Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettronica

Tesi di Laurea Magistrale

# Cloaking di un impianto osseo a frequenza 2.45 GHz

**Relatore**
prof. Ladislau Matekovits

**Candidato**
Mattia Ramella Livrin
matricola: 277897

Anno accademico 2020-2021

# Sommario

La biocompatibilità è un tema da tenere sempre più in considerazione, a causa dei numerosi dispositivi medici utilizzati per la cura di pazienti affetti da malattie. L'impiego di essi può essere un problema, per esempio prendendo come riferimento un impianto osseo, se si è circondati da sorgenti e dispositivi che lavorano in una determinata banda; infatti possono crearsi interferenze con l'apparato, tipicamente costituito da una parte metallica, e dunque provocare malfunzionamenti e risonanze. La frequenza di interesse in questa tesi è di 2.45 GHz, la centrale della banda ISM, che è utilizzata da un elevato numero di dispositivi a scopo medico, industriale e scientifico. Per ridurre i fenomeni indesiderati è stata modificata la struttura di un impianto osseo, simulando un modello cilindrico metallico e rivestendolo con uno strato di materiale dielettrico (Allumina) con un determinato spessore, ricoperto a sua volta da un'impedenza superficiale di valore opportuno a simulare una metasuperficie. Questa tecnica è denominata Mantle Cloaking, e consiste nel ridurre il campo riflesso di un oggetto utilizzando una particolare configurazione come quella descritta. L'arto umano in questione è la gamba di un uomo adulto di dimensioni medie, simulata con un modello composto da strati sovrapposti di osso, muscolo, grasso e pelle, semplificato rispetto al caso reale. E' stato dunque ottenuta una riduzione del valore della Sezione Radar Equivalente (RCS), e ricavata una relazione tra il raggio della parte metallica e il valore di impedenza superficiale che minimizza l'RCS; infine è stato simulato un modello di forma conica sfruttando i dati analizzati, avvicinandosi di più alla conformazione di un impianto osseo nella realtà.

# Ringraziamenti

Il candidato ringrazia vivamente il Professore Ladislau Matekovits, per la sua disponibilità, il materiale fornito per la stesura, i suoi consigli e la tempestività ad ogni richiesta.

Un ringraziamento inoltre ai genitori, i quali grazie al loro sostegno hanno permesso di portare a termine il percorso universitario.

# Indice

**Elenco delle tabelle** 6

**Elenco delle figure** 7

**1 Introduzione generale** 11
- 1.1 Introduzione . . . 11
- 1.2 Cloaking . . . 12
- 1.3 Risultati principali . . . 13

**2 Revisione letteraria** 17

**3 Simulazione gamba senza impianto** 19
- 3.1 Ambiente di simulazione . . . 19
- 3.2 Modello gamba senza impianto . . . 20
- 3.3 Simulazione gamba senza impianto . . . 22

**4 Simulazioni impianto senza cloaking** 27
- 4.1 Modello gamba con impianto . . . 27
- 4.2 Simulazioni e analisi dati impianto senza cloaking . . . 28
  - 4.2.1 Campo elettrico impianto senza cloaking . . . 28
  - 4.2.2 Sezione radar equivalente impianto senza cloaking . . . 31

**5 Simulazioni impianto con cloaking mediante $TiO_2$** 35
- 5.1 Modello gamba con impianto con strato di diossido di titanio . 35
- 5.2 Simulazioni e analisi dati impianto con diossido di titanio . . . 36
  - 5.2.1 Campo elettrico impianto con $TiO_2$ . . . 36
  - 5.2.2 Sezione Radar Equivalente impianto con $TiO_2$ . . . 39

**6 Simulazioni impianto con cloaking mediante $Al_2O_3$** 43
- 6.1 Modello gamba con impianto con strato di $Al_2O_3$ . . . 43

6.2 Simulazioni e analisi dati impianto con $Al_2O_3$ . . . . . 44
6.2.1 Campo elettrico per spessore dell'ossido di 500 $\mu$m . . 44
6.2.2 RCS per spessore dell'ossido di 500 $\mu$m . . . . . 44
6.2.3 Campo elettrico per spessore dell'ossido di 1 mm . . . 48
6.2.4 RCS per spessore dell'ossido di 1 mm . . . . . 50
6.2.5 RCS per spessore dell'ossido di 1 mm per $\theta \in [0°,180°)$ e $[180°,360°)$ . . . . . 53
6.3 Modello gamba con impianto di raggio variabile con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 55

**7 Simulazioni impianto conico con cloaking mediante $Al_2O_3$** 63
7.1 Modello gamba con impianto conico con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 63
7.2 Campo elettrico impianto conico . . . . . 64
7.3 RCS impianto conico . . . . . 69

**8 Conclusioni** 73

**Bibliografia** 75

# Elenco delle tabelle

3.1 Caratteristiche dei materiali organici del modello . . . . . 21
6.1 Valori di impedenza superficiale che minimizzano l'RCS medio al variare del raggio dell'impianto metallico . . . . . 56

# Elenco delle figure


1.1 Modello gamba con impianto ricoperto da strato di $Al_2O_3$ di 1 mm e impedenza superficiale . . . . . 13
1.2 RCS medio in dB al variare di $Z_s$ . . . . . 14
1.3 Regressione quadratica di $Z_s$ al variare del raggio dell'impianto metallico . . . . . 15
3.1 Vista esterna del modello con materiale ECCOSORB (azzurro) posto alle estremità della sezione. . . . . 20
3.2 Sezione interna del modello senza impianto. Partendo dallo strato più esterno sono raffigurati: pelle, grasso, muscolo e osso. 21
3.3 Curve di raggio 50 mm e 150 mm poste internamente ed esternamente al modello. . . . . 22
3.4 Onda piana incidente. . . . . 23
3.5 Valore assoluto del campo elettrico valutato sulla curva di raggio 50 mm . . . . . 23
3.6 Valore assoluto del campo elettrico valutato sulla curva di raggio 150 mm . . . . . 24
3.7 Vista sezione a z=0 con riferimento in coordinate cilindriche . 25
4.1 Sezione a z=0 del modello con impianto metallico . . . . . 27
4.2 Valore assoluto campo elettrico con e senza impianto valutato sulla curva di raggio 50 mm . . . . . 28
4.3 Valore assoluto campo elettrico con e senza impianto valutato sulla curva di raggio 150 mm . . . . . 29
4.4 Norma in dB tra modello gamba con e senza l'impianto . . . 30
4.5 Valore assoluto del campo elettrico al variare del raggio dell'impianto . . . . . 31
4.6 RCS lungo la curva di raggio 50 mm al variare del raggio metallico . . . . . 33
4.7 RCS medio in funzione del raggio metallico . . . . . 34
5.1 Sezione a z=0 del modello con impianto metallico rivestito da strato di $TiO_2$ e impedenza superficiale . . . . . 36

5.2 Valore assoluto campo elettrico valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 350 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale . . . . . 37
5.3 Valore assoluto campo elettrico valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 500 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale . . . . . 38
5.4 RCS valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 350 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale 39
5.5 RCS valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 500 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale 40
5.6 RCS medio valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 350 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale . . . . . 41
5.7 RCS medio valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 500 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale . . . . . 42
6.1 Sezione a z=0 del modello con strato di $Al_2O_3$ . . . . . 44
6.2 Valore assoluto campo elettrico a z=0 del modello con strato di $Al_2O_3$ di 500 $\mu$m . . . . . 45
6.3 RCS lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 500 $\mu$m . . . . . 46
6.4 RCS medio lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 500 $\mu$m . . . . . 47
6.5 Valore assoluto campo elettrico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali negative . . . . . 48
6.6 Valore assoluto campo elettrico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali positive . . . . . 49
6.7 RCS lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali negative . . . . . 50
6.8 RCS lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali positive . . . . . 51
6.9 RCS medio lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 52
6.10 RCS medio per $\theta \in [0°,180°)$ del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 53
6.11 RCS medio per $\theta \in [180°,360°)$ del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 54
6.12 RCS medio al variare dell'impedenza superficiale e del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 56

6.13 Interpolazione dell'RCS medio al variare dell'impedenza superficiale e del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 57
6.14 Valore assoluto del campo elettrico del modello con impianto con cloaking per diversi valori di raggio con impedenza superficiale ottimale valutato lungo la curva di raggio 50 mm . 58
6.15 RCS del modello con impianto con cloaking per diversi valori di raggio con impedenza superficiale ottimale valutato lungo la curva di raggio 50 mm . . . . . 59
6.16 Regressione quadratica dell'impedenza che minimizza l'RCS al variare del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 60
6.17 RCS medio con impedenza superficiale ottimale al variare del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . 61
6.18 Variazione relativa dell'RCS rispetto al caso del modello senza impianto al variare del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm . . . . . 62
7.1 Impianto conico e curve di raggio 50 mm distanti 12.5 mm ciascuna . . . . . 64
7.2 Sezione a x=0 del modello della gamba con impianto conico con cloaking . . . . . 64
7.3 Impianto conico e curve di raggio 50 mm distanti 12.5 mm ciascuna . . . . . 65
7.4 Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{x}$ del modello con impianto metallico conico, valutato lungo curva di raggio 50 mm . . . . . 65
7.5 Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{x}$ del modello con impianto conico con cloaking, valutato lungo curva di raggio 50 mm . . . . . 65
7.6 Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{y}$ del modello con impianto metallico conico, valutato lungo curva di raggio 50 mm . . . . . 66
7.7 Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{y}$ del modello con impianto con conico cloaking, valutato lungo curva di raggio 50 mm . . . . . 66
7.8 Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{z}$ del modello con impianto metallico conico, valutato lungo curva di raggio 50 mm . . . . . 66

7.9 Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{z}$ del modello con impianto conico con cloaking, valutato lungo curva di raggio 50 mm . . . . . 66
7.10 Valore assoluto campo totale del modello con impianto metallico conico valutato lungo le curve di raggio 50 mm . . . . . 67
7.11 Valore assoluto campo totale del modello con impianto conico con cloaking valutato lungo le curve di raggio 50 mm . . . . . 68
7.12 RCS impianto metallico conico valutato lungo le curve di raggio 50 mm . . . . . 69
7.13 RCS impianto con cloaking valutato lungo le curve di raggio 50 mm . . . . . 70
7.14 Circuito equivalente. . . . . 71
7.15 Corrente superficiale in corrispondenza di z=-37.5 (r=4 mm) . 71
7.16 Corrente superficiale in corrispondenza di z=12.5 (r=9 mm) . 72

# Capitolo 1

# Introduzione generale

## 1.1 Introduzione

Il problema della biocompatibilità si sta diffondendo sempre di più nella nostra società, a causa della necessità di inserire nel corpo umano apparati medici artificiali sempre più avanzati, con lo scopo di monitorare o per guarire i pazienti. Come da definizione del termine, l'obiettivo è quello di evitare che i materiali introdotti nell'organismo siano causa di qualche reazione immunitaria o rigetto. Uno dei casi più comuni riguarda l'inserimento di un impianto all'interno di un osso, a causa di un trauma o di una malattia: a seguito dell'intervento il nuovo oggetto deve essere riconosciuto e deve inglobarsi con il resto dei tessuti circostanti, creando un tutt'uno con essi.

L'insieme di materiali che compongono un impianto presentano proprietà chimiche, termiche, meccaniche, elettriche e magnetiche che sono da tenere in considerazione, perché possono essere causa di disturbi sia per la persona interessata sia per l'ambiente che lo circonda e gli altri esseri viventi circostanti. In particolare per quanto riguarda l'aspetto elettromagnetico, un impianto con componenti metallici al suo interno può provocare interferenze ad apparati posti a distanza di pochi metri. Un esempio può essere quello del metal detector in un aeroporto, il quale dovrebbe rilevare oggetti pericolosi indossati dai passeggeri prima dell'imbarco; nel caso di una persona con impianto, che può essere osseo oppure un dispositivo antibradicardico come il pacemaker, è necessario però dichiarare in anticipo la presenza del corpo metallico. Stesso ragionamento può essere fatto in altri contesti con caratteristiche diverse: per esempio si può considerare che in media ogni persona possiede uno smartphone, solitamente collegato a una rete WiFi, con dispositivi bluetooth connessi quali smartwatch e auricolari, e che tutti

questi lavorano a bande di frequenze ristrette e sovrapposte. L'interferenza già presente tra di loro può essere incrementata a causa della presenza di un oggetto metallico a scopo medico, che magari presenta risonanze proprio in quella specifica banda.

L'obiettivo dunque è di ridurre questi fenomeni, agendo sulla struttura degli impianti, modificandone i materiali da cui è composto e di conseguenza anche le proprietà elettromagnetiche, consentendo una vita per il paziente alla pari con quella di una persona comune.

## 1.2 Cloaking

Per cercare di ridurre l'impatto che può avere l'inserimento di un impianto all'interno di un osso è stato utilizzato il concetto di occultamento (cloaking): dalla definizione esso consiste nel prendere un oggetto con una geometria definita e ridurre il più possibile il campo riflesso causato da una sorgente esterna che irradia in una banda definita [1]. Per attuarlo in questa tesi è stato scelto l'utilizzo del "Mantle Cloaking", che consiste nel rivestire la parte metallica con uno strato di materiale dielettrico e circondare il tutto da una metasuperficie, la quale dal punto di vista elettrico corrisponde a un determinato valore di impedenza superficiale $Z_s$, con parte reale nulla. La reattanza di quest'ultima è fondamentale per ottenere una parziale o totale cancellazione di un'armonica a una specifica frequenza del campo elettrico riflesso, riducendo così la Sezione Radar Equivalente (in inglese Radar Cross Section, o "RCS") e rendendo l'impianto non visibile in quelle specifiche condizioni.

