche 1 m x 1 m x 30 cm circa) viene collocato su una struttura di supporto

formata da una piattaforma orizzontale, sostenuta da piedi e fissata mediante bracci a una lastra quadrata di alluminio di lato 2.5 m e di spessore 3 mm mantenuta in posizione verticale. La lastra di alluminio svolge la funzione di schermo elettromagnetico totale impedendo la propagazione del campo elettromagnetico. Al centro della lastra è presente una finestra quadrata di circa 90 cm di lato allo scopo di consentire la propagazione indisturbata del campo elettromagnetico dall'antenna TX a quella RX quando il campione da testare non è collocato sulla piattaforma orizzontale. La struttura di supporto è realizzata in modo che il campione di materiale da costruzione, una volta in posizione sulla piattaforma orizzontale, si trovi quindi a occludere la finestra nella lastra di alluminio rappresentando così un ostacolo alla propagazione del campo elettromagnetico tra le antenne TX e RX. In questo modo si può eseguire la misura di SE del campione.

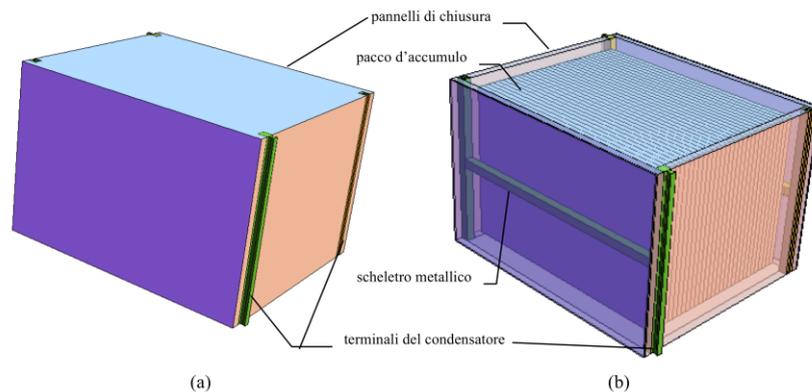


Fig. 4. Blocco accumulatore (a) con guscio in trasparenza per evidenziare il sistema di assemblaggio (b).



Fig. 5. Prototipo 2 della tamponatura con contenitore in fibra di canapa non completo: particolare dell'accumulatore elettrico all'interno della struttura contenitiva e dei tubolari metallici per assemblaggio.

Il prototipo di tamponatura con accumulo elettrico integrato in esame prevede un sistema di assemblaggio visibile nel modello mostrato in Fig. 4 e nella foto di Fig. 5 relativa al Prototipo 2; mediante tale sistema i blocchi accumulatore possono essere collegati tra loro a formare una parete modulare ad accumulo del tipo di quella mostrata in Fig. 6, ove sono rappresentati blocchi collegati in modo sfalsato. Alcune foto del processo di assemblaggio delle tamponature a formare una parete sono mostrate in Fig. 7. La parete modulare mostrata in Fig. 7 c) ha dimensioni 90 cm x 62 cm e pesa circa 35–40 kg.

La tecnica di misura illustrata in [9] si presenta quindi adatta per la valutazione della SE di un sistema modulare di questo tipo. Nella prima fase dell'attività, a causa dei ritardi nella realizzazione e fornitura dei prototipi di tamponatura con sistema di accumulo elettrico integrato, dovuta anche alla situazione

pandemica da COVID-19, si è potuto disporre per le prove di un unico prototipo del blocco accumulatore (Prototipo 1). È stato quindi necessario definire e mettere a punto una tecnica di misura da applicare ad un solo campione di tamponatura. Si è quindi elaborata una procedura di misura con caratteristiche intermedie tra quelle descritte in [5] e in [9]. In particolare, la normativa IEEE Std 299:2006 [5] si applica alla misura della SE alle onde elettromagnetiche di involucri e contenitori e può essere impiegata anche per la misura della SE di campioni di materiale piani di grandi dimensioni.

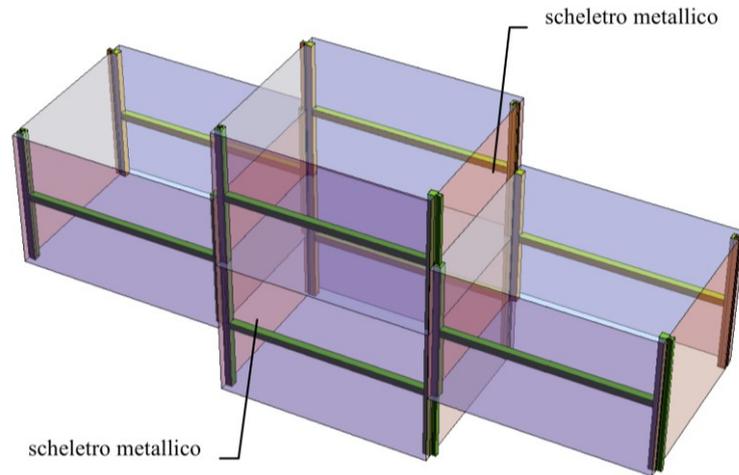


Fig. 6. Parete modulare ad accumulo composta da alcuni blocchi accumulatore assemblati.



(a)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7. Assemblaggio delle tamponature: a) prototipi di blocco accumulatore, b) assemblaggio dei blocchi, c) blocchi accumulatore completi e assemblati, d) parete modulare con pannello di protezione.

Nel metodo di misura descritto in [5] si impiega una cella schermata, generalmente cubica, con un'apertura rettangolare (finestra) su una delle facce. All'interno della cella viene posizionata un'antenna (in questo caso ricevente, RX), collegata alla porta di ingresso di un analizzatore di rete (Vector Network Analyzer, VNA) e all'esterno una antenna (in questo caso trasmittente, TX), collegata alla porta di uscita del VNA e allineata all'antenna RX. Come nel metodo di misura descritto in [9], la finestra ha lo scopo di consentire la propagazione indisturbata del campo elettromagnetico dall'antenna TX a quella RX quando il materiale da testare non è presente. Posizionando successivamente il campione di materiale in modo da ostruire l'apertura, è possibile misurare la perdita di inserzione causata dallo stesso nella propagazione del campo elettromagnetico tra le antenne TX e RX. Il setup di misura descritto nella [5] è mostrato in Fig. 8. La distanza tra le antenne, tra le antenne e l'apertura e l'intervallo di frequenze in cui viene eseguita la misura sono scelti per ricreare le condizioni il più possibile prossime a quelle di un'onda piana uniforme per il campo elettromagnetico incidente sull'apertura (ovvero distanza tra antenne e apertura di alcune lunghezze d'onda).

Generalmente, il campione di materiale piano viene fissato su una flangia che viene poi fissata a sua volta sulla finestra della cella schermata. Si è quindi pensato di procedere allo stesso modo per eseguire le misure sulla tamponatura, realizzando un'apposita flangia che avesse anche funzione di supporto per la tamponatura.

Successivamente, nell'ultimo periodo di attività si è potuto disporre della parete modulare formata dai blocchi accumulatore assemblati mostrata in Fig. 7 c), pertanto l'attività di ricerca è stata completata con le misure della SE della parete secondo la procedura illustrata in [9]. In luogo di una parete schermante con un'apertura come in [9] si è invece utilizzata la camera schermata presso il laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica LACEM del Dipartimento DEI, sfruttando come finestra una delle aperture per ventilazione presenti su una delle pareti della camera.

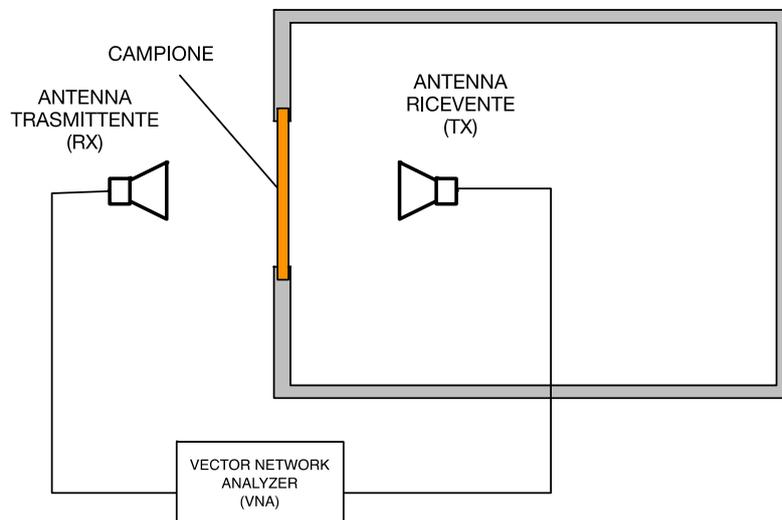


Fig. 8: Setup di misura secondo la normativa STD IEEE 299:2006 [5].

La definizione del setup ha riguardato anche la definizione della strumentazione necessaria, delle configurazioni di prova e delle modalità di esecuzione della prova. Le misure eseguite hanno consentito di validare il modello elettromagnetico della tamponatura messo a punto nell'ambito dell'attività LA3.19 del presente progetto.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Principi di schermatura

2.1.1 Efficienza di schermatura

Con il termine schermo si indica genericamente una barriera alla trasmissione dei campi elettromagnetici avente lo scopo di limitare il disturbo elettromagnetico che interessa una determinata regione di spazio [15], [16]. Lo schermo può avere una configurazione chiusa, come un contenitore, oppure aperta, come una lastra o una guarnizione, a seconda che separi completamente la regione in cui è attiva la sorgente da quella in cui è presente la vittima [17]. La struttura dello schermo può essere inoltre continua oppure presentare aperture che ne degradano in generale le prestazioni.

Le prestazioni di uno schermo sono indicate dall'efficienza di schermatura (SE), che è una quantità funzione della frequenza ed è normalmente espressa in decibel. In condizioni quasi stazionarie (generalmente, a bassa frequenza) il campo magnetico e il campo elettrico devono essere considerati separatamente, cioè

$$SE_{H,dB} = 20\log_{10} \frac{H_0}{H_1} \quad (1)$$

oppure

$$SE_{E,dB} = 20\log_{10} \frac{E_0}{E_1} \quad (2)$$

ove H_0 , E_0 sono le ampiezze rispettivamente del campo magnetico ed elettrico in un punto dello spazio in assenza di schermo, e H_1 , E_1 le ampiezze rispettivamente del campo magnetico ed elettrico nello stesso punto dello spazio in presenza di schermo. Da questa definizione segue che la SE è una grandezza positiva, perché il campo in assenza di schermo deve essere più grande del campo in presenza di schermo. Inoltre, le (1) e (2) mostrano che esistono due definizioni per la SE a seconda che si consideri il campo magnetico o il campo elettrico. Quando l'ipotesi di quasi stazionarietà non è più soddisfatta (ovvero, a frequenza elevata) il campo magnetico e il campo elettrico sono correlati, pertanto le (1) e (2) coincidono e le due definizioni di SE possono essere riunite in un'unica definizione in termini di flusso di potenza:

$$SE_{dB} = 20\log_{10} \frac{P_0}{P_1} \quad (3)$$

ove P_0 e P_1 sono rispettivamente la potenza in un punto dello spazio in assenza e in presenza di schermo.

2.1.2 Parametri di scattering

Le potenze che compaiono nella (3) possono essere agevolmente misurate con un analizzatore di rete scalare o vettoriale. Utilizzando un analizzatore di rete vettoriale a due porte (una di uscita e una di ingresso), è possibile misurare i parametri di scattering (o parametri S) che descrivono il comportamento di un qualsiasi doppio bipolo collegato tra le due porte del VNA. I parametri S sono espressi in termini delle potenze entranti e uscenti nelle porte del doppio bipolo secondo le seguenti relazioni:

$$\hat{S}_{11} = \frac{\hat{b}_1}{\hat{a}_1} \Big|_{\hat{a}_2=0} \quad (4)$$

$$\hat{S}_{22} = \frac{\hat{b}_2}{\hat{a}_2} \Big|_{\hat{a}_1=0} \quad (5)$$

$$\hat{S}_{21} = \frac{\hat{b}_2}{\hat{a}_1} \Big|_{\hat{a}_2=0} \quad (6)$$

$$\hat{S}_{12} = \frac{\hat{b}_1}{\hat{a}_2} \Big|_{\hat{a}_1=0} \quad (7)$$

ove \hat{a}_1, \hat{a}_2 sono le potenze entranti rispettivamente nella porta 1 e nella porta 2 del doppio bipolo e \hat{b}_1, \hat{b}_2 le potenze uscenti rispettivamente dalla porta 1 e dalla porta 2 del doppio bipolo. I parametri S assumono pertanto il seguente significato: \hat{S}_{11} e \hat{S}_{22} rappresentano i coefficienti di riflessione rispettivamente alla porta 1 e alla porta 2, mentre \hat{S}_{21} e \hat{S}_{12} i coefficienti di trasmissione rispettivamente dalla porta 1 alla porta 2 e dalla porta 2 alla porta 1. Nella Fig. 9 sono rappresentati i parametri S per un generico bipolo.

