

Applicatori di Potenza in guida a 2,45 GHz: progetto e caratterizzazione di una cavità risonante debolmente accoppiata e dell'adattatore di impedenza

Andrea Bruschi⁽¹⁾, Sadik Malaj⁽²⁾

⁽¹⁾ IFAC-CNR, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), Italy

⁽²⁾ Elab Scientific, Via Madonna del Piano, 10 50019 Sesto Fiorentino (FI)

1 - Introduzione

Questo studio si inquadra all'interno del progetto TemArt, che mira a sviluppare prodotti e servizi innovativi per la caratterizzazione e la conservazione di beni culturali. Più in particolare l'obiettivo del gruppo di lavoro è la realizzazione di un prototipo di apparato per il trattamento a microonde di superfici (lapidei, pareti in genere) attaccate da biodeteriogeni (soprattutto licheni, ma anche muffe ed alghe).

Questo apparato è composto da un generatore a microonde commerciale, costituito da un alimentatore Dipolar AB (modello Magdrive1000 standard) e da un magnetron Panasonic 2M244-M14, e da un applicatore di potenza collegato al generatore tramite cavo coassiale. L'applicatore può essere schematizzato come una cavità risonante accoppiata tramite una terminazione a diaframma al materiale da trattare. Per la realizzazione dell'applicatore si ha bisogno di tre componenti (Fig 1): la transizione da cavo a guida d'onda, che trasferisce la potenza dal generatore alla guida d'onda, un tratto di guida che funge da adattatore di impedenza per disaccoppiare il generatore dalla cavità risonante, e dalla terminazione che accoppia la cavità risonante con il materiale. Il circuito equivalente dell'applicatore di potenza è riportato in Fig 2. In questo lavoro tratteremo la seconda parte dell'applicatore, cioè il tratto di guida che funge da adattatore di impedenza.

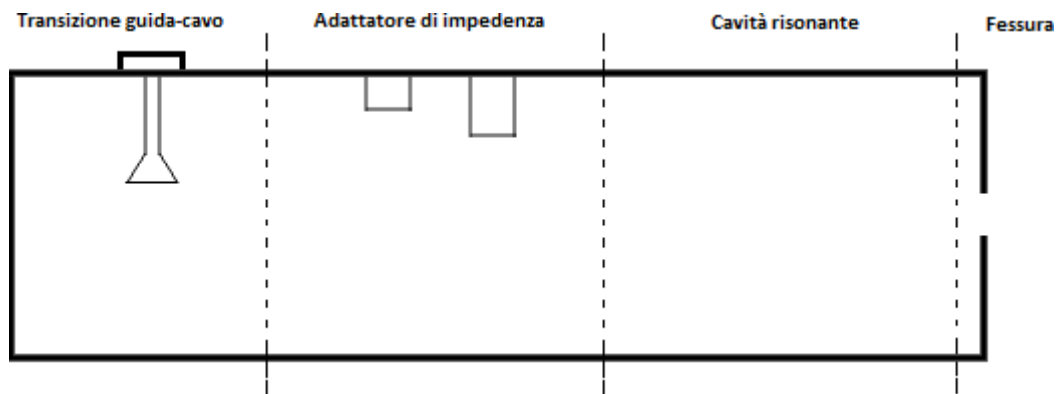


Fig. 1 - Schema di realizzazione dell'applicatore: a sinistra la transizione cavo-guida, in mezzo il tratto di guida che agisce da adattatore di impedenze e a destra il tratto terminale dell'applicatore.

La realizzazione dell'adattatore di impedenza è un passo importante per la realizzazione dell'applicatore di potenza: infatti un corretto adattamento consente di disaccoppiare il generatore dalla cavità risonante; in questo modo il generatore "vede" una guida chiusa sulla sua impedenza caratteristica indipendentemente dal carico su cui sta lavorando l'applicatore.

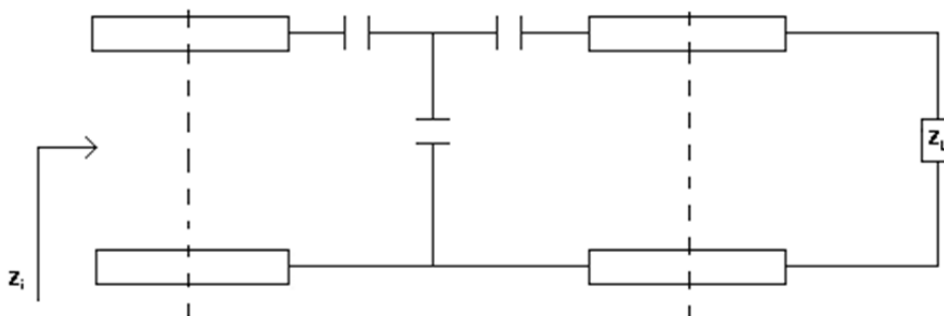


Fig. 2 - Schema circuitale equivalente dell'applicatore: la cavità risonante chiusa sul carico Z_L (che schematizza il materiale da trattare) viene disaccoppiata dal generatore tramite un tratto di guida che funziona da adattatore di impedenza; in questo modo il generatore "vede" un tratto di guida chiusa sull'impedenza caratteristica della guida indipendentemente dal carico.

Per realizzare questo tratto di guida, sono stati studiati adattatori di impedenza commerciali, accoppiati alla transizione cavo-guida progettata e costruita precedentemente [1], ed è stato costruito un adattatore di impedenza a due *stubs*. Successivamente è stato costruito, utilizzando il software COMSOL Multiphysics, un modello che simulasse l'applicatore ed è stato verificato l'accordo tra i risultati della simulazione e quelli sperimentali. L'ottimizzazione delle caratteristiche dell'adattatore (distanza tra gli *stubs*, profondità nella guida degli stessi, etc.) è stata effettuata tramite simulazione, ricercando le condizioni che minimizzassero il rapporto d'onda stazionaria (ROS) nell'intervallo di frequenze 2,4-2,5 GHz in modo da studiare la risposta dell'applicatore in un intorno della frequenza di lavoro (2,45 GHz). La versione ottimizzata dell'adattatore è stata poi costruita e ne sono state studiate le prestazioni utilizzando un analizzatore di reti.

2 - Considerazioni preliminari

Come abbiamo già detto lo scopo di questa parte dell'applicatore è accoppiare la cavità risonante al generatore, in modo che quest'ultimo veda l'applicatore come un carico adattato che è praticamente indipendente dal carico su cui è applicato. Questo scopo lo si ottiene inserendo uno o più *stubs* in un tratto di guida d'onda: la presenza di questi può essere schematizzata come un sistema di capacità, come mostrato in Fig 3.

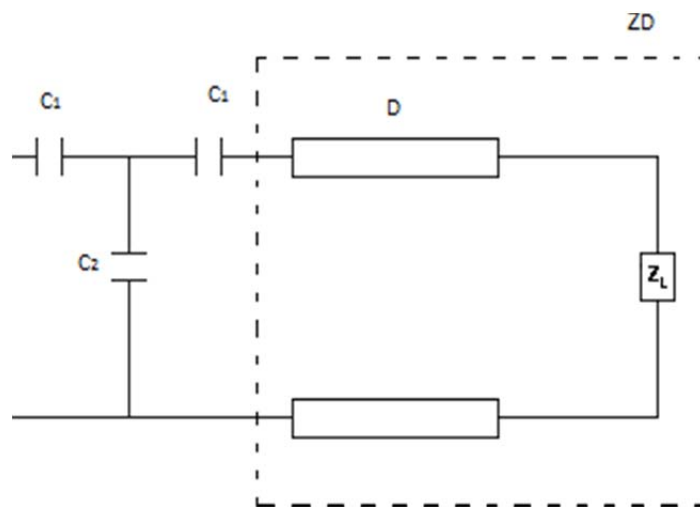


Fig. 3 - Schematizzazione circuitale dell'effetto introdotto dalla presenza dei due stubs nella guida d'onda.

Se l'impedenza introdotta dallo *stub* è in grado di annullare la parte complessa e trasformare la parte reale dell'impedenza del carico su cui è chiuso l'applicatore (Z_D), il generatore "sente" il carico dell'applicatore come una guida chiusa sulla sua impedenza caratteristica. Dunque, secondo questa schematizzazione, l'adattamento si effettua variando le capacità introdotte dagli *stubs* (C_1 e C_2), che consiste nel modificarne le caratteristiche (profondità, diametro dello *stub*, distanza fra i centri degli *stubs*, etc.), ricercando il minimo del ROS.

3 - Prima progettazione

La prima parte del lavoro è consistita nel cercare di assemblare una prima versione dell'adattatore ricercando, mediante uno studio di tipo *cut&try*, la configurazione che minimizzasse il ROS dell'applicatore. La misura del ROS è stato effettuato tramite analizzatore di reti *HP Agilent 8753A Network Analyzer* dopo aver posto l'applicatore su di un materiale di prova (mattone).

L'applicatore è costituito dalla transizione cavo-guida studiata precedentemente [1], da un tratto di guida con *stubs* variabili (oggetto dello studio con metodo *cut&try*) che ha il compito di funzionare da cavità risonante in cui accumulare l'energia che verrà poi dissipata sul materiale da trattare attraverso l'ultima parte dell'applicatore, la terminazione, che è composta da una flangia con fessura di dimensioni 46 mm x 5 mm, due strati di bollinato di sezione uguale a quella della guida e uno strato di schiuma poliuretanicca flessibile inumidita con acqua (il bollinato e la schiuma permettono di migliorare l'adattamento dell'applicatore al materiale da trattare). In Fig. 4 e in Fig. 5 si possono vedere rispettivamente la parte terminale dell'applicatore e l'apparato utilizzato per la misura.

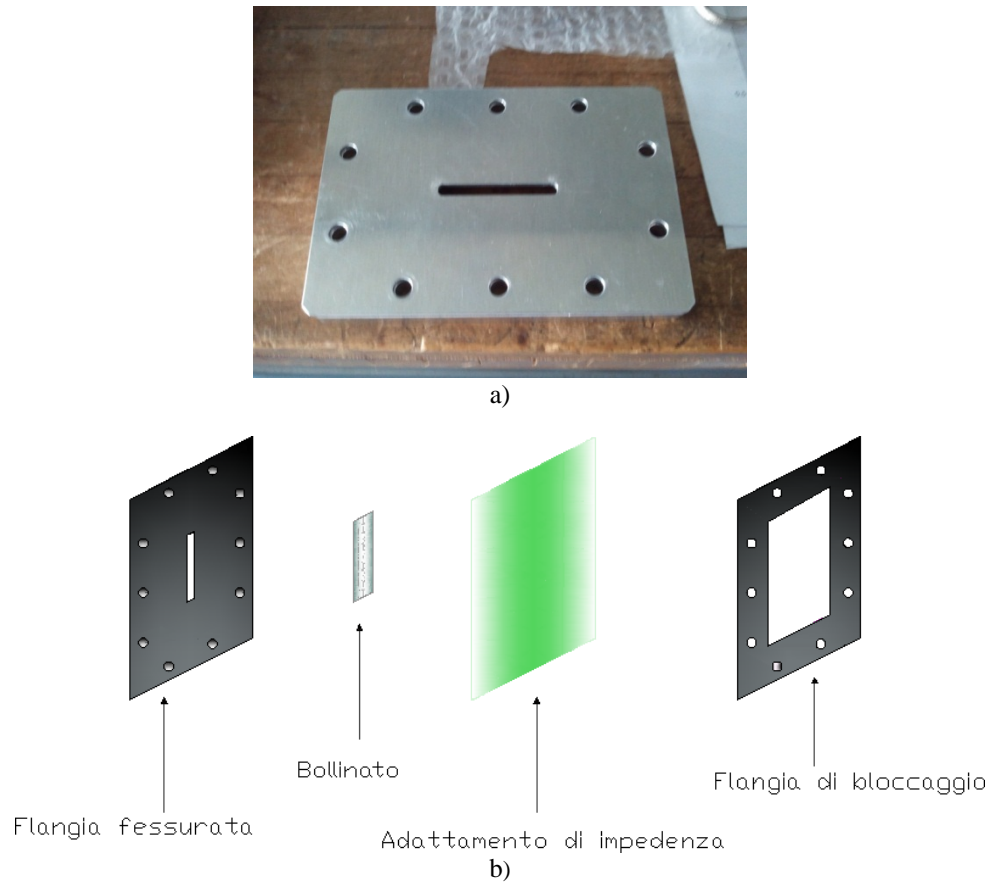


Fig 4 - Terminazione dell'applicatore: (a) Immagine della flangia fessurata; (b) Schematizzazione della parte terminale dell'applicatore.