La frequenza specifica presa in considerazione per le simulazioni è di 2.45 GHz, ed è la centrale per la banda ISM che va da 2.4 GHz a 2.5 GHz. L'acronimo ISM corrisponde a "Industrial, Scientific and Medical" e fa riferimento al tipo di applicazioni che lavorano in quel determinato spettro con limitazioni riguardo la potenza e il solo utilizzo in luoghi non pubblici: alcuni esempi di applicazione in ambito industriale possono essere i riscaldatori, per induzione o a microonde per il trattamento di materiale plastico. In ambito medico invece ci sono dispositivi per il trasferimento di calore all'interno dei tessuti, sia con lo scopo di rigenerarli da traumi (Tecar) sia per tentare di eliminare cellule cancerogene. Sono presenti anche altre applicazioni, che però non rientrano nella definizione letterale di ISM, quali per esempio Bluetooth, NFC, RFID, WiFi; queste ultime sono tutte a bassa potenza, a corto raggio

e dunque utilizzabili senza licenza, però comunque operanti all'interno della banda tra i 2.4 GHz a 2.5 GHz.

Dal punto di vista etico, considerando per esempio l'ambito medico, per un paziente possedere un impianto osseo può essere visto come una discriminazione, in quanto gli viene negato di poter usufruire di un trattamento, magari l'unico possibile, solo a causa di un corpo estraneo. Il cloaking di un oggetto dunque si può considerare come un modo per rendere tutti alla pari di fronte a queste situazioni, e poter avvalersi di qualsiasi servizio, medico e non, indipendentemente dalla struttura fisica e corporea che uno possiede.

## 1.3 Risultati principali

Il lavoro svolto è servito per comprendere il comportamento di un oggetto metallico all'interno del corpo umano, simulando un modello di una sezione di una gamba di un uomo adulto, variando dimensioni e materiali fino ad ottenere una riduzione del campo riflesso significativa. Esso è composto da un insieme di strati di spessori e proprietà diverse, per simulare i vari tessuti organici presenti; procedendo dall'esterno verso l'interno sono disposti pelle, grasso, muscolo e osso. In quest'ultimo è stato inserito l'impianto metallico ricoperto da uno strato di ossido e un'impedenza superficiale come mostrato in Fig. 1.1.

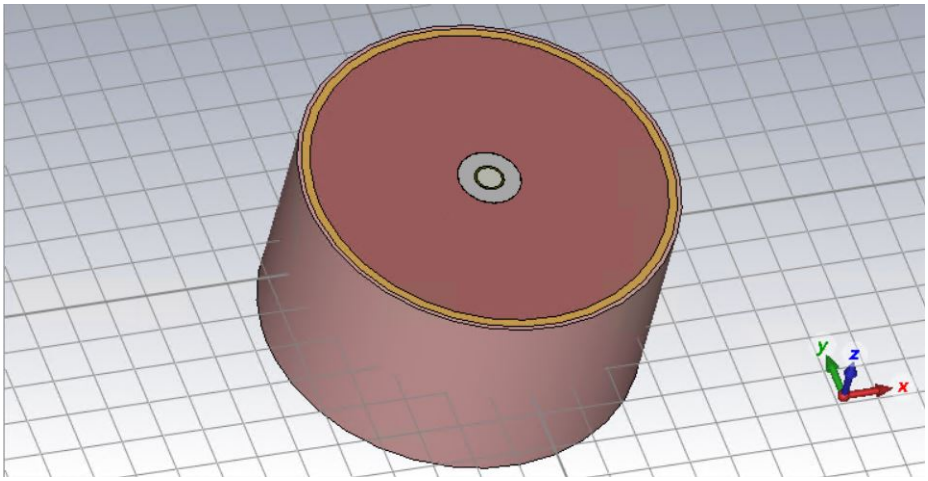


Figura 1.1. Modello gamba con impianto ricoperto da strato di $Al_2O_3$ di 1 mm e impedenza superficiale

Sono stati eseguite simulazioni con due diversi materiali dielettrici, il primo $TiO_2$ e il secondo $Al_2O_3$, scegliendo quest'ultimo data la sua più facile implementazione dal punto di vista materialistico.

Le simulazioni eseguite per determinare l'impedenza superficiale che presenta il minimo RCS sono state svolte utilizzando un modello di impianto cilindrico, per studiare anche l'influenza legata alla dimensione. E' stato effettuato uno studio parametrico per trovare una relazione tra il raggio della parte metallica e il valore dell'impedenza superficiale, considerando il valore medio dell'RCS lungo una curva di raggio 50 mm, ottenendo il grafico in Fig. 1.2.

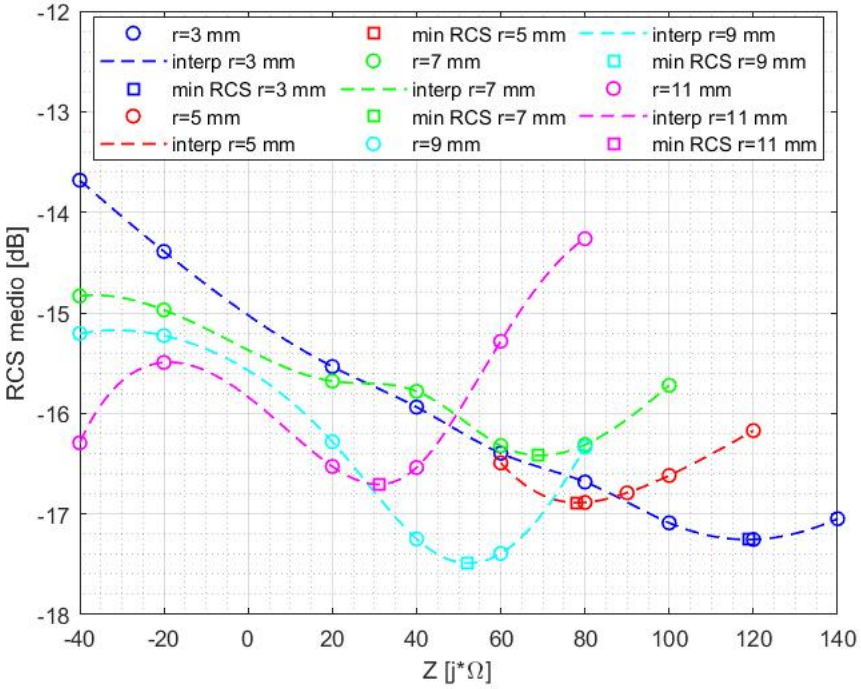


Figura 1.2. RCS medio in dB al variare di $Z_s$

I valori di reattanza che minimizzano l'RCS sono tutti positivi e il modulo cresce al diminuire del raggio della parte metallica. Da questo risultato è possibile dunque ricavare il valore ottimale di $Z_s$ per qualsiasi dimensione del diametro dell'impianto (Fig. 1.3), permettendo dunque di passare a una struttura più complessa ma più realistica, ovvero quella conica. Su di essa dunque si è in grado ottenere un cloaking ottimale definendo un valore di impedenza superficiale variabile lungo l'asse principale dell'impianto, riducendo

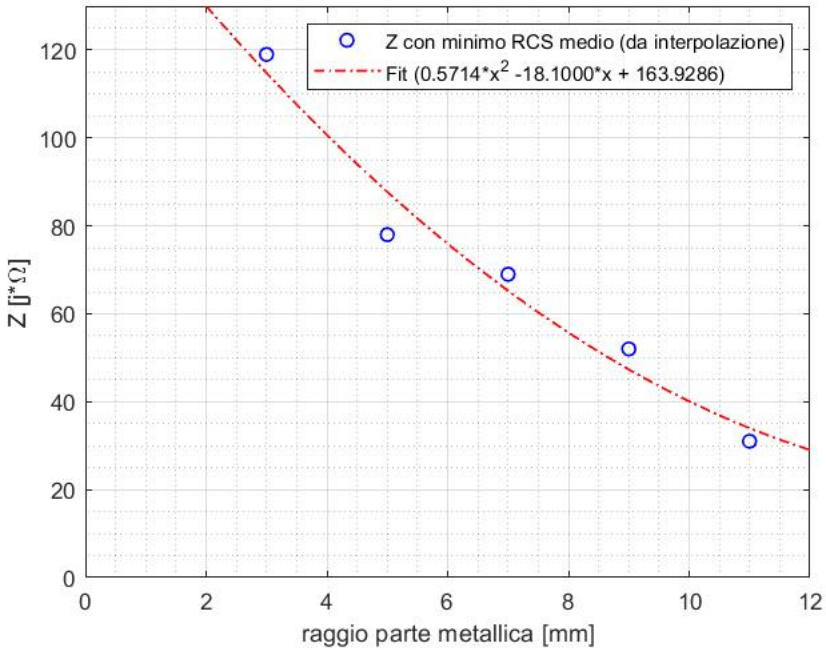


Figura 1.3. Regressione quadratica di $Z_s$ al variare del raggio dell'impianto metallico

il campo riflesso lungo tutta la sua lunghezza.

# Capitolo 2

# Revisione letteraria

Il concetto di invisibilità di un oggetto è da sempre stato di interesse specialmente per applicazioni in ambito militare e fisico, oltre che puramente scientifico. I primi studi riportati su carta riguardanti questo argomento risalgono ai primi del '900, presentati da Wood [2], il quale tratta però solamente problemi legati all'ottica. I primi aspetti teorici invece sono stati proposti da Veselago [3], il quale menziona alcune particolari proprietà di materiali con parametri costitutivi $\varepsilon_{\mathrm{r}}$ e $\mu_{\mathrm{r}}$ negativi. Altri teoremi che sarebbero poi tornati utili in futuro sono stati enunciati da Schelkunoff, in particolare quello nel 1938, nel quale prende in considerazione ed evidenzia il concetto di impedenza superficiale come strumento utile per studiare fenomeni di elettromagnetismo [4]. Un altro importante contributo riguarda quello di Devaney e Wolf, i quali nel 1973 definiscono le condizioni necessarie e sufficienti per localizzare campi arbitrari particolari, seguendo i teoremi da loro derivati e sviluppati nel progetto di dispersori invisibili [5, 6].

Nel corso degli anni sono state proposte molte altre teorie riguardo questo argomento con numerose soluzioni su come implementarle, le cui principali tecniche possono essere riassunte in Trasmission Optic, Plasmonic Cloaking e Mantle Cloaking. La prima è basata sulla trasformazione spaziale del campo, il quale viene deformato in una determinata regione all'interno della quale è possibile nascondere un oggetto di dimensioni e materiali opportuni [7, 8]. La seconda invece consiste nella cancellazione di una determinata armonica del campo riflesso; la struttura, di forma sferica o cilindrica che si vuole rendere non visibile, deve essere rivestita da un metamateriale con parametri costitutivi ($\varepsilon_{\mathrm{r}}$ e $\mu_{\mathrm{r}}$) tipicamente negativi o inferiori all'unità [9]. L'ultima tecnica si basa sullo stesso concetto matematico della seconda, solamente che per essere messa in atto si utilizza una metasuperficie con impedenza superficiale

equivalente $Z_s$ [10, 11]. Per questa tesi è stato preso in considerazione il Mantle Cloaking, in quanto la metasuperficie risulta essere meno ingombrante da implementare rispetto al caso del Plasmonic Cloaking, il cui funzionamento dipende anche dalla risonanza del metamateriale, e quindi dalla sua corretta e precisa realizzazione.

Nel caso di un impianto osseo, e in particolare partendo per semplicità da una struttura cilindrica e non conica, si può fare riferimento alla teoria proposta da Lorentz-Mie, la quale descrive la soluzione completa delle equazioni di Maxwell riguardo lo scattering di un onda piana da una superficie sferica o cilindrica di lunghezza infinita [12, 13]. Essa è valida però per strutture più semplici, come per esempio corpi immersi in un materiale uniforme e isotropo, come può essere un impianto metallico rivestito da uno strato di dielettrico immerso nel vuoto [14]. Nel caso di impianto all'interno di una gamba, si ha una situazione più complessa: oltre ad avere uno strato di ossido intorno alla parte metallica, avvolto da una metasuperficie a simulare un impedenza superficiale, il tutto è circondato da diverse stratificazioni di materiali organici, quali osso, muscolo, pelle e grasso, che presentano proprietà e caratteristiche diverse. Dunque calcoli analitici risultano molto complessi, e per analizzare ciò che effettivamente avviene quando si ha un onda elettromagnetica incidente si fa uso di un simulatore in grado di elaborare e risolvere il problema. Inoltre anche la scelta di lavorare a frequenza di 2.45 GHz ha comportato delle difficoltà, in quanto risultano esserci studi simili e teorie [15, 16] su strutture specifiche per il cloaking ma a range di frequenze ben diverse o con conformazioni e condizioni non analoghe a quella analizzata in questa tesi.

# Capitolo 3

# Simulazione gamba senza impianto

## 3.1 Ambiente di simulazione

Il calcolatore utilizzato per le simulazioni è un server con sistema operativo Windows Server 2012 R2 Standard; esso monta processore Intel Core i7 950, con massima frequenza di lavoro pari a 3.07 GHz basato su 64 bit, e una RAM totale installata di 24 GB. Per eseguire le simulazioni è stato utilizzato il software Microwave Studio con il pacchetto CST Studio Suite (v.2019), necessario per eseguire analisi di campi elettromagnetici con modelli tridimensionali. Il risolutore scelto è stato quello nel dominio del tempo, in quanto permette di eseguire simulazioni in banda larga in un'unica esecuzione e lavorare a frequenze dell'ordine dei GHz. Per quanto riguarda i materiali è stato possibile per i tessuti organici usufruire della libreria Voxel, dalla quale sono stati importati tutti i parametri elettromagnetici necessari. Anche per quanto riguarda i materiali inorganici sono stati impiegati quelli già presenti all'interno del software. Tutte le simulazioni sono state eseguite con mesh del tipo "Hexahedral" e un accuratezza di -20 dB: quest'ultima scelta è stata dettata dal lungo tempo di risoluzione, causato da un modello complesso comprendente strati di materiale di spessore ridotto e dunque un numero elevato di mesh necessarie per un risultato accurato.

