



## Lezione 10

# Schermi

Giuseppe Pelosi - Stefano Selleri  
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni  
Università di Firenze



## Sommario della Lezione

- ❖ Introduzione
- ❖ Efficacia Schermante
- ❖ Efficacia Schermante approssimata
- ❖ Schermi multilamina

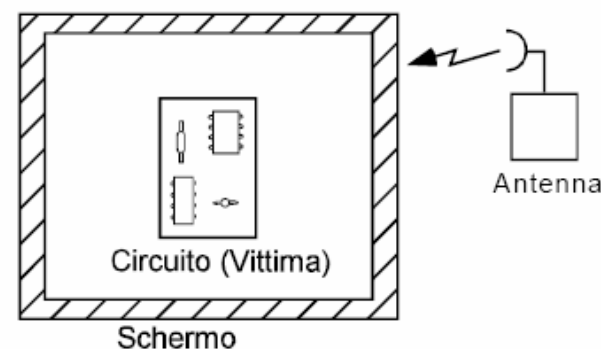
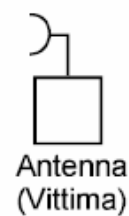
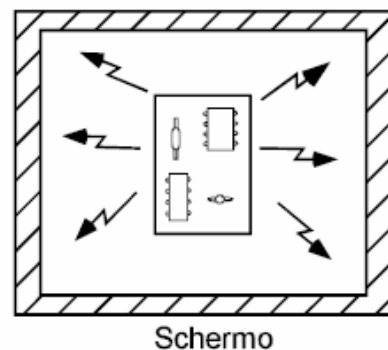


## Introduzione

Si definisce usualmente **schermo** una copertura metallica che racchiude totalmente un sistema o un sottosistema.

Lo schermo può svolgere una duplice funzione:

- ❖ Protegge il sistema dai disturbi radiati che provengono dall'esterno (ne riduce la suscettibilità)
- ❖ Impedisce ai disturbi radiati generati dal sistema di uscire e interferire con altri sistemi (ne riduce l'emissività)





## Efficacia Schermante

Nessuno schermo è perfettamente in grado di annullare i disturbi radiati, e queste imperfezioni sono di due ordini:

- ❖ Uno schermo di spessore finito e conducibilità finita attenua i disturbi radiati. Il valore di quest'attenuazione è l'*efficacia schermante* (Shielding effectiveness) dello schermo
- ❖ Uno schermo non può essere perfettamente sigillato ma deve avere delle aperture per le linee di alimentazione e di segnale (da cui possono passare i disturbi condotti, ma anche quelli radiati) e degli sportelli per la manutenzione che, anche da chiusi, possono non garantire una sufficiente continuità elettrica.



## Efficacia Schermante

### *Efficacia Schermante*

Si definisce efficacia schermante il rapporto fra l'ampiezza di campo elettrico che si ha in un punto in assenza di schermature e l'ampiezza del campo elettrico in quello stesso punto nel caso in cui la schermatura sia presente.

$$SE = \frac{|E_i|}{|E_t|}; \quad SEE_{dB} = 20 \log_{10} \frac{|E_i|}{|E_t|}$$

Una analoga definizione si può dare in termini di campo magnetico. Per campi radiati, dove E ed H sono in rapporto costante le due definizioni coincidono, per campi vicini questo invece non è vero.

Il problema può essere trattato teoricamente per il caso di schermi piani infiniti

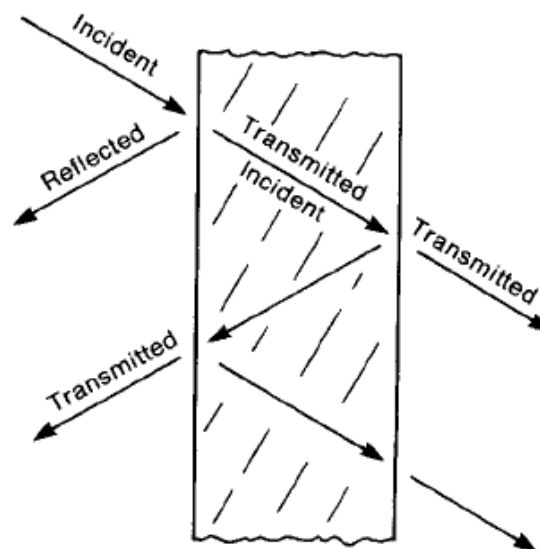
Per schermi reali è necessario ricorrere alle tecniche numeriche



## Efficacia Schermante

### *Efficacia Schermante*

Uno schermo è una doppia interfaccia fra dielettrici, su cui incide un'onda piana



In linea di principio vi sono infinite riflessioni interne, ma si può dimostrare come la soluzione possa essere scritta in termini di sole 5 onde piane

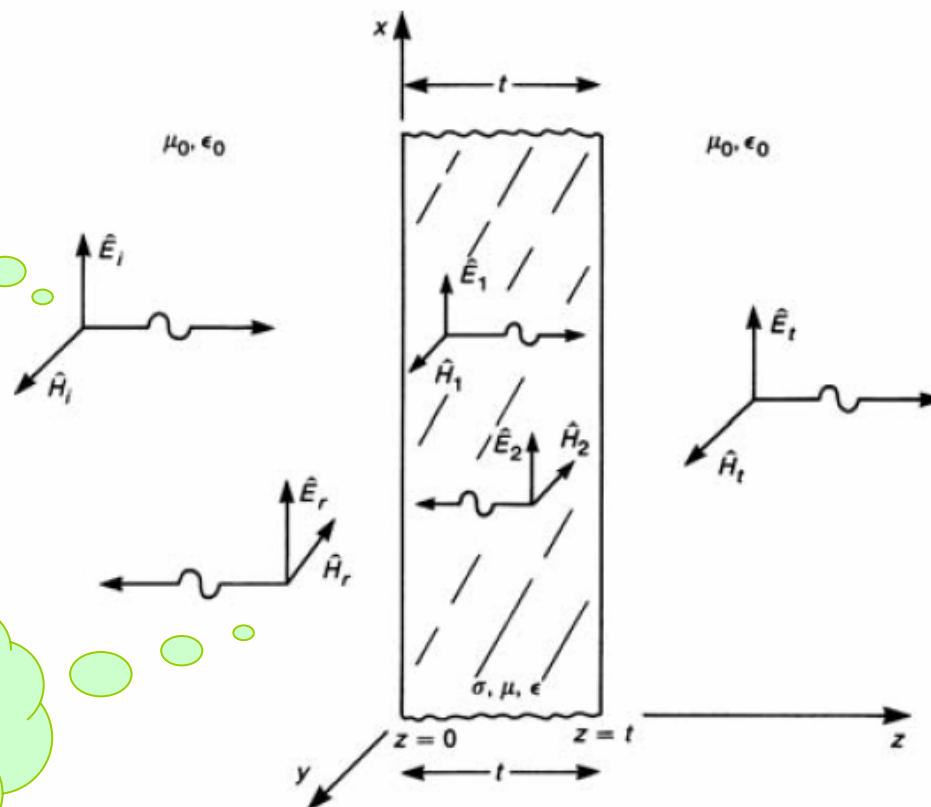


## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

All''''esterno'' abbiamo il campo incidente e riflesso

$E_i$  e  $H_i$  sono  
I campi  
dell'onda piana  
incidente



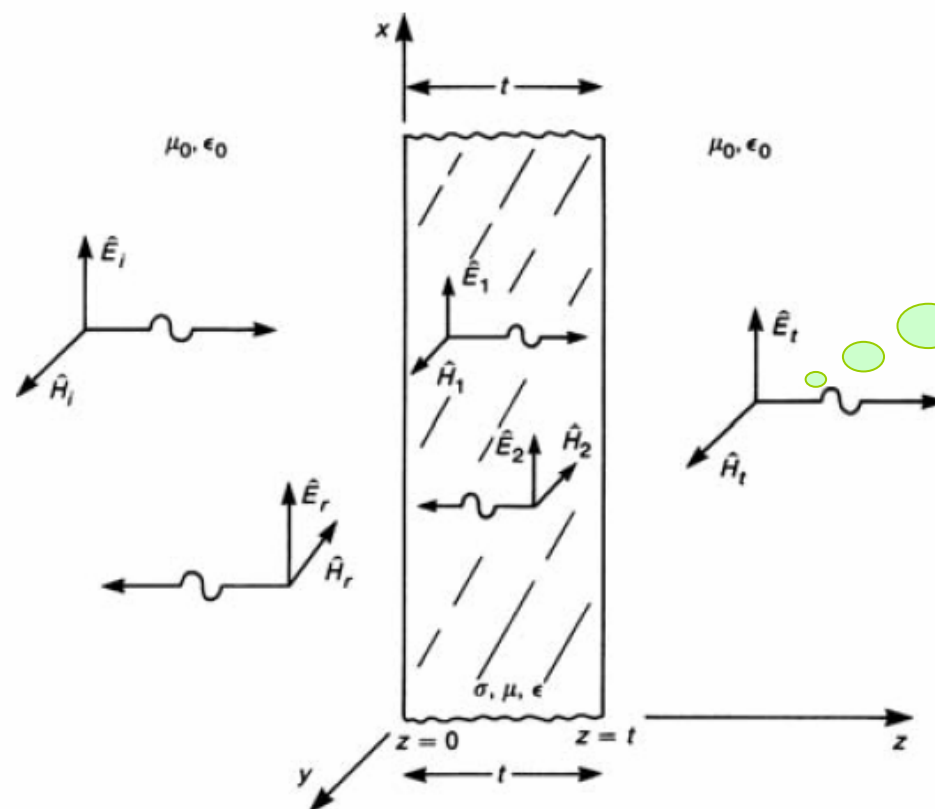
$E_r$  e  $H_r$  sono  
I campi  
dell'onda piana  
riflessa