Per la realizzazione dell'adattatore di potenza è stato utilizzato un tratto di guida d'onda lunga circa 170 mm ed è stata praticata una fessura (55 mm x 4 mm) su una delle due facce a maggior superficie per permettere lo spostamento dello *stub* lungo l'asse maggiore della faccia (Fig. 6). Il primo passo è stato quello di capire quale configurazione (con uno *stub* o con due *stubs*) fosse la migliore: senza variare la profondità di penetrazione nella guida dei cilindri, sono stati testati entrambi i casi ed è risultato che quello con due *stubs* è il migliore per il nostro scopo.



Fig. 5 - Apparato utilizzato per la misura di ROS: l'applicatore e il materiale (mattoni) su cui è applicato.

A questo punto, dopo aver impostato una distanza tra i due *stubs* pari a quella misurata su adattatori d'impedenza commerciali, e rimandando a più avanti lo studio di questa variabile, al variare della frequenza tra 2,43 e 2,5 GHz (a passi di 10 MHz) sono state ricercate le condizioni per cui il minimo del ROS fosse centrato sulla frequenza scelta: il diametro dei cilindri è stato lasciato invariato (20 mm) mentre sono stati lasciati liberi come parametri le profondità di penetrazione dei cilindri in modo da capire entro quali intervalli effettuare lo studio di ottimizzazione. In Tab. 1 sono riportati i risultati di questo primo studio: nell'intervallo di frequenze studiato si nota che la profondità del secondo cilindro varia intorno ai 18 mm mentre la profondità del primo ha un'escursione molto maggiore. Per questo è stato deciso di effettuare nuovamente le stesse misure fissando a tre valori diversi la profondità del secondo *stub* (17,50 mm in Tab. 2, 18 mm in Tab. 3 e 19 mm in Tab. 4): in seguito a questo studio, è stato scelto di fissare come valore di profondità per il primo cilindro (guardando dal generatore) 10 mm, un valore intermedio fra quelli che minimizzano il ROS a 2,45 GHz nei tre casi sopra citati.

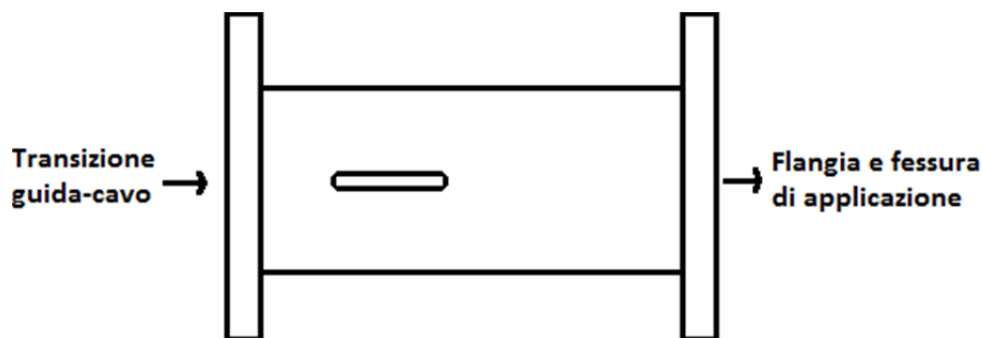


Fig. 6 - Visione dall'alto del tratto di guida adattatore di impedenza: la fessura, posta sull'asse maggiore della faccia, permette lo spostamento degli *stubs*.

Tab. 1 – Prima stima delle condizioni di ottimizzazione del ROS: sono riportati la frequenza di studio (prima colonna), le profondità dei due cilindri (seconda e terza colonna) e il valore di ROS in queste condizioni (quarta colonna).

Frequenza (GHz)	Stub A (mm)	Stub B (mm)	S11 (ROS)
2,43	5	18	1,3
2,44	7	18	1,09
2,45	7	17,5	1,04
2,46	6	17	1,06
2,47	6	16	1,2
2,48	5	16,5	1,14
2,49	15	18	1,03
2,5	15	17,7	1,07

Tab. 2 – Stima della profondità del primo cilindro nella minimizzazione del ROS al variare della frequenza fissando la profondità del secondo a 17,5 mm.

Frequenza (GHz)	Stub A (mm)	Stub B (mm)	S11 (ROS)
2,43	6	17,5	2,2
2,44	0	17,5	1,5
2,45	6	17,5	1,12
2,46	7	17,5	1,12
2,47	10	17,5	1,23
2,48	13	17,5	1,22
2,49	15	17,5	1,11
2,5	15,5	17,5	1,05

I parametri che ancora restano da fissare sono la distanza tra i due *stubs* (distanza fra i centri dei due cilindri) e la profondità del secondo di questi. Per quanto riguarda la distanza tra gli *stubs* è stato deciso di rimandare lo studio alla fase di ottimizzazione fissando per il momento questo parametro a 22 mm, mentre per

quanto riguarda il secondo *stub* la profondità scelta è di 19 mm rimandando anche in questo caso uno studio più accurato alla fase di ottimizzazione successiva.

Tab. 3 – Stima della profondità del primo cilindro nella minimizzazione del ROS al variare della frequenza fissando la profondità del secondo a 18 mm.

Frequenza (GHz)	Stub A (mm)	Stub B (mm)	S11 (ROS)
2,43	0	18	1,3
2,44	0	18	1,03
2,45	10	18	1,17
2,46	10	18	1,17
2,47	13	18	1,2
2,48	14,5	18	1,12
2,49	15,5	18	1,04
2,5	15,5	18	1,3

Tab. 4 – Stima della profondità del primo cilindro nella minimizzazione del ROS al variare della frequenza fissando la profondità del secondo a 19 mm.

Frequenza (GHz)	Stub A (mm)	Stub B (mm)	S11 (ROS)
2,43	5,5	19	1,4
2,44	7,5	19	1,25
2,45	11	19	1,14
2,46	13	19	1,1
2,47	115	19	1,3
2,48	15,5	19	1,47
2,49	15	19	1,7
2,5	14,5	19	1,9

4 - Prima versione dell'adattatore

Una volta stimati i parametri per la prima versione dell'adattatore, questo è stato costruito: i due cilindri penetrano nella guida rispettivamente di 10 mm il primo e 19 mm il secondo e, contrariamente a come era nella prima fase di studio, sono fissati alla guida e non sono mobili; la distanza tra i centri delle basi (diametro di 20 mm) dei due cilindri è pari a 22 mm. In Fig. 7 viene mostrata la sezione longitudinale dell'adattatore d'impedenza con le dimensioni di costruzione mentre in Fig. 8 è mostrata la prima versione dell'applicatore con le dimensioni.

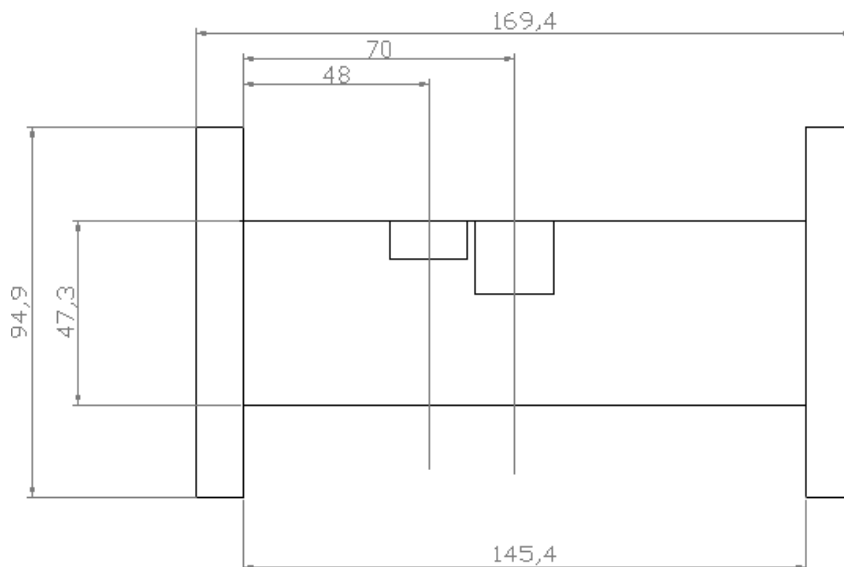


Fig. 7 – Sezione longitudinale dell'adattatore di impedenza con riportate le dimensioni di costruzione (in mm).

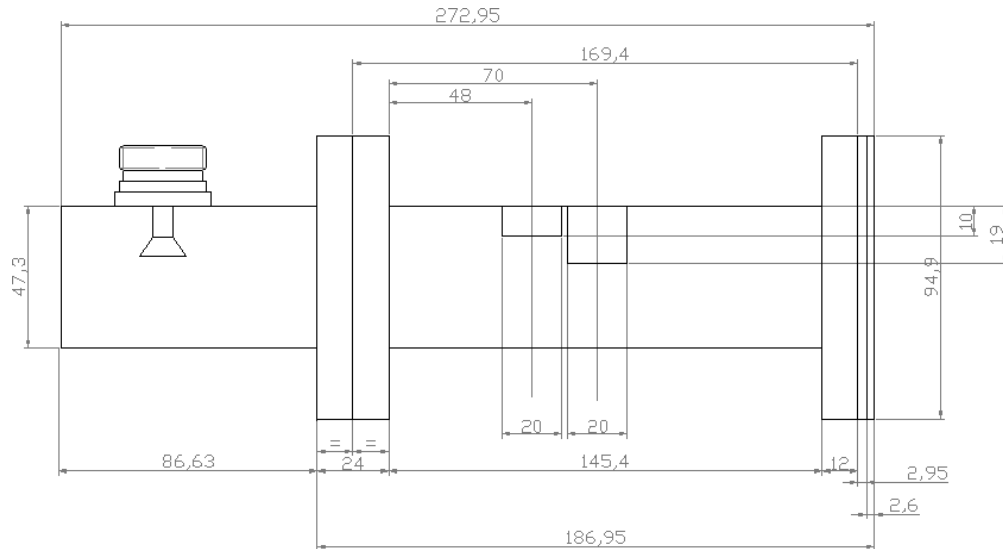


Fig. 8 – Sezione longitudinale della prima versione dell'applicatore con le relative dimensioni (in mm).