## 3.2 Modello gamba senza impianto

Il modello utilizzato per le simulazioni fa riferimento a una gamba di un uomo adulto di dimensioni medie, semplificando però la struttura interna in un insieme di strati di vario spessore a simulare tutti i possibili materiali organici presenti in un arto. L'altezza della sezione della gamba risulta di 100 mm, valore necessario per poi simulare, una volta elaborati tutti i dati, il modello con l'impianto conico al suo interno. Nella parte superiore e inferiore sono stati posizionati due dischi di ECCOSORB AN-77 (Fig. 3.1): questo materiale, essendo costituito da una schiuma in poliuretano caricata con polvere di carbone, è in grado di assorbire microonde e dunque attenuare gli effetti di bordo del campo. Avendo una bassa riflettività con una riduzione superiore ai 17 dB per frequenze superiori a 1.2 GHz, soddisfa ampiamente la specifica dei 2.45 GHz.

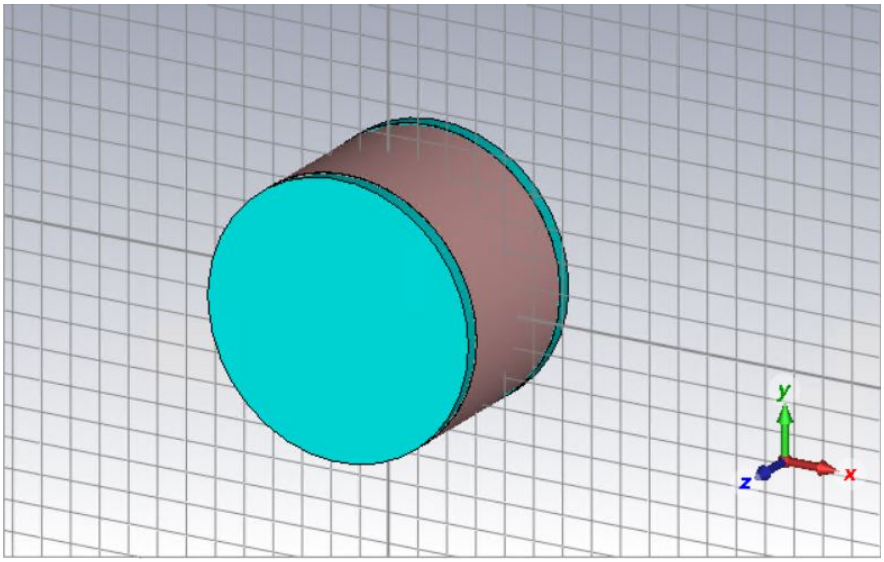


Figura 3.1. Vista esterna del modello con materiale ECCOSORB (azzurro) posto alle estremità della sezione.

Per quanto riguarda la stratificazione della parte interna, partendo dall'esterno è presente un cilindro cavo di spessore di 2 mm e raggio esterno di 90 mm, a simulare la pelle. Al di sotto di esso è presente uno strato di grasso, di spessore 4 mm e raggio esterno 88 mm; internamente a quest'ultimo è situato lo strato muscolare, con spessore molto maggiore rispetto ai precedenti pari a 69 mm e raggio esterno di 84 mm. Come ultimo materiale, solo nel caso di gamba senza impianto, è presente l'osso, di raggio 15 mm. Tutti i cilindri

sopra descritti e illustrati in Fig. 3.2 sono costituiti da 360 segmenti, in modo da avere una superficie tra materiali diversi non troppo frastagliata ma allo stesso tempo non rendere eccessivamente complessa la struttura e lunghi i tempi di calcolo. Le caratteristiche dei vari materiali sono riportati in Tab. 3.2, dove sono elencati la costante dielettrica relativa $\varepsilon_r$ e la conduttività elettrica $\sigma$.

Tabella 3.1. Caratteristiche dei materiali organici del modello

| | $\varepsilon_r$ | $\sigma$ [S/m] |
|---|---|---|
| Osso | 12.45 | 0.143 |
| Muscolo | 55.03 | 0.943 |
| Grasso | 5.46 | 0.051 |
| Pelle | 43.75 | 0.856 |

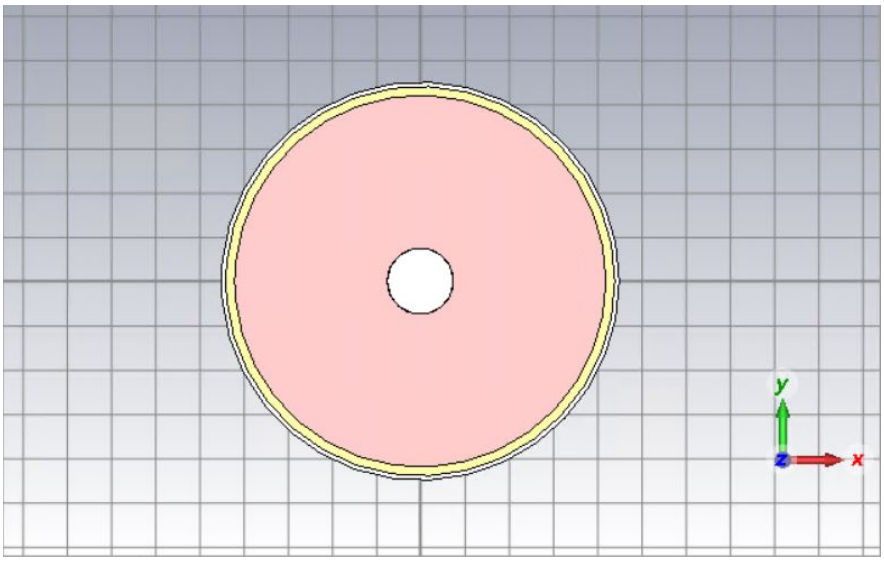


Figura 3.2. Sezione interna del modello senza impianto. Partendo dallo strato più esterno sono raffigurati: pelle, grasso, muscolo e osso.

Tutti questi materiali, come già accennato precedentemente, sono stati importati dai modelli di corpo umano nella sezione Voxel, presente in CST. Essi presentano oltre ai parametri elettromagnetici anche quelli meccanici e termici, anche se questi ultimi non verranno presi in considerazioni perché non necessari per le analisi e le simulazioni di questa tesi.

## 3.3 Simulazione gamba senza impianto

La simulazione è stata eseguita prendendo in considerazione due curve, come mostrato in Fig. 3.3, poste a metà lunghezza del modello, la prima di raggio 50 mm e dunque esterna allo strato di pelle, la seconda di raggio 150 mm, quindi interna allo strato muscolare. Esse sono state definite in modo da poter misurare il campo elettrico intorno al modello e poter calcolare l'RCS successivamente.

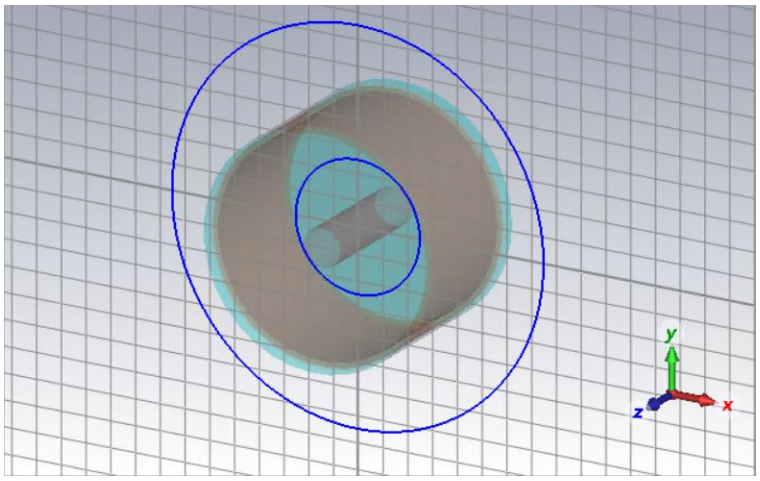


Figura 3.3. Curve di raggio 50 mm e 150 mm poste internamente ed esternamente al modello.

Come sorgente è stata utilizzata un onda piana uniforme come mostrato in Fig. 3.4, con $\hat{k}$ parallelo a $\hat{y}$; il campo elettrico presenta una polarizzazione lungo $\hat{z}$, con intensità di 1 V/m, e di conseguenza quello magnetico lungo $\hat{x}$, con frequenza pari a 2.45 GHz e una polarizzazione lineare.

Il campo elettrico estrapolato lungo le due curve risulta essere come raffigurato in Figg. 3.5 e 3.6; in questo caso è stato riportato il valore assoluto del campo totale, cioè la somma di quello incidente e quello riflesso, per comprendere in che direzione si hanno riflessioni maggiori.

Sull'asse orizzontale, siccome è stato utilizzato un sistema di riferimento in coordinate cilindriche, è rappresentata la posizione lungo la circonferenza con un angolo in gradi secondo la relazione 3.1.

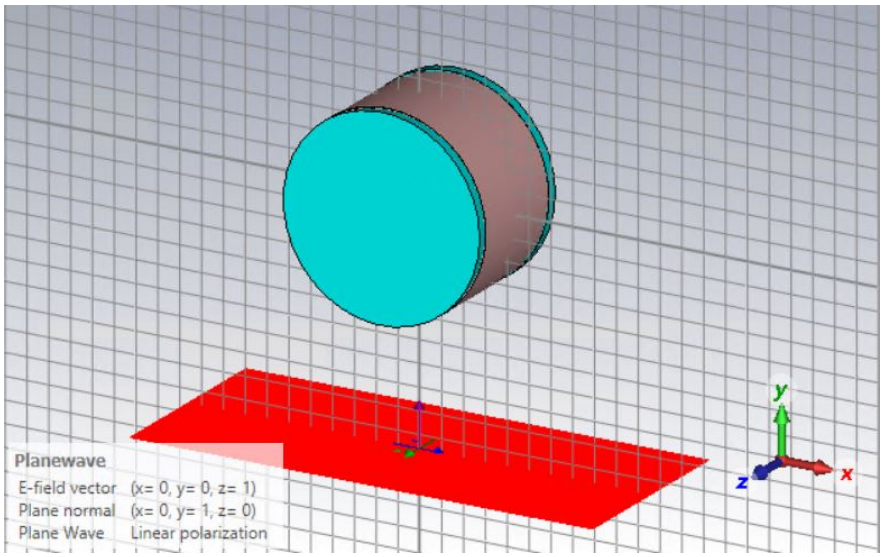


Figura 3.4. Onda piana incidente.

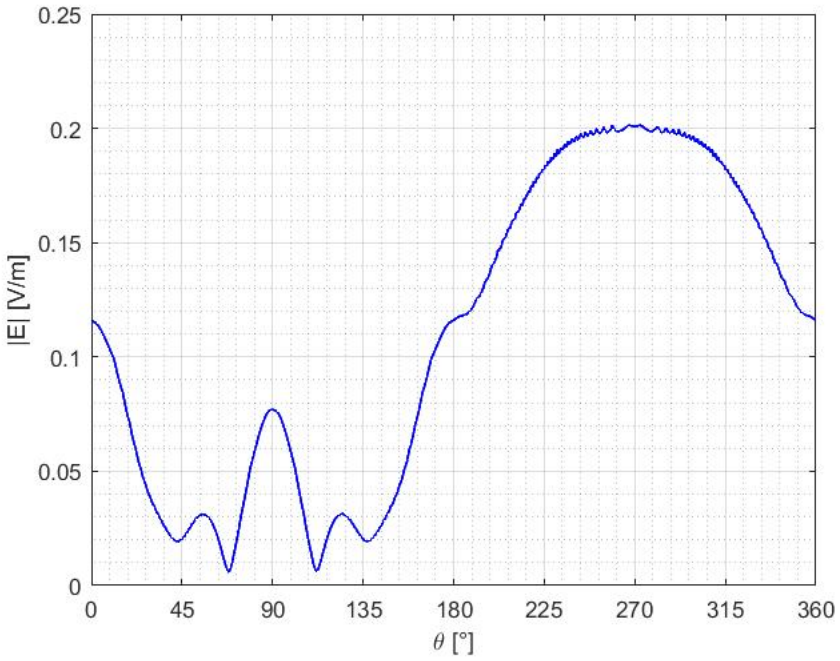


Figura 3.5. Valore assoluto del campo elettrico valutato sulla curva di raggio 50 mm

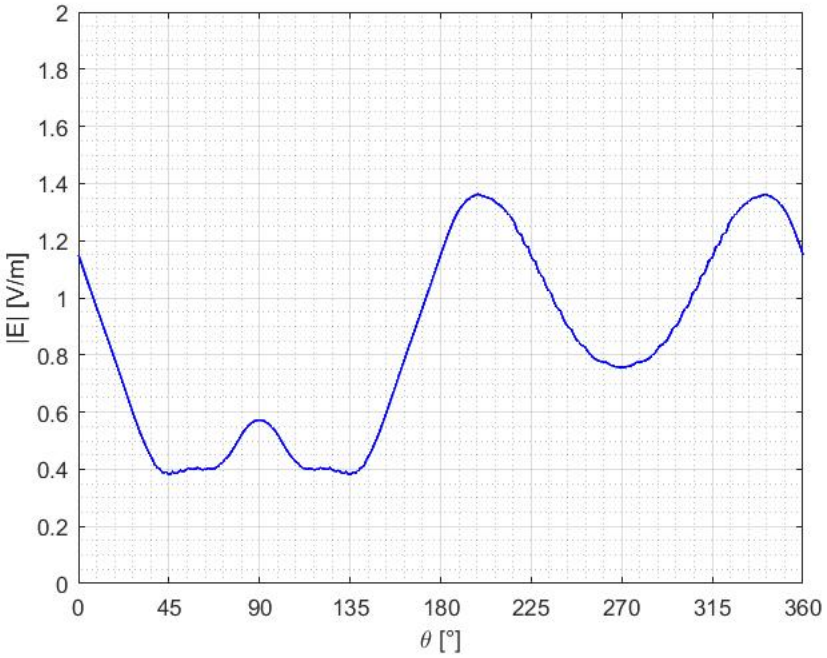


Figura 3.6. Valore assoluto del campo elettrico valutato sulla curva di raggio 150 mm

$$\begin{cases} x = \rho\cos(\theta), & \rho \in [0, +\infty) \\ y = \rho\sin(\theta), & \theta \in [0,2\pi) \\ z = z, & z \in (-\infty, +\infty) \end{cases} \tag{3.1}$$

Nelle Fig. 3.5 e 3.6 ci si è posti sul piano z=0, con $\rho$ pari al raggio del cerchio corrispondente, facendo variare $\theta$ tra 0° e 360°, con 90° in corrispondenza della direzione di propagazione dell'onda piana incidente $\hat{k}$ (Fig. 3.7).