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

All'interno abbiamo il solo campo trasmesso



$E_t$  e  $H_t$  sono  
I campi  
dell'onda piana  
trasmessa

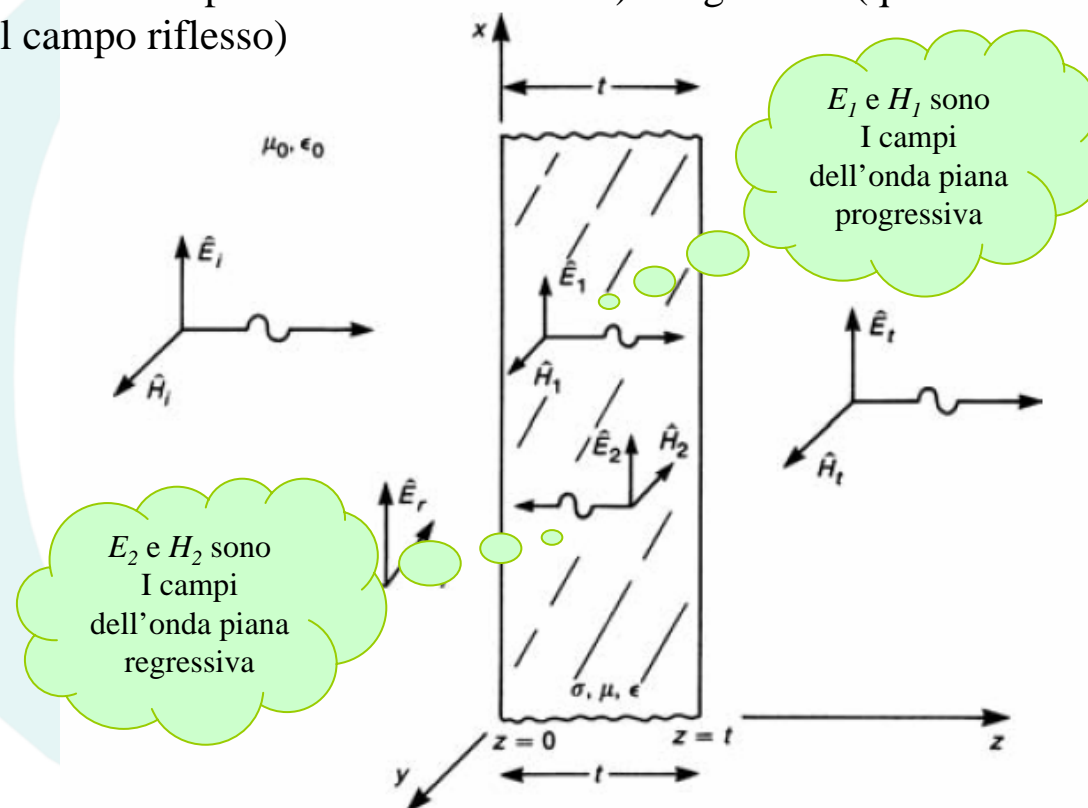




## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

Dentro lo schermo vi sono due onde, che chiameremo progressiva (quella che viaggia nella stessa direzione dei campi incidente e trasmesso) e regressiva (quella che viaggia nella stessa direzione del campo riflesso)





## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

In formule

$$\mathbf{E}_i = E_i e^{-jk_0 z} \hat{\mathbf{x}}$$
$$\mathbf{H}_i = \frac{E_i}{\zeta_0} e^{-jk_0 z} \hat{\mathbf{y}}$$

$$\mathbf{E}_r = E_r e^{jk_0 z} \hat{\mathbf{x}}$$
$$\mathbf{H}_r = -\frac{E_r}{\zeta_0} e^{jk_0 z} \hat{\mathbf{y}}$$

$$\mathbf{E}_1 = E_1 e^{-jkz} \hat{\mathbf{x}}$$
$$\mathbf{H}_1 = \frac{E_1}{\zeta} e^{-jkz} \hat{\mathbf{y}}$$

$$\mathbf{E}_2 = E_2 e^{jkz} \hat{\mathbf{x}}$$
$$\mathbf{H}_2 = -\frac{E_2}{\zeta} e^{jkz} \hat{\mathbf{y}}$$

$$\mathbf{E}_t = E_t e^{-jk_0 z} \hat{\mathbf{x}}$$
$$\mathbf{H}_t = \frac{E_t}{\zeta_0} e^{-jk_0 z} \hat{\mathbf{y}}$$



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

Nel vuoto è

$$k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0}; \quad \zeta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$$

Nello schermo

$$k = \omega \sqrt{\mu \left( \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right)} = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \left( \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right)} = k_0 \sqrt{\left( \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right)} = \beta \pm j\alpha;$$

$$\zeta_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega}}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \left( \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right)}} = \zeta_0 \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}}$$



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

Nel caso di buon conduttore si ha

$$\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \gg \varepsilon_r \Rightarrow \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \gg 1$$

E le caratteristiche propagative dello schermo divengono

$$k \cong \frac{1}{\delta}(1 - j); \quad \zeta \cong \frac{1}{\sigma \delta}(1 + j); \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Avendo definito la profondità di penetrazione  $\delta$



## Efficacia Schermante

### *Efficacia Schermante*

Supposta nota l'intensità del campo elettrico incidente, restano incognite quelle dei campi elettrici riflessi, trasmessi, e delle onde progressive e regressive.

Si tratta di quattro incognite che possono essere determinate tramite le quattro relazioni che impongono la continuità dei campi elettrici e magnetici tangenti alle due interfacce.

$$E_i + E_r = E_1 + E_2$$
$$\frac{E_i}{\zeta_0} - \frac{E_r}{\zeta_0} = \frac{E_1}{\zeta} - \frac{E_2}{\zeta}$$

$$E_1 e^{-jkt} + E_2 e^{jkt} = E_t e^{-jk_0 t}$$
$$\frac{E_1}{\zeta} e^{-jkt} - \frac{E_2}{\zeta} e^{jkt} = \frac{E_t}{\zeta_0} e^{-jk_0 t}$$

Dove  $t$  è lo spessore dello schermo



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

Saltando pochi semplici passaggi matematici...

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\zeta_0 + \zeta)^2}{4\zeta_0\zeta} \left[ 1 - \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right)^2 e^{-j2kt} \right] e^{-jkt} e^{-jk_0t}$$

Nel caso di buon conduttore

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} \zeta = 0 \quad \Rightarrow \quad \zeta \ll \zeta_0$$

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\zeta_0 + \zeta)^2}{4\zeta_0\zeta} \left[ 1 - \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right)^2 e^{-\frac{2t}{\delta}} e^{-j\frac{2t}{\delta}} \right] e^{-\frac{t}{\delta}} e^{-j\frac{t}{\delta}} e^{-jk_0t}$$

Circa 1



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

Inoltre, se lo schermo è spesso rispetto alla profondità di penetrazione

$$t \gg \delta$$

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\zeta_0 + \zeta)^2}{4\zeta_0\zeta} \left[ 1 - e^{-\frac{2t}{\delta}} e^{-j\frac{2t}{\delta}} \right] e^{-\frac{t}{\delta}} e^{-j\frac{t}{\delta}} e^{-jk_0 t}$$

Trascurabile  
rispetto a 1



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

Quindi per schermi spessi e di buon conduttore:

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\zeta_0 + \zeta)^2}{4\zeta_0\zeta} e^{-\frac{t}{\delta}} e^{-j\frac{t}{\delta}} e^{-jk_0 t}$$

$$SE_{dB} = 20\log_{10} \left| \frac{(\zeta_0 + \zeta)^2}{4\zeta_0\zeta} e^{-\frac{t}{\delta}} e^{-j\frac{t}{\delta}} e^{-jk_0 t} \right| = 20\log_{10} \left| \frac{(\zeta_0 + \zeta)^2}{4\zeta_0\zeta} \right| e^{-\frac{t}{\delta}} \cong 20\log_{10} \left( \left| \frac{\zeta_0}{4\zeta} \right| e^{-\frac{t}{\delta}} \right)$$

$$SE_{dB} \cong 20\log_{10} \left( \left| \frac{\zeta_0}{4\zeta} \right| e^{-\frac{t}{\delta}} \right)$$





## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

Ma torniamo alla formula generale

Ricorda un coefficiente di trasmissione... è legato al disadattamento delle due interfaccie. Si chiama **Reflection Loss**

$$\frac{E_i}{E_t} = \frac{(\zeta_0 + \zeta)^2}{4\zeta_0\zeta} \left[ 1 - \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right)^2 e^{-j2kt} \right] e^{-jkt} e^{-jk_0t}$$

A parte il termine di fase questa è l'attenuazione dell'onda che fa un percorso lungo  $t$  nel mezzo. Si chiama **Absorption loss**

Qui c'è l'effetto delle riflessioni multiple è la **Multiple Reflection Loss**



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante*

In dB

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{E_i}{E_t} \right) = 20 \log_{10} (R \cdot M \cdot A)$$

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

I termini  $R_{dB}$  e  $A_{dB}$  sono sempre positivi.

Il termine  $M_{dB}$ , come abbiamo visto, è 0 se lo schermo è spesso e buon conduttore, altrimenti è negativo.

Le riflessioni interne multiple *degradano* la capacità schermante.



## Efficacia Schermante

### *Efficacia Schermante approssimata*

L'efficacia schermante si può valutare in forma approssimata valutandone separatamente i contributi:

#### *Reflection Loss*

Il metodo rigoroso seguito in precedenza corrisponde, nell'analogia con le linee di trasmissione, ad aver riportato il carico “spazio libero” ancora allo spazio libero tramite un tratto di linea con perdite.