5 - Simulazione dell'applicatore di potenza con COMSOL Multiphysics

Per poter effettuare l'ottimizzazione dell'adattatore di impedenza abbiamo deciso di costruire un modello, con l'ausilio del software *COMSOL Multiphysics*, che descrivesse in modo corretto l'applicatore ed effettuare su di esso l'ottimizzazione dei parametri. Ci siamo concentrati sulla parte finale dell'applicatore (adattatore di impedenza e terminazione) tralasciando la transizione da cavo a guida che è stata sostituita da una porta rettangolare delle dimensioni della guida con condizione di eccitazione d'onda TE₁₀ di potenza unitaria (la presenza della transizione non fa altro che complicare ed allungare i tempi di simulazione mentre le condizioni fisiche sono identiche). Le dimensioni della guida sono state riprodotte senza spessore esterno. Per simulare lo spessore della flangia con la fessura è stato inserito uno spessore di 2 mm con sezione pari alla fessura riempito di aria (come di aria è riempita anche la guida). Per quanto riguarda la terminazione, la realizzazione del modello è stata più complicata: sono state provate tante configurazioni (sia con uno strato che simulasse il bollinato e uno per la schiuma con spessori variabili, sia con la sola schiuma) ma si è notato che è necessaria la presenza del bollinato per la corretta simulazione.

La versione definitiva dello stadio finale (terminazione) del modello è costituita da uno strato spesso 1mm e di sezione pari a quella della guida (42,5 mm x 85,8 mm) riempita di aria (che approssima il bollinato) e uno strato con la stessa sezione ma spessore 3 mm che simula la schiuma poliuretanic. Per impostare la costante dielettrica di questo materiale, è stato effettuato un calcolo approssimato tramite il metodo dei volumi parziali: sono state misurate le dimensioni del materiale asciutto (il volume in buona approssimazione rimane lo stesso anche nel caso bagnato) e calcolato il suo peso sia nel caso asciutto che in quello bagnato; per differenza è stato trovata l'acqua assorbita e da questa il suo volume; la costante dielettrica media è stata calcolata nel seguente modo:

$$\langle \varepsilon \rangle = v_{schiuma} * \varepsilon_{schiuma} + v_{acqua} * \varepsilon_{acqua} \sim 13 \quad (1)$$

dove $v_{schiuma}$ e v_{acqua} sono i volumi parziali rispetto al volume totale. Questo risultato è stato poi confrontato con una misura di costante dielettrica su un campione di materiale bagnato con risultato $\varepsilon \sim 16$ (da tener conto però che la misura effettuata in punti diversi della spugna produceva risultati diversi, in quanto alcune zone potevano essere meno bagnate di altre). Per stabilirne il valore migliore, è stato studiato il parametro $\langle \varepsilon \rangle$ in un intervallo compreso tra 10 e 16 (si è cercato il valore di $\langle \varepsilon \rangle$ per il quale la simulazione fosse in maggior accordo con i risultati sperimentali) che è stato poi fissato a 12.

L'ultimo stadio della terminazione dell'applicatore è il materiale da trattare. Per simulare questo è stato costruito un cilindro tale che la sua base fosse più grande della sezione della guida, in modo da contenere gli effetti di bordo del campo elettrico che si formano ai margini della superficie di contatto tra l'applicatore e il materiale. Lo spessore del cilindro è stato posto pari a 5 cm cosicché le condizioni al contorno sull'altra base (conduttore elettrico perfetto) non avessero effetto sul campo elettrico che si propaga nel mezzo (spessore necessario perché non si produca un'onda riflessa dalla collisione dell'onda diretta con la parete che agisce come

un circuito aperto). La costante dielettrica assegnata al materiale è stata scelta simile a quella del mattone asciutto compreso il contributo di perdita dielettrica ($\epsilon = 3$ e $\text{tg}\Delta = 0.01$) in modo da essere conforme alle prove effettuate in laboratorio.

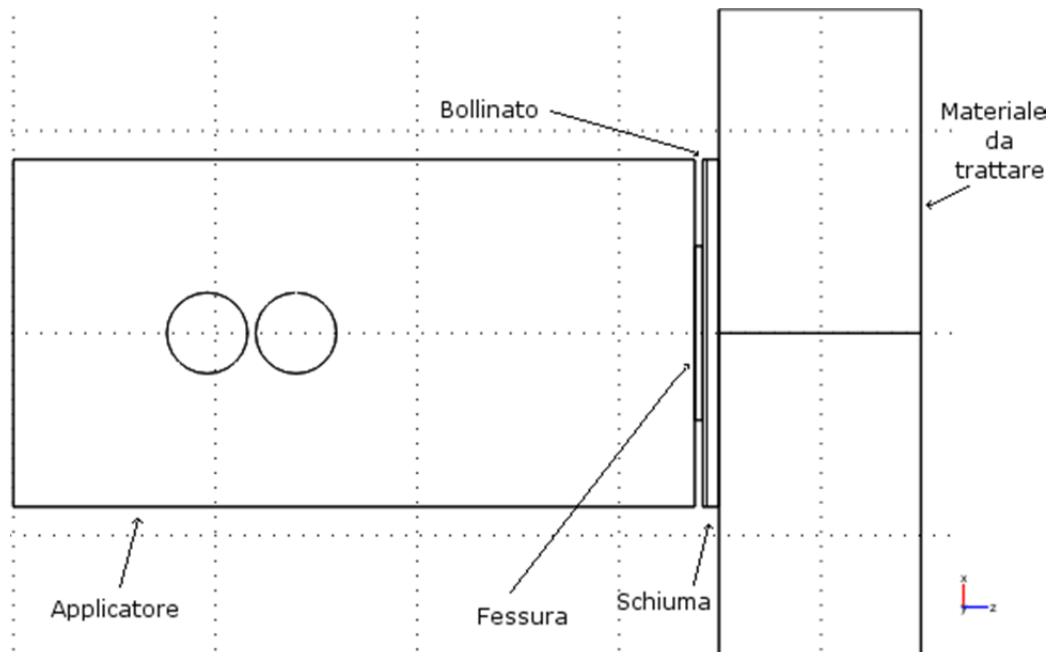


Fig. 9 - Sezione lungo il piano x-z (dall'alto) dell'applicatore.

Una volta costruito il modello (in Fig. 9 e Fig. 10 si possono vedere delle sezioni lungo diversi piani) e impostate le condizioni al contorno (conduttore elettrico perfetto su tutte le facce esterne, continuità sulle aree di contatto tra i vari strati e porta con eccitazione di onda sulla superficie di entrata della guida) è stata effettuata la simulazione variando la frequenza dell'onda eccitante tra 2.4 GHz e 2.5 GHz a passi di 0.01GHz: per queste frequenze è stato calcolato il ROS dell'applicatore il cui andamento è riportato in Fig. 11.

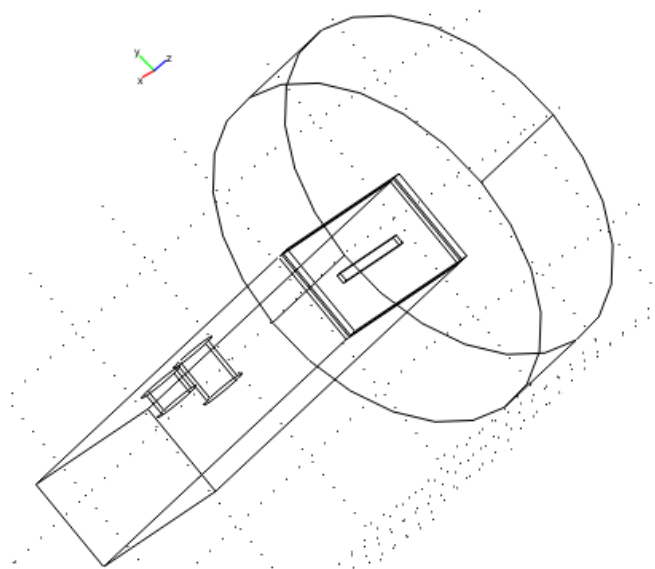


Fig. 10 - Simulazione dell'applicatore: vista dal lato.

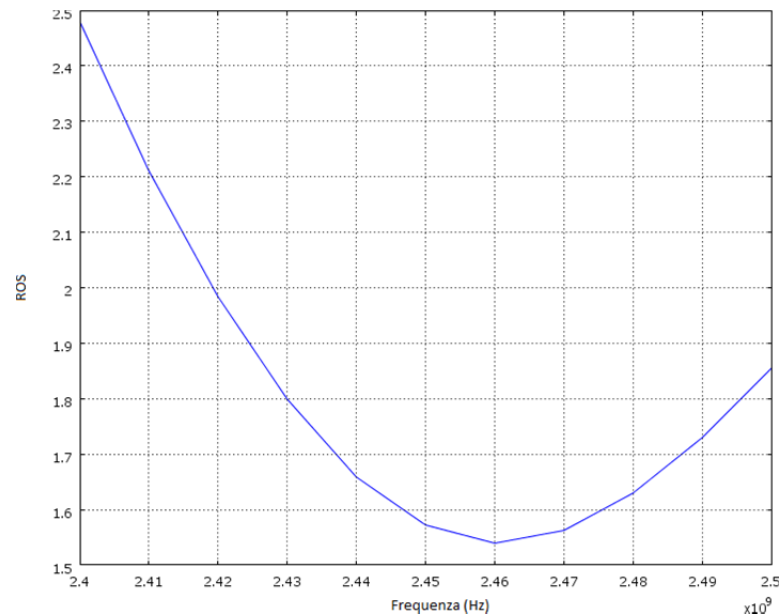


Fig. 11- ROS al variare della frequenza ottenuto con la simulazione dell'applicatore.

L'andamento è consistente con le misure sperimentali tenendo conto delle approssimazioni che sono state effettuate nello sviluppo del modello. Per effettuare una verifica diretta del modello, sono stati confrontati i risultati delle simulazioni dell'applicatore (stesse dimensioni, stessa fessura e stesso assetto dopo la fessura) senza però la presenza degli *stubs*, con i risultati sperimentali della guida costruita senza gli *stubs*. Anche questa volta i risultati sono abbastanza consistenti tra loro tenendo conto delle approssimazioni che sono state effettuate nello sviluppo del modello (la simulazione produce ROS intorno a 6 mentre con l'analizzatore di reti il ROS era di circa 7).

6 - Ottimizzazione delle prestazioni

Per cercare di migliorare l'adattamento di impedenza dell'applicatore costruito, si possono studiare diversi parametri. Per facilitare questo lavoro, una volta verificata l'attendibilità della simulazione, è possibile effettuare le modifiche su questa e, una volta determinata la migliore configurazione, costruire la versione definitiva. In questo modo, le modifiche meccaniche (allungamento o accorciamento degli *stubs* per esempio) possono essere studiate senza doverle ogni volta applicare agli *stubs* originali.

Il primo studio si è rivolto al bollinato: essendo questo materiale non fissabile sulla fessura c'è il rischio che gli strati si muovano, portando ad un peggioramento delle prestazioni. Per questo abbiamo cercato un materiale più adatto allo scopo senza che le prestazioni peggiorassero. Abbiamo dunque sostituito nella simulazione lo strato di 1mm di aria che simulava il bollinato con uno strato di spessore variabile di rexolite ($\epsilon = 2.5$ con un $\text{tg}\Delta = 0.00025$): al variare dello spessore della rexolite è stato calcolato il ROS dell'applicatore per frequenze comprese tra 2,4 GHz e 2,5 GHz. Come si può notare in Fig. 12 con uno strato di 3,5 mm di rexolite (curva in rosso) si ottengono delle prestazioni simili al caso con uno strato di 1 mm di aria (curva in nero); si nota inoltre che con uno strato di 4 o 4,5 mm di rexolite si ottengono risultati migliori rispetto al caso base.

Per verificare questi risultati sono stati tagliati due tasselli uguali di spessore 1,5 mm con dimensioni tali da contenere effetti di bordo del campo elettrico all'uscita della fessura (56 mm X 15 mm X 1,5 mm). Sulla prima versione dell'applicatore sono state effettuate due prove sostituendo al bollinato prima uno e poi due strati di rexolite ed è stato misurato con l'analizzatore di reti il ROS dell'applicatore per un confronto con i risultati della simulazione. I risultati sono in accordo con la simulazione confermando che lo strato di 3 mm di rexolite riproduce, approssimativamente, il ROS della prima versione costruita dell'applicatore; questo induce a pensare che l'utilizzo di uno strato di 4 mm o 4,5 mm di rexolite potrebbe portare a un miglioramento delle prestazioni dell'applicatore.