Come si può notare in entrambi i casi il campo mostra delle variazioni in base alla posizione in cui viene calcolato, mostrando valori più elevati in corrispondenza dei 270°, cioè in corrispondenza della faccia esposta alla sorgente. Siccome il campo totale risulta essere la somma di due contributi, conoscendo l'intensità della parte incidente, è possibile ottenere il campo riflesso, che in questo caso corrisponde all'andamento mostrato in Fig. 3.5 e 3.6. Nel paragrafo successivo verrà dunque descritto e analizzato come l'inserimento di un impianto metallico possa incidere sul campo elettrico riflesso e quindi anche su quello totale.

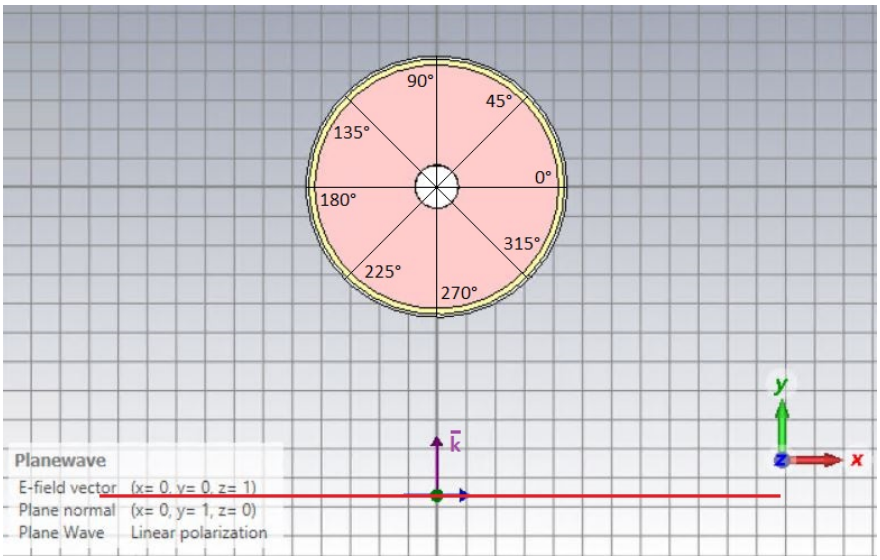


Figura 3.7. Vista sezione a z=0 con riferimento in coordinate cilindriche

# Capitolo 4

# Simulazioni impianto senza cloaking

## 4.1 Modello gamba con impianto

L'impianto inserito all'interno del modello risulta essere costituito da un cilindro metallico in PEC (Perfect Electric Conductor), in modo da simulare un conduttore che può essere sostituito nella realtà da una lega biocompatibile. Esso è posizionato all'interno dell'osso, con altezza pari a 10 cm e raggio di 7 mm, come illustrato nella Fig. 4.1.

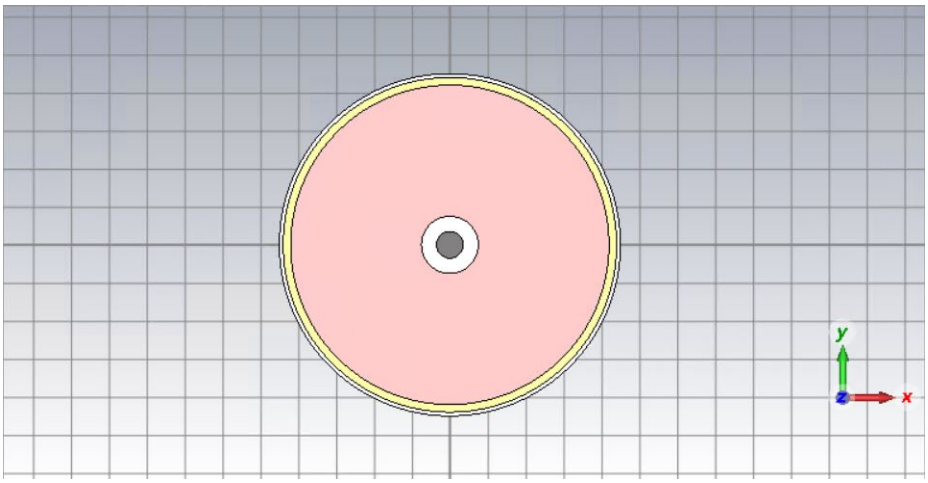


Figura 4.1. Sezione a z=0 del modello con impianto metallico

Per questa analisi e per le successive con cloaking la forma non sarà conica

come ci si aspetta da un reale impianto metallico, ma si presenterà cilindrica: il motivo di questa scelta è stato quello di comprendere come varia il campo elettrico con una struttura più semplice da analizzare, dalla quale i valori di campo siano indipendenti dalla sezione presa. Solo nei paragrafi finali verranno messe insieme tutte le considerazioni e i risultati trovati per ottenere una relazione tra il raggio dell'impianto e la rispettiva impedenza superficiale che ne riduce il campo riflesso, utilizzando dunque una struttura conica e non più cilindrica.

## 4.2 Simulazioni e analisi dati impianto senza cloaking

### 4.2.1 Campo elettrico impianto senza cloaking

Una volta terminata la simulazione è stato estrapolato il campo elettrico e paragonato a quello mostrato nel capitolo precedente, per valutarne le differenze. I risultati lungo le due curve sono rappresentati in Figg. 4.2 e 4.3 e sovrapposti a quelli del modello senza impianto.

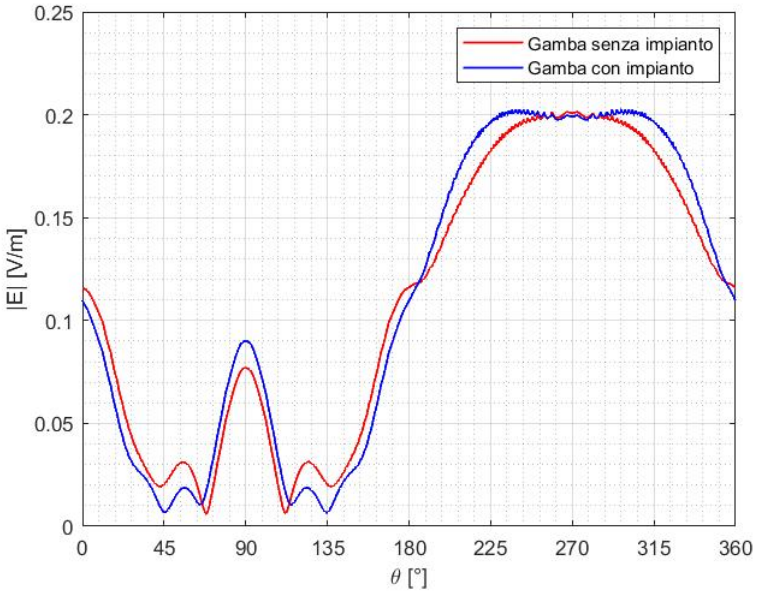


Figura 4.2. Valore assoluto campo elettrico con e senza impianto valutato sulla curva di raggio 50 mm

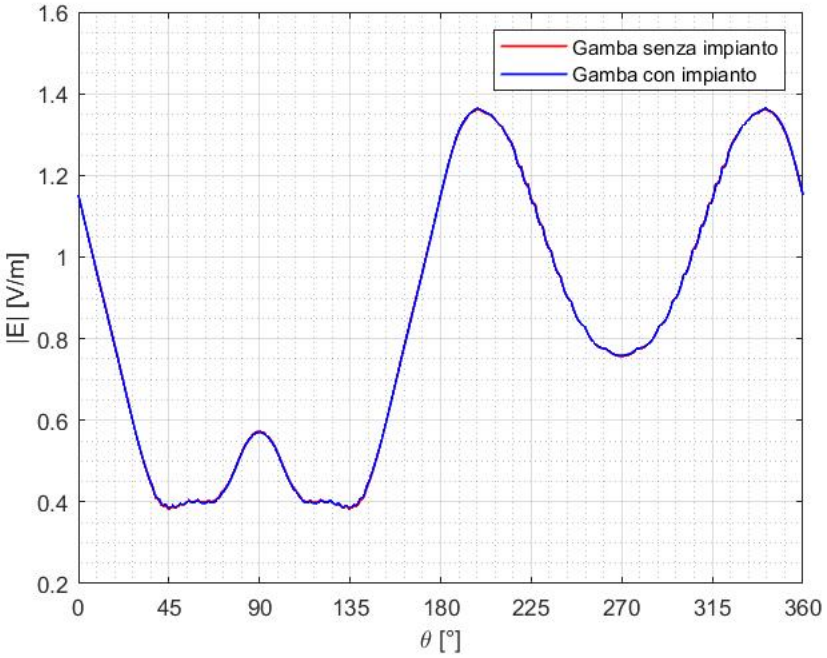


Figura 4.3. Valore assoluto campo elettrico con e senza impianto valutato sulla curva di raggio 150 mm

Come si può notare si ha una notevole variazione sia per quanto riguarda la superficie frontale alla direzione di propagazione dell'onda piana, sia per quanto riguarda quella nascosta, ma solamente nel caso del campo misurato sulla curva di raggio 50 mm. La motivazione del fatto che lungo la curva esterna non ci siano differenze è dovuta alla bassa intensità del campo elettrico generato dall'onda piana, pari a 1 V/m, unito a un'elevata costante dielettrica degli strati che circondano l'impianto, in particolare pelle e muscolo, causando quindi riflessioni interne e schermando queste ultime rispetto lo spazio esterno. Considerando dunque solamente la curva interna, è stata valutata la norma tra campo con e senza impianto, secondo la formula 4.1.

$$Norma_{dB} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{|E_{impianto}|^2 - |E_{gamba}|^2}{|E_{gamba}|^2}\right) \tag{4.1}$$

Da essa si ottiene il risultato in Fig. 4.4, dove si nota che i contributi più significativi sono principalmente intorno ai 90°, ovvero in corrispondenza della parte nascosta alla sorgente. Nella parte frontale invece la differenza è minima, intorno ai -40 dB, che è inoltre paragonabile all'accuratezza

considerata durante le simulazioni, dunque è possibile trascurarla.

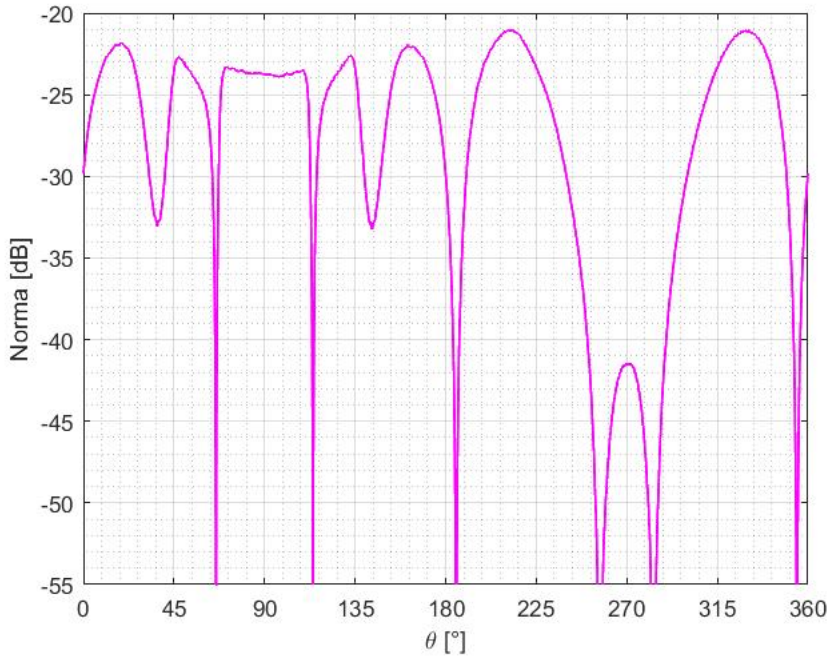


Figura 4.4. Norma in dB tra modello gamba con e senza l'impianto

### 4.2.2 Sezione radar equivalente impianto senza cloaking

Dopo aver constatato che i dati presi dalla curva più esterna non sono significativi, è stato fatto variare il raggio dell'impianto metallico, da un valore di 3 mm a uno di 11 mm con passo di 2 mm, come riportato in Fig. 4.5. Gli estremi di questo intervallo sono stati scelti prendendo in considerazione i raggi delle estremità di un impianto metallico di forma conica, osservando un aumento dei valori del campo in corrispondenza della parte frontale, da associare a una maggiore riflessione al crescere del raggio.