Il metodo approssimato consiste nel considerare separatamente le due interfacce e approssimare la perdita di riflessione con i due coefficienti di riflessione e di trasmissione di un'interfaccia sola.

$$\frac{E_1}{E_i} \cong \frac{2\zeta}{\zeta_0 + \zeta}$$

$$\frac{E_t}{E_2} \cong \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta}$$

*Reflection Loss*

Di conseguenza

$$R = \left| \frac{E_i}{E_t} \right| = \left| \frac{E_i}{E_2} \right| \left| \frac{E_2}{E_t} \right| \cong \left| \frac{\zeta_0 + \zeta}{2\zeta} \right| \left| \frac{\zeta_0 + \zeta}{2\zeta_0} \right| = \frac{|\zeta_0 + \zeta|^2}{4|\zeta_0||\zeta|}$$

Si noti come, per buoni conduttori  $\zeta_0 \gg \zeta$  e quindi

$$R = \underbrace{\left| \frac{\zeta_0 + \zeta}{2\zeta} \right|}_{\text{Trasmissione alla prima interfaccia}} \underbrace{\left| \frac{\zeta_0 + \zeta}{2\zeta_0} \right|}_{\text{Trasmissione alla seconda interfaccia}} \cong \left| \frac{\zeta_0}{4\zeta} \right|$$

Ovvero il campo elettrico si riflette quasi interamente alla prima interfaccia e passa raddoppiato dalla seconda. Che passi raddoppiato dalla seconda non è un problema in quanto la maggior parte del campo è comunque riflesso dalla prima.



## Efficacia Schermante

*Reflection Loss*

Si noti esplicitamente che per i campi magnetici è:

$$\frac{H_1}{H_i} = \frac{E_1 / \zeta}{E_i / \zeta_0} \cong \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta}$$

$$\frac{H_t}{H_2} = \frac{E_t / \zeta_0}{E_2 / \zeta} \cong \frac{2\zeta}{\zeta_0 + \zeta}$$

Quindi il coefficiente di trasmissione del campo magnetico alla prima interfaccia è molto grande (circa 2) mentre il coefficiente di trasmissione alla seconda è molto piccolo.

Di conseguenza il campo magnetico è riflesso principalmente dalla *seconda* interfaccia là dove il campo elettrico è riflesso dalla *prima*.

Quindi per schermare il campo elettrico basta uno schermo sottile, in quanto il metallo dopo la prima interfaccia non è necessario. Per schermare il campo magnetico invece è preferibile uno schermo spesso



### *Reflection Loss*

In ogni caso, sia per il campo elettrico, sia per il campo magnetico, il prodotto delle due trasmissioni è uguale, quindi

$$\frac{H_1}{H_i} = \frac{E_1 / \zeta}{E_i / \zeta_0} \cong \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta}$$

### *Absorption Loss*

L'approssimazione precedente delle reflection losses è viziata dall'approssimazione di aver considerato che tutto il campo trasmesso alla prima interfaccia raggiunga la seconda interfaccia e che, allo stesso tempo, non vi siano riflessioni multiple.

Se lo schermo è così sottile da poter trascurare le perdite nel metallo allora in effetti si può ritenere che tutto il campo trasmesso alla prima interfaccia raggiunga la seconda, ma, se così è, allora tutto il campo riflesso dalla seconda interfaccia raggiungerà la prima e non sarà lecito trascurare le riflessioni multiple



## Efficacia Schermante

### *Absorption Loss*

È quindi necessario correggere l'efficacia schermate tramite le absorption losses se lo schermo è spesso, e tramite le Multiple reflection losses se lo schermo è sottile.

Per le absorption losses è sufficiente valutare di quanto si attenua il campo elettrico nel percorso dalla prima alla seconda interfaccia. Questa attenuazione è data dall'esponenziale reale  $\exp(-t/\delta)$ , quindi:

$$A_{dB} = 20 \log_{10} \frac{1}{e^{-\frac{t}{\delta}}} = 8.6859 \frac{t}{\delta}$$

L'efficacia dello schermo è quindi aumentata di 8.7dB per ogni profondità di penetrazione di spessore dello schermo stesso



## Efficacia Schermante

### *Multiple Reflections Loss*

Le Multiple reflection losses sono più complesse da considerare, ma sono indispensabili in quanto *degradano* le proprietà dello schermo.

L'onda che effettua una riflessione interna multipla è soggetta a una doppia attenuazione per assorbimento, in quanto fa due volte il percorso all'interno dello schermo.

Se però lo schermo è sottile queste perdite possono non essere sufficienti a permettere di trascurare le riflessioni multiple.

Il campo trasmesso all'interno della schermatura sarà quindi costituito da:

$$E_t = E_t^{(1)} + E_t^{(2)} + E_t^{(3)} + \dots$$

Campo trasmesso  
nell'ipotesi di assenza  
di riflessioni interne.

Contributi  
incrementali dalle  
riflessioni interne



*Multiple Reflection loss*

Ovvero:

$$E_t = E_t^{(1)} (1 + \Delta^{(2)} + \Delta^{(3)} + \dots)$$

 $E^{(0)}$ 

$$E_t^{(1)} = \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta} E^{(0)}$$

$$E_r^{(1)} = \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} E^{(0)}$$

Questo campo riflesso si propaga nella direzione delle  $z$  negative fino alla prima interfaccia, sulla quale incide come

$$E_r^{(1)} e^{jk(-z)}$$



## Efficacia Schermante

*Multiple Reflection loss*

Si ha una nuova riflessione con lo stesso coefficiente di riflessione della precedente (si sta sempre cercando di uscire dal materiale che costituisce lo schermo).

Il campo che si allontana è ora

$$\frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} E_r^{(1)} e^{jk(-t)}$$

Questo campo riflesso si propaga nella direzione delle  $z$  positive fino alla seconda interfaccia, sulla quale incide come

$$\frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} E_r^{(1)} e^{jk(-t)} e^{-jkt}$$

Di questo campo parte viene trasmessa oltre l'interfaccia con il proprio coefficiente di trasmissione, parte viene nuovamente riflessa...

$$E_t^{(2)} = \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta} \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} E_r^{(1)} e^{jk(-t)} e^{-jkt} = \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta} \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right)^2 E^{(0)} e^{-2jkt} = \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right)^2 E_t^{(1)} e^{-2jkt}$$



## Efficacia Schermante

*Multiple Reflection loss*

Quindi è

$$E_t^{(2)} = \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right)^2 E_t^{(1)} e^{-2jkt} \Rightarrow \Delta^{(2)} = \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right)^2 e^{-2jkt}$$

Se definiamo

$$\Delta = \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} e^{-jkt}$$

È immediato verificare come sia

$$E_t = E_t^{(1)} (1 + \Delta^2 + \Delta^4 + \dots) = \frac{E_t^{(1)}}{1 - \Delta^2}$$



## Efficacia Schermante

*Multiple Reflection loss*

La perdita per riflessione multipla è legata al rapporto fra campo trasmesso senza e con le riflessioni multiple:

$$SE = \frac{E_i}{E_t} = \frac{E_i}{E_t^{(1)}} \frac{E_t^{(1)}}{E_t} = \underbrace{\frac{E_i}{E_t^{(1)}}}_{\text{qui ci sono le perdite senza riflessioni multiple (assorbimento e riflessione)}} \underbrace{\frac{E_t^{(1)}}{E_t}}_{\text{e qui ci sono le riflessioni multiple}} = \frac{1}{(1 - \Delta^2)}$$

Definiamo infine

$$M_{dB} = 20 \log_{10} (1 - \Delta^2) = 20 \log_{10} \left| 1 - \left( \frac{\zeta_0 - \zeta}{\zeta_0 + \zeta} \right) e^{-2jkt} \right|$$



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante approssimata*

Se infine lo schermo è di *buon conduttore*:

$$R = \left| \frac{\zeta_0 + \zeta}{2\zeta} \right| \left| \frac{\zeta_0 + \zeta}{2\zeta_0} \right| \cong \left| \frac{\zeta_0}{4\zeta} \right| \cong \left| \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{4 \sqrt{\frac{\omega \mu}{\sigma}} e^{j\frac{\pi}{4}}} \right| = \left| \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu_r \epsilon_0}} \right|$$

$$R_{dB} \cong 20 \log_{10} \left( \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu_r \epsilon_0}} \right)$$

Si osservi che le perdite per riflessione sono tanto più alte quanto più è alta la conduciubilità e bassa la frequenza. In particolare la schermatura decade di 10 dB/decade con la frequenza.

Si noti inoltre che un materiale magnetico ha capacità schermanti inferiori.



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante approssimata*

Se si definisce una *conducibilità relativa* rispetto al rame:

$$\sigma = \sigma_r \sigma_{Cu} \quad \sigma_{Cu} = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$$

$$\begin{aligned} R_{dB} &\cong 20 \log_{10} \left( \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma \sigma_r}{2\pi f \mu_r \epsilon_0}} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{2\pi \epsilon_0}} \sqrt{\frac{\sigma_r}{f \mu_r}} \right) = \\ &20 \log_{10} \left( \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{2\pi \epsilon_0}} \right) + 20 \log_{10} \left( \sqrt{\frac{\sigma_r}{f \mu_r}} \right) = 168 + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_r}{f \mu_r} \right) \end{aligned}$$

$$R_{dB} \cong 168 + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_r}{f \mu_r} \right)$$



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante approssimata*

Qualche esempio:

Materiale		$f=10\text{kHz}$	$f=10\text{MHz}$	$f=10\text{GHz}$
Rame	$\sigma_r = 1$ $\mu_r = 1$	128dB	98dB	68dB
Acciaio	$\sigma_r = 0.1$ $\mu_r = 1000$	88dB	58dB	28dB



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante approssimata*

Per le perdite di assorbimento, se è un *buon conduttore*:

$$A_{dB} = 20 \log_{10} \frac{1}{e^{-\frac{t}{\delta}}} = 8.6859 \frac{t}{\delta} = 1.314 t \sqrt{f \mu_r \sigma_r}$$

Con  $t$  in millimetri.

Si noti che le perdite di assorbimento vanno con la radice quadrata della frequenza *in scala logaritmica*. Le perdite di riflessione invece diminuiscono con la radice della frequenza *in scala lineare* e di conseguenza perdono 10 dB/decade.