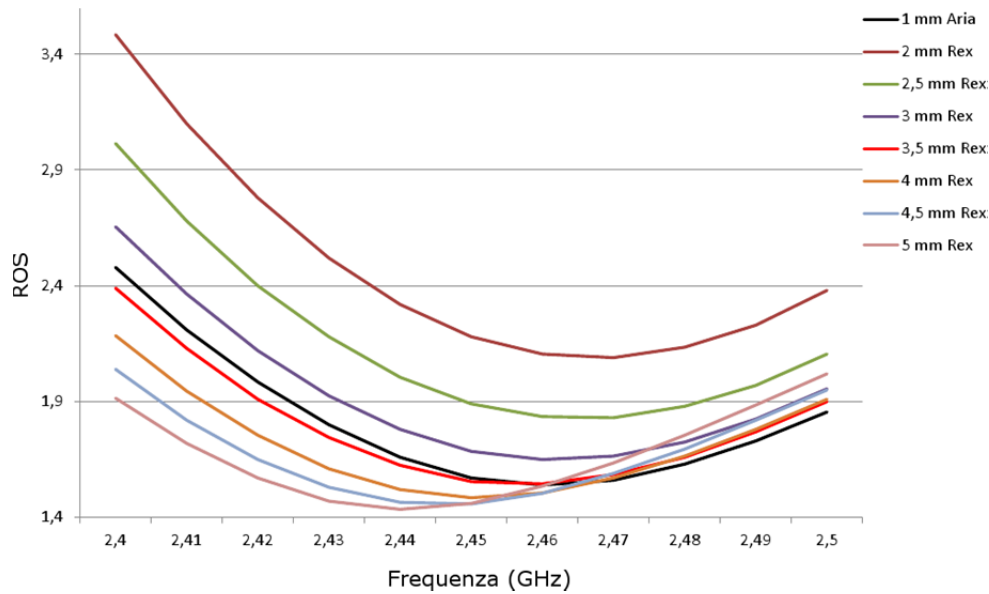


Fig. 12 - Confronto fra i ROS simulati dell'applicatore con lo strato d'aria (in nero) e strati variabili di rexolite.

Per verificare che, nonostante il buon adattamento con il materiale da trattare, il campo elettrico sulla superficie di applicazione nel caso con la rexolite non sia basso (producendo quindi un riscaldamento più lento del materiale da trattare), è stato studiato l'andamento del campo elettrico nelle simulazioni con 1 mm di aria e con 3 mm di rexolite per una frequenza di 2,45 GHz: nei due casi è stato studiato il profilo del campo elettrico lungo l'asse che passa dal centro della guida ed è parallelo alla direzione di propagazione dell'onda (Fig. 13).

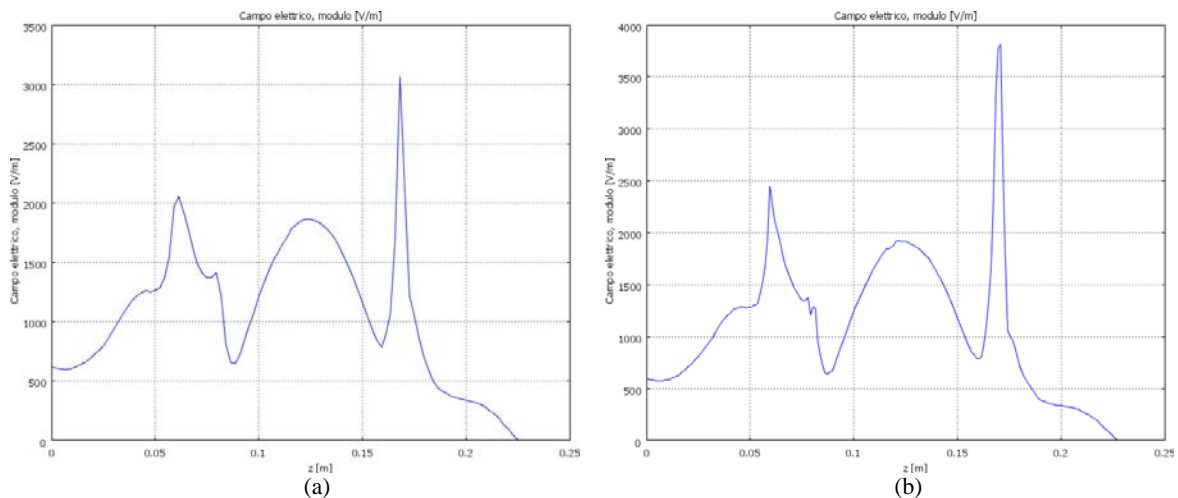


Fig. 13 - Profilo del campo elettrico lungo l'asse passante dal centro della guida: (a) caso con aria; (b) caso con rexolite.

In Fig. 14 invece è mostrato un ingrandimento del profilo del campo elettrico da dopo la fessura fino alla fine dell'applicatore: le linee rosse separano i vari strati. Da queste figure si nota subito che l'andamento generale del campo elettrico è molto simile nei due casi ma si nota che sulla superficie di applicazione nel caso con la rexolite il campo è un po' inferiore rispetto al caso con aria. Si nota però anche che il campo elettrico sulla faccia di ingresso della guida è diverso nei due casi (anche se non troppo) e questo non permette di capire a fondo in quanto consiste la differenza di campo sulla superficie di applicazione. Per risolvere questo problema si è deciso di effettuare una prova di potenza (600 W) con la prima versione dell'applicatore sostituendo al bollinato 3 mm di rexolite per verificare che questo apparato producesse un riscaldamento su di un mattone, uguale o simile al caso con il bollinato. I risultati di questa prova sono stati confortanti in quanto il tempo necessario ad arrivare ad una temperatura di circa 70 gradi sul materiale da trattare (con una potenza riflessa mai superiore a 200 W) era compatibile se non migliore al caso del bollinato.

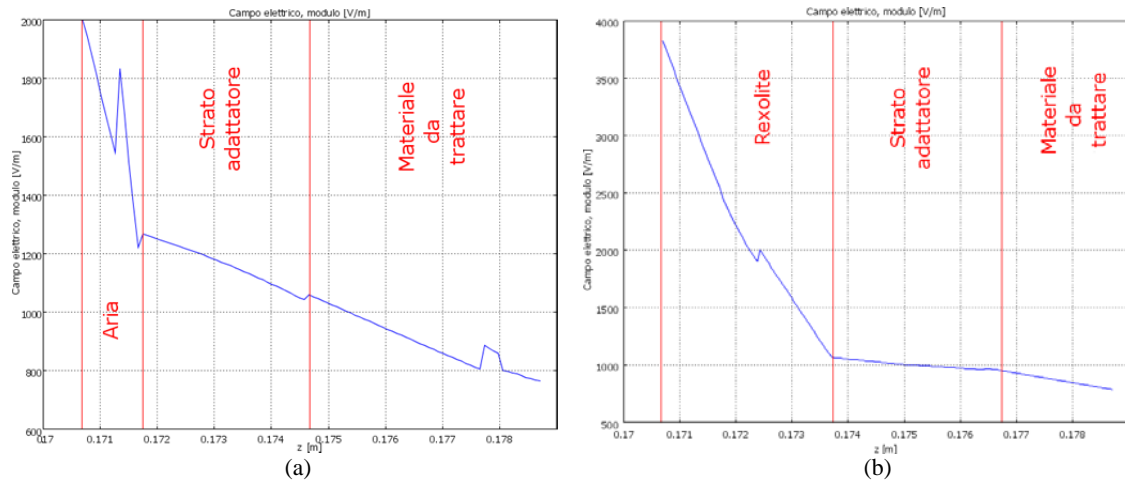


Fig. 14 - Ingrandimento dell'ultima parte del profilo del campo elettrico lungo l'asse: (a) caso con aria; (b) caso con rexolite.

Sono infine state fatte anche delle prove preliminari, solo in fase di simulazione, utilizzando un materiale con perdite ancora inferiori alla rexolite e più resistente all'urto (la rexolite può rompersi se sottoposta a urto), cioè il teflon ($\epsilon = 2.1$ con un $\text{tg}\Delta = 0.00015$). In Fig. 15 sono mostrati i risultati per diversi spessori di teflon: come si nota per uno spessore di 2,5 mm (curva in rosso) si riottengono le prestazioni del caso base con l'aria (curva nera) mentre per 3,5 mm si ottengono dei risultati migliori rispetto al caso base.

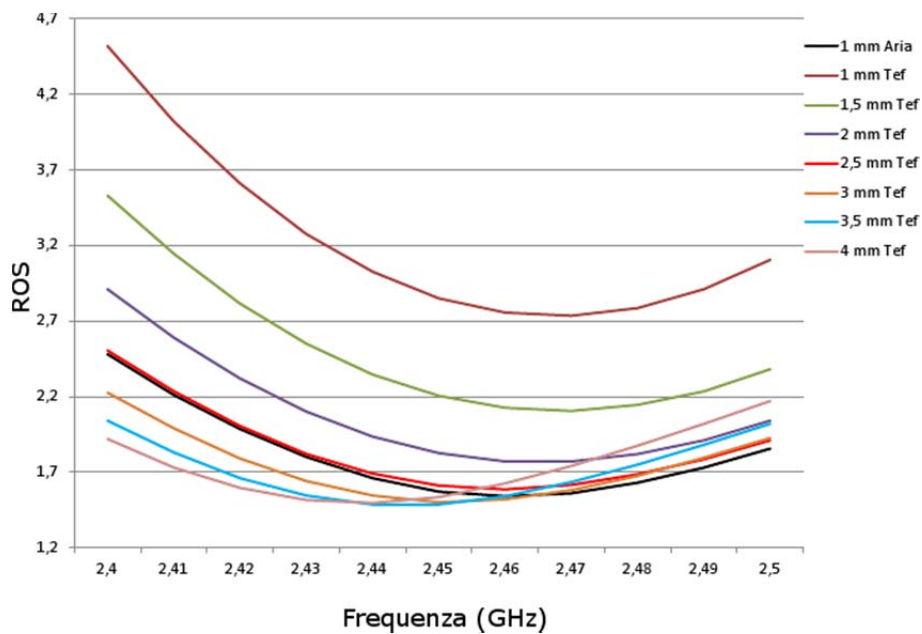


Fig. 15 - Confronto fra i ROS simulati dell'applicatore con lo strato d'aria (in nero) e strati variabili di teflon.

In Fig. 16 invece sono riportati il profilo del campo elettrico lungo l'asse che passa dal centro della guida ed è parallelo alla direzione di propagazione dell'onda ed un suo ingrandimento dopo la fessura: anche in questo caso il campo sulla superficie di applicazione è inferiore rispetto al caso con aria e quello sulla porta d'ingresso è diverso. Anche in questo caso quindi è necessaria una verifica sperimentale tramite prove di potenza, che però non sono ancora state effettuate.