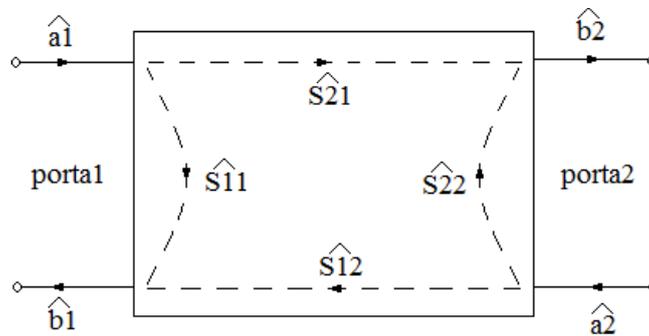


Fig. 9. Parametri di scattering per un doppio bipolo.

In una misura di SE, il doppio bipolo rappresenta lo schermo in prova, mentre le potenze P_0 e P_1 della (3) sono le ampiezze della potenza \hat{b}_2 rispettivamente in assenza e in presenza dello schermo. In particolare, si può indicare con \hat{b}_2^0 la potenza ricevuta mediante l'antenna RX in assenza di schermo, mentre con \hat{b}_2^1 la potenza ricevuta in presenza di schermo; inoltre, \hat{a}_1 è la potenza trasmessa dall'antenna TX, che rimane la stessa sia in assenza sia in presenza di schermo. In altre parole, mediante un VNA si possono misurare direttamente i coefficienti di trasmissione \hat{S}_{21} in assenza e in presenza dello schermo, la cui differenza costituisce la SE dello schermo. Infatti:

$$S_{21,dB}^0 = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{b}_2^0}{\hat{a}_1} \right| \quad (8)$$

$$S_{21,dB}^1 = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{b}_2^1}{\hat{a}_1} \right| \quad (9)$$

da cui si può ottenere la SE per differenza:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left| \frac{\hat{b}_2^0}{\hat{b}_2^1} \right| = S_{21,dB}^0 - S_{21,dB}^1 \quad (10)$$

2.2 Misure sperimentali

2.2.1 Misura sul singolo prototipo di tamponatura: allestimento setup di misura e misura della dinamica

Per le misure di SE della tamponatura si è quindi deciso di procedere seguendo la procedura indicata nella normativa IEEE Std 299:2006 [5] utilizzando la cella schermata cubica in dotazione al laboratorio LACEM, realizzata in acciaio AISI 304 e avente dimensioni 1 m x 1 m x 1.1 m. Poiché l'apertura sulla parete frontale della cella (mostrata in Fig. 10) avente dimensioni 55 cm x 45 cm risulta molto più grande delle dimensioni larghezza x altezza (26.9 cm x 15.5 cm) della tamponatura, è stato necessario realizzare un'apposita flangia

con un'apertura più piccola. Si è deciso di realizzare una finestra delle stesse dimensioni *larghezza x altezza* della tamponatura in una flangia di spessore sufficiente a mantenere in posizione la tamponatura collocata nell'apertura senza necessità di ulteriori supporti da fissare alla flangia. Si è così scelta una lamiera di acciaio dello spessore di 3 mm, quindi adeguatamente rigida per sostenere un peso della tamponatura di circa 3 kg. Come antenne si sono utilizzate due coppie di antenne identiche: una coppia di antenne log-periodiche EMCTEST (frequenza di utilizzo 850 MHz – 6.5 GHz, guadagno 6 dBi) e una coppia di antenne horn Q-par Angus Ltd (frequenza di utilizzo 2 – 18 GHz, guadagno da 7 a 13 dBi), mostrate rispettivamente in Fig. 11 e in Fig. 12. Come da schema di Fig. 8, per generare la tensione sinusoidale da applicare all'antenna TX e per misurare la tensione ricevuta dall'antenna RX è stato utilizzato un unico strumento, ovvero un analizzatore di rete (VNA) Advantest R3763B (frequenza di utilizzo 300 kHz – 3.6 GHz).

Le misure sono state eseguite inizialmente sul prototipo di tamponatura mostrato in Fig. 2 a) e poi ripetute sul prototipo di tamponatura mostrato in Fig. 2 b), impiegato nella realizzazione della parete modulare.

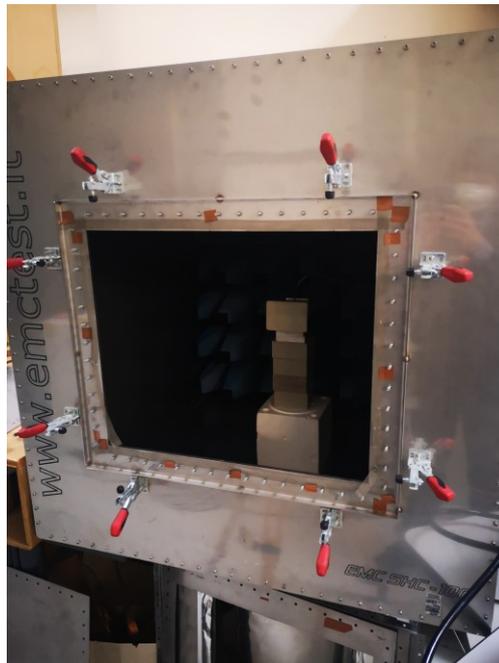
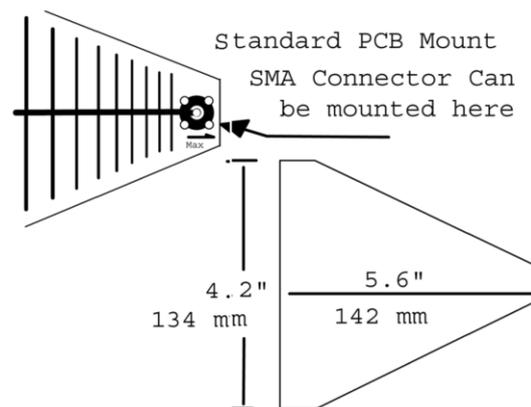


Fig. 10. Apertura (finestra) sulla parete frontale della cella schermata.



(a)



(b)

Fig. 11. Foto dell'antenna log-periodica utilizzata nelle misure di SE (a) con relative dimensioni (b).

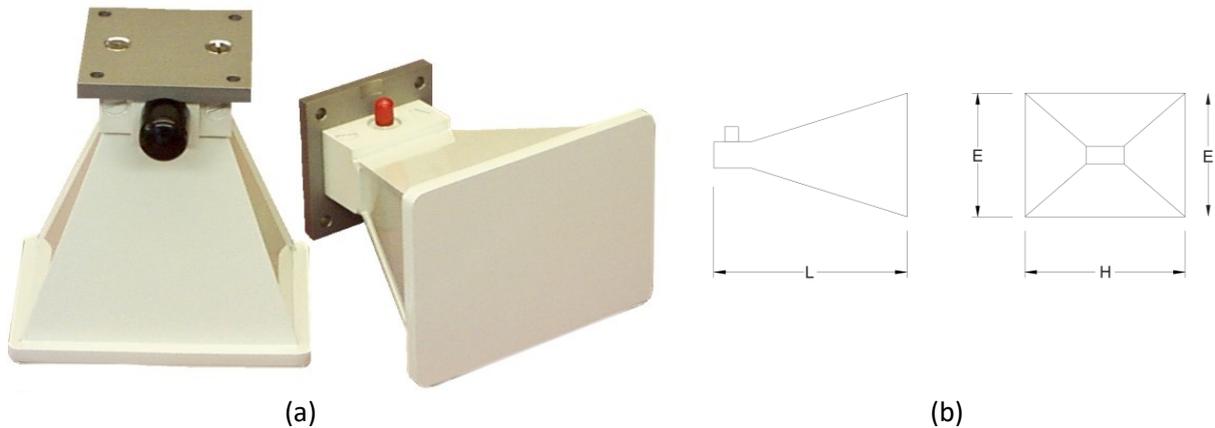


Fig. 12. Foto dell'antenna horn utilizzata nelle misure di SE (a) con relative dimensioni: $L=119$ mm, $E=86$ mm, $H=119$ mm (b).

In Tabella 1 si elencano marche, modelli e descrizione degli strumenti e degli accessori utilizzati per le misure.

Tabella 1. Strumentazione impiegata per le misure.

Marca	Modello	Descrizione
Advantest	R3763B	Analizzatore di rete vettoriale
EMCTEST	PCB-LP	Antenna log-periodica 850 MHz – 6.5 GHz
Q-PAR Angus	WBH2-18S	Antenna Horn 2-18 GHz
EMCTEST	EMC-SHC-100	Shield box per test di SE
Huber-Suhner	Sucoflex 104A	Cavi coassiali N(m)-N(m) – 1.5 metri
Berlebach	Mulda	Treppiede con supporto dielettrico
Stanley	SLL360	Livella laser per allineamento antenne
		Metro
Apple	MacBook Pro	Computer portatile
National Instruments	LabView 15	Software acquisizione dati
National Instruments	GPB-USB-HS	Interfaccia GPIB-USB per acquisizione dati
Huawei	P20	Fotocamera digitale integrata nello Smartphone

Considerando l'intervallo di frequenza di impiego delle antenne, e quello di funzionamento del VNA, descritti in Tabella 1, le misure sono state condotte tra 800 MHz e 3.6 GHz. Per l'acquisizione dei dati è stato impiegato il software LabView [18] per il controllo del VNA. Uno screenshot del software Labview e il relativo schema a blocchi sono invece mostrati nelle Fig. 13 e Fig. 14.

Preliminarmente alle misure è stata valutata la dinamica del sistema di misura (ovvero il minimo segnale misurabile) nelle due configurazioni (antenne log-periodiche e antenne horn) considerate. Per la configurazione con antenne log-periodiche si è adottata una polarizzazione orizzontale delle stesse, mentre per la configurazione con antenne horn si è misurata la dinamica sia per la polarizzazione orizzontale che per quella verticale. L'allestimento del sistema di misura è mostrato nella Fig. 15 per la configurazione con antenne log-periodiche e in Fig. 16 per la configurazione con antenne horn in polarizzazione verticale.

La misura della dinamica è stata eseguita misurando l'accoppiamento tra le antenne log-periodiche con finestra della cella aperta (vedi Fig. 10), ottenendo così il parametro $S_{21, dB}^0$, e ripetendo la misura dopo avere

chiuso la finestra della cella con una flangia costituita da un pannello di acciaio (vedi Fig. 15), ottenendo il parametro $S_{21, dB}$. La dinamica del sistema è rappresentata quindi dalla SE ottenuta con la (10). Analogamente si è proceduto con la coppia di antenne horn in polarizzazione orizzontale e verticale.

I risultati delle misure sono mostrati rispettivamente in Fig. 17 per la configurazione con antenne log-periodiche e nelle Fig. 18 e Fig. 19 per le configurazioni con antenne horn in polarizzazione orizzontale e verticale, rispettivamente. La dinamica risulta superiore a circa 40 dB (valori medi) per la configurazione con antenne log-periodiche e a circa 45-50 dB (valori medi) nell'intervallo specificato di utilizzo delle antenne. I valori di dinamica riscontrati sono stati ritenuti sufficienti per la misura della SE della tamponatura e pertanto non si è ritenuto di aumentare la dinamica inserendo nella catena di misura un preamplificatore ad alto guadagno.