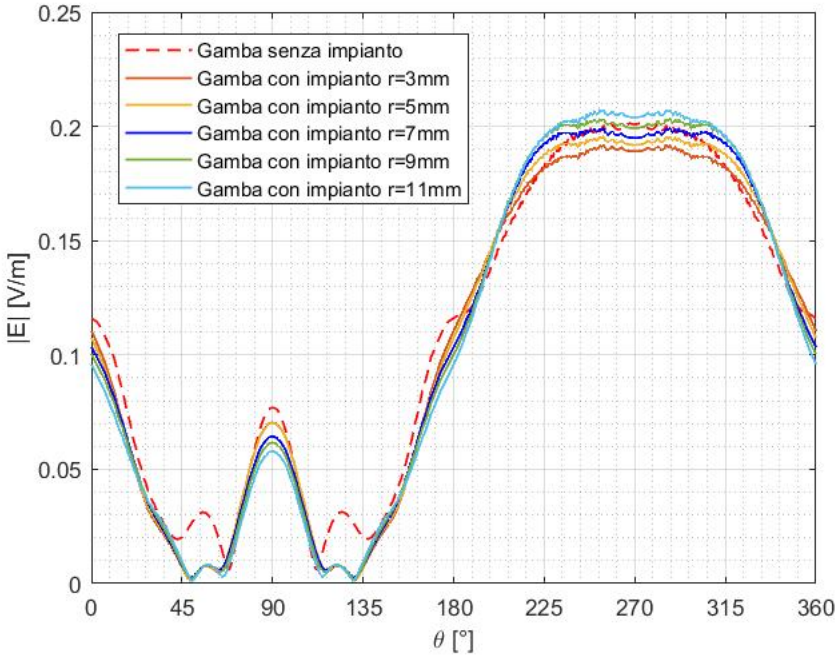


Figura 4.5. Valore assoluto del campo elettrico al variare del raggio dell'impianto

Avendo appurato la dipendenza dal raggio della parte metallica, è stato valutata l'RCS, per determinare quanto questo oggetto sia visibile da un radar, che in questo caso potrebbe essere quello si un metal detector. Il tutto è stato calcolato seguendo la formula 4.2, dove $E_{impianto}$ corrisponde al campo prelevato dal modello con impianto, e $E_{gamba}$ è usato come campo di riferimento, ovvero senza parte metallica.

$$RCS_{dB} = 10\log_{10}\left[2\pi r\left(\frac{|E_{impianto}|^2-|E_{gamba}|^2}{|E_{gamba}|^2}\right)\right] \tag{4.2}$$

Come si nota non è la formula convenzionale relativa all'RCS, la quale prevede la differenza dei campi elettrici utilizzando parte reale e immaginaria e non direttamente i moduli secondo la formula 4.3.

$$RCS_{dB} = 10\log_{10}\left[2\pi r\left(\frac{|E_{impianto}-E_{gamba}|^2}{|E_{gamba}|^2}\right)\right] \tag{4.3}$$

Questa scelta è stata considerata per queste prime analisi principalmente per due motivazioni: la prima è legata a un fattore di precisione, siccome valutando l'RCS con la 4.2 o con la 4.3 i risultati sono analoghi, con i contributi di maggior valore identici e un errore tra le due comparabile con quello della simulazione, ovvero di -20 dB, rendendo trascurabile tale differenza. La seconda invece riguarda l'aspetto logistico, ossia il tempo per l'esportazione e l'elaborazione dati, i quali avrebbe richiesto di salvare e manipolare file doppi per ogni simulazione contenenti parte reale e immaginaria. In seguito, una volta descritto il modello conico dell'impianto verrà utilizzata la formula convenzionale (4.3) per avere risultati più accurati.

I grafici riportati in Fig. 4.6 mostrano come l'RCS presenti contributi significativi nel lato del modello nascosto alla sorgente, in corrispondenza dell'intervallo $90°\pm21°$. Per valutare però in maniera più significativa come il variare del raggio influisca, è stato inoltre valutato il valore medio dell'RCS lungo tutta la curva di raggio 50 mm, sommando tutti i campioni e dividendoli in questo caso per 3601, ovvero il numero di punti. In questo modo è stato ottenuto un andamento analogo a quello in Fig. 4.7, con una variazione del valore medio non molto marcata.

A seguito dei risultati precedentemente ottenuti e analizzati, è stata modificata la struttura dell'impianto per far sì di ridurre l'RCS. Il nuovo modello e le rispettive simulazioni sono riportate nel capitolo successivo.

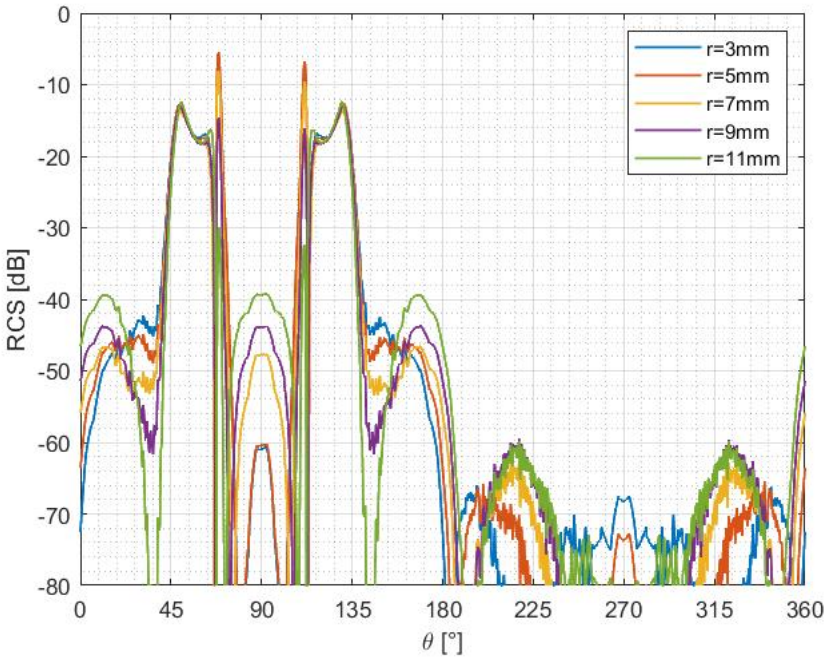


Figura 4.6. RCS lungo la curva di raggio 50 mm al variare del raggio metallico

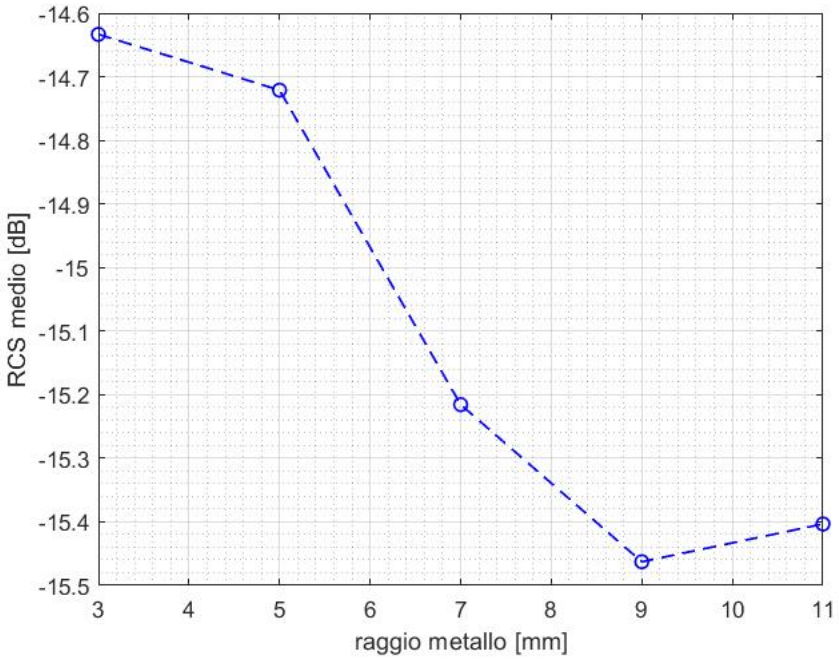


Figura 4.7. RCS medio in funzione del raggio metallico

# Capitolo 5

# Simulazioni impianto con cloaking mediante $TiO_2$

## 5.1 Modello gamba con impianto con strato di diossido di titanio

Il modello della gamba é stato modificato inserendo uno strato di ossido tra la parte metallica e quella ossea; al di sopra di esso é stato posto un altro strato, come si nota in Fig. 5.1, di spessore molto ridotto (0.05 mm) a simulare l'impedenza superficiale che ricopre l'intero impianto. Non è stato possibile definirlo di spessore infinitesimo perché sul simulatore esso causa una sovrapposizione con i materiali adiacenti, quali osso e ossido, provocando un errato risultato a fine simulazione. Il compito di questi due strati aggiunti é quello di ridurre una specifica armonica a una determinata frequenza, in questo caso intorno ai 2.45 GHz, del campo elettrico riflesso, simulando dunque l'azione di una metasuperficie [14].

Il diossido di titanio come materiale dielettrico é stato scelto perché risulta essere biocompatibile (anche se di recente si sta rivalutando la sua sicurezza), é stato impiegato in passato per questo scopo e lo é tuttora. E' possibile inoltre depositarlo in sottili film siccome si presenta sotto forma di polvere. In Microwave Studio CST Suite non risulta presente nella libreria, e dunque é stato definito con costante dielettrica relativa pari a 90 e conducibilità $10^{-11}$ S/m [17]. Lo spessore del $TiO_2$ é stato scelto di due valori differenti, per constatare la dipendenza della riduzione del campo riflesso dallo spessore, scegliendo i valori di 350 $\mu$m e 500 $\mu$m. Purtroppo però questa analisi ha lo scopo di comprendere come reagisce la struttura a un campo incidente, senza

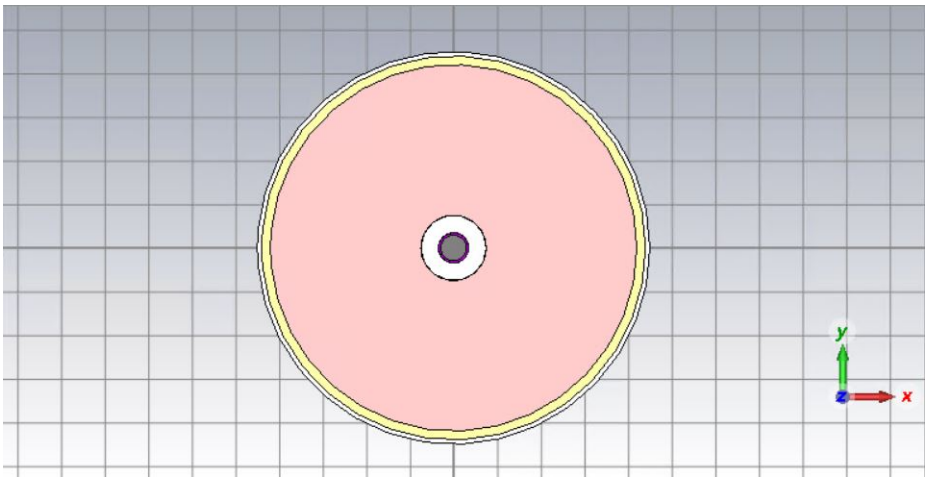


Figura 5.1. Sezione a z=0 del modello con impianto metallico rivestito da strato di $TiO_2$ e impedenza superficiale

però approfondire ulteriormente siccome il massimo spessore di ossido che può essere depositato nella realtà é di gran lunga inferiore a 350 $\mu$m, e dunque non sarebbe implementabile con metodi tradizionali ed economici. Nei capitoli successivi verrà utilizzato un materiale diverso, ma che comunque mantiene lo stesso funzionamento del diossido di titanio. Tutti gli altri parametri relativi alle dimensioni degli altri strati organici sono stati lasciati inalterati, per poter confrontare direttamente i risultati descritti precedentemente con questi, mentre il raggio della parte metallica è stato impostato pari a 6 mm, che rappresenta il valore medio di un impianto conico.

## 5.2 Simulazioni e analisi dati impianto con diossido di titanio

### 5.2.1 Campo elettrico impianto con $TiO_2$

Seguendo la tipologia di analisi dati dei capitoli precedenti, é stato estrapolato il campo elettrico, ma solamente dalla curva interna al muscolo di raggio 50 mm, perché da quella esterna anche in questo caso non si hanno variazioni rispetto alla configurazione con metallo senza ossido. I risultati ottenuti sono riportati nelle Figg. 5.2 e 5.3, che corrispondono a spessore 350 $\mu$m e 500 $\mu$m rispettivamente, facendo variare il valore dell'impedenza superficiale $Z_s$ nell'intervallo [-5,-100]j$\Omega$.