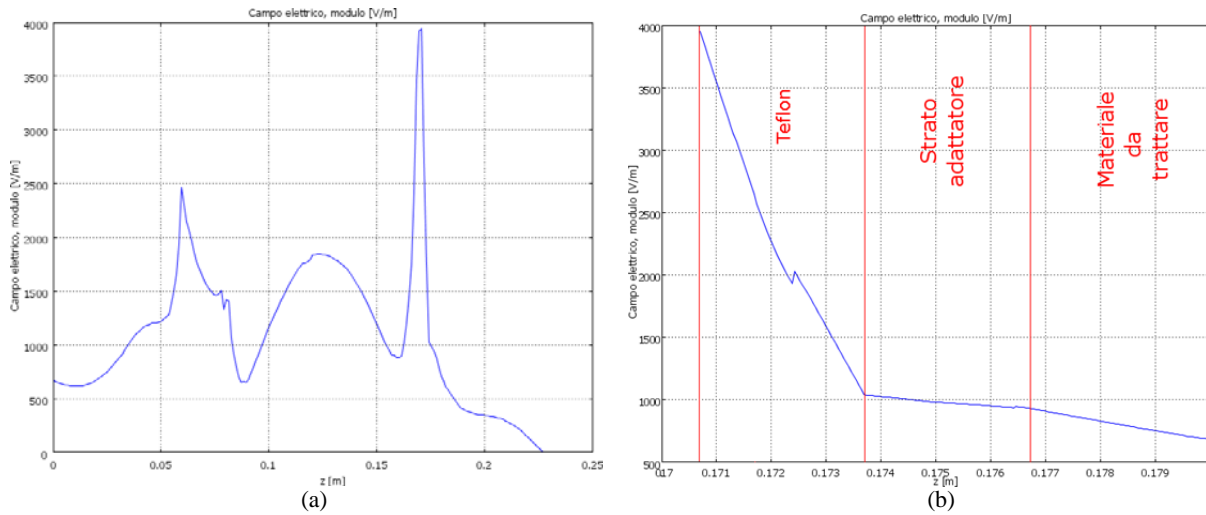


Fig. 16 - (a) Profilo del campo elettrico lungo l'asse della guida per l'applicatore con uno strato di 3 mm di teflon; (b) Ingrandimento dello stesso profilo dopo la fessura.

Per concludere l'ottimizzazione della terminazione dell'applicatore, il secondo parametro che abbiamo studiato, agendo solo sulla simulazione, è stata la fessura. Sono state modificate, nel modello simulato, sia la larghezza (da 4 a 10 mm) che la lunghezza (da 43 a 50 mm) della fessura, lasciando invariato lo spessore della flangia (simulato dai 2 mm di aria) partendo dal valore base della stessa. In Fig. 17 riportiamo i confronti fra le simulazioni al variare della larghezza e dell'altezza della fessura.

Tab. 5 - ROS dell'applicatore simulato: sono riportati i valori per frequenze da 2,4 a 2,5 GHz per le migliori configurazioni ricavate dallo studio precedente (la versione base corrisponde a una fessura 46 mm x 5 mm).

Lunghezza	46 mm	43 mm	45 mm	46 mm	47 mm	48mm	50 mm
Altezza	5 mm	9mm	7mm	4mm	5mm	8mm	10mm
2,4 GHz	2,04	1,965	1,99	2,01	2,115	2,135	2,165
2,41 GHz	1,82	1,79	1,785	1,8	1,885	1,895	1,915
2,42 GHz	1,65	1,67	1,63	1,64	1,695	1,695	1,705
2,43 GHz	1,53	1,615	1,53	1,525	1,55	1,545	1,545
2,44 GHz	1,465	1,625	1,49	1,47	1,46	1,445	1,435
2,45 GHz	1,46	1,69	1,515	1,475	1,425	1,41	1,385
2,46 GHz	1,505	1,805	1,59	1,525	1,445	1,43	1,395
2,47 GHz	1,59	1,945	1,695	1,615	1,51	1,5	1,455
2,48 GHz	1,695	2,105	1,825	1,72	1,605	1,595	1,55
2,49 GHz	1,82	2,275	1,965	1,845	1,72	1,715	1,665
2,5 GHz	1,95	2,45	2,11	1,975	1,845	1,85	1,8

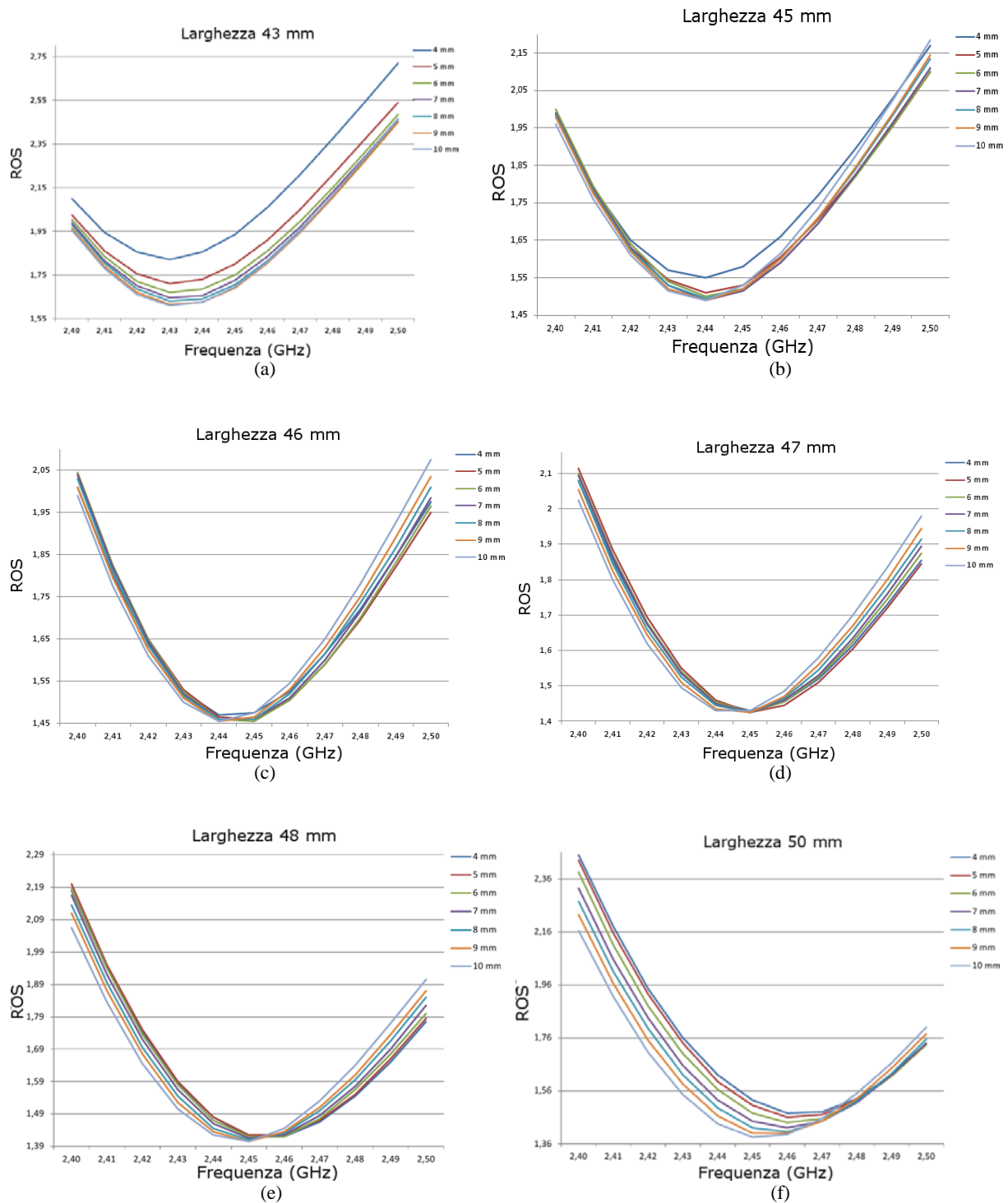


Fig. 17 - Valore del ROS dell'applicatore simulato al variare dell'altezza della fessura per diversi valori della larghezza della stessa: (a) 43 mm , (b) 45 mm, (c) 46 mm,(d) 47 mm (e) 48 mm e (f) 50 mm.

In Tab. 5 e Fig. 18 è invece riportato il confronto fra la migliore configurazione per ogni larghezza studiata e il caso base (curva nera): come si nota le configurazioni risultano, eliminando il caso di fessura lunga 43 mm, avere tutte prestazioni simili; è stato dunque deciso, visto che i miglioramenti introdotti dal cambio della fessura non sono così netti, di lasciare la fessura costruita in fase iniziale (46mm x 5mm).

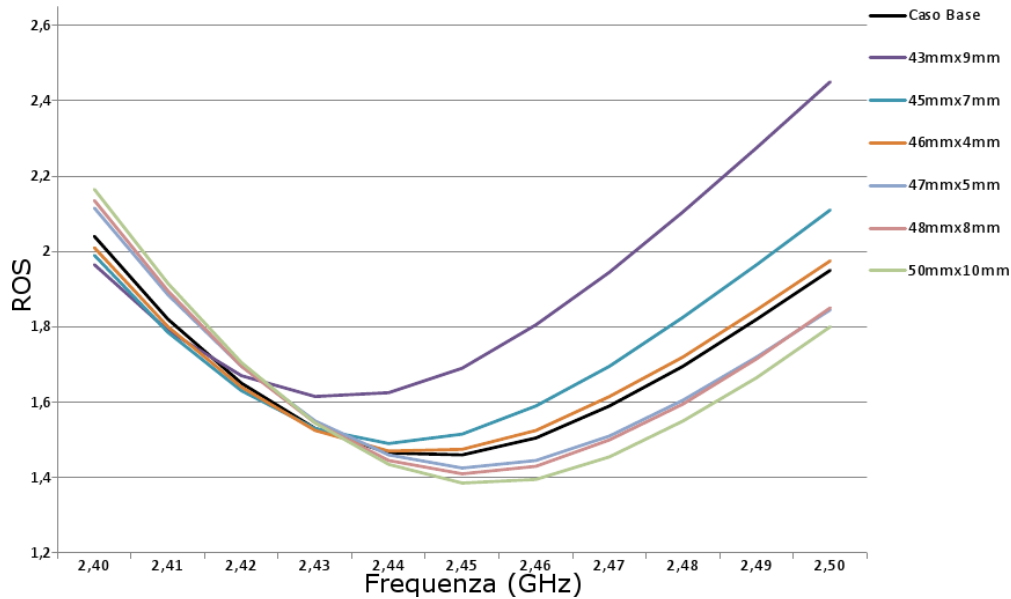


Fig. 18 - Confronto fra le varie configurazioni ottimizzate della fessura e la versione base (curva in nero).

Dopo aver studiato e ottimizzato i parametri legati alla terminazione dell'applicatore, il passo successivo è stato andare a studiare i parametri meccanici legati ai due *stubs*: il raggio degli stessi, la distanza tra i loro centri, la distanza tra la fessura e il secondo *stub* e la profondità di penetrazione di entrambi gli *stubs* nella guida. Sono stati dunque variati singolarmente i parametri sotto studio, per due diversi assetti della terminazione (4,5 mm di rexolite con fessura 46 mm x 5 mm e 3,5 mm di teflon con la stessa fessura) ricercando la configurazione che minimizzasse il ROS; le condizioni migliori dei singoli parametri sono poi state unite ricercando la configurazione migliore per l'applicatore.

Di seguito, in Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22 e Fig. 23, si riportano i confronti fra le diverse configurazioni studiate variando singolarmente i parametri meccanici per l'assetto della terminazione contenente la rexolite. La configurazione base dei parametri sulla quale sono state effettuate le modifiche è la seguente: il primo *stub* penetra nella guida per 10 mm; il secondo invece di 19 mm, la distanza tra i loro centri è di 22 mm; il raggio degli *stubs* è 10 mm mentre la distanza tra il centro del secondo *stub* e la fessura è 98,7 mm.