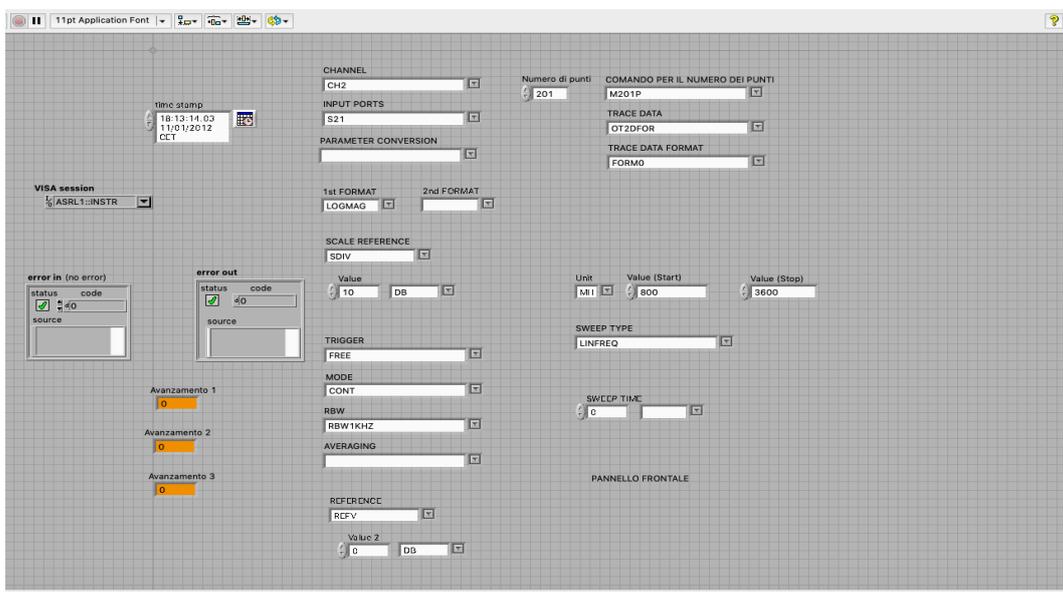


Fig. 13. Screenshot del software LabView per l'acquisizione dati dal VNA.

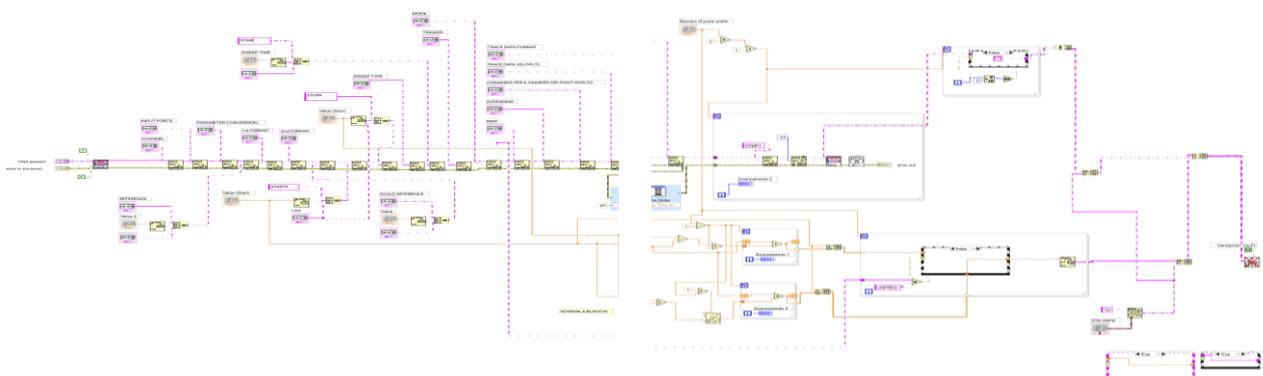


Fig. 14. Schema a blocchi del software LabView per l'acquisizione dati dal VNA.

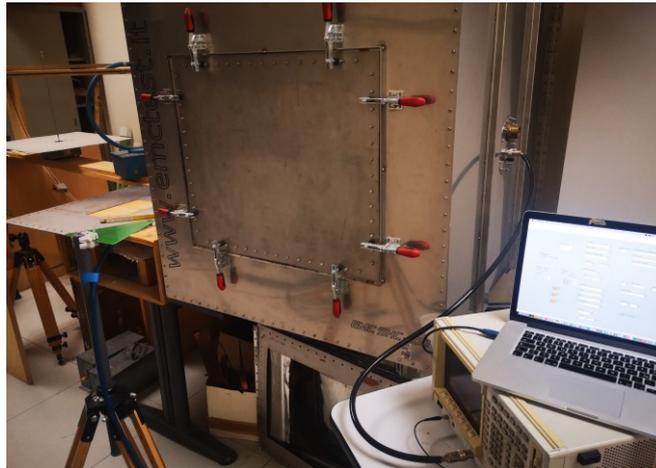


Fig. 15. Apertura (finestra) sulla parete frontale della cella schermata chiusa con flangia di acciaio completa per la misura della dinamica. È visibile anche il VNA usato per la misura.



Fig. 16. Apertura (finestra) sulla parete frontale della cella schermata chiusa con flangia di acciaio per la misura della dinamica con antenne horn in polarizzazione verticale.

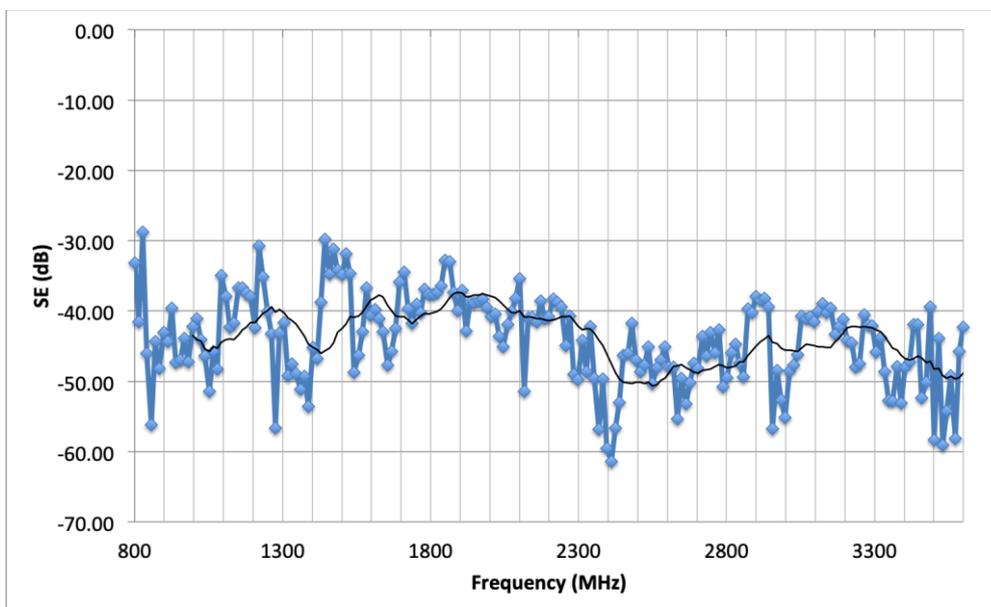


Fig. 17. Dinamica della cella schermata con antenne log-periodiche in polarizzazione orizzontale. In nero è rappresentata la media mobile delle misure a partire da 1 GHz.

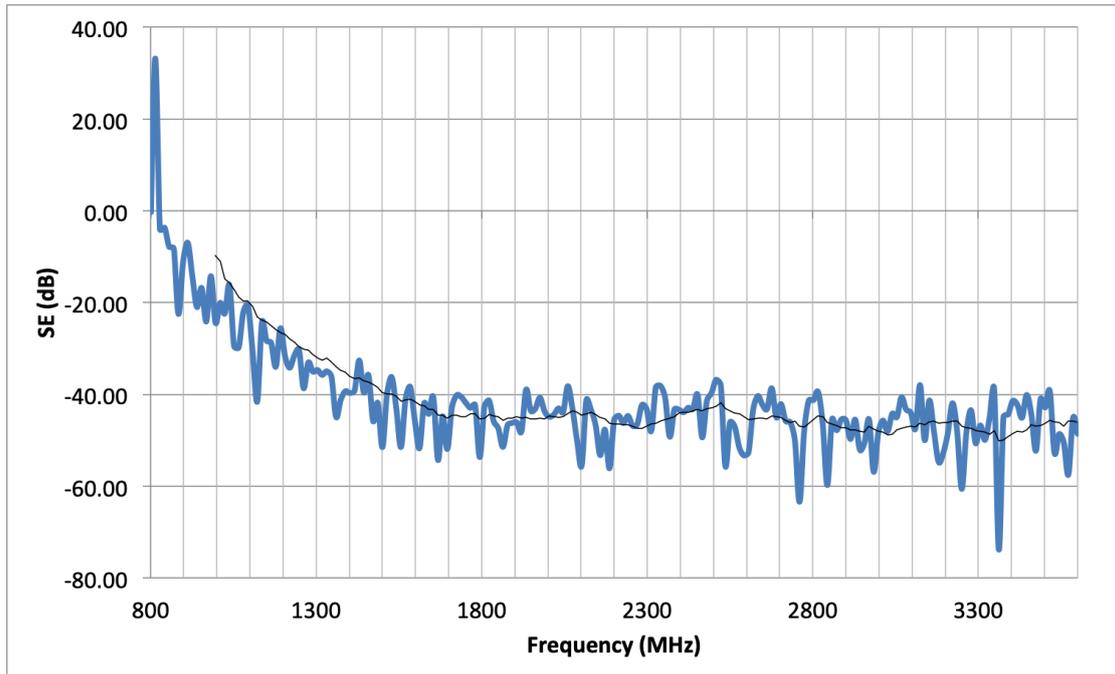


Fig. 18. Dinamica della cella schermata con antenne horn in polarizzazione orizzontale. In nero è rappresentata la media mobile delle misure a partire da 1 GHz.

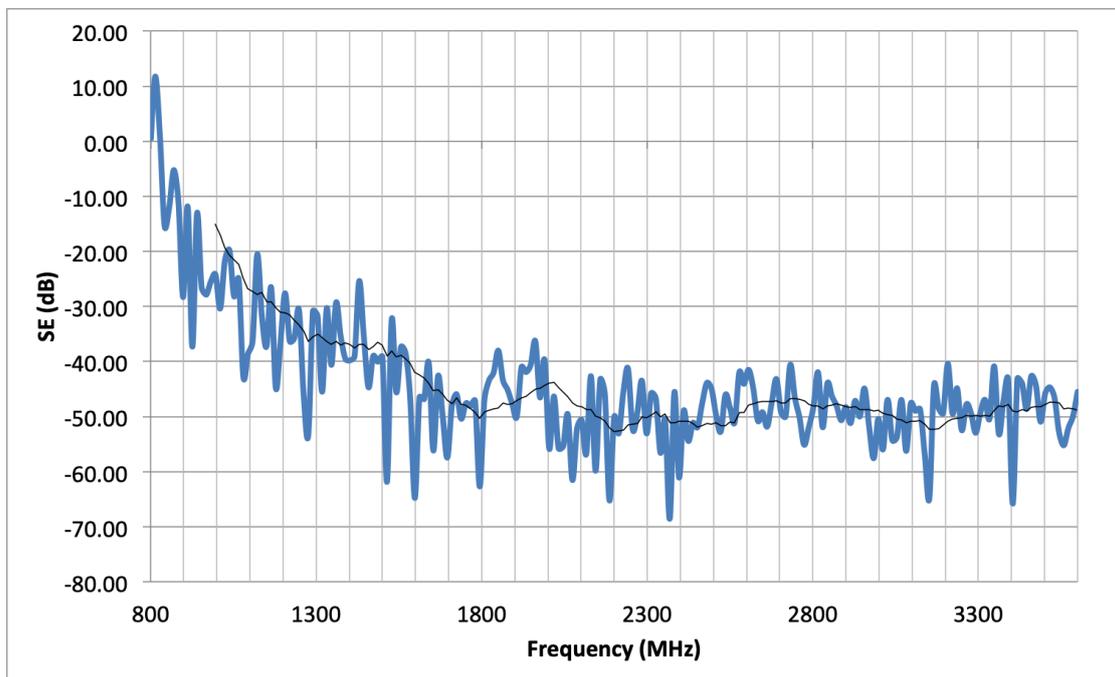


Fig. 19. Dinamica della cella schermata con antenne horn in polarizzazione verticale. In nero è rappresentata la media mobile delle misure a partire da 1 GHz.

2.2.2 Misura sul singolo prototipo di tamponatura: misura della SE del Prototipo 1

Si è quindi proceduto con le misure sul Prototipo 1 mostrato in Fig. 2 a) iniziando dalla configurazione con antenne log-periodiche in polarizzazione orizzontale. Mediante il VNA si è misurato il parametro $S_{21, dB}^0$ dato dalla (8) e relativo alla propagazione indisturbata del campo tra l'antenna log-periodica TX, posta fuori dalla cella schermata, e l'antenna RX posta all'interno della cella schermata. L'allestimento di prova è mostrato in

Fig. 20, ove è visibile chiaramente l'antenna TX mentre l'antenna RX è poco visibile attraverso l'apertura della cella, su cui è stata collocata la flangia in cui inserire la tamponatura nelle misure successive.