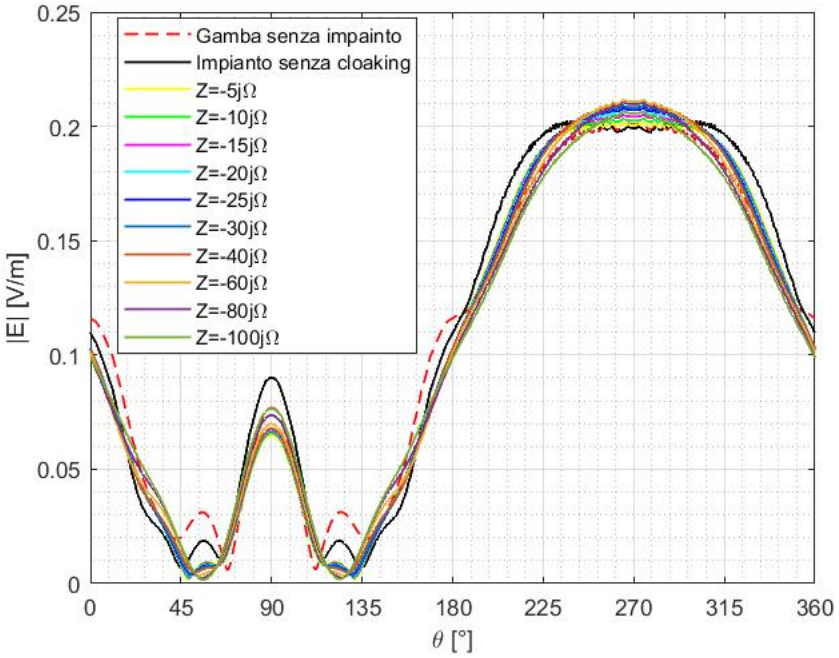


Figura 5.2. Valore assoluto campo elettrico valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 350 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale

L'andamento del campo risulta analogo a quello con l'impianto senza cloaking, però si possono riscontrare differenze in più punti: in corrispondenza dei 90° e intorno al picco, ci sono variazioni ma non così significative siccome di intensità non elevata. Invece nell'intorno tra i 225° e i 315° la variazione è più marcata, con dipendenza rispetto al valore dell'impedenza superficiale e incremento del valore massimo a 270°. Anche in questo caso, come per l'impianto senza ossido, il campo estrapolato dalla curva posta esternamente al modello di raggio 150 mm non è riportato, in quanto non è possibile osservare alterazioni.

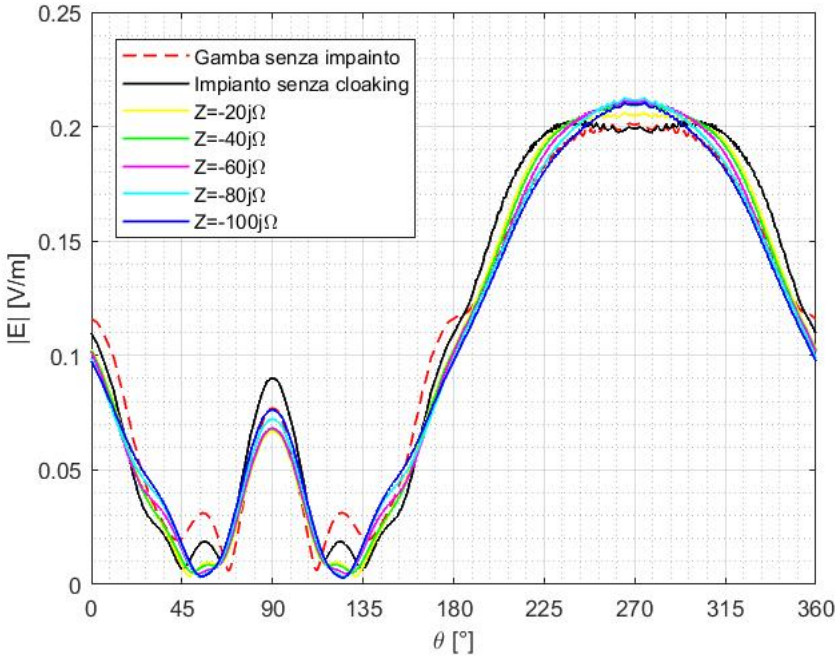


Figura 5.3. Valore assoluto campo elettrico valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 500 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale

### 5.2.2 Sezione Radar Equivalente impianto con $TiO_2$

E' stato valutato inoltre anche l'RCS, sempre seguendo la formula 4.2, ottenendo i grafici in Figg. 5.4 e 5.5: per entrambe le configurazioni la differenza rispetto al caso dell'impianto semplice risulta evidente, segno che l'inserimento dei due nuovi strati ha portato a una variazione del campo riflesso.

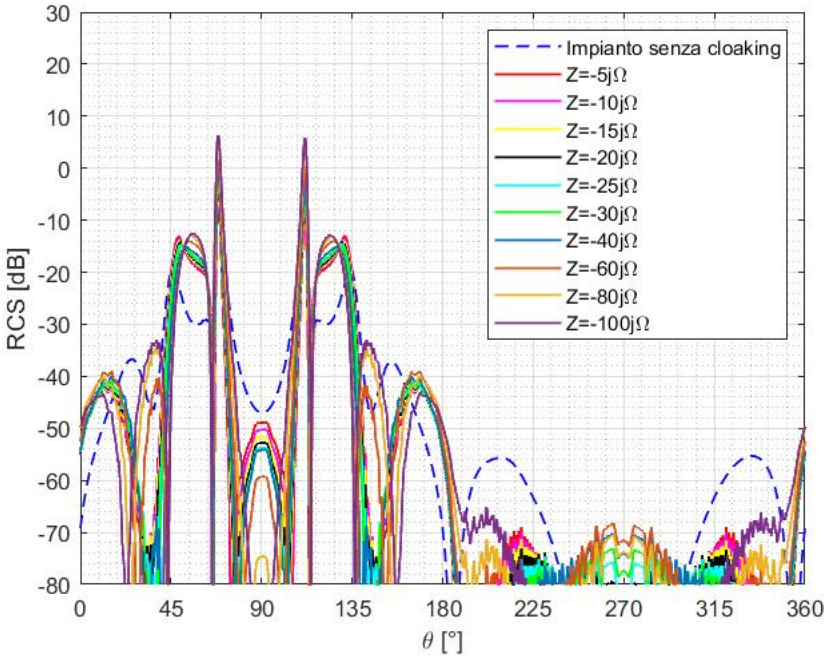


Figura 5.4. RCS valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 350 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale

Per comprendere invece con quale valore di impedenza superficiale si ottiene una migliore riduzione del campo, è stato valutato l'RCS medio, giungendo ai risultati in Figg. 5.6 e 5.7. Come si può notare si ha un trend decrescente al crescere della reattanza di $Z_s$, che risulta proseguire anche per valori positivi. Anche il fatto che il valore medio nel caso di impianto senza cloaking sia molto più basso della maggior parte dei valori negativi di impedenza suggerisce che il minimo possa trovarsi per valori positivi. Il numero di simulazioni non sono molte, a causa dei lunghi tempi del calcolatore, che in questo caso superano le 8 ore di attesa su un dispositivo come quello descritto nel paragrafo 3.1. Inoltre non sono stati considerati valori positivi e quindi la possibilità di trovare un valore minimo perché, come accennato in precedenza, il $TiO_2$

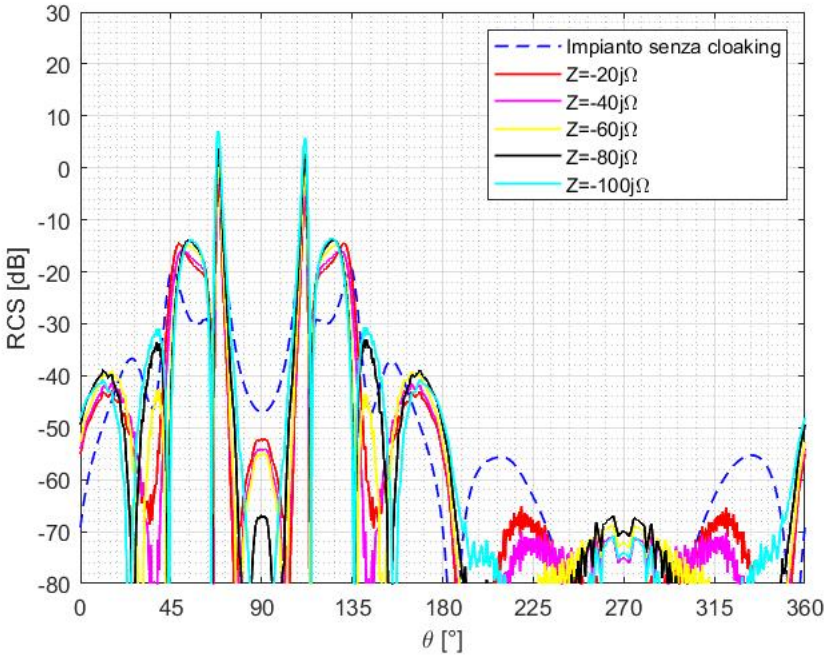


Figura 5.5. RCS valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 500 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale

non è implementabile con questo spessore; questa analisi è servita per capire in che direzione continuare lo studio, e verificare se questa struttura funzioni correttamente. Si è deciso dunque di passare a un altro materiale dielettrico, come l'allumina, che sarà descritto nel capitolo successivo.

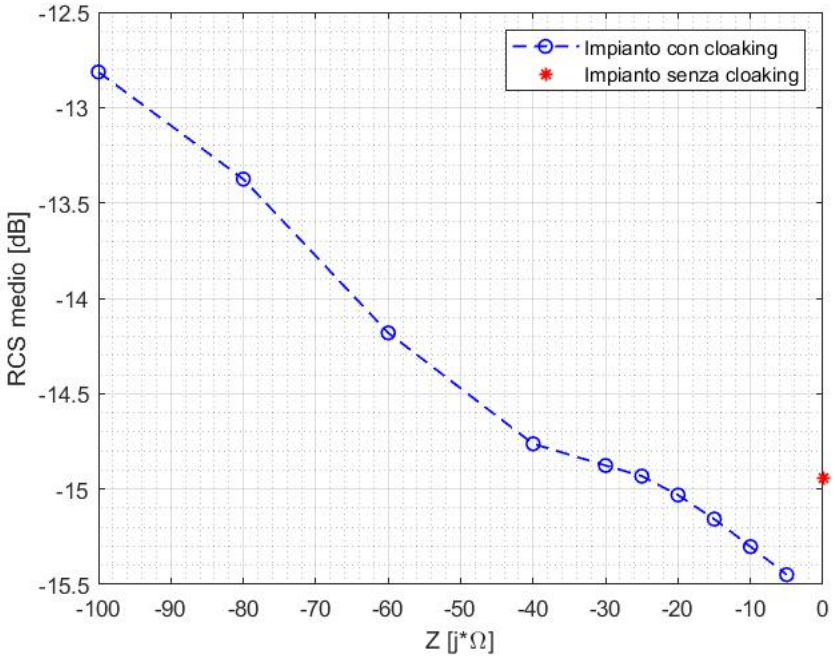


Figura 5.6. RCS medio valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 350 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale

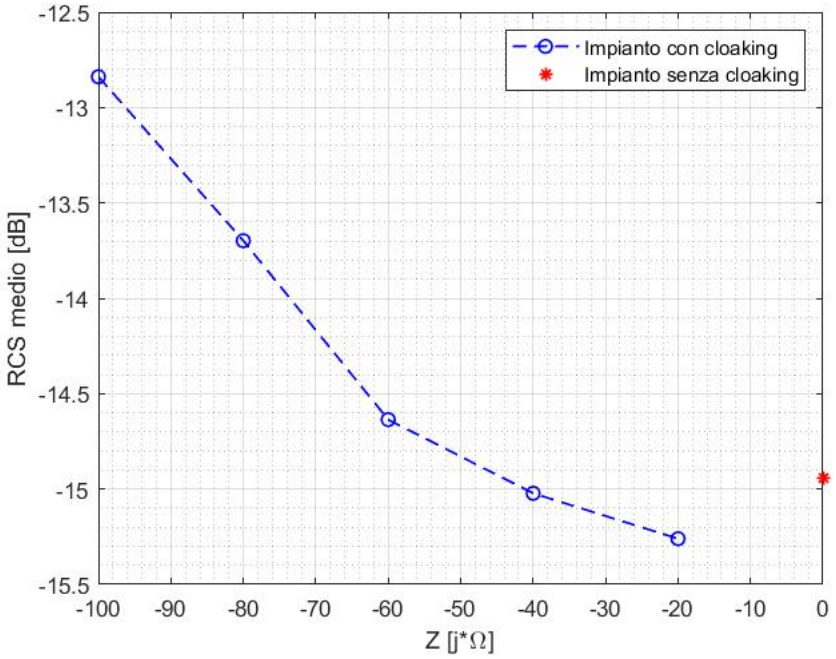


Figura 5.7. RCS medio valutato lungo la curva di raggio 50 mm del modello con ossido di spessore 500 $\mu$m al variare dell'impedenza superficiale

# Capitolo 6

# Simulazioni impianto con cloaking mediante $Al_2O_3$

## 6.1 Modello gamba con impianto con strato di $Al_2O_3$

Avendo constatato che il diossido di titanio non si presta ad essere depositato con spessori dell'ordine del millimetro, è stato scelto come materiale alternativo l'allumina ($Al_2O_3$). In questo caso è già presente all'interno della libreria di CST Studio, ed è stata scelta con purezza pari al 96%, con costante dielettrica relativa pari a 9.4 e tg$\delta$=0.0004. Il problema di questo ossido è che non risulta essere biocompatibile, quindi necessiterebbe di essere rivestito esternamente da un sottilissimo strato di materiale biocompatibile, quale per esempio il $TiO_2$, per separarlo da un eventuale contatto con la parte ossea. Questa aggiunta però nelle simulazioni, date le ridotte dimensioni, avrebbe portato ad un aumento significativo dei tempi di elaborazione a causa di un incremento notevole del numero di mesh: è stata dunque omessa dal modello, in quanto la sua presenza non comporta grosse variazioni nei dati di campo prelevati. Come nel caso precedente, per simulare l'impedenza superficiale è stato inserito uno strato di spessore 0.05 mm esternamente all'ossido, come mostrato in Fig. 6.1, necessario per effettuare l'azione di cloaking.