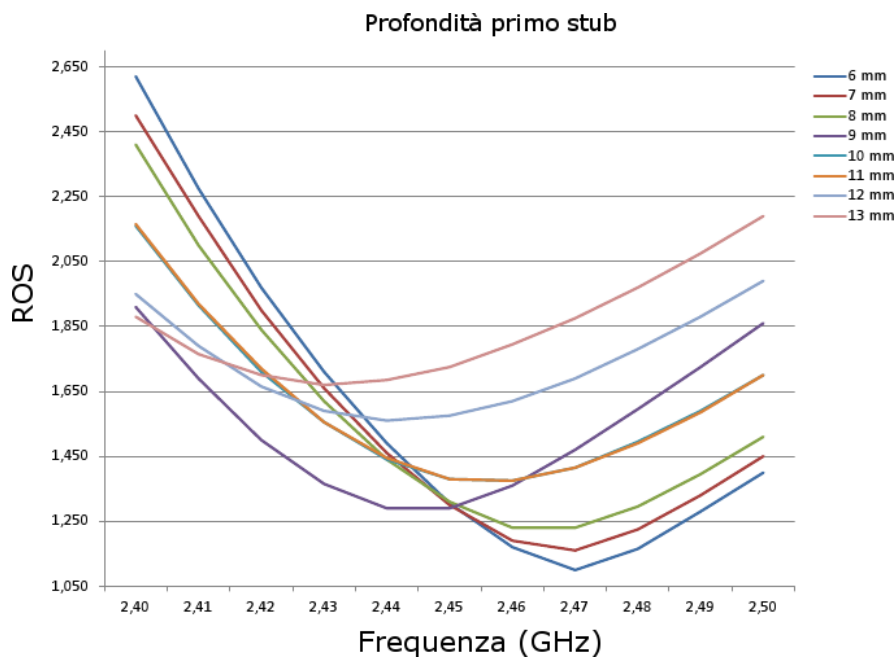


Fig. 19 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la profondità del primo *stub* per il modello di applicatore con la rexolite.

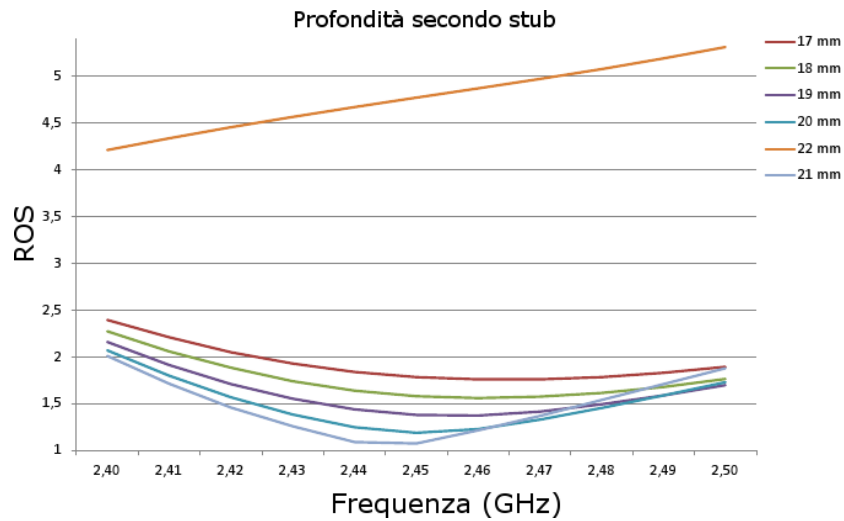


Fig. 20 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la profondità del secondo *stub* per il modello di applicatore con la rexolite.

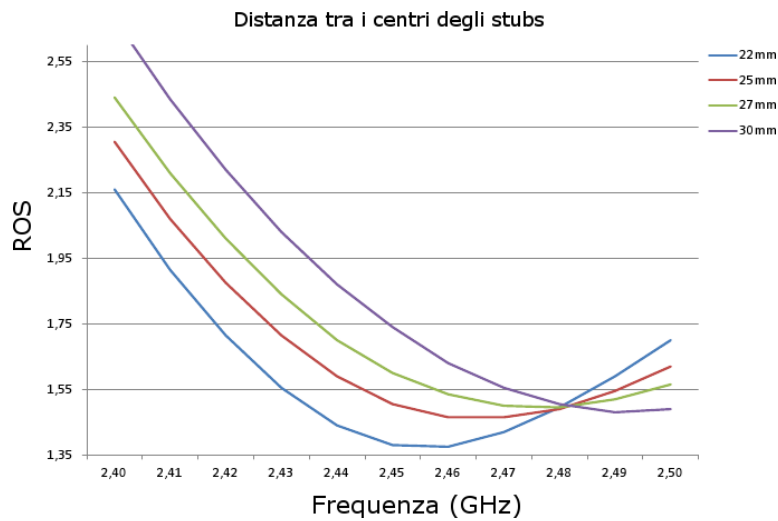


Fig. 21 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la distanza tra i centri dei due *stubs* per il modello di applicatore con la rexolite.

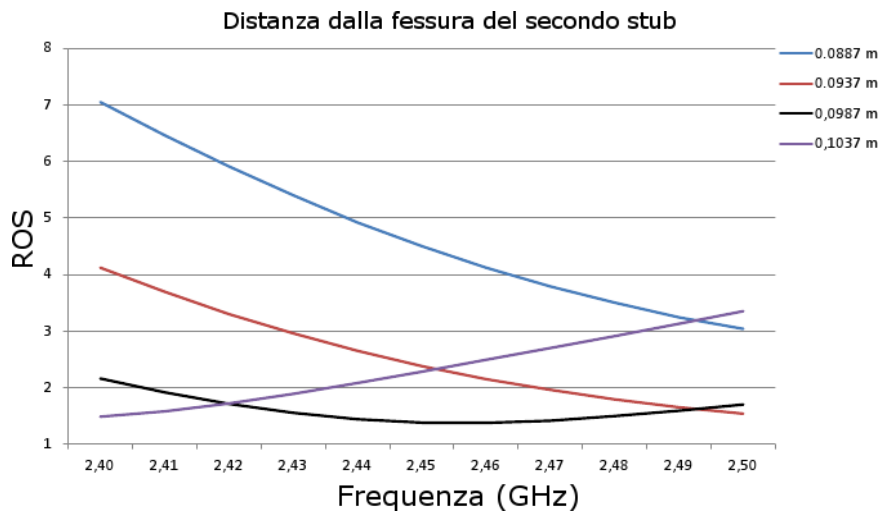


Fig. 22 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la distanza tra il secondo *stub* e la fessura di applicazione per il modello di applicatore con la rexolite.

Facendo uso dei risultati dello studio singolo dei parametri da ottimizzare, sono state studiate nove configurazioni dell'applicatore, riportate in Tab. 6: in Fig. 24 sono riportati i valori di ROS simulati confrontati con il caso base.

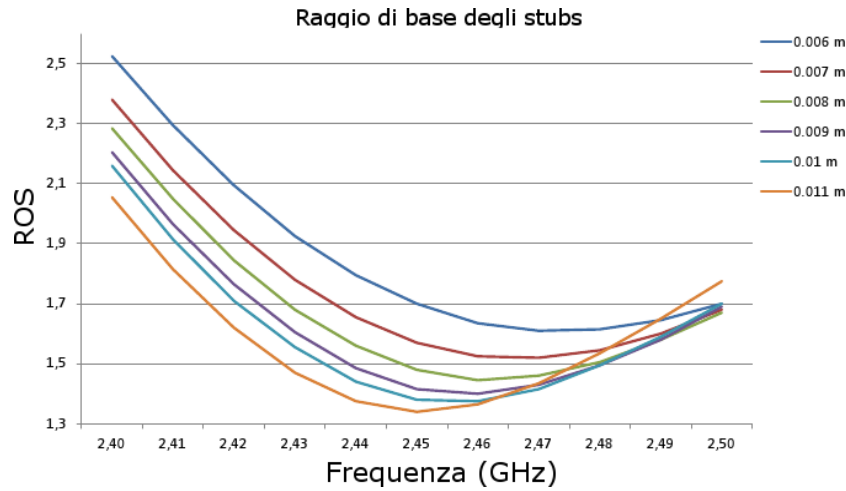


Fig. 23 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo il raggio di base dei due stubs per il modello di applicatore con la rexolite.

Tab. 6 - Configurazioni utilizzate per l'ottimizzazione dell'applicatore sia nel caso di terminazione con rexolite che con teflon.

	I Stub	II Stub	Raggio Stub	Distanza da fessura	Distanza tra i centri
Caso Base	10 mm	19 mm	10 mm	0,0987 m	22 mm
I Configurazione	10 mm	21 mm	10 mm	0,0987 m	20 mm
II Configurazione	10 mm	21 mm	10 mm	0,0987 m	22 mm
III Configurazione	10 mm	21 mm	8 mm	0,0987 m	20 mm
IV Configurazione	10 mm	21 mm	8 mm	0,0987 m	16 mm
V Configurazione	10 mm	21 mm	7 mm	0,0987 m	16 mm
VI Configurazione	10 mm	21 mm	7 mm	0,0987 m	14 mm
VII Configurazione	8 mm	21 mm	10 mm	0,0987 m	22 mm
VIII Configurazione	6 mm	19 mm	10 mm	0,0987 m	22 mm
IX Configurazione	6 mm	21 mm	10 mm	0,0987 m	22 mm

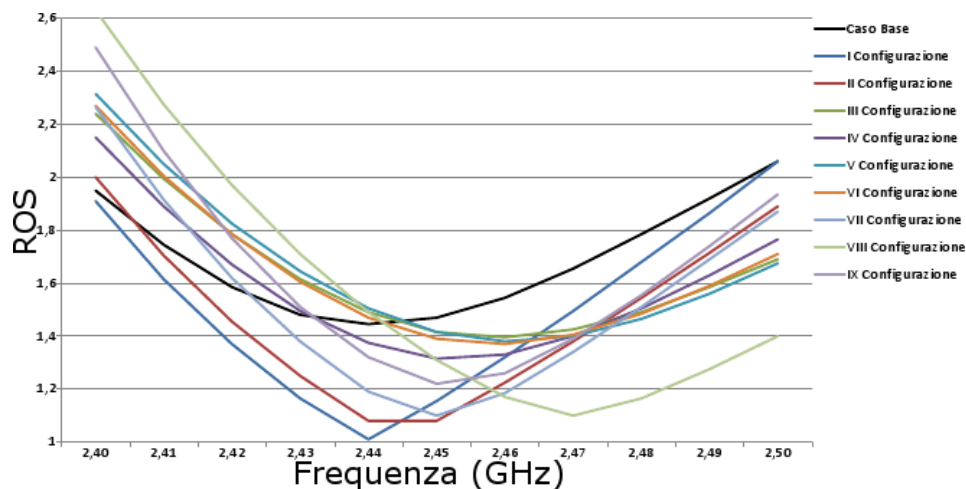


Fig. 24 - Confronto fra le diverse configurazioni (Tab. 6) e il caso base (in nero): la migliore, per l'assetto dell'applicatore utilizzato (con la rexolite), è la configurazione II.

Nelle Fig. 25, Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28 e Fig. 29, sono invece riportati i ROS simulati per le modifiche dei singoli parametri per l'applicatore con lo strato di 3,5 mm di teflon al posto della rexolite; la configurazione base è la stessa utilizzata per la rexolite.