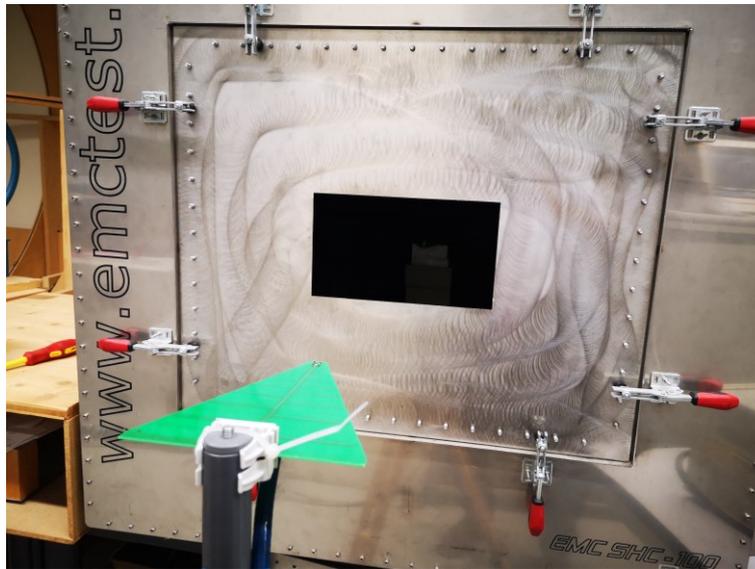


Fig. 20. Cella schermata con flangia collocata sull'apertura frontale e antenna log-periodica trasmittente in polarizzazione orizzontale.

Si è quindi inserita la tamponatura (Prototipo 1) nell'apertura della flangia, che svolge anche funzione di supporto per la tamponatura stessa, e si è ripetuta la misura col VNA per determinare il parametro $S_{21, dB}^1$ dato dalla (9) e relativo alla propagazione del campo tra l'antenna log-periodica TX, posta fuori dalla cella schermata, e l'antenna RX, posta all'interno della cella schermata, in presenza dello schermo. Poiché la flangia consentiva l'alloggiamento della tamponatura nell'apertura in due diverse modalità, ovvero parte predominante del volume della tamponatura rispettivamente all'esterno o all'interno della cella schermata, si è deciso di misurare la SE per entrambi gli alloggiamenti. La Fig. 21 e la Fig. 22 mostrano quindi le configurazioni di prova per le antenne log-periodiche in polarizzazione orizzontale con parte predominante del volume della tamponatura rispettivamente all'esterno e all'interno della cella schermata. Mediante la (10) si sono così ricavate le SE per le due configurazioni di prova considerate.

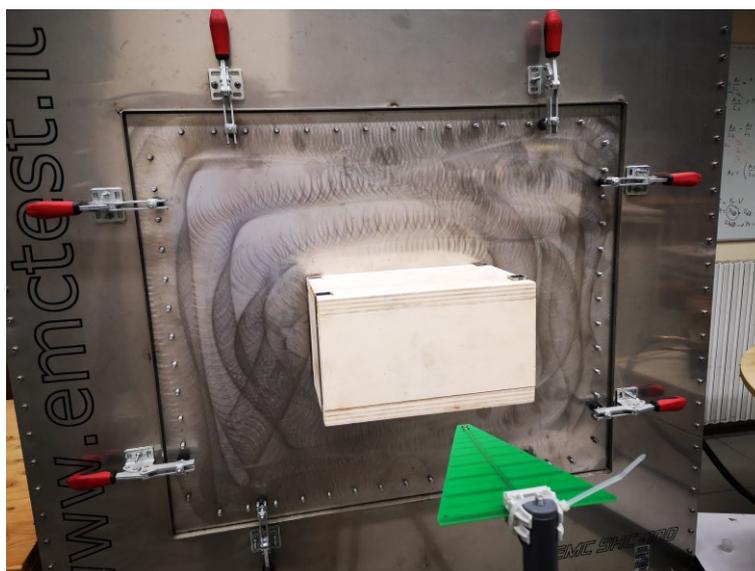


Fig. 21. Tamponatura collocata nella flangia sull'apertura frontale e antenna log-periodica TX in polarizzazione orizzontale. La tamponatura è collocata con la parte predominante del volume all'esterno della cella schermata.

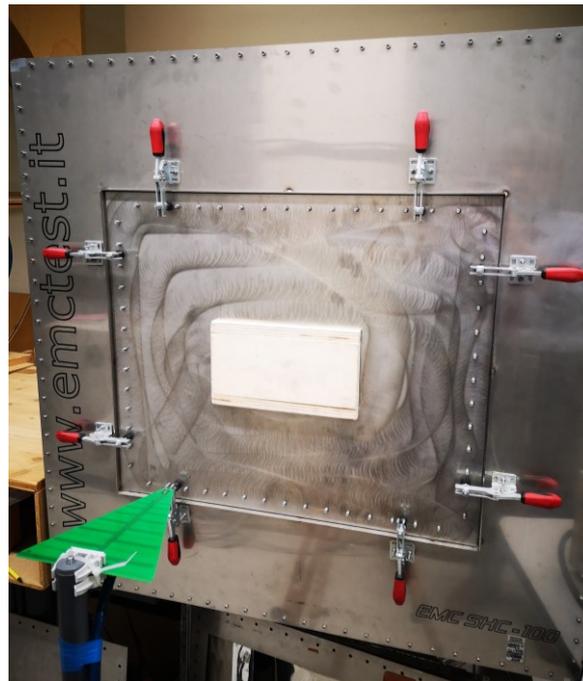


Fig. 22. Tamponatura collocata nella flangia sull'apertura frontale e antenna log-periodica TX in polarizzazione orizzontale. La tamponatura è collocata con la parte predominante del volume all'interno della cella schermata.

Si sono poi ripetute le misure sul Prototipo 1 di tamponatura per la configurazione con antenne horn in polarizzazione verticale. Si è misurato con il VNA il parametro $S_{21, dB}^0$ dato dalla (8) relativo alla propagazione indisturbata del campo tra l'antenna horn TX, e l'antenna horn RX. In Fig. 23 è mostrato l'allestimento di prova per questa configurazione; è chiaramente visibile l'antenna TX, posta fuori dalla cella schermata, mentre l'antenna RX, posta all'interno della cella schermata, è poco visibile attraverso la finestra.

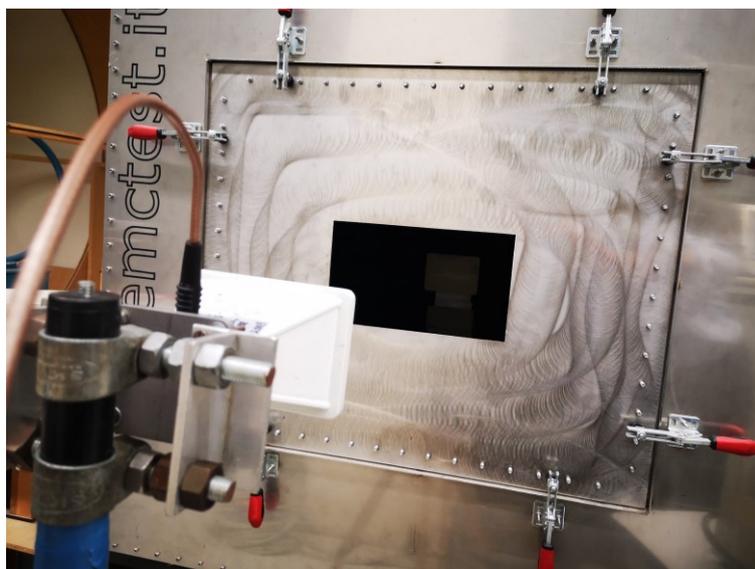


Fig. 23. Cella schermata con flangia collocata sull'apertura frontale e antenna horn trasmittente in polarizzazione verticale.

Successivamente si è inserita la tamponatura (Prototipo 1) nella finestra della flangia e si sono ripetute le misure col VNA per determinare il parametro $S_{21, dB}^1$ dato dalla (9) relativo alla propagazione del campo tra l'antenna horn TX e l'antenna horn RX in presenza dello schermo. Anche in questo caso si sono esaminate entrambe le configurazioni possibili di alloggiamento della tamponatura nell'apertura (parte predominante

del volume della tamponatura all'esterno o all'interno della cella schermata) misurando la SE per entrambi gli alloggiamenti. Nelle Fig. 24 e Fig. 25 sono mostrate le configurazioni di prova per le antenne horn in polarizzazione verticale con parte predominante del volume della tamponatura rispettivamente all'esterno e all'interno della cella schermata. Le SE per le due configurazioni di prova considerate sono state poi ricavate mediante la (10).

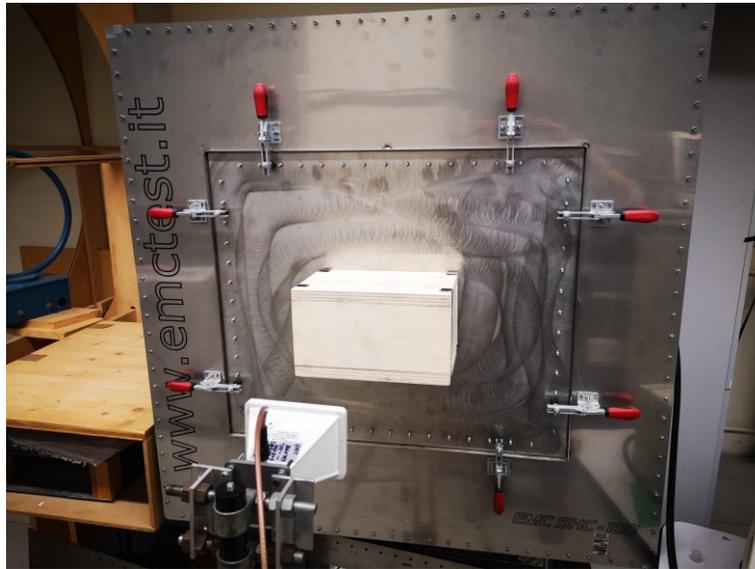


Fig. 24. Tamponatura collocata nella flangia sull'apertura frontale e antenna horn TX in polarizzazione verticale. La tamponatura è collocata con la parte predominante del volume all'esterno della cella schermata.

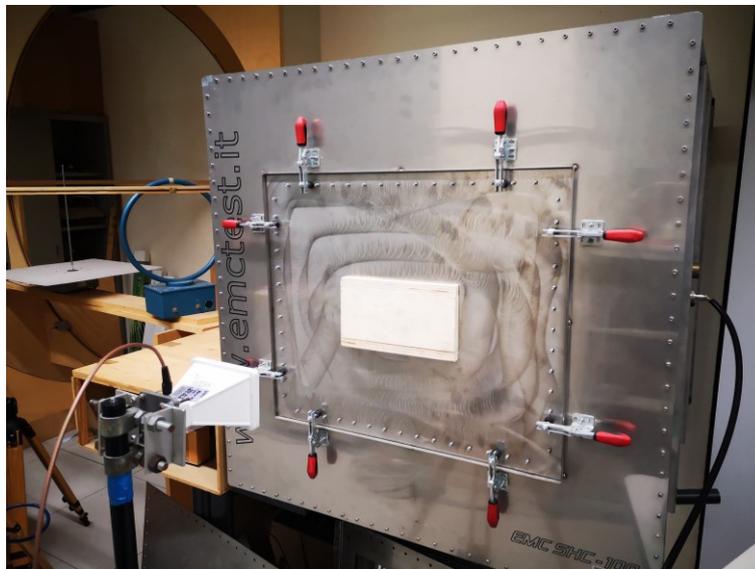


Fig. 25. Tamponatura collocata nella flangia sull'apertura frontale e antenna horn TX in polarizzazione verticale. La tamponatura è collocata con la parte predominante del volume all'interno della cella schermata.

2.2.3 Misura sul singolo prototipo di tamponatura: risultati delle misure sul Prototipo 1

La SE ottenuta con la (10) è mostrata nelle Fig. 26 e Fig. 27 rispettivamente per le configurazioni di prova con antenne log-periodiche e horn. In generale, si può notare come la disposizione della tamponatura all'interno o all'esterno della cella schermata non comporti sostanziali variazioni della SE, con l'eccezione della configurazione con antenne log-periodiche per frequenze superiori a 3 GHz circa.

Come si nota dalla Fig. 26, la SE per le configurazioni con antenne log-periodiche risulta abbastanza variabile nell'intervallo di misura, con minimi intorno a 4 dB per frequenze di 1265 e 2038 MHz e massimi di circa 38

dB per frequenze di 835, 1541 e 2894 MHz (si noti che la prima frequenza è però al di sotto della minima frequenza di lavoro specificata per l'antenna).

La Fig. 27 mostra invece che a partire da 1800 MHz la variazione della SE per le configurazioni con antenne horn (che hanno una frequenza minima di lavoro di 2 GHz) è invece più contenuta, con minimi di circa 0 dB per frequenze di 816 e 1226 MHz (al di sotto però della minima frequenza di lavoro specificata per l'antenna) e un massimo di circa 18 dB a 1062 MHz. Si può osservare, come già anticipato, che i valori di SE misurati rientrano nella dinamica del sistema di misura.