Le dimensioni di tutti gli strati è stato lasciato invariato, e la parte metallica, come nel caso del $TiO_2$, ha raggio di 6 mm; lo spessore del materiale dielettrico invece è stato variato, assegnando due valori, uno di 0.5 mm e l'altro di 1 mm, per comprendere il funzionamento e osservarne le differenze. Il setup di maggior interesse è però quello a 1 mm, il quale verrà preso in

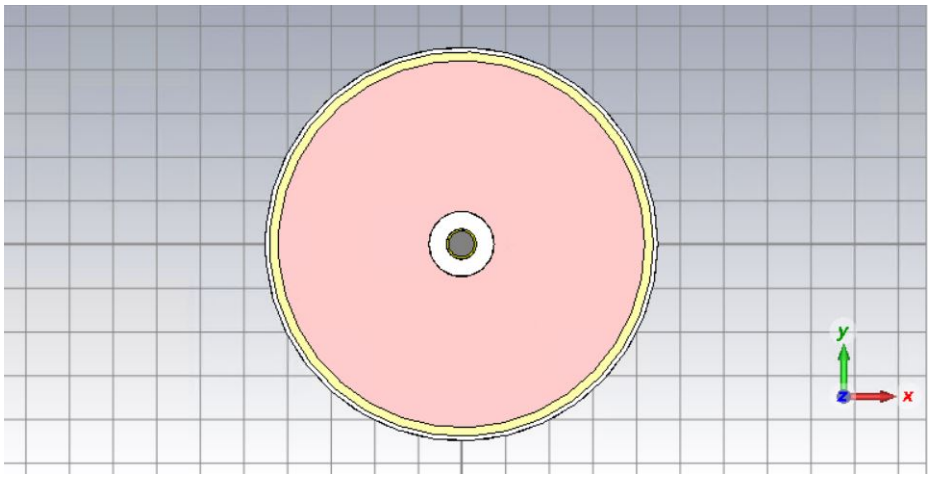


Figura 6.1. Sezione a z=0 del modello con strato di $Al_2O_3$

considerazione per eseguire simulazioni e analisi più dettagliate con lo scopo di essere utilizzate per il modello con impianto conico.

## 6.2 Simulazioni e analisi dati impianto con $Al_2O_3$

### 6.2.1 Campo elettrico per spessore dell'ossido di 500 $\mu$m

In prima battuta è stato valutato il campo elettrico relativo impostando uno spessore dell'$Al_2O_3$ di 0.5 mm, facendo variare il valore di $Z_s$ da -j100 Ω a -j5 Ω. I risultati sono riportati in Fig. 6.2 e mostrano un andamento simile a quanto emerso nel capitolo precedente in Figg. 5.2 e 5.3, con un campo elettrico che in corrispondenza dei 90° e 270° subisce modifiche in base al valore dell'impedenza superficiale.

### 6.2.2 RCS per spessore dell'ossido di 500 $\mu$m

Successivamente è stato valutato l'RCS (Fig. 6.3), seguendo la formula 4.2, osservando anche qui andamenti simili a quelli ottenuti dalle simulazioni con il $TiO_2$.

Valutando il valore medio lungo la curva di raggio 50 mm interna allo strato muscolare, si ottiene un andamento decrescente come mostrato in Fig.

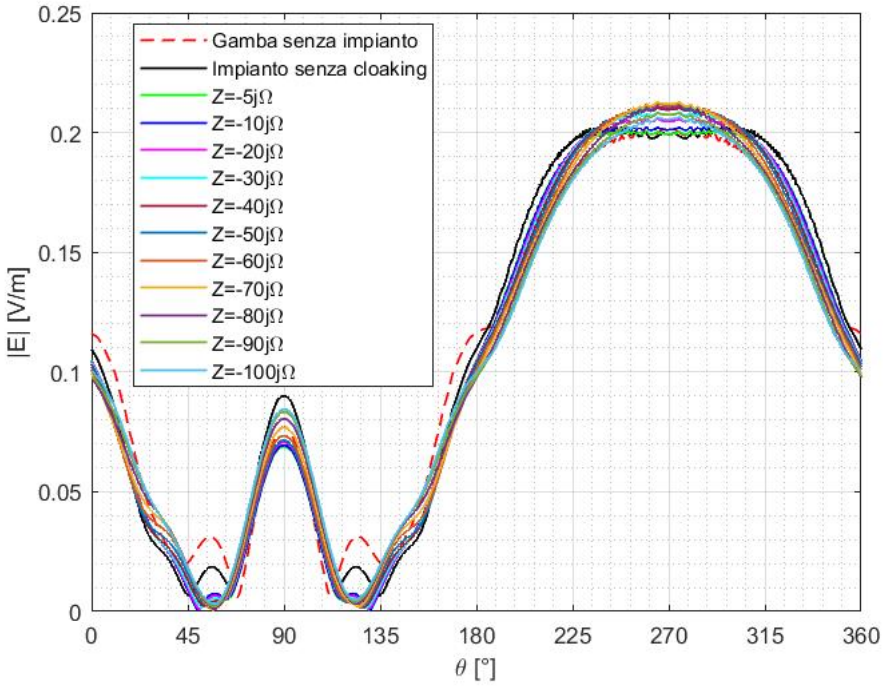


Figura 6.2. Valore assoluto campo elettrico a z=0 del modello con strato di $Al_2O_3$ di 500 $\mu$m

6.4, dove anche in questo caso si può ipotizzare un minimo per valori positivi di reattanza. Questi risultati confermano come, anche variando il materiale dielettrico che ricopre la parte metallica, il comportamento risulti analogo, seppur con valori diversi a causa delle proprietà differenti, in particolare a una costante dielettrica molto diversa.

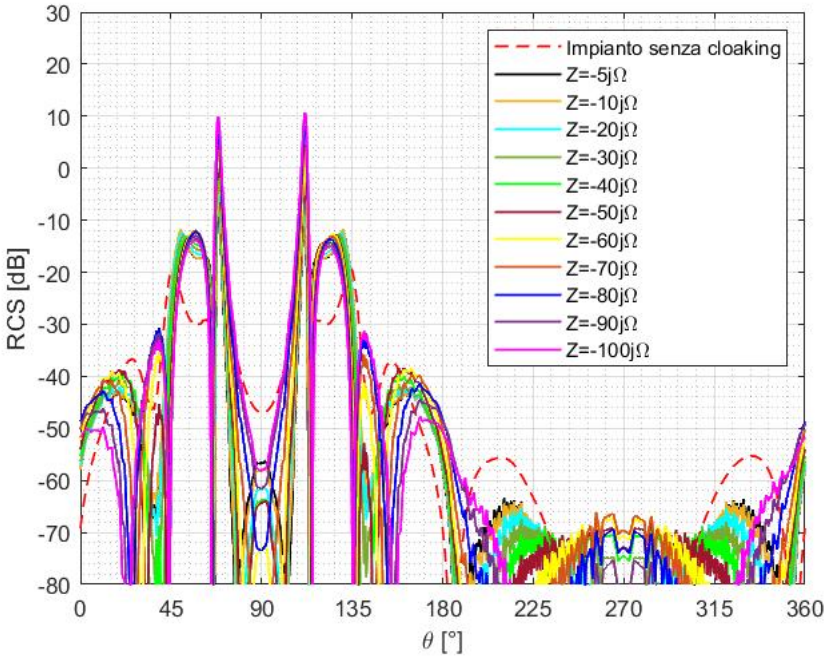


Figura 6.3. RCS lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 500 $\mu$m

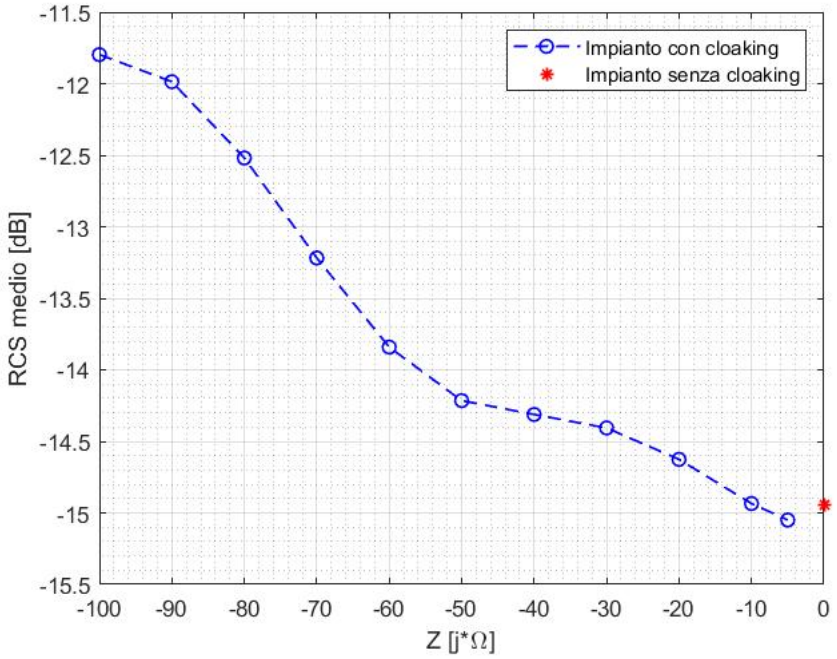


Figura 6.4. RCS medio lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 500 $\mu$m

### 6.2.3 Campo elettrico per spessore dell'ossido di 1 mm

Lo spessore dell'ossido è stato aumentato fino a raggiungere 1 mm di spessore: questo valore è stato considerato come quello definitivo, in quanto oltre alla sua più facile implementazione è anche non troppo sottile da causare un aumento significativo dei tempi di calcolo. Si consideri che i tempi di attesa per queste simulazioni sono stati di circa 9 ore per ciascun valore di $Z_s$[1]. E' stato valutato dunque il campo elettrico lungo la curva di raggio 50 mm, al variare dell'impedenza superficiale, in questo caso però partendo da valori negativi (-100 jΩ) fino ad arrivare a valori positivi (150 jΩ) come mostrato in Figg. 6.5 e 6.6. Con questa configurazione è stato scelto di suddividere i due grafici in base a $Z_s$ positiva o negativa per renderli più leggibili e valutare eventuali differenze.

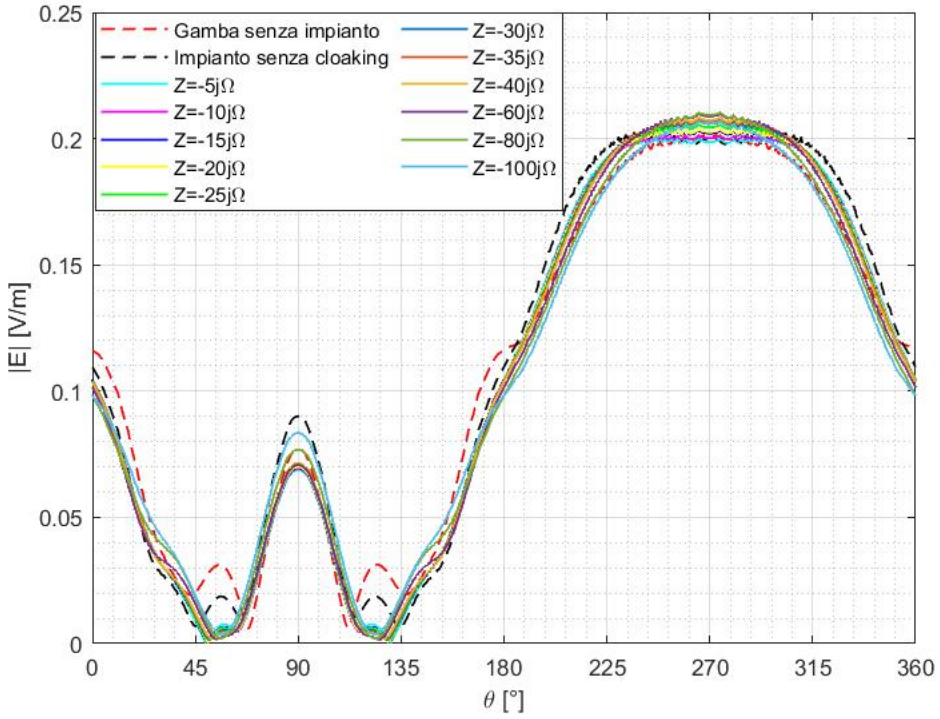


Figura 6.5. Valore assoluto campo elettrico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali negative

[1]Utilizzando un calcolatore come quello descritto nel paragrafo 3.1

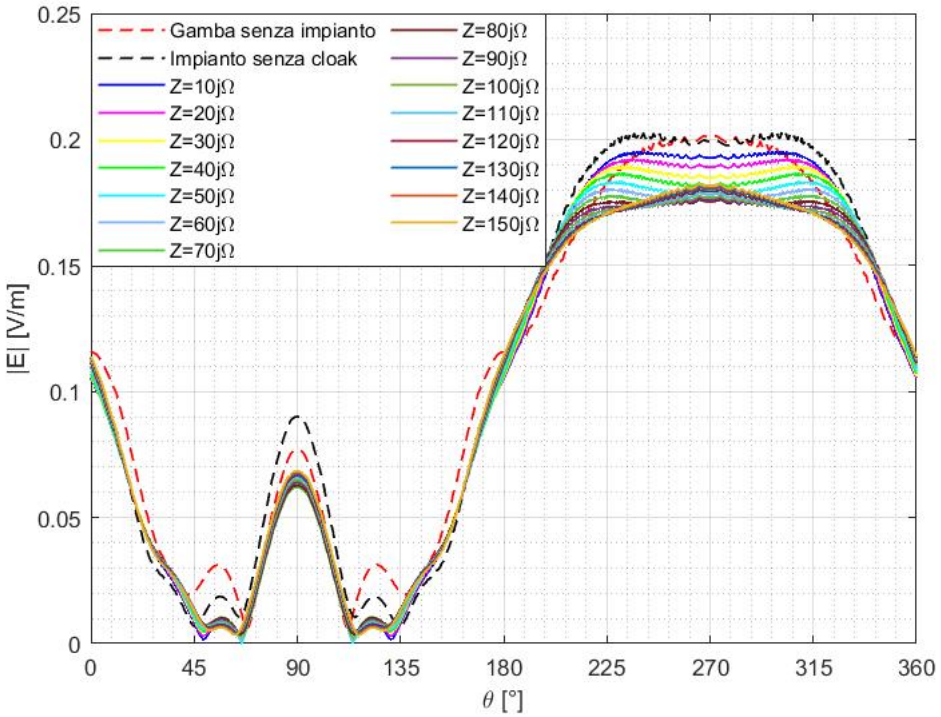


Figura 6.6. Valore assoluto campo elettrico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali positive

Infatti osservando il grafico in Fig. 6.6 si può notare come al crescere dell'impedenza si ha una variazione significativa del campo in corrispondenza di $\theta \in [225°,315°]$, a differenza di quanto accade per impedenze negative (Fig. 6.5) dove non è così marcata.