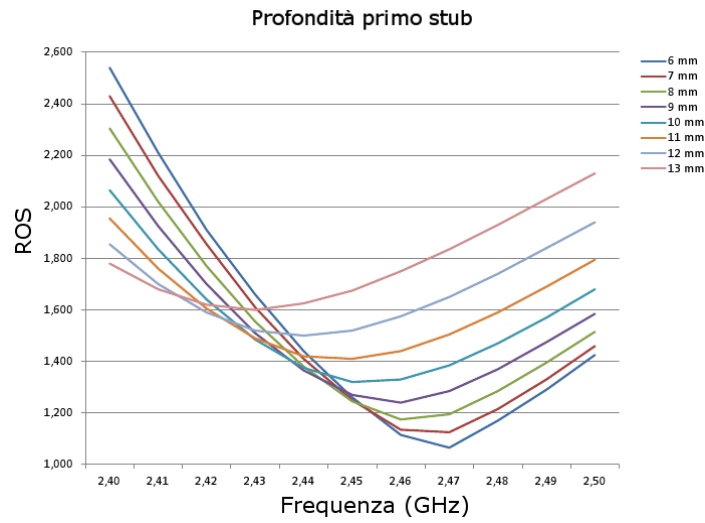


Fig. 25 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la profondità del primo stub per il modello di applicatore con il teflon.

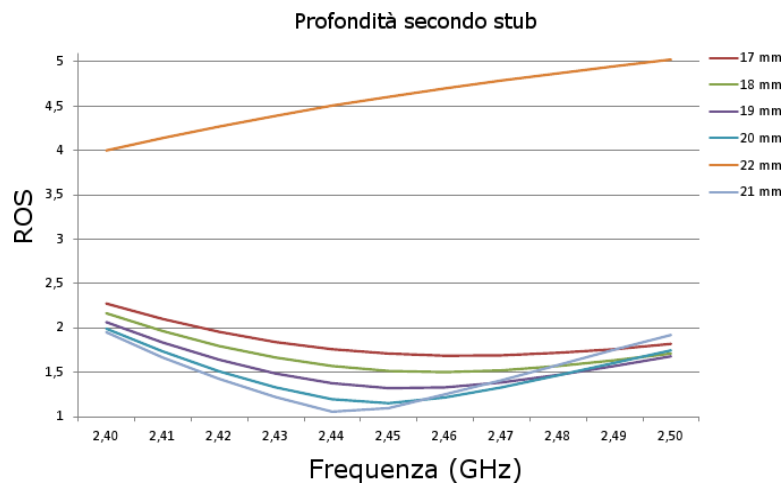


Fig. 26 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la profondità del secondo stub per il modello di applicatore con il teflon.

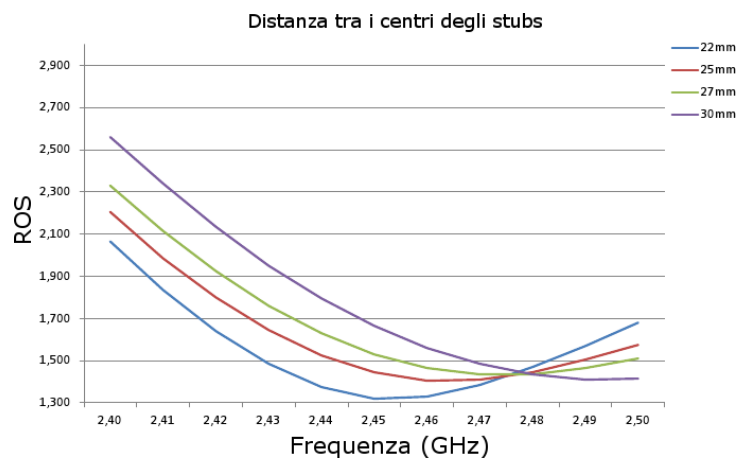


Fig. 27 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la distanza tra i centri dei due stubs per il modello di applicatore con il teflon.

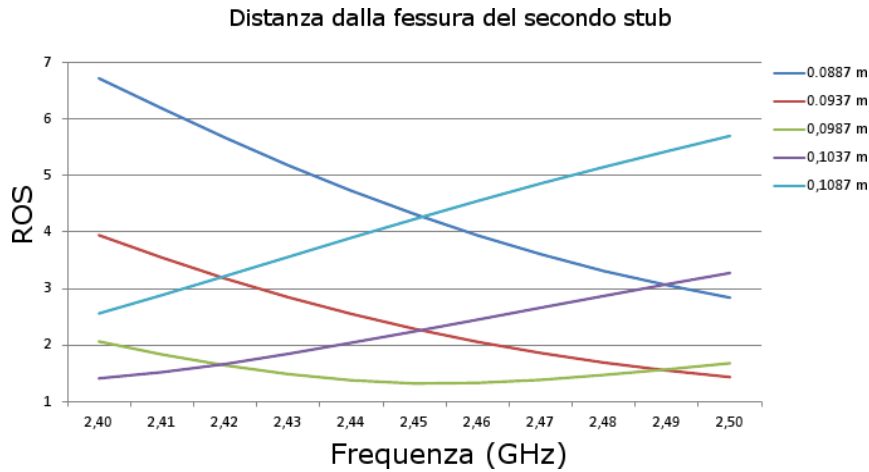


Fig. 28 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo la distanza tra il secondo *stub* e la fessura di applicazione per il modello di applicatore con il teflon.

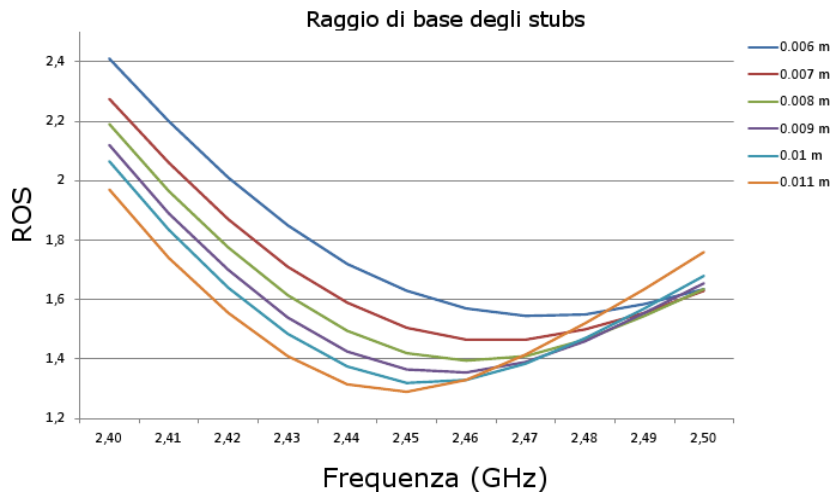


Fig. 29 - Confronto fra varie configurazioni in cui è stata variata solo il raggio di base dei due *stubs* per il modello di applicatore con il teflon.

Come effettuato nel caso con la rexolite, sono stati studiati i ROS simulati per le diverse configurazioni (Tab. 6) dell'applicatore, ricercando quella che ottimizzasse le prestazioni: in Fig. 30 è riportato il confronto del ROS del caso base (in nero) e quello delle altre configurazioni per frequenze che variano tra 2,4 GHz e 2,5 GHz.

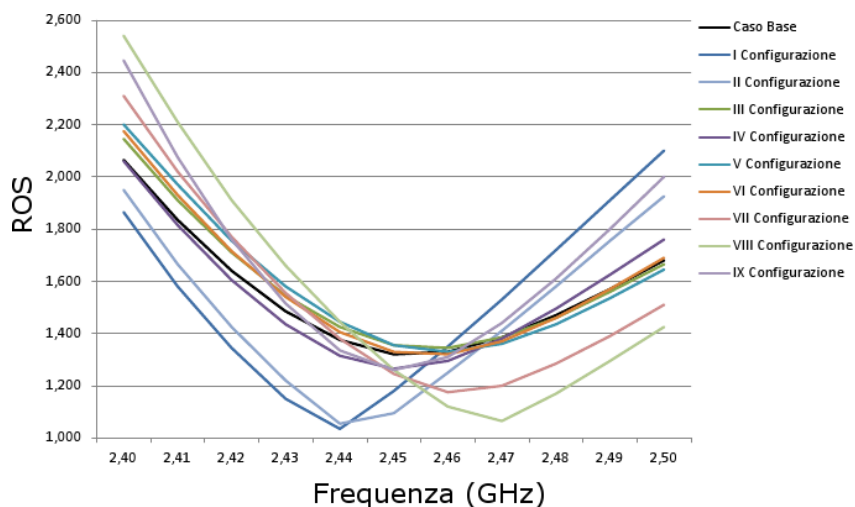


Fig. 30 - Confronto fra le diverse configurazioni (Tab. 6) e il caso base (in nero): la migliore, per l'assetto dell'applicatore utilizzato (con il teflon), è la configurazione II.

7 - Realizzazione di un prototipo ottimizzato e verifica delle prestazioni

Una volta effettuata l'ottimizzazione, è stato costruito un prototipo dell'adattatore con i parametri meccanici ottimizzati in modo da verificarne sperimentalmente le prestazioni e l'accordo con le simulazioni. I parametri scelti sono i seguenti: profondità di penetrazione del primo *stub* 10 mm, quella del secondo *stub* 21 mm, distanza tra i centri dei due *stubs* 22 mm, distanza del secondo *stub* dalla fessura 98,7 mm, raggio dei cilindri 10 mm, fessura 46 mm x 5 mm e uno spessore di 4,5 mm di rexolite posta dopo la fessura.

Il modello che descrive questa configurazione è quello mostrato in Fig. 31 (si mostra l'andamento del campo elettrico per un piano longitudinale passante per il centro della guida e lungo il piano su cui giace la fessura); in Fig. 32 è invece mostrato il ROS simulato per frequenze comprese tra 2,4 GHz e 2,5 GHz della configurazione costruita.

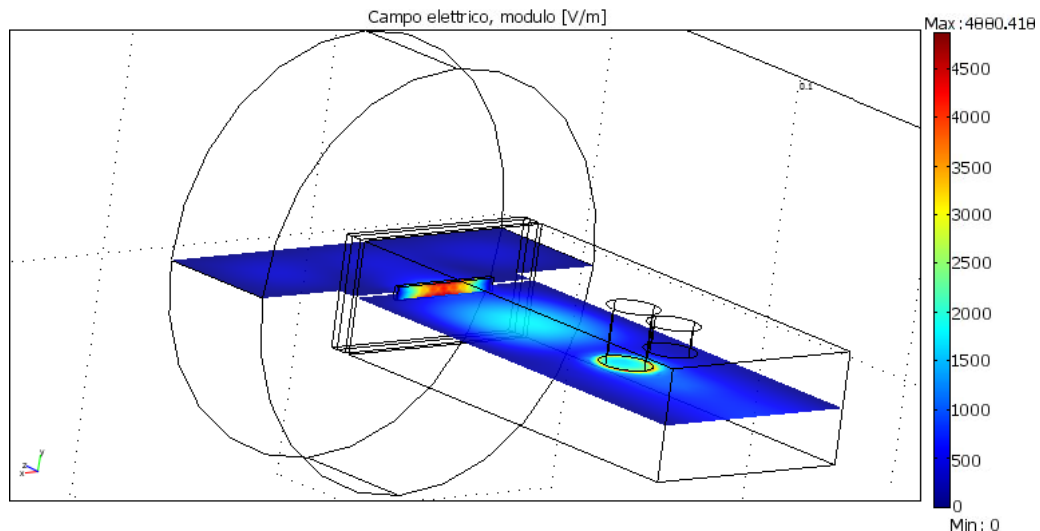


Fig. 31 - Simulazione dell'applicatore costruito con uno spessore di 4,5 mm di rexolite posti dopo la fessura: andamento del campo elettrico lungo un piano longitudinale passante per il centro della guida e lungo il piano della fessura.

In Fig. 33 invece sono confrontati il ROS dell'applicatore costruito misurato con un analizzatore di spettro con i risultati ottenuti tramite la simulazione: come si nota l'accordo non è perfetto, ma va tenuto conto che la simulazione è basata su alcune approssimazioni (pareti della guida senza dimensioni, porta d'ingresso rettangolare); da far notare è però che il ROS dell'applicatore costruito si mantiene sotto la soglia di ROS pari a 2 nell'intorno delle frequenze di uso dell'applicatore.