La maggiore direttività dell'antenna horn rispetto all'antenna log-periodica e quindi la conseguente struttura del campo irradiato dall'antenna e incidente perpendicolarmente sulla tamponatura più prossima a quella di un'onda piana uniforme rende preferibile riferirsi ai risultati ottenuti con le antenne horn. Per questa ragione, le misure sul Prototipo 2 sono state eseguite con le antenne horn in entrambe le polarizzazioni.

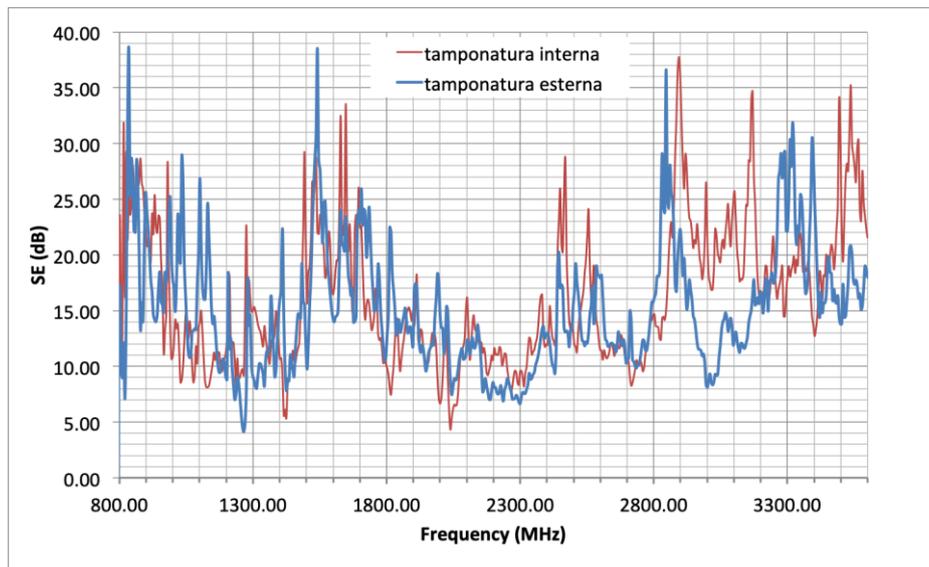


Fig. 26. Efficienza di schermatura (10) per le configurazioni di prova con antenne log-periodiche.

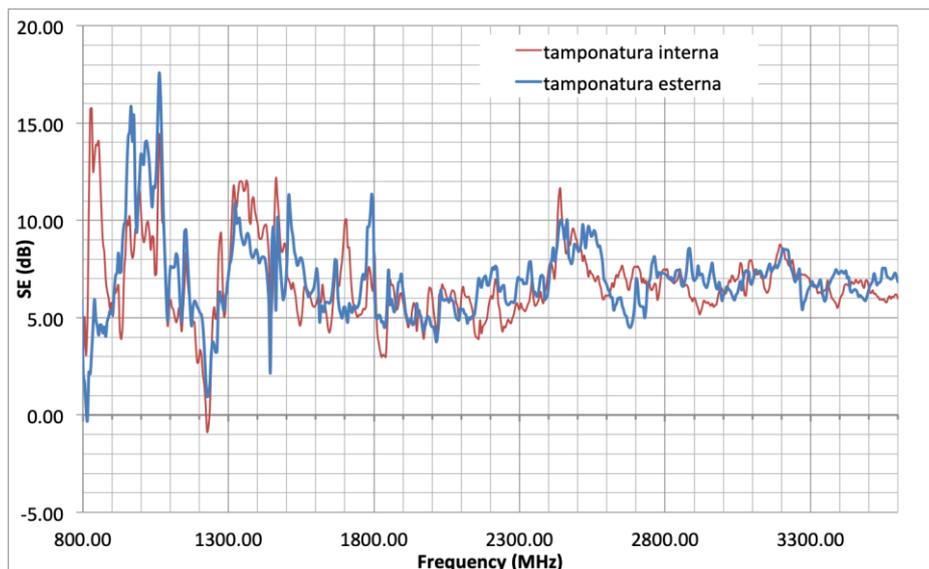


Fig. 27. Efficienza di schermatura (10) per le configurazioni di prova con antenne horn.

2.2.4 Misura sul singolo prototipo di tamponatura: misura della SE del Prototipo 2

Poiché durante lo svolgimento della ricerca è stato fornito un secondo prototipo per le misure (Prototipo 2, mostrato in Fig. 2 b)), utilizzato poi per l'assemblaggio in parete modulare (vedi paragrafo 2.2.6 e seguenti) si è deciso di ripetere le misure sul nuovo singolo prototipo di tamponatura. Le misure sul Prototipo 1 possono quindi essere ritenute preliminari e comunque propedeutiche allo svolgimento delle successive misure sul Prototipo 2. Alla luce dei risultati precedentemente ottenuti, si è scelto di utilizzare solo le antenne horn, questa volta in polarizzazione sia orizzontale che verticale, e con la tamponatura collocata nella flangia in modo che la parte preponderante del volume fosse all'esterno della cella schermata. In particolare, quest'ultima scelta è motivata dal fatto che le misure sul Prototipo 1 con le antenne horn avevano mostrato risultati simili per la tamponatura collocata internamente o esternamente alla cella schermata (vedi Fig. 27) e per avere una maggiore distanza tra l'antenna RX (all'interno della cella schermata) e la tamponatura. Differentemente dal Prototipo 1, la struttura contenitiva del Prototipo 2 (in fibra di canapa) è risultata piuttosto friabile e soggetta a deteriorarsi anche con il solo maneggiamento. Pertanto, poiché per il parziale sgretolamento delle superfici esterne della struttura la flangia non riusciva più a svolgere funzione di supporto, per il corretto posizionamento della tamponatura è stato necessario realizzare un apposito sistema di supporto che è stato poi fissato alla flangia, come si vede nelle Fig. 28 e Fig. 29. Per questo motivo sono state inoltre impiegate delle guarnizioni elettromagnetiche tra la flangia e le superfici della struttura contenitiva laddove era venuto a mancare il contatto a causa dello sgretolamento.

Mediante il VNA si è misurato il parametro $S_{21, dB}^0$ dato dalla (8) e relativo alla propagazione indisturbata del campo tra l'antenna horn TX, posta fuori dalla cella schermata e l'antenna RX posta all'interno della cella schermata. L'accoppiamento tra le antenne è stato misurato con la flangia per l'alloggiamento della tamponatura collocata sulla finestra della cella.

Dopo il posizionamento della tamponatura sul supporto della flangia, si sono ripetute le misure col VNA per ottenere il parametro $S_{21, dB}^1$ dato dalla (9) relativo alla propagazione del campo tra le antenne horn in presenza dello schermo. Nelle Fig. 28 e Fig. 29 sono mostrate le configurazioni di prova per le antenne horn in polarizzazione rispettivamente orizzontale e verticale. Le SE per le due configurazioni di prova considerate sono state poi ricavate mediante la (10).

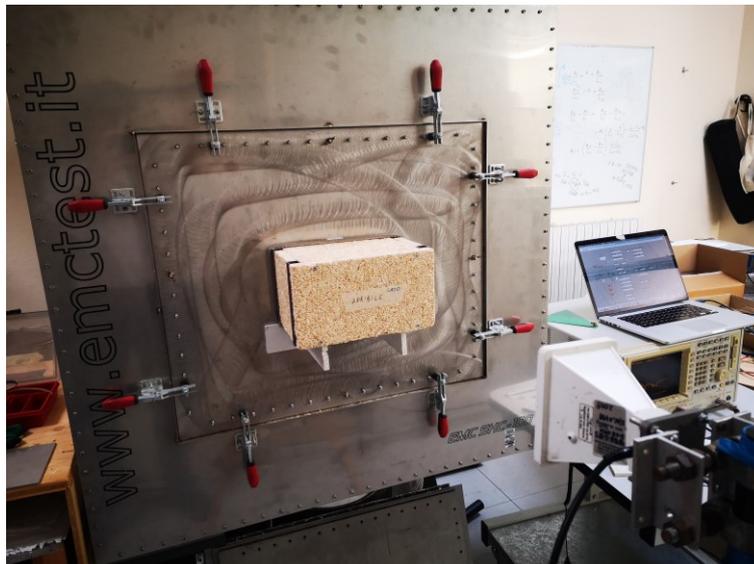


Fig. 28. Misura della SE della tamponatura (Prototipo 2) con antenne horn in polarizzazione orizzontale.

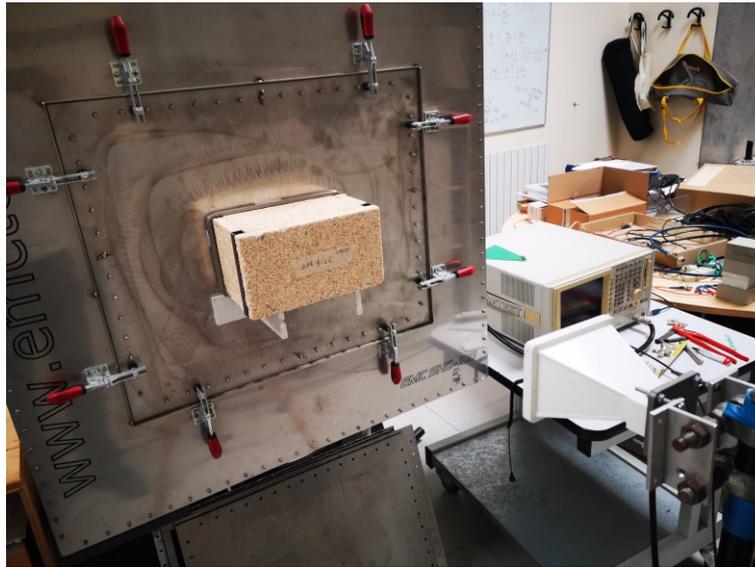


Fig. 29. Misura della SE della tamponatura (Prototipo 2) con antenne horn in polarizzazione verticale.

2.2.5 Misura sul singolo prototipo di tamponatura: risultati delle misure sul Prototipo 2

La SE ottenuta con la (10) è mostrata in Fig. 30 per le antenne horn in polarizzazione orizzontale, e in Fig. 31 per le antenne horn in polarizzazione verticale.

Dalle Fig. 30 e Fig. 31 si può osservare che la SE risulta maggiore per la configurazione di prova con antenne horn in polarizzazione orizzontale, con un valor medio tra 15 e 25 dB a partire da 1 GHz. Per la configurazione di prova con antenne horn in polarizzazione orizzontale, il valor medio si attesta tra 7 e 17 dB per le stesse frequenze. I valori misurati sono nell'ambito della dinamica del sistema di misura. In generale, i valori di SE ottenuti sono risultati maggiori di quelli ottenuti per il Prototipo 1; una causa potrebbe essere l'impiego di guarnizioni elettromagnetiche, che non erano state invece utilizzate nelle misure sul Prototipo 1.

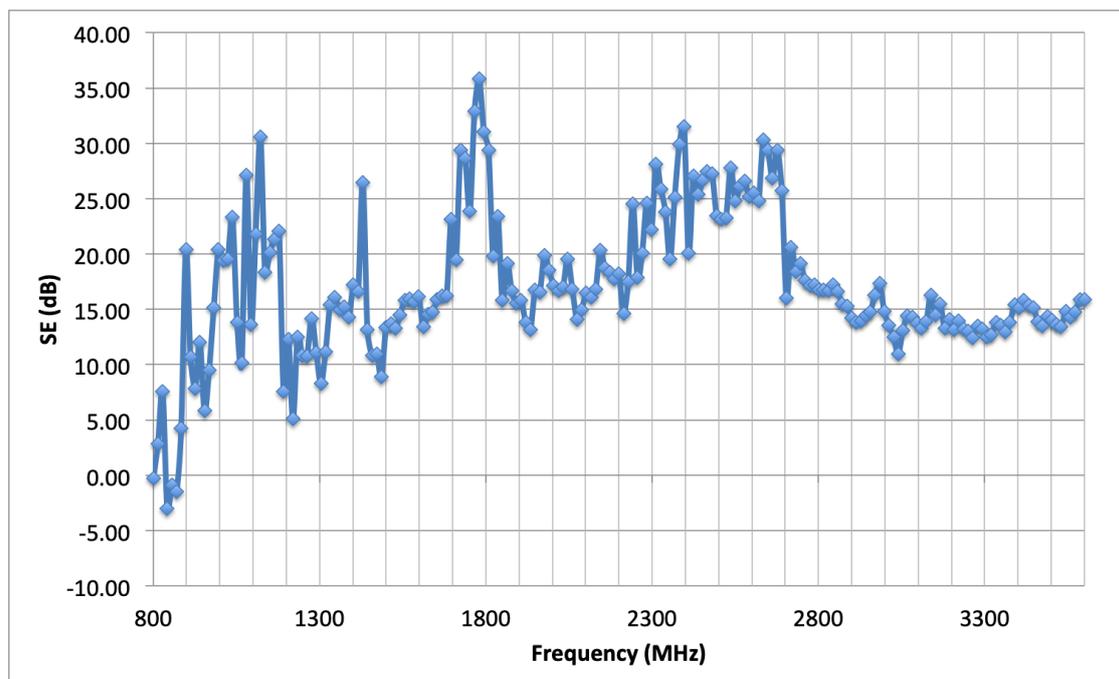


Fig. 30. Efficienza di schermatura (10) per il Prototipo 2 di tamponatura con antenne horn in polarizzazione orizzontale.