Questo comportamento è molto diverso e le perdite per assorbimento crescono molto rapidamente al crescere della frequenza.

Inoltre in questo caso, le proprietà magnetiche del materiale portano ad un aumento delle perdite.





## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante approssimata*

Osserviamoi esplicitamente come le perdite per riflessione dipendano da  $\sigma_r / \mu_r$  laddove le perdite per assorbimento dipendono da  $\sigma_r \mu_r$

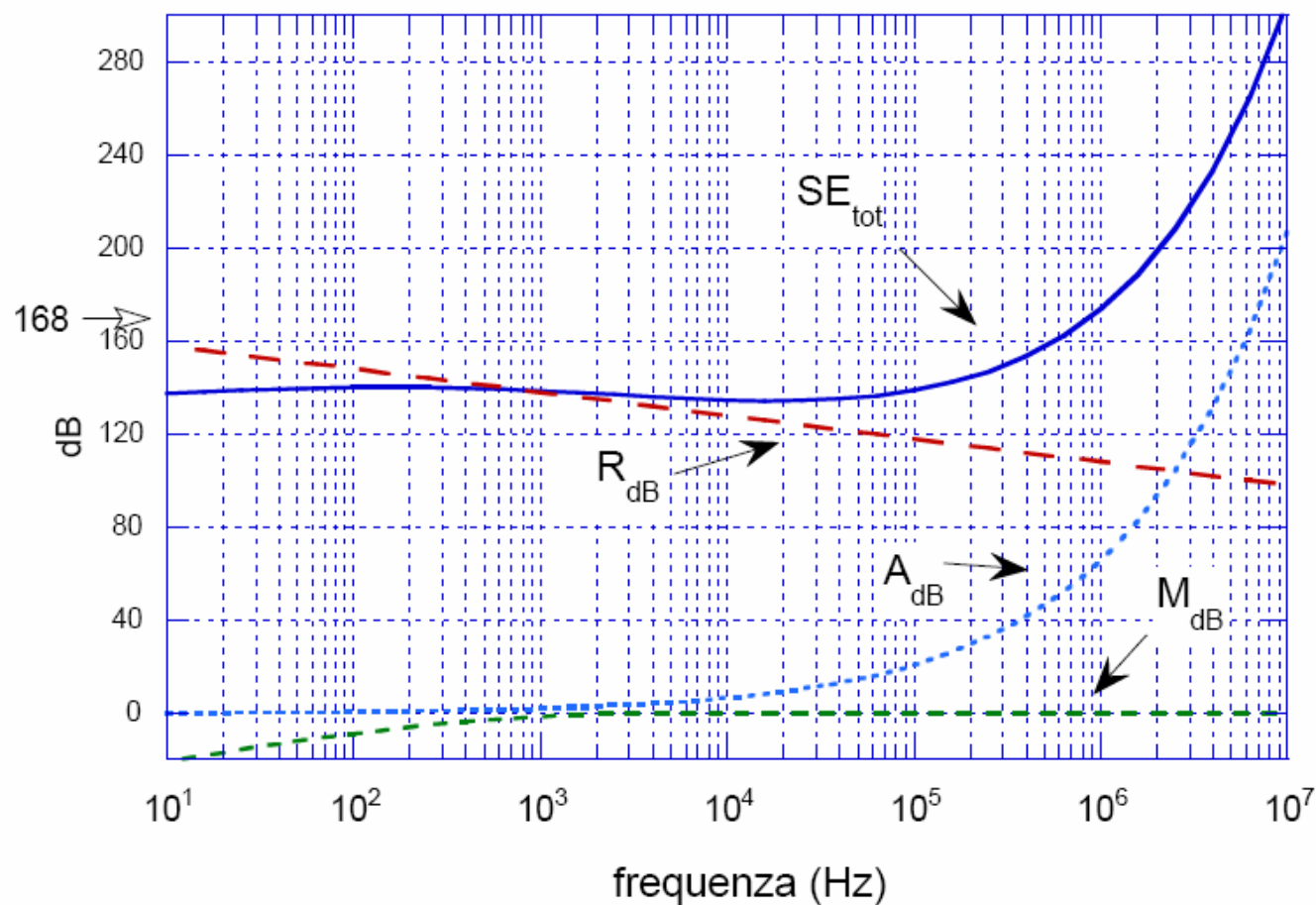
Material	$\sigma_r$	$\mu_r$	$A \sim \mu_r \sigma_r$	$R \sim \sigma_r / \mu_r$
Silver	1.05	1	1.05	1.05
Copper	1	1	1	1
Gold	0.7	1	0.7	0.7
Aluminum	0.61	1	0.61	0.61
Brass	0.26	1	0.26	0.26
Bronze	0.18	1	0.18	0.18
Tin	0.15	1	0.15	0.15
Lead	0.08	1	0.08	0.08
Nickel	0.2	600	120	$3.3 \times 10^{-4}$
Stainless steel (430)	0.02	500	10	$4 \times 10^{-5}$
Steel (SAE 1045)	0.1	1000	100	$1 \times 10^{-4}$
Mumetal (at 1 kHz)	0.03	30,000	900	$1 \times 10^{-6}$
Superpermalloy (at 1 kHz)	0.03	100,000	3000	$3 \times 10^{-7}$



## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante approssimata*

Schermo di rame da mezzo millimetro

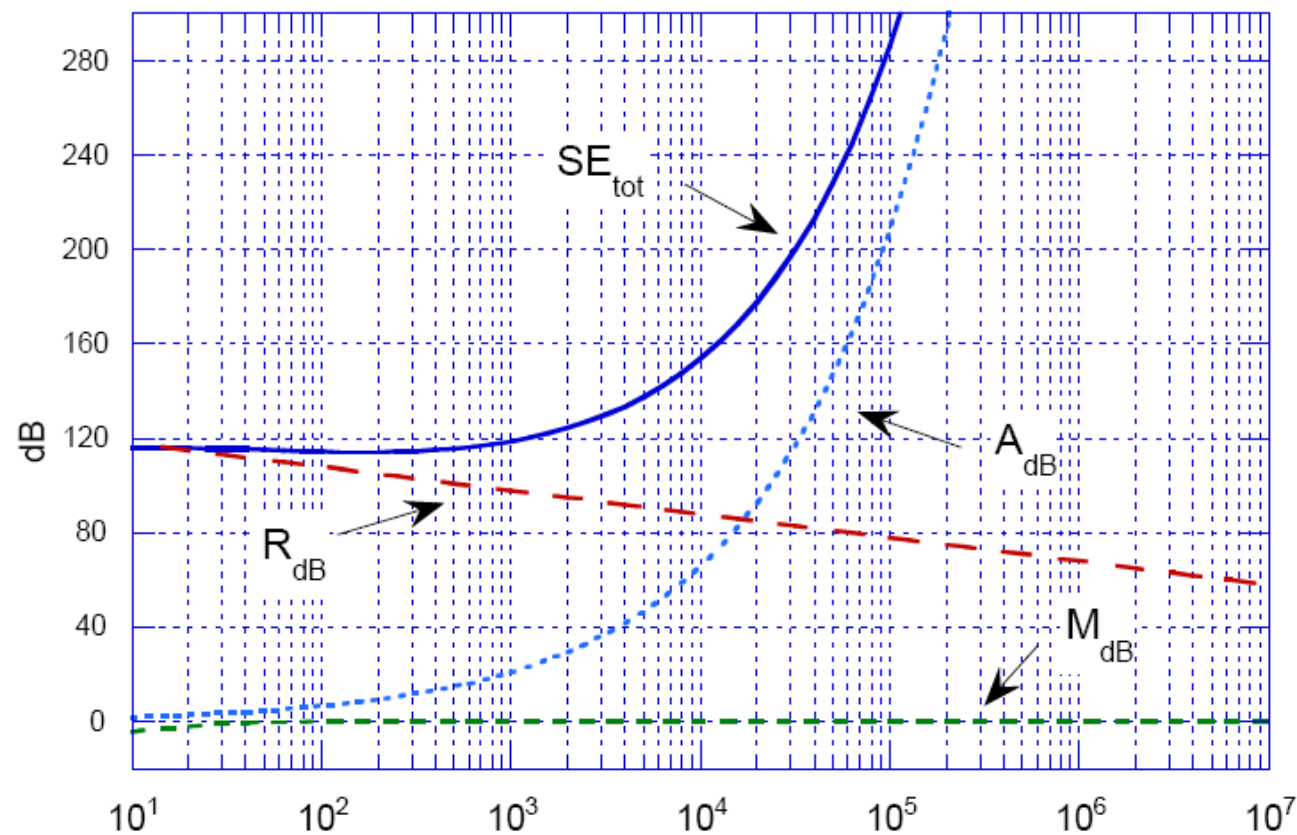




## Efficacia Schermante

*Efficacia Schermante approssimata*

Schermo di acciaio da mezzo millimetro

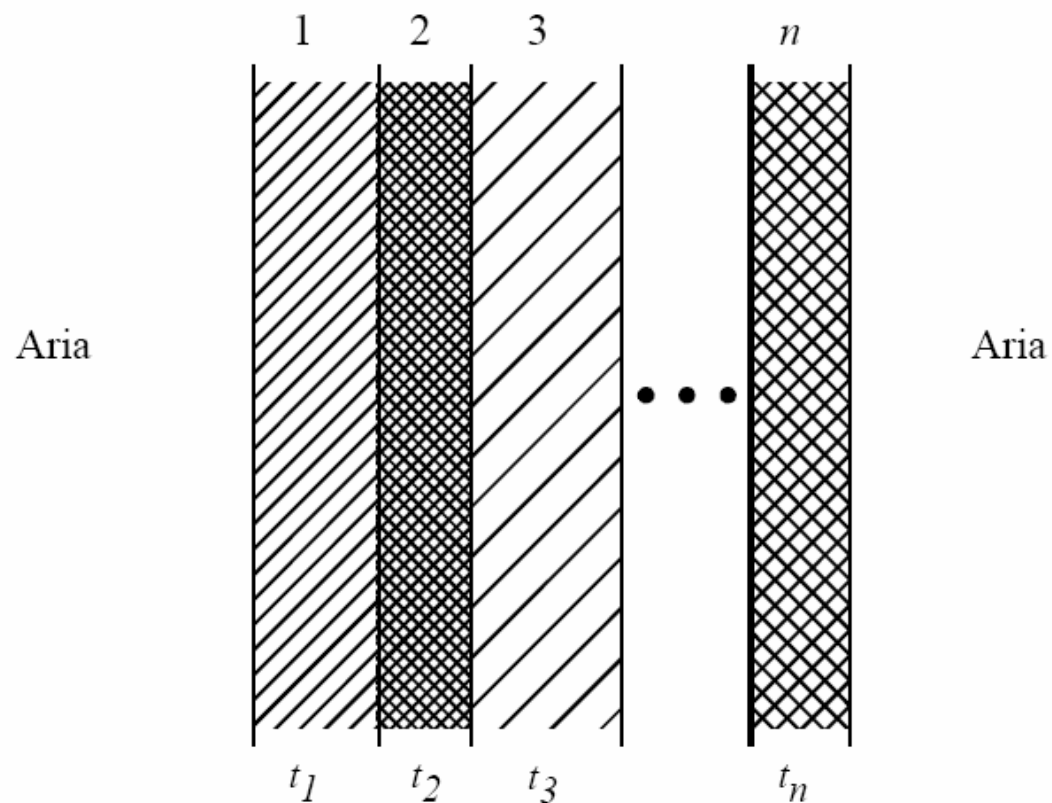




## Schermi Multilamina

*Schermi multilamina*

Si supponga di avere uno schermo costituito da più lamine di materiali diversi





## Schermi Multilamina

*Schermi multilamina*

Le impedenze siano  $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_n$  e gli spessori  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$

È sempre possibile individuare tre contributi principali:  $R$ ,  $A$  ed  $M$

Per le riflessioni semplici

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2\zeta_1}{\zeta_0 + \zeta_1} \frac{2\zeta_2}{\zeta_1 + \zeta_2} \frac{2\zeta_3}{\zeta_2 + \zeta_3} \dots \frac{2\zeta_n}{\zeta_{n-1} + \zeta_n}$$

Quindi

$$R_{dB} = 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_1} \right) \right| + 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_2} \right) \right| + 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_3} \right) \right| + \dots + 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_n}{\zeta_0} \right) \right|$$

*Schermi multilamina*

Per le riflessioni multiple la matematica è più complessa, e si ha

$$M_{dB} = 20 \log_{10} \left| \left(1 - \nu_1 e^{-2jk_1 t_1}\right) \left(1 - \nu_2 e^{-2jk_2 t_2}\right) \left(1 - \nu_3 e^{-2jk_3 t_3}\right) \dots \left(1 - \nu_n e^{-2jk_n t_n}\right) \right| = \\ 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_1 e^{-2jk_1 t_1} \right| + 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_2 e^{-2jk_2 t_2} \right| + 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_3 e^{-2jk_3 t_3} \right| + \dots + 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_n e^{-2jk_n t_n} \right|$$

Dove

$$k_i = \omega \sqrt{\mu_i \left( \varepsilon_i - j \frac{\sigma_i}{\omega} \right)}; \quad \nu_i = \frac{\zeta_i - \zeta_{i-1}}{\zeta_i + \zeta_{i-1}} \frac{\zeta_i - \hat{\zeta}_i}{\zeta_i + \hat{\zeta}_i}$$

Con

$$\hat{\zeta}_i = \zeta_{i+1} \frac{\zeta_{i+1} + \zeta_{i+1} \tanh(k_{i+1} t_{i+1})}{\zeta_{i+1} + \hat{\zeta}_{i+1} \tanh(k_{i+1} t_{i+1})}$$

Ovvero l'impedenza che la sezione *iesima* vede verso destra.



## Schermi Multilamina

## 2 lamine

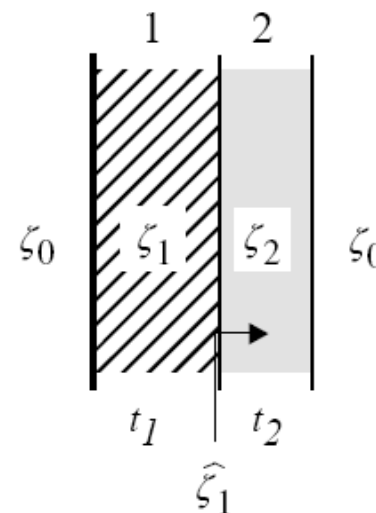
Vediamo uno schermo a doppia lamina rame/acciaio

$$R_{dB} = 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_1} \right) \right| + 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_2} \right) \right| + 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_0} \right) \right|$$

Dove, per buoni conduttori, il primo termine, dipendente dalla frequenza, è dominante, mentre l'ultimo è trascurabile. Il termine centrale vale

$$20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_2} \right) \right| = 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\sqrt{\frac{\omega\mu_1}{\sigma_1}} e^{j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\frac{\omega\mu_2}{\sigma_2}} e^{j\frac{\pi}{4}}} \right) \right| = 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{\frac{\sigma_2\mu_1}{\sigma_1\mu_2}} \right) \right|$$

Indipendente dalla frequenza.





## Schermi Multilamina

## 2 lamine

L'assorbimento è semplicemente la somma degli assorbimenti delle singole lamine

$$A_{dB} = 8.6859 \left( \frac{t_1}{\delta_1} + \frac{t_2}{\delta_2} \right)$$

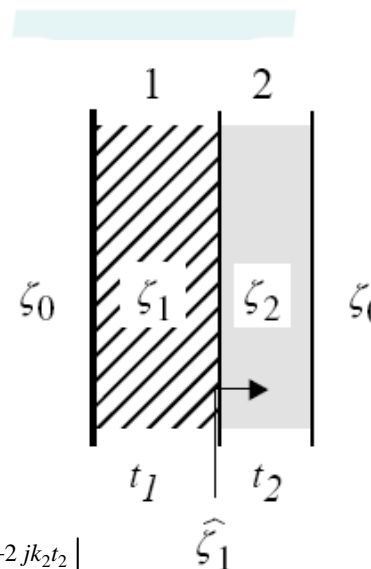
Le multiple riflessioni danno

$$M_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - v_1 e^{-2jk_1 t_1} \right| + 20 \log_{10} \left| 1 - v_2 e^{-2jk_2 t_2} \right|$$

Con

$$v_1 = \frac{\zeta_1 - \zeta_0}{\zeta_1 + \zeta_0} \frac{\zeta_1 - \hat{\zeta}_1}{\zeta_1 + \hat{\zeta}_1}; \quad \hat{\zeta}_1 = \zeta_2 \frac{\hat{\zeta}_2 + \zeta_2 \tanh(k_2 t_2)}{\zeta_2 + \hat{\zeta}_2 \tanh(k_2 t_2)}$$

$$v_2 = \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\zeta_2 + \zeta_1} \frac{\zeta_2 - \hat{\zeta}_2}{\zeta_2 + \hat{\zeta}_2}; \quad \hat{\zeta}_2 = \zeta_0$$



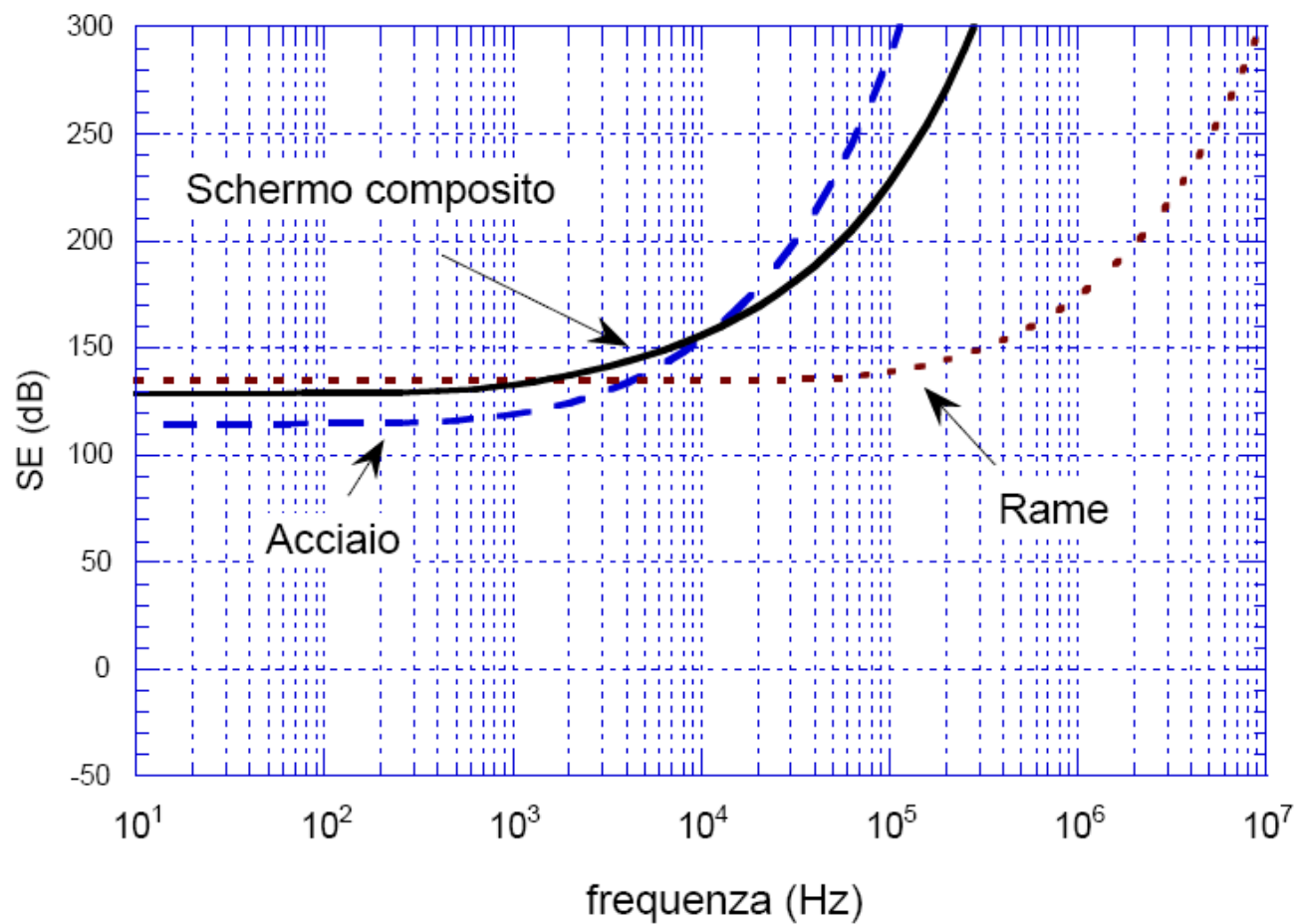




## Schermi Multilamina

*2 lamine*

Schermo singolo rame 0.5mm, schermo singolo acciaio 0.5mm e schermo composito acciaio (0.25mm) + rame (0.25mm).