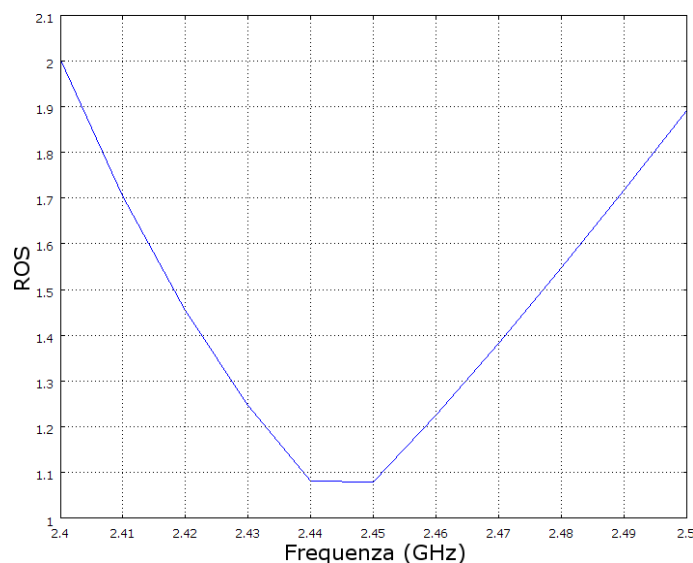


Fig. 32 - Simulazione dell'applicatore costruito con uno spessore di 4,5 mm di rexolite posti dopo la fessura: ROS ottenuto dalla simulazione.

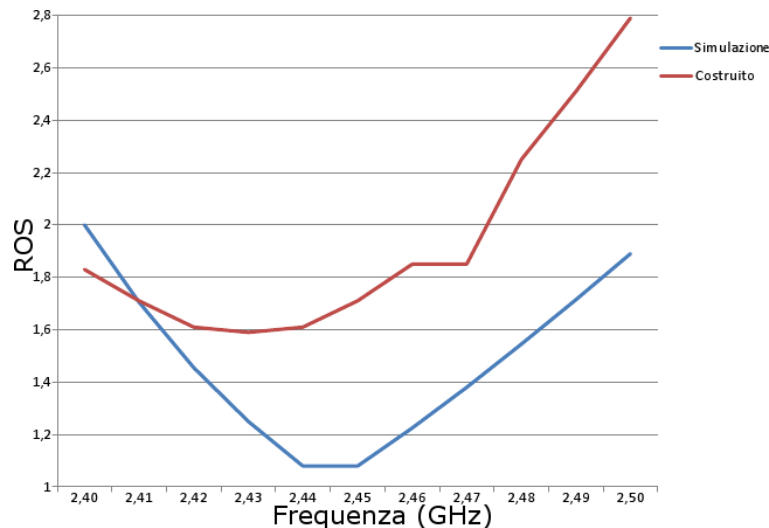


Fig. 33 – Confronto fra il ROS dell'applicatore simulato (in blu) e i risultati della misura sull'applicatore costruito (in rosso).

8 - Conclusioni

In questo lavoro sono riportati gli studi effettuati che hanno portato alla costruzione della seconda parte dell'applicatore di potenza in guida a 2,45 GHz, l'adattatore di impedenza e la cavità risonante. Da un primo prototipo costruito dopo uno studio *cut&try* dei parametri meccanici, è stato costruito un modello, con l'ausilio del software COMSOL Multiphysics, che simulasse l'applicatore e che fosse in accordo con i risultati sperimentali tenendo conto delle approssimazioni che necessariamente sono state introdotte nel modello. Dopo aver verificato la bontà di questo modello, è stata ricercata la configurazione meccanica che minimizzasse il ROS variando i parametri solo sulla simulazione. La configurazione ottimizzata dei parametri è quella riportata in Tab. 7.

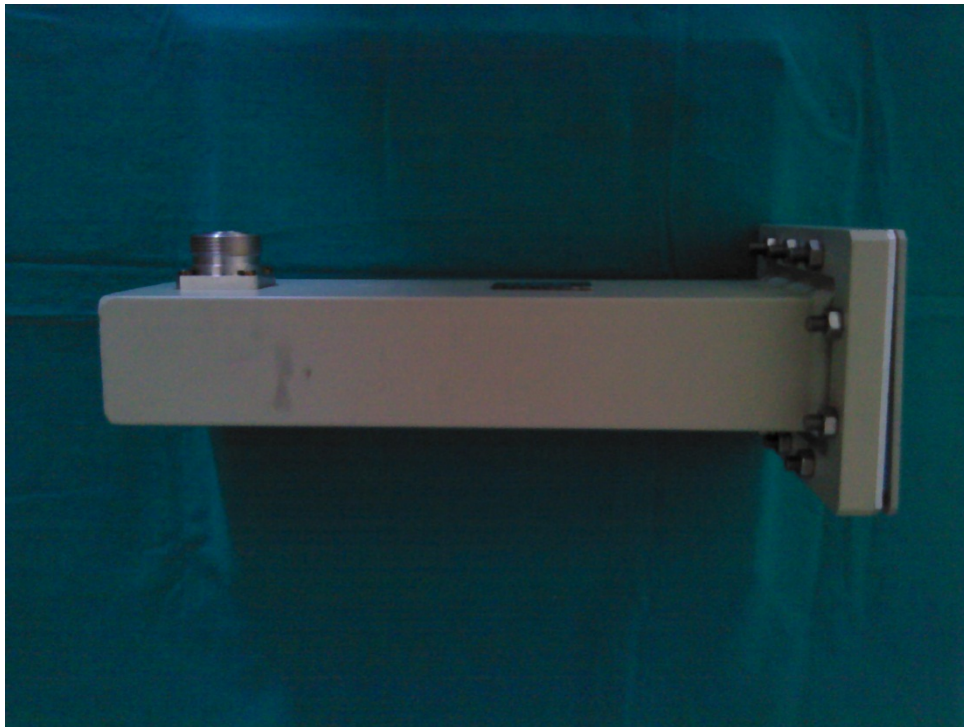
Tab. 7 – Riassunto dei parametri meccanici ottimizzati dell'applicatore costruito.

Parametro	Configurazione finale
Profondità primo <i>stub</i>	10 mm
Profondità secondo <i>stub</i>	21 mm
Distanza tra i centri degli <i>stubs</i>	22 mm
Distanza della fessura dal secondo <i>stub</i>	98,7 mm
Raggio di base degli <i>stubs</i>	10 mm
Dimensioni fessura	46 mm x 5 mm
Spessore strato di rexolite	4,5 mm

Il progetto ottimizzato è stato poi costruito (Fig. 34) ed il ROS misurato con un analizzatore di reti è stato confrontato con il ROS teorico fornito dalla simulazione. L'accordo fra i due ROS non è perfetto ma questo è dovuto alle necessarie approssimazioni che nella simulazione sono state effettuate; si nota però che l'applicatore costruito in un intorno della frequenza di lavoro 2,45 GHz ha comunque un ROS inferiore a 2.



(a)



(b)

Fig. 34 – Applicatore completamente assemblato secondo l'ottimizzazione studiata tramite simulazione: vista dall'alto (a) e dal lato (b).

Appendice Disegni tecnici dell'applicatore realizzato

In questa appendice riportiamo i disegni tecnici di realizzazione dell'applicatore finale costruito dopo la procedura di ottimizzazione che abbiamo studiato in questo lavoro: in Fig. 35 è riportata una sezione trasversale dell'applicatore con le principali dimensioni, mentre in Fig. 36 è riportato il disegno della flangia con la fessura posta al termine dell'applicatore.

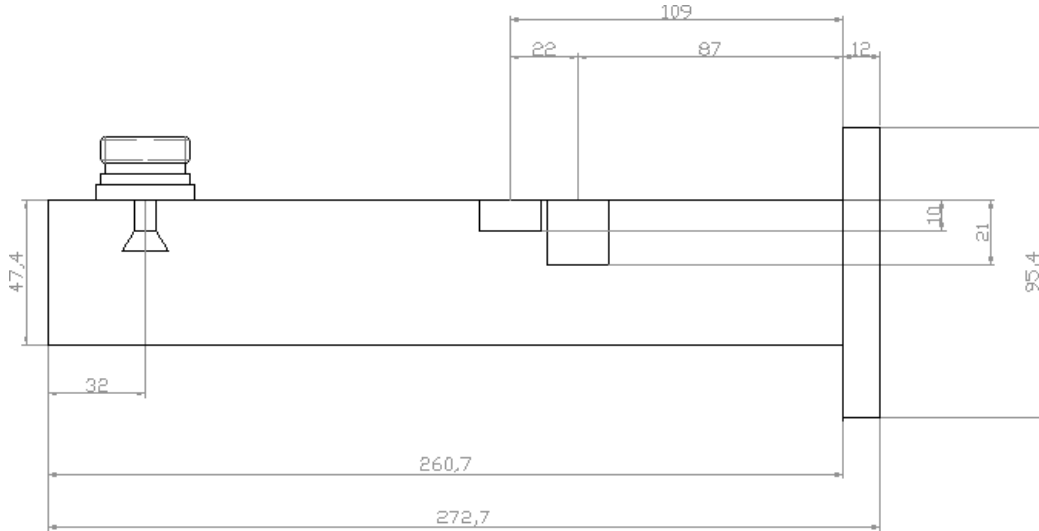


Fig. 35 – Disegni tecnici dell'applicatore costruito: sezione trasversale con le principali dimensioni (in mm).

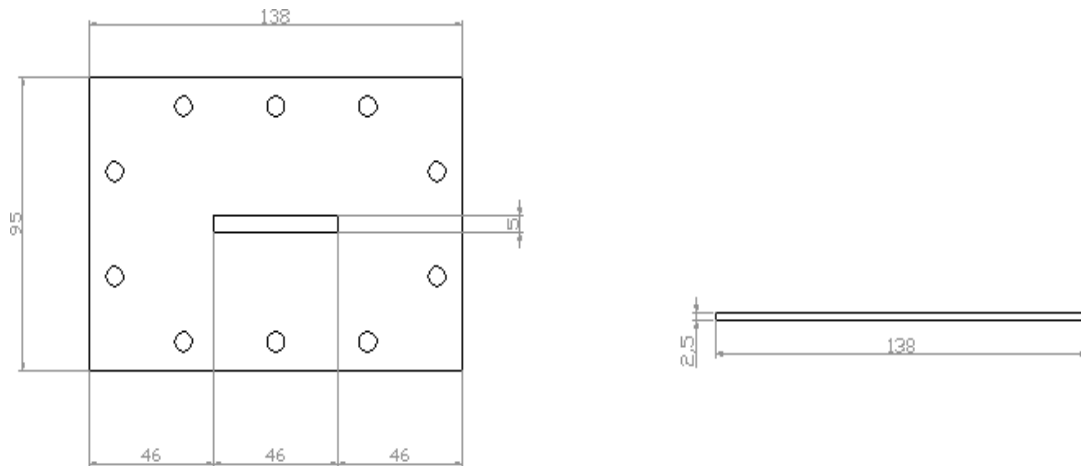


Fig. 36 – Disegni tecnici dell'applicatore costruito: vista frontale della flangia con la fessura (a sinistra) e spessore della flangia (a destra) con le principali dimensioni (in mm).

Riferimenti Bibliografici

1. A. Bruschi and S. Malaj, *Applicatori di Potenza in guida a 2,45 GHz: progetto e caratterizzazione di una transizione da connettore 7/16 a guida d'onda WR340*, Report IFAC-CNR, Dicembre 2011.