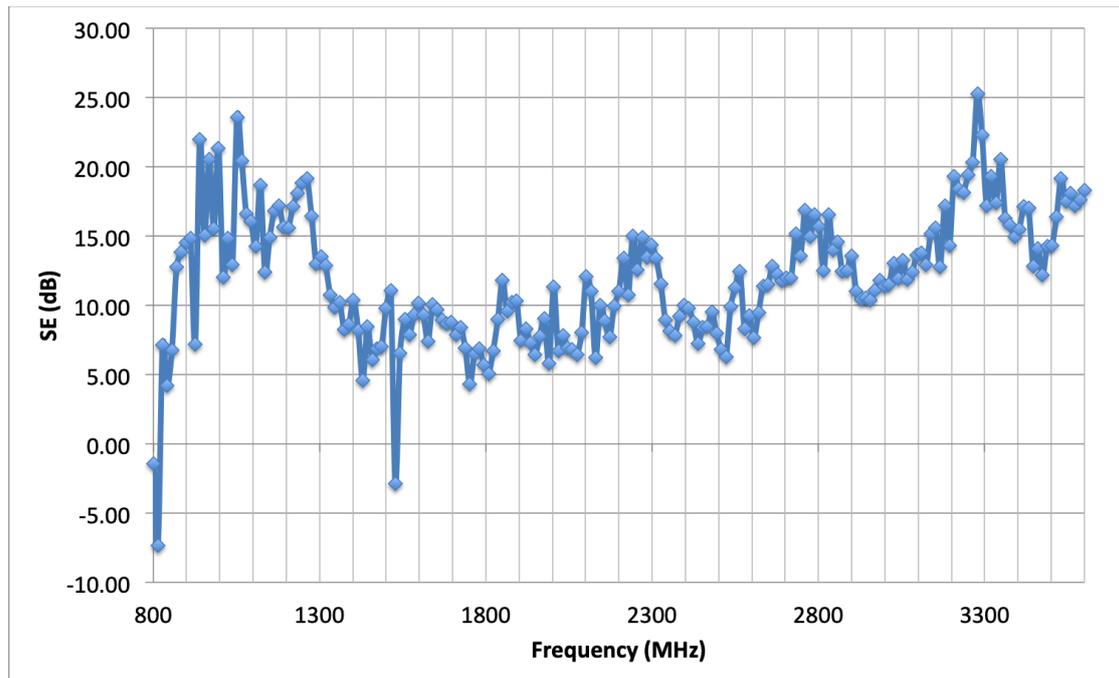


Fig. 31. Efficienza di schermatura (10) per il Prototipo 2 di tamponatura con antenne horn in polarizzazione verticale.

2.2.6 Misura sulla parete modulare: allestimento setup di misura e misura della dinamica

Per le misure di SE della parete si è seguita la procedura illustrata in [9] utilizzando però, in luogo di un'ampia lastra metallica con una finestra al centro, la camera schermata del laboratorio LACEM, realizzata in acciaio AISI 304 e avente dimensioni 5.52 m x 2.93 m x 2.74 m. La camera presenta sui due lati più lunghi aperture quadrate aventi dimensioni 30 cm x 30 cm per l'inserimento di pannelli *honeycomb* per la ventilazione, chiuse da una flangia di acciaio di dimensioni 35 cm x 35 cm in quanto non utilizzate. Si è quindi impiegata una di queste aperture per la misura della SE della parete modulare formata da nove tamponature.

La strumentazione consiste nella coppia di antenne horn già mostrate in Fig. 12 e nel VNA (vedi Tabella 1).



Fig. 32. Apertura per ventilazione (chiusa da pannello d'acciaio) sul lato lungo della camera schermata.

Come per il singolo prototipo di tamponatura, le misure sono state condotte con il VNA controllato da LabView [18] nell'intervallo di frequenza tra 800 MHz e 3.6 GHz. La misura della dinamica è stata eseguita per la coppia di antenne horn per entrambe le polarizzazioni orizzontale e verticale misurando l'accoppiamento tra le antenne horn attraverso l'apertura della camera schermata (parametro $S_{21, dB}^0$) e ripetendo la misura dopo avere chiuso l'apertura con la flangia (parametro $S_{21, dB}^1$), come si vede in Fig. 33. La differenza tra le due misure fornisce la dinamica del sistema secondo la (10). L'allestimento del setup di prova per la misura della dinamica con antenna horn in polarizzazione orizzontale è mostrato in Fig. 33 con riferimento alla misura di $S_{21, dB}^1$ (è visibile solo l'antenna posta all'esterno della camera schermata).



Fig. 33. Misura della dinamica del setup di misura con camera schermata.

La dinamica misurata per le polarizzazioni orizzontale e verticale delle antenne horn è mostrata rispettivamente in Fig. 34 e in Fig. 35. La dinamica è superiore a circa 50 dB (valori medi) per frequenze superiori a 1800 MHz. Non si è pertanto ritenuto di aumentare la dinamica inserendo nella catena di misura un preamplificatore ad alto guadagno.

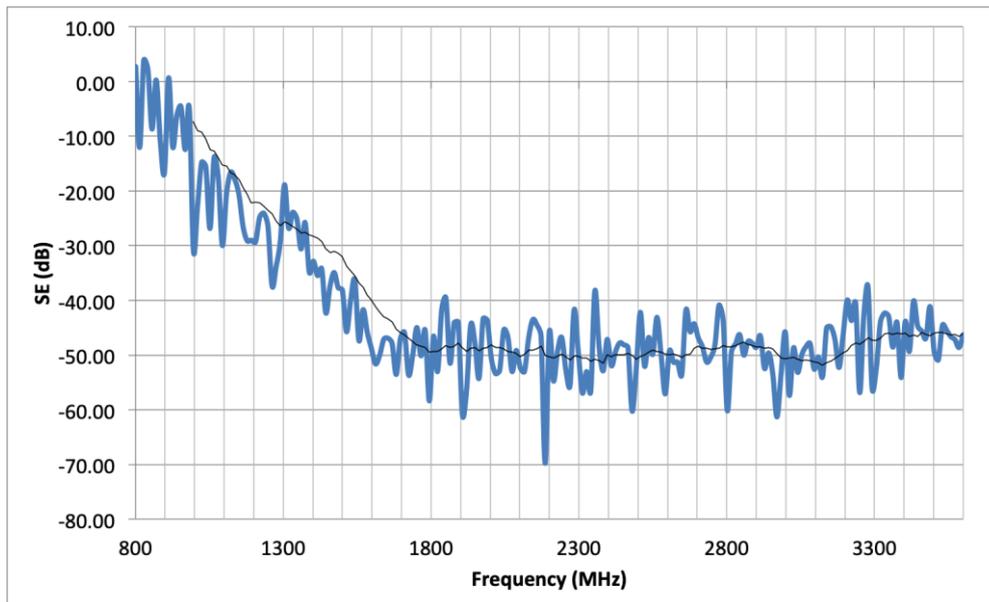


Fig. 34. Dinamica della camera schermata con antenne horn in polarizzazione orizzontale. In nero è rappresentata la media mobile delle misure a partire da 1 GHz.

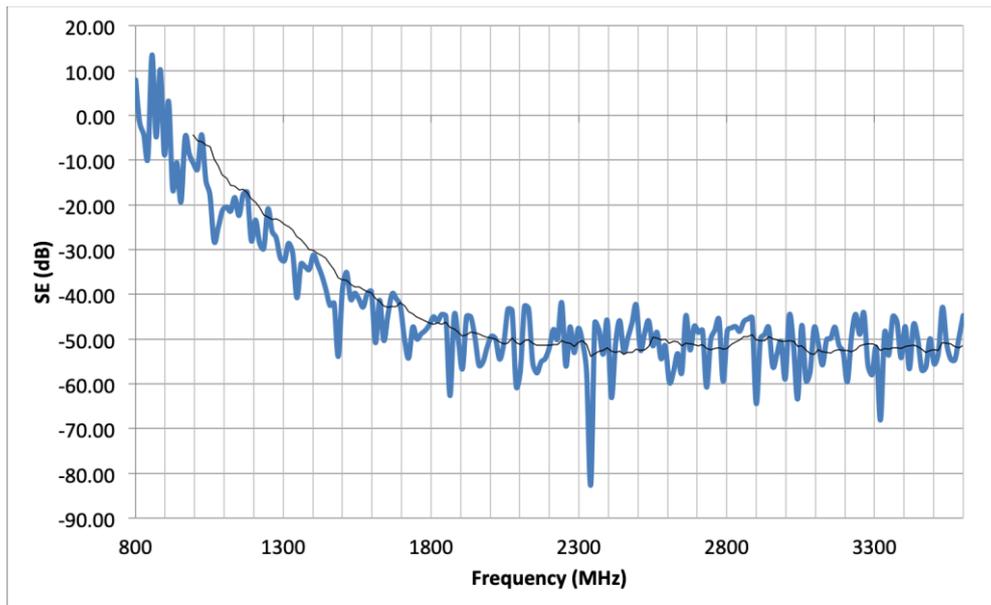


Fig. 35. Dinamica della camera schermata con antenne horn in polarizzazione verticale. In nero è rappresentata la media mobile delle misure a partire da 1 GHz.

2.2.7 Misura sulla parete modulare: esecuzione delle misure

Mediante il VNA si è misurato il parametro $S_{21,dB}^0$ dato dalla (8) e relativo alla propagazione indisturbata del campo tra l'antenna horn TX, posta all'esterno della camera schermata e l'antenna RX posta all'interno della camera schermata. L'accoppiamento tra le antenne è stato misurato rimuovendo la flangia collocata sull'apertura di ventilazione della camera.

Si sono quindi ripetute le misure col VNA per ottenere il parametro $S_{21,dB}^1$ dato dalla (9) relativo alla propagazione del campo tra le antenne horn in presenza dello schermo, costituito dalla parete modulare posta a occludere l'apertura della camera schermata. Nelle Fig. 36 e Fig. 37 sono mostrate le configurazioni di prova per le antenne horn in polarizzazione rispettivamente orizzontale e verticale. Le SE per le due configurazioni di prova considerate sono state poi ricavate mediante la (10).



Fig. 36. Misura della SE della parete modulare con antenne horn in polarizzazione orizzontale.



Fig. 37. Misura della SE della parete modulare con antenne horn in polarizzazione verticale.

2.2.8 Misura sulla parete modulare: risultati delle misure

La SE ottenuta con la (10) è mostrata in Fig. 38 per le antenne horn in polarizzazione orizzontale, e in Fig. 39 per le antenne horn in polarizzazione verticale.

Dalle Fig. 38 e Fig. 39 si può notare che la SE risulta mediamente simile per entrambe le polarizzazioni delle antenne, con un valor medio di circa 10 dB per frequenze superiori a 2 GHz. In Fig. 38 si nota un picco alla frequenza di 1950 MHz, frequenza al limite dell'intervallo di funzionamento specificato dal costruttore delle antenne. Si nota inoltre come i valori di SE della parete modulare siano inferiori a quelli misurati per il Prototipo 2 per entrambe le polarizzazioni. Inoltre, ad eccezione del picco a 1950 MHz per la configurazione delle antenne in polarizzazione orizzontale, le variazioni dei valori di SE misurati appaiono più contenute rispetto a quelle delle misure del Prototipo 2 (vedi Fig. 30 e Fig. 31).