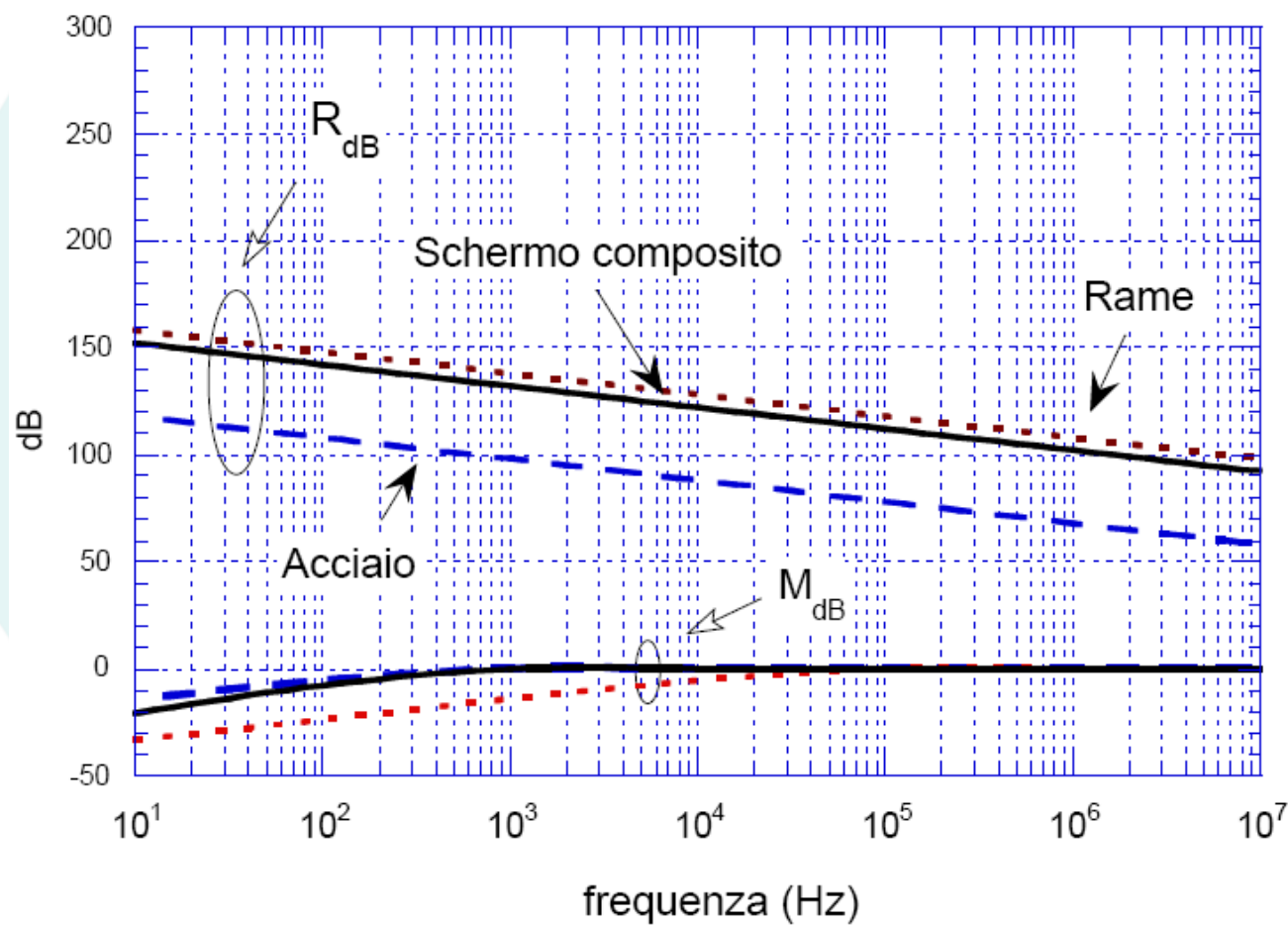




## Schermi Multilamina

## 2 lamine

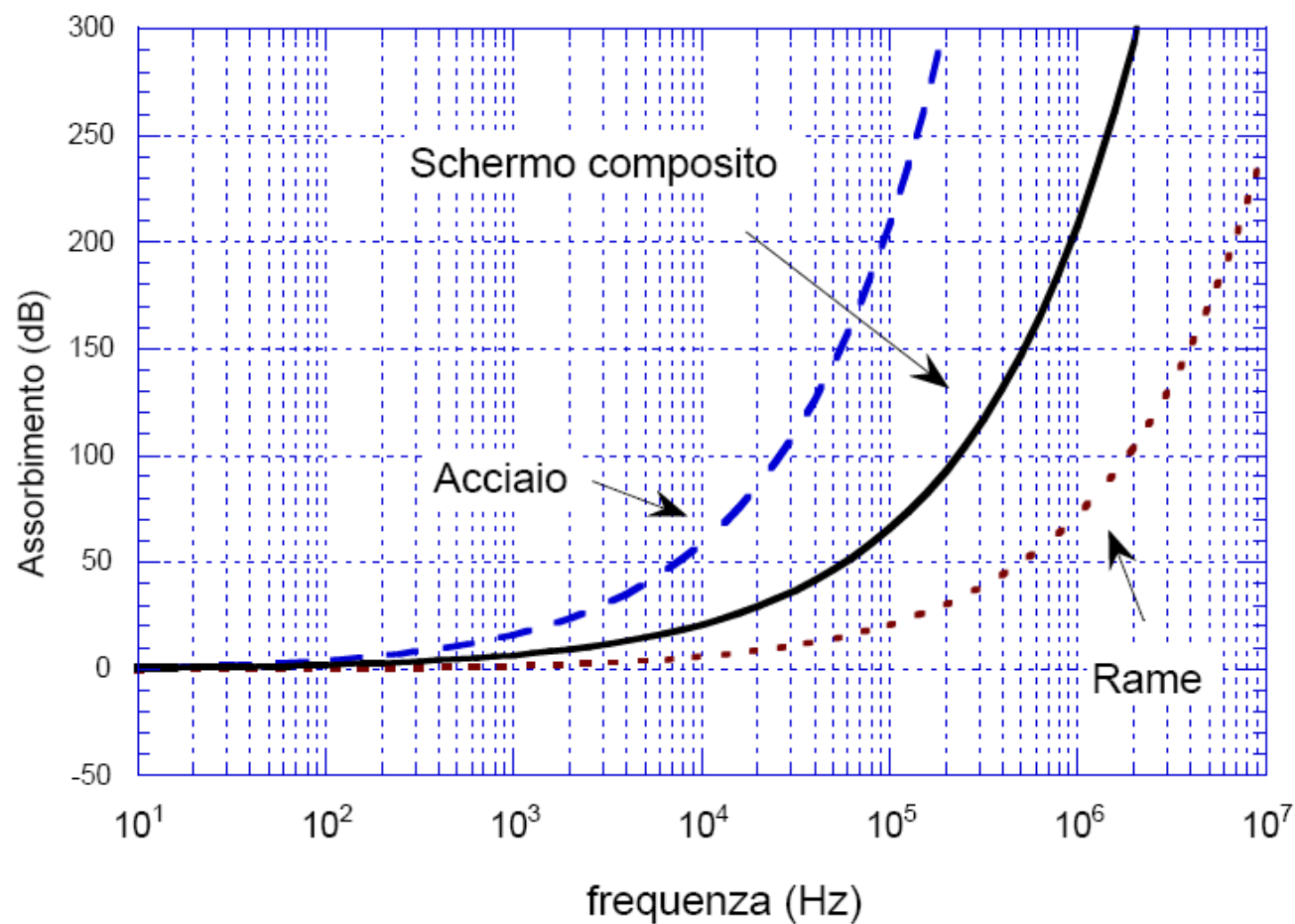
Analisi delle sole riflessioni (semplici e multiple)





2 lamine

Analisi del solo assorbimento



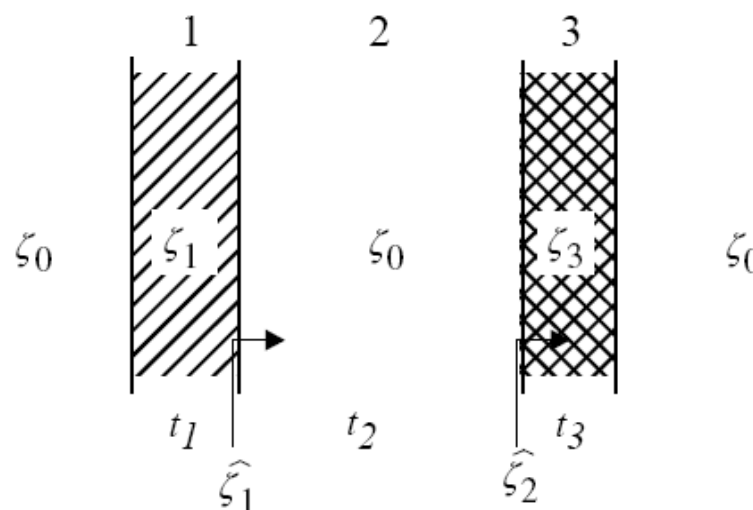


## Schermi Multilamina

## 3 lamine

Vediamo uno schermo a doppia lamina con aria internosta

$$R_{dB} = 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_1} \right) \right| + 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_0} \right) \right| +$$
$$+ 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_2} \right) \right| + 20\log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_2}{\zeta_0} \right) \right|$$



Dove stavolta nessun termine è indipendente dalla frequenza.

L'assorbimento è sempre la somma degli assorbimenti delle singole lamine (l'aria non assorbe)

$$A_{dB} = 8.6859 \left( \frac{t_1}{\delta_1} + \frac{t_2}{\delta_2} \right)$$

*3 lamine*

Le multiple riflessioni danno

$$M_{dB} = 20\log_{10} |1 - \nu_1 e^{-2jk_1 t_1}| + 20\log_{10} |1 - \nu_2 e^{-2jk_0 t_2}| + 20\log_{10} |1 - \nu_3 e^{-2jk_3 t_3}|$$

Con

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \frac{\zeta_1 - \zeta_0}{\zeta_1 + \zeta_0} \frac{\zeta_1 - \hat{\zeta}_1}{\zeta_1 + \hat{\zeta}_1}; & \hat{\zeta}_1 &= \zeta_0 \frac{\hat{\zeta}_2 + \zeta_0 \tanh(k_0 t_2)}{\zeta_0 + \hat{\zeta}_2 \tanh(k_0 t_2)} \\ \nu_2 &= \frac{\zeta_0 - \zeta_1}{\zeta_0 + \zeta_1} \frac{\zeta_0 - \hat{\zeta}_2}{\zeta_0 + \hat{\zeta}_2}; & \hat{\zeta}_2 &= \zeta_3 \frac{\hat{\zeta}_3 + \zeta_3 \tanh(k_3 t_3)}{\zeta_3 + \hat{\zeta}_3 \tanh(k_3 t_3)} \\ \nu_3 &= \frac{\zeta_3 - \zeta_0}{\zeta_3 + \zeta_0} \frac{\zeta_3 - \hat{\zeta}_3}{\zeta_3 + \hat{\zeta}_3}; & \hat{\zeta}_3 &= \zeta_0 \end{aligned}$$

*3 lamine*

Se i due schermi sono dello stesso materiale e di ugual spessore

$$R_{dB} = 40 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_0}{\zeta_1} \right) \right| + 40 \log_{10} \left| \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\zeta_1}{\zeta_0} \right) \right| \cong 40 \log_{10} \left| \frac{\zeta_0}{4\zeta_1} \right|$$

$$A_{dB} = 2 \times 8.6859 \left( \frac{t_1}{\delta_1} \right)$$

$$M_{dB} = 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_1 e^{-2jk_1 t_1} \right| + 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_2 e^{-2jk_0 t_2} \right| + 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_3 e^{-2jk_1 t_1} \right|$$

Ma qui  $k_0$  è reale, quindi il secondo termine è inevitabilmente ben maggiore degli altri

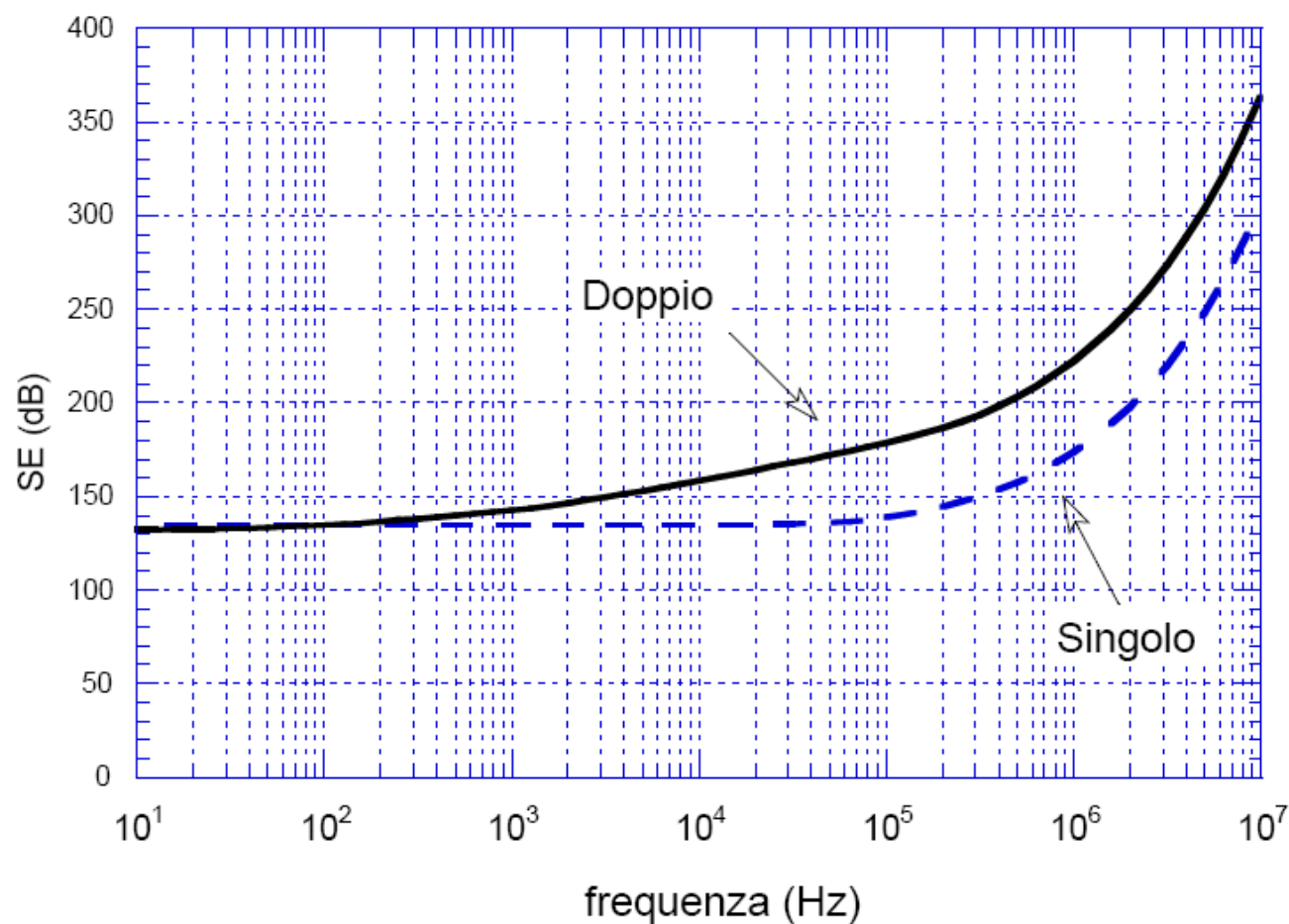
$$M_{dB} \cong 20 \log_{10} \left| 1 - \nu_2 e^{-2jk_0 t_2} \right|$$



## Schermi Multilamina

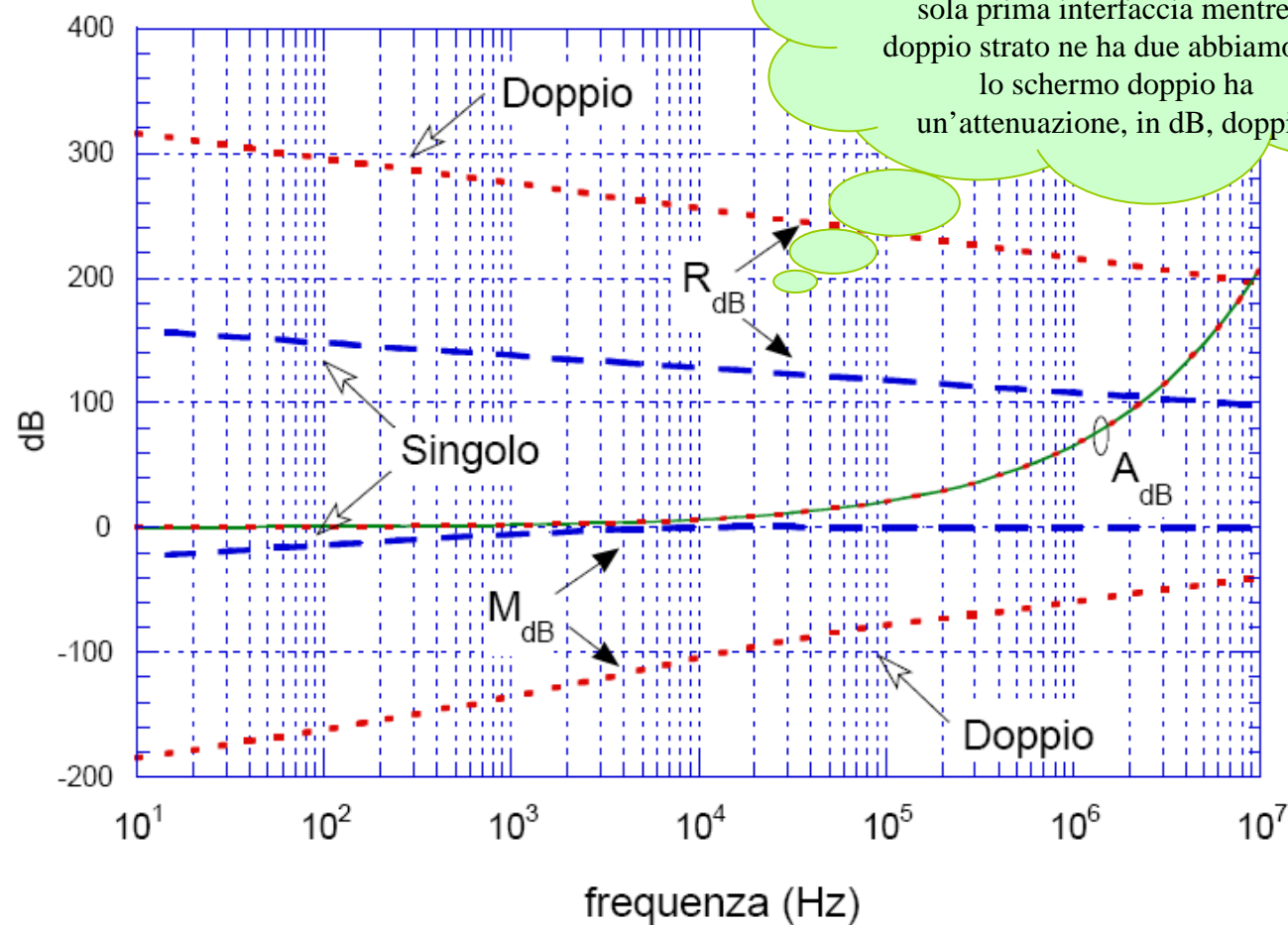
*3 lamine*

Schermo singolo rame 0.5mm, confrontato con schermo multiplo, costituito da due fogli di rame da 0.25mm distanziati di 2.5cm.





## Schermi Multilamina

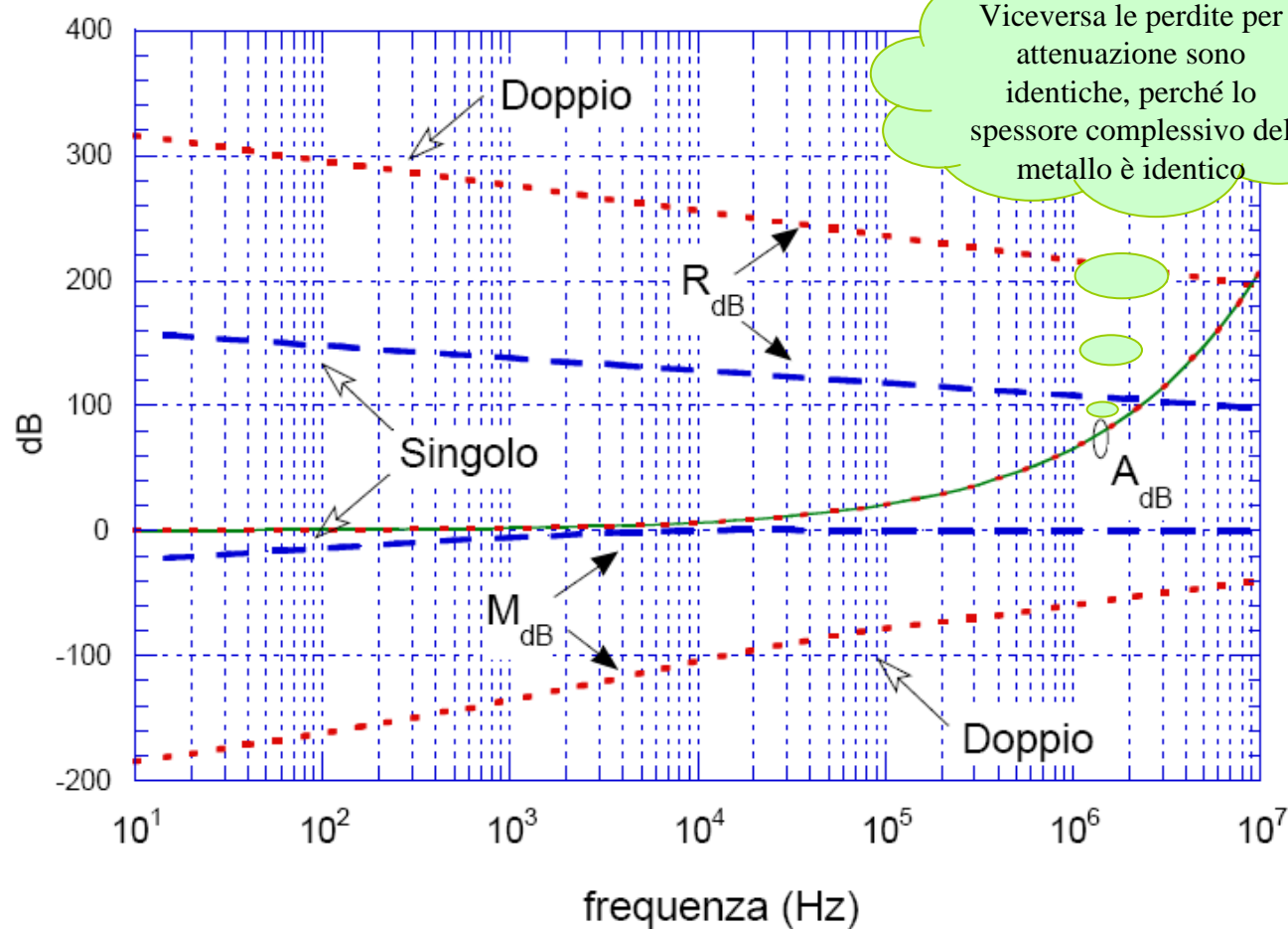
*3 lamine*

Siccome le perdite di riflessione dipendono dalla prima interfaccia aria-metallo e il singolo strato ha una sola prima interfaccia mentre il doppio strato ne ha due abbiamo che lo schermo doppio ha un'attenuazione, in dB, doppia.





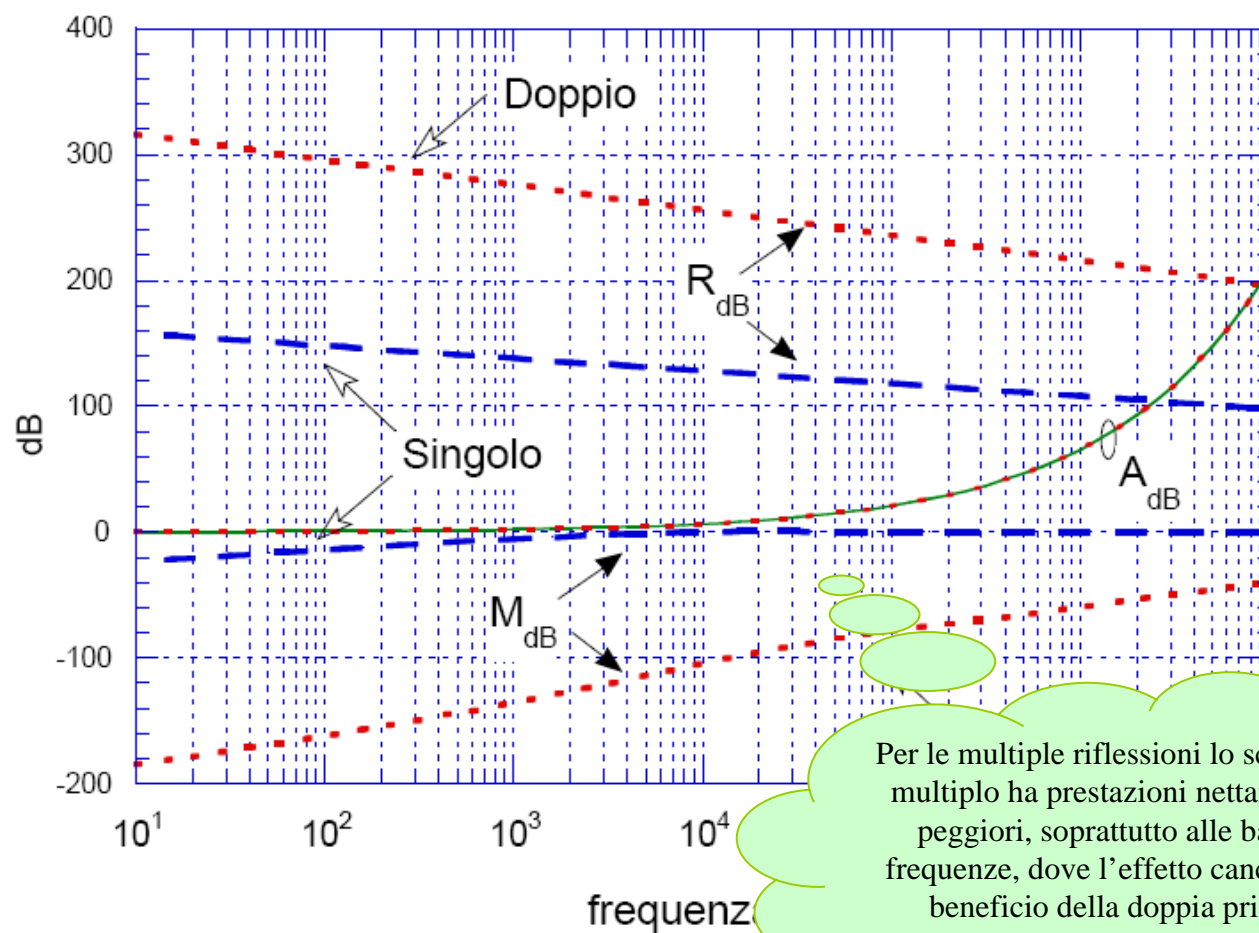
## Schermi Multilamina

*3 lamine*



## Schermi Multilamina

3 lamine



Per le multiple riflessioni lo schermo multiplo ha prestazioni nettamente peggiori, soprattutto alle basse frequenze, dove l'effetto cancella il beneficio della doppia prima interfaccia