### 6.2.4 RCS per spessore dell'ossido di 1 mm

Successivamente è stato valutato l'RCS, secondo la formula 4.2, suddividendo anche in questo caso i grafici per $Z_s$ positive e negative, come riportato in Figg. 6.7 e 6.8. Tra i due è possibile osservare come i due massimi presenti in corrispondenza di $\theta$ pari a 68° e 112°, ovvero nel lato nascosto alla sorgente, si discostino di circa 10 dB, segno che per impedenze superficiali positive si ha una riduzione maggiore del campo riflesso, come ci si aspettava dalle analisi delle configurazioni precedenti.

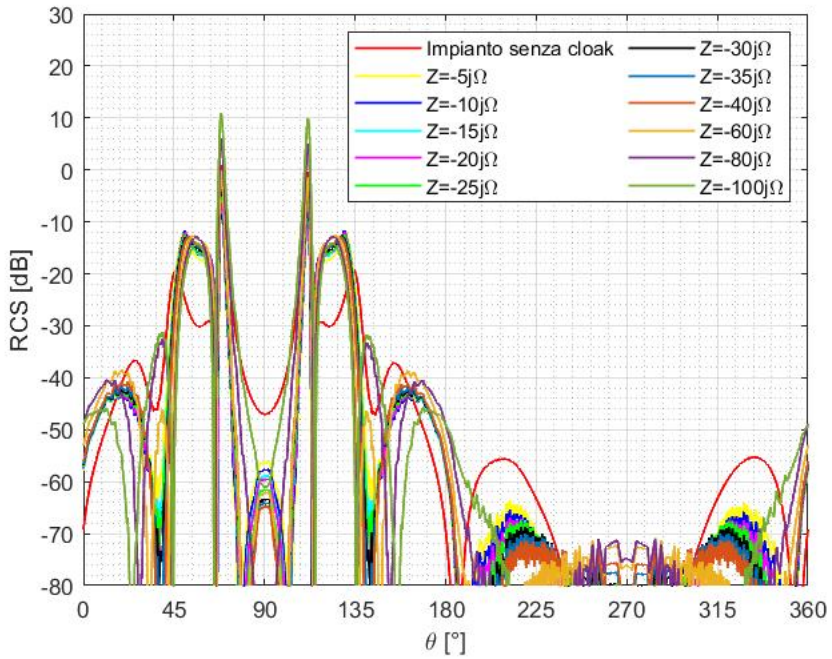


Figura 6.7. RCS lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali negative

Per valutare quale $Z_s$ massimizzi il cloaking dell'impianto è stato valutato il valor medio lungo la curva di raggio 50 mm, ottenendo l'andamento in Fig. 6.9. Il trend decrescente oltre a confermare quanto visto in precedenza per spessori di ossido differenti, mostra un minimo in corrispondenza di 80 jΩ, a comprovare che per valori positivi l'effetto di cloaking è più significativo come previsto. Dunque se si ipotizzasse di avere un impianto cilindrico di raggio 6 mm, con uno strato di ossido di spessore 1 mm e un impedenza superficiale pari a 80 jΩ, si andrebbe a minimizzare il campo totale, e dunque il campo riflesso. Siccome però l'obiettivo è quello di effettuare il cloaking su di un

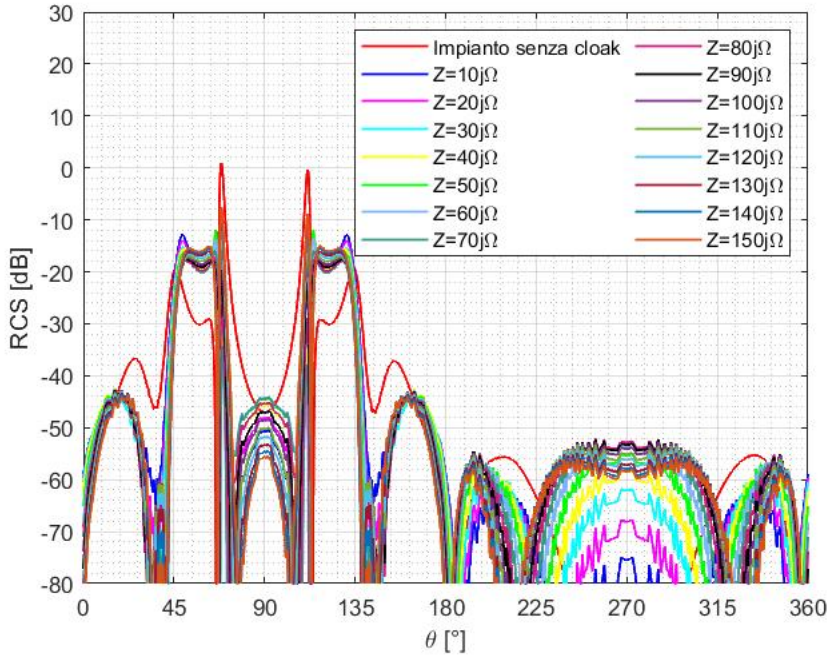


Figura 6.8. RCS lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm per impedenze superficiali positive

impianto conico, nei paragrafi successivi verrà fatto variare il raggio della parte metallica, per trovare l'impedenza che rende minimo l'RCS per ogni valore.

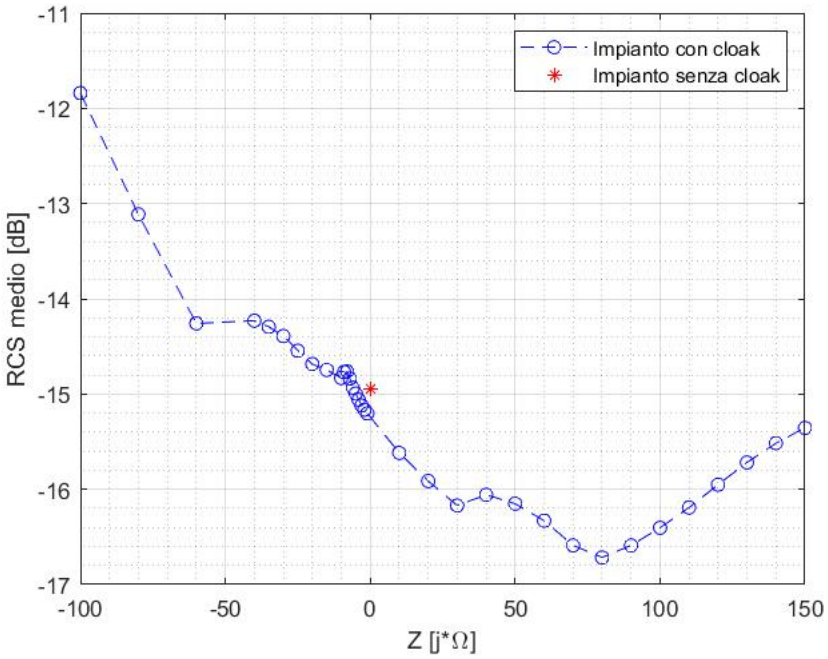


Figura 6.9. RCS medio lungo la curva di raggio 50 mm del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

### 6.2.5 RCS per spessore dell'ossido di 1 mm per $\theta \in$ [0°,180°) e [180°,360°)

Utilizzando i dati precedentemente raccolti, se si suppone di conoscere la direzione di incidenza della sorgente, come nel caso simulato con l'onda piana (Fig. 3.4), si potrebbero assegnare valori diversi di impedenza superficiale in base alla posizione, ottenendo un risultato migliore. Analizzando e suddividendo i campioni di campo elettrico per $\theta$ appartenente a [0°,180°) (lato nascosto) e [180°,360°) (lato frontale), e valutando il valore medio dell'RCS sempre lungo la curva di raggio 50 mm, si ottengono i risultati di Figg. 6.10 e 6.11. Il valore trovato in precedenza di 80 jΩ viene confermato nel caso della faccia nascosta alla sorgente, mentre per quella esposta il valore ottimale lo si trova per -15 jΩ.

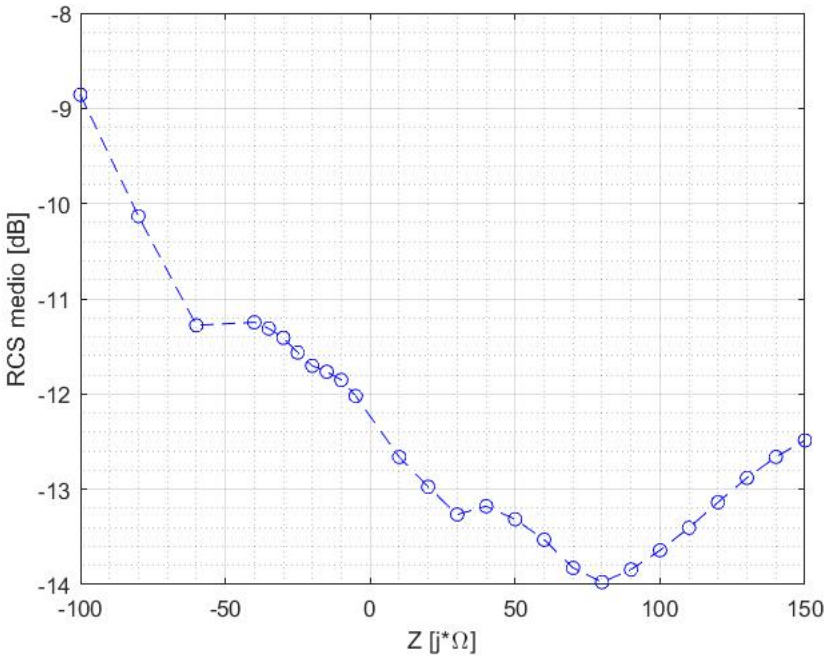


Figura 6.10. RCS medio per $\theta \in$ [0°,180°) del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

Questa analisi può essere sfruttata in studi futuri per implementare una struttura non uniforme, in particolare se si è a conoscenza della posizione della sorgente, conseguendo un effetto di cloaking più preciso. Volendo però fare riferimento a un caso più generico, è stato deciso di modellare una struttura uniforme, siccome nella maggior parte dei casi descritti nel paragrafo

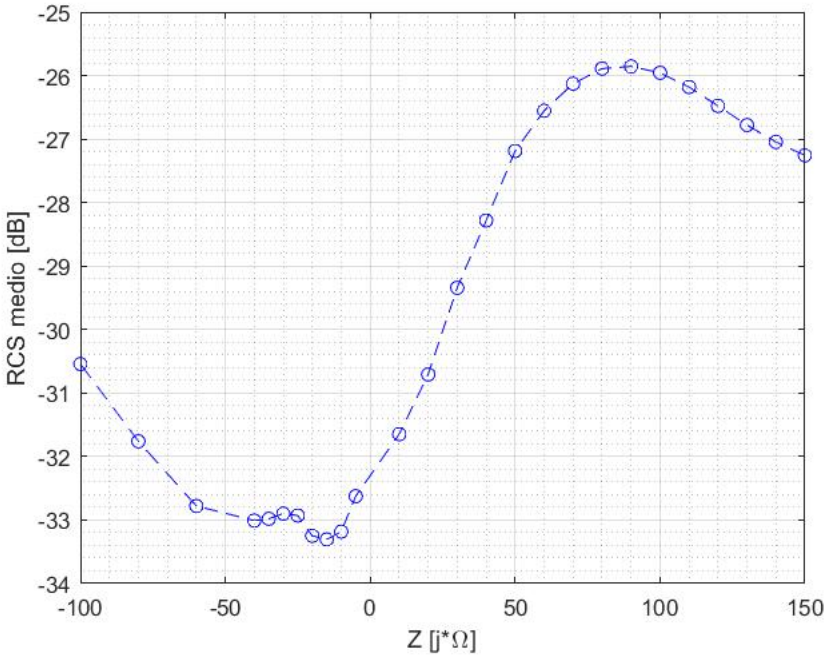


Figura 6.11. RCS medio per $\theta \in [180°,360°)$ del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

1.2 non si conosce la provenienza dell'onda incidente.

## 6.3 Modello gamba con impianto di raggio variabile con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

Dopo aver constatato che l'inserimento dello strato di ossido insieme ad una determinata impedenza superficiale ha un azione di riduzione del campo significativa, è stato fatto variare il raggio della parte metallica, in un intervallo tra 3 mm e 11 mm, con passo di 2 mm. Questi valori sono legati alle dimensioni tipiche di un impianto conico, che presenta raggio superiore di circa 12 mm e inferiore di circa 4 mm con una lunghezza di circa 10 cm: in questo caso il raggio è stato diminuito di 1 mm in modo da poter ospitare lo strato di $Al_2O_3$ spesso 1 mm. Come per le analisi precedenti è stato estrapolato il campo elettrico lungo una curva di raggio 50 mm posta sul piano z=0, al variare del raggio metallico e allo stesso tempo assegnando