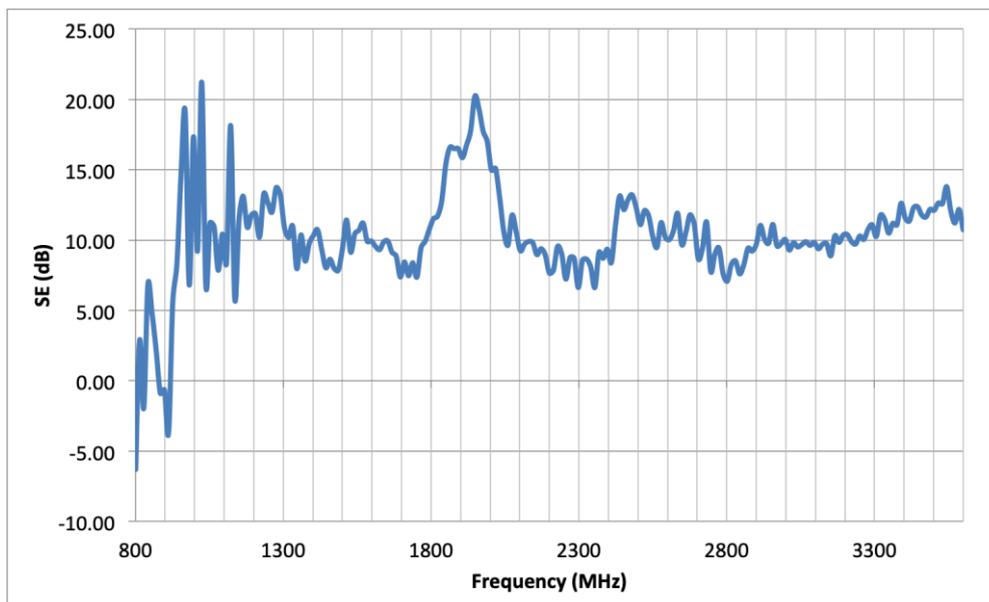


Fig. 38. Misura della SE della parete modulare ottenuta con la camera schermata con antenne horn in polarizzazione orizzontale.

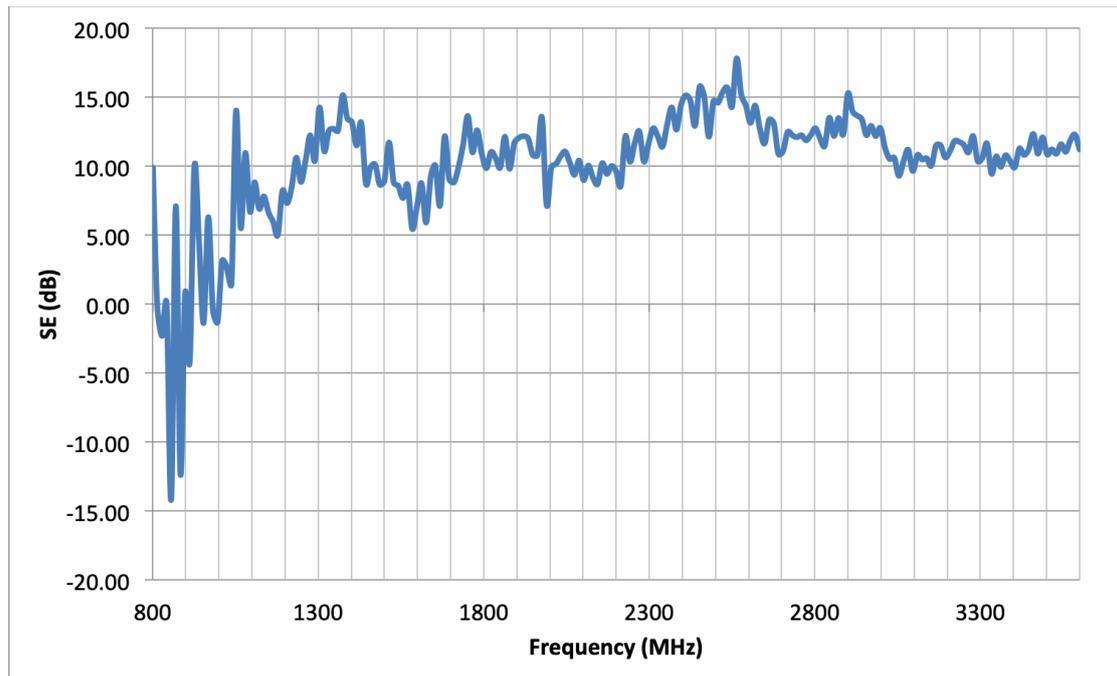


Fig. 39. Misura della SE della parete modulare ottenuta con la camera schermata con antenne horn in polarizzazione verticale.

2.2.9 Discussione dei risultati delle misure sul singolo prototipo di tamponatura: Prototipo 2

La SE misurata per le due polarizzazioni orizzontale e verticale delle antenne è stata quindi confrontata con la SE ottenuta dalle simulazioni svolte nell'ambito dell'attività LA3.19. Il confronto è mostrato nelle Fig. 40 e Fig. 41 e assume maggiore significatività a frequenze superiori a 2000 MHz, frequenza minima di lavoro delle antenne horn impiegate nelle misure. Si può notare innanzitutto come sia l'andamento sia i valori medi della SE siano più simili nel caso della polarizzazione verticale del campo (vedi Fig. 41), con valori medi di SE compresi tra 7 e 17 dB circa. Nel caso di polarizzazione orizzontale, invece, le misure forniscono valori di SE maggiori rispetto alle simulazioni, con valori medi tra 15 e 25 dB circa.

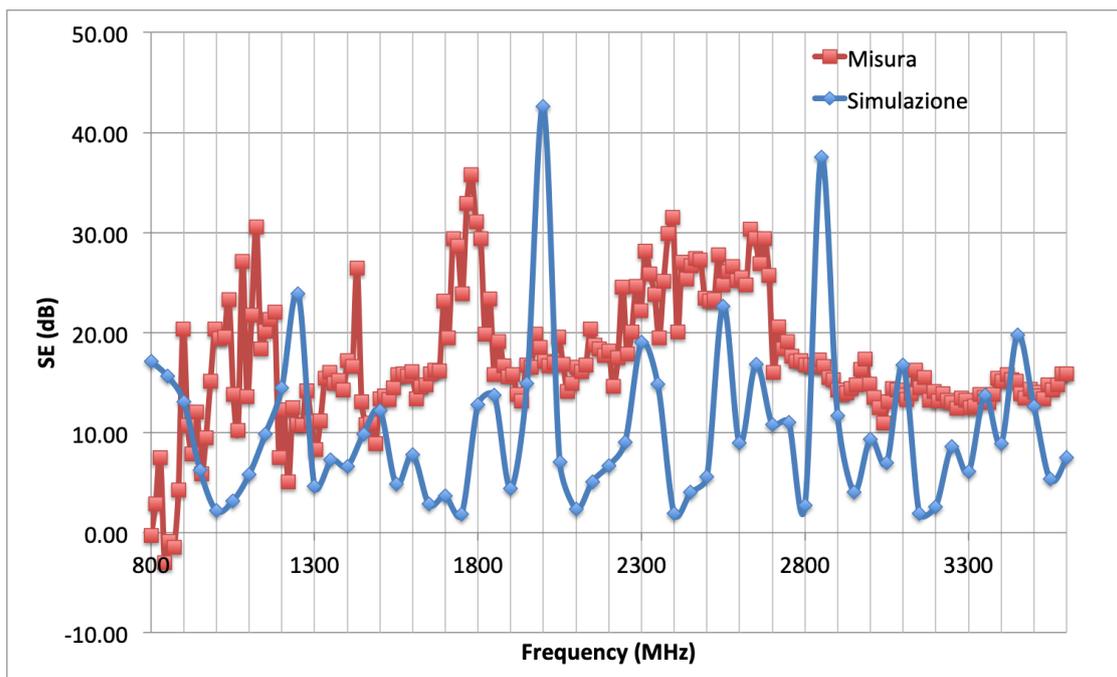


Fig. 40. Confronto tra l'efficienza di schermatura del Prototipo 2 misurata con antenne horn in polarizzazione orizzontale e simulazioni FEM.

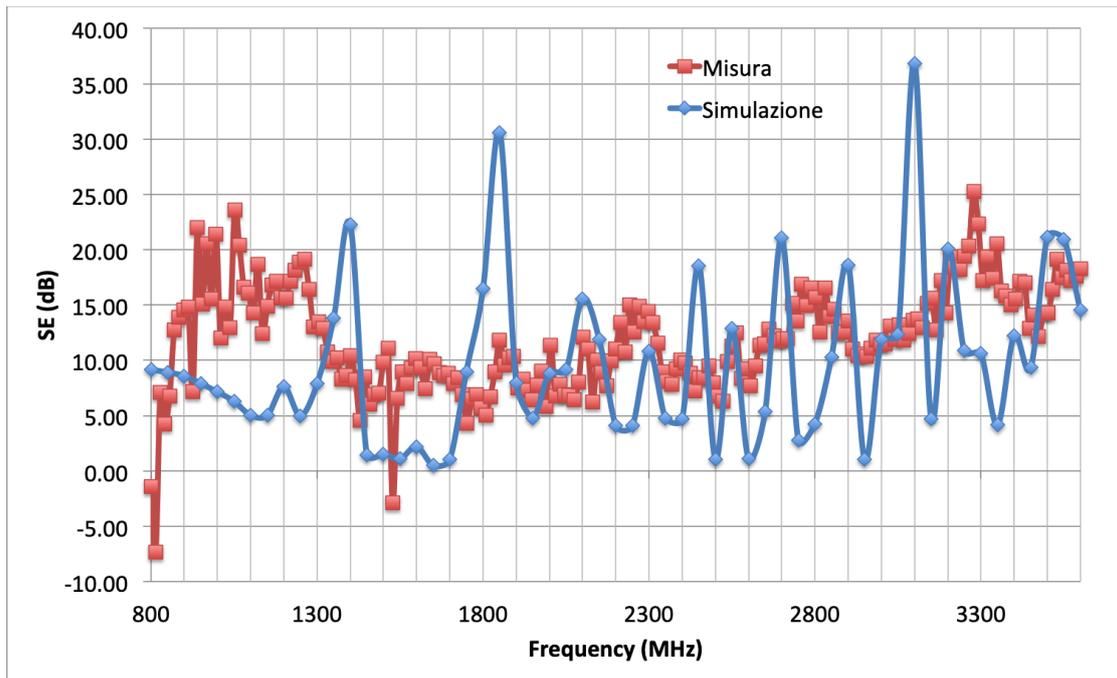


Fig. 41. Confronto tra l'efficienza di schermatura del Prototipo 2 misurata con antenne horn in polarizzazione verticale e simulazioni FEM.

2.2.10 Discussione dei risultati delle misure sulla parete modulare

Analogamente a quanto fatto per il Prototipo 2, si è proceduto a confrontare la SE misurata per la parete modulare con la SE ottenuta dalle simulazioni svolte nell'ambito dell'attività LA3.19. Il confronto è mostrato nella Fig. 42 per la sola polarizzazione verticale delle antenne (e quindi del campo elettrico). Si può notare come andamento e valori medi della SE siano simili, benché in generale la SE sia maggiore nel caso delle misure (valori medi di SE compresi tra 10 e 15 dB circa) per frequenze superiori a 2 GHz.

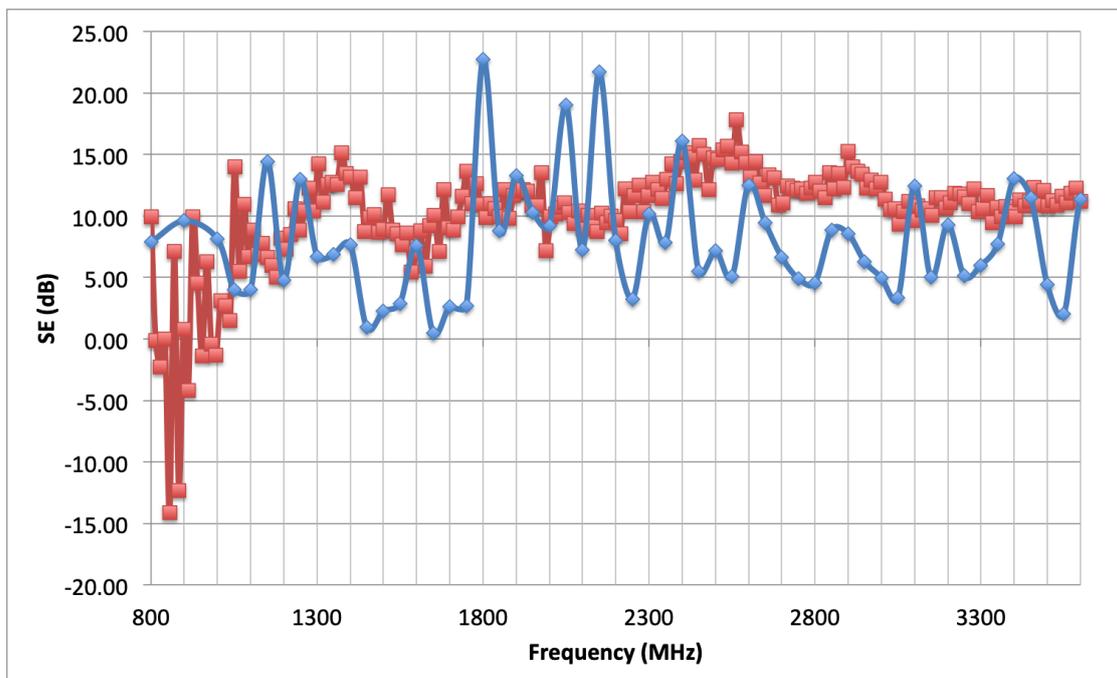


Fig. 42. Confronto tra l'efficienza di schermatura della parete modulare misurata con antenne horn in polarizzazione verticale e simulazioni FEM.

3 Conclusioni

Dal confronto della SE misurata con la SE calcolata mediante le simulazioni elettromagnetiche sul modello agli elementi finiti (FEM) (vedasi relazione relativa alla LA3.19) si può osservare come in generale l'andamento si presenti simile. Inoltre, i valori ottenuti sperimentalmente sono compatibili con quelli ottenuti nelle simulazioni. Sia per il Prototipo 2, che per la parete modulare, i valori misurati sono superiori a quelli calcolati con il modello FEM.

I bassi valori di SE ottenuti sia per il singolo prototipo di tamponatura sia per la parete modulare, specialmente per frequenze maggiori di 1.5 GHz, possono essere giustificati essenzialmente considerando che l'accumulatore elettrico non occupa interamente il volume dell'involucro dell'accumulatore KEMET e che siano presenti degli spazi tra l'involucro dell'accumulatore e la struttura contenitiva della tamponatura, come mostra la Fig. 5. Tali spazi rappresentano aperture in cui il campo elettromagnetico alle frequenze considerate può penetrare efficacemente. Si può quindi concludere che la tamponatura ad accumulo elettrico integrato non costituisce uno schermo efficace ai campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenze esaminato.

La presenza di spazi tra l'involucro dell'accumulatore e la struttura contenitiva della tamponatura può anche giustificare la minore SE ottenuta nelle misure sulla parete modulare mostrata in Fig. 7 b); essendo le dimensioni dell'apertura nella camera schermata maggiori delle dimensioni della tamponatura, il campo elettromagnetico può trovare più interstizi in cui penetrare attraverso l'apertura.

Si ritiene che i risultati delle misure della SE della parete modulare siano più indicativi delle prestazioni schermanti ottenibili dalle tamponature in quanto nelle reali condizioni di utilizzo le tamponature verrebbero utilizzate in configurazioni assemblate.

La ricerca può essere sviluppata ed estesa con ulteriori indagini sulla SE di una parete modulare, per esempio cambiando l'allestimento di prova e confrontando la SE di aperture di diverse dimensioni, oppure estendendo l'intervallo di frequenze in cui eseguire le misure.

4 Riferimenti bibliografici

1. *ASTM D4935-18* "Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials," (*Revision of ASTM D4935-89*).
2. P. F. Wilson and M. T. Ma, "A study of techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials," U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Boulder, CO, NBS Tech. Note 1095, 1986.
3. P. F. Wilson and M. T. Ma, "Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: part I: far-field source simulation," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 30, pp. 239–250, Aug. 1988.
4. J. Baker-Jarvis and M. D. Janezic, "Analysis of a two-port flanged coaxial holder for shielding effectiveness and dielectric measurements of thin films and thin materials," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, pp. 67–70, Feb. 1996.
5. *IEEE Std 299-2006* "IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures," (*Revision of IEEE Std 299-1997*), vol., no., pp.1-52, 28 Feb. 2007, doi: 10.1109/IEEESTD.2007.323387.
6. *ASTM E1851-21*, "Standard Test Method for Electromagnetic Shielding Effectiveness of Durable Rigid Wall Relocatable Structures,"
7. *IEC 61000-5-7:2001*, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5-7: Installation and mitigation guidelines - Degrees of protection by enclosures against electromagnetic disturbances (EM code)".
8. *IEC 61000-4-21:2011*, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods".

9. NIST Construction Automation Program, Report No.3, "Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials", Oct. 1997.
10. C. L. Holloway, D. Hill, J. Ladbury, G. Koepke, and R. Garzia, "Shielding effectiveness measurements of materials in nested reverberation chambers" *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, no. 2, 2003.
11. M. O. Hatfield, "Shielding effectiveness measurements using mode-stirred chambers: a comparison of two approaches," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 30, pp. 229–238, Aug. 1988. [L]
[SEP]
12. W. Kurner and A. Schwab, "Parameters and results of SE-measurements performed in mode-stirred chambers," in *Proc. 2000 IEEE Int. Symp. Electromagnetic Compatibility*, Washington, DC, USA, Aug. 21–25, 2000, pp. 611–614. [L]
[SEP]
13. T. A. Loughry and S. H. Gurbazani, "The effects of intrinsic test fixture isolation on material shielding effectiveness measurements using nested mode-stirred chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 37, pp. 449–452, Aug. 1995. [L]
[SEP]
14. B. Foulonneau, F. Gaudaire, and Y. Gabillet, "Measurement method of electromagnetic transmission loss of building components using two reverberation chambers," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 23, pp. 2130–2131, 1996. [L]
[SEP]
15. C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons, 1992.
16. P.A. Chatterton, M.A. Houlden, *EMC Electromagnetic Theory to Practical Design*, John Wiley & Sons, 1992.
17. M. D'Amore, *Compatibilità Elettromagnetica*, Edizioni Scientifiche Siderea, 2003. [L]
[SEP]
18. National Instruments Corporation, LabView v. 15. National Instruments Corporation, 2015. [L]
[SEP]

5 Abbreviazioni ed acronimi

Efficienza di schermatura, SE

Analizzatore di rete vettoriale (Vector Network Analyzer), VNA

Ricevente, RX

Trasmittente, TX

6 Appendice

CURRICULUM VITAE di Leonardo Sandrolini, Professore Associato presso Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e "Guglielmo Marconi" (DEI), Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna.

POSIZIONE ACCADEMICA

2020-oggi: Abilitazione a Professore di I fascia di Elettrotecnica dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR)

2019 - oggi: Professore Associato di Elettrotecnica

2001-2019: Ricercatore confermato

2000-2001: Borsa di studio post-dottorato presso Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e "Guglielmo Marconi" (DEI) (già Dipartimento di Ingegneria Elettrica), Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

ISTRUZIONE

2000: Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica, Università di Bologna

1995: Abilitazione alla professione di Ingegnere

1995: Laurea con lode in Ingegneria Elettrotecnica, Università di Bologna

ATTIVITÀ DIDATTICA

2001-oggi: Leonardo Sandrolini ricopre incarichi di insegnamento di corsi ("Compatibilità Elettromagnetica", "Elettrotecnica") presso la Scuola di Ingegneria dell'Università di Bologna in Corsi di Studio del primo e secondo livello dal 2004 (Ingegneria dell'Energia Elettrica, Ingegneria Gestionale, Ingegneria dell'Automazione). Dal 2002 al 2008 ha ricoperto incarichi di insegnamento per supplenza presso l'Università di Modena e Reggio Emilia, Modena (corsi di "Elettrotecnica"). Dal 2001 è relatore e correlatore di tesi di laurea vecchio ordinamento/triennale/magistrale (circa 100 tesi) e di tesi di dottorato (6).

ATTIVITÀ DI RICERCA E PROGETTI

Dal 2012 Leonardo Sandrolini è il responsabile/coordinatore scientifico del Laboratorio di Compatibilità Elettromagnetica (LACEM), Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e "Guglielmo Marconi" (DEI), Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.

L'attività di ricerca si articola principalmente nelle seguenti tematiche: compatibilità elettromagnetica (efficienza di schermatura, accoppiamenti elettromagnetici, interferenze elettromagnetiche in convertitori switching, emissioni condotte nell'intervallo delle supraharmonics, interferenze elettromagnetiche in sistemi ferroviari), caratterizzazione elettromagnetica dei materiali, aspetti elettrici dell'energetica (caratterizzazione elettrica di sorgenti rinnovabili di energia, trasmissione wireless di energia elettrica con tecniche non radiative).

Ha partecipato come responsabile a numerosi progetti di ricerca e convenzioni con enti di ricerca e aziende private (ENEA, M.E.P. Marine Equipment Pellegrini, Tecna, SAMP, Tetra Pak Packaging Solutions, Trevi, Calzoni, SIMEL, Consorzio Alta Velocità Emilia Toscana (CAVET), Consorzio Alta Velocità Torino - Milano (C.A.V.To.Mi.), Laboratori Guglielmo Marconi), nella maggior parte dei casi sulle tematiche di compatibilità elettromagnetica e interferenze elettromagnetiche. Ha inoltre partecipato a numerosi progetti di ricerca in collaborazione con altre università italiane, come i progetti PRIN (Progetti di Rilevante Interesse Nazionale) finanziati dal MUR (è stato partecipante nel 2002, 2004, 2006 e responsabile dell'Unità di Bologna nel 2008). È stato responsabile di due progetti di ricerca per Giovani Ricercatori finanziati dal MUR nel 2000 e nel 2001. È autore di circa 130 lavori scientifici, la maggior parte dei quali pubblicati in riviste internazionali e negli atti di congressi internazionali, 1 capitolo di libro, 1 curatela.

H-index (Scopus): 14, numero totale delle citazioni: 1005

ATTIVITÀ ISTITUZIONALI E ACCADEMICHE

2020–oggi: membro del Collegio dei Docenti del Dottorato in Ingegneria Biomedica, Elettrica e dei Sistemi (IBES) dell'Università di Bologna. È stato supervisore di 6 studenti di Dottorato ed è stato revisore esterno delle tesi di due candidati di altre università italiane. Nel 2017 è stato membro effettivo della Commissione d'Esame della Scuola di Dottorato in Ingegneria dell'Informazione, Università di Salerno, Salerno.

2012–oggi: membro del CIRI-MAM – Centro Interdipartimentale per la Ricerca Industriale "Meccanica Avanzata e Materiali", Università di Bologna, Bologna.

2001–2007: membro della giunta del Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Bologna, Bologna.

Settembre 2002 e Aprile 2019: visiting professor presso la School of Electrical and Electronic Engineering, George Green Institute for Electromagnetics Research, the Nottingham University, Nottingham, Regno Unito
Ottobre 2015 e Ottobre 2016: Visiting Professor presso University of Tongji, Shanghai, Cina, ove ha tenuto il corso "Electrical Engineering" nell'ambito del Programma AlmaTong (Laurea in Ingegneria dell'Automazione – Università di Bologna / Bachelor of Science in Automation Engineering – Tongji University).

2018–2021: responsabile dell'accordo di scambio Erasmus+ con l'Università di Nottingham, Nottingham, Regno Unito

2016 – oggi: Valutatore di proposte di progetti di ricerca della Cyprus Research Promotion Foundation (RPF)
<https://iris.research.org.cy>

MEMBERSHIP DI COMITATI TECNICI, SCIENTIFICI ED EDITORIALI

- Senior Member della IEEE dal 2016 (Member dal 2000).
- Member della IEEE EMC Society Technical Committee TC 7 Low Frequency EMC
- Non-voting Member della IEEE MTT Society Technical Committee MTT-26 Wireless Energy Transfer and Conversion
- Associate editor della rivista Hindawi International Journal of Photoenergy dal 2015
- Member della Editorial Board della rivista Elsevier International Journal of Electrical Power & Energy Systems dal 2017
- Technical Program Chair del congresso internazionale 19th IEEE-EEEIC + 3rd I&CPS Europe, Genova, Italy (June 11-14, 2019)
- Membro del Comitato Tecnico e Organizzatore del Workshop EST 2007 - Electrical Energy Storage Technologies 2007, Bologna, Italy. Co-editore dei Proceedings del Workshop
- Topic Editor della rivista MDPI Applied Sciences since 2021
- Guest Editor della Special issue "Power Quality in Electrified Transportation Systems", rivista MDPI Energies, 2021
- Guest Editor della Special issue "Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Interference in Power Electronic Converters", rivista MDPI Electronics, 2021.
- Guest Editor della Special issue "AC/DC Interference on Buried Pipelines", rivista MDPI Applied Sciences, 2022.

AWARDS AND RECOGNITIONS

Premio per la migliore presentazione poster: "Circuito equivalente non linear di una cella a combustibile PEM", XX Riunione Annuale dei Ricercatori Italiani di Elettrotecnica, ET2004, Salerno, Giugno 16-19, 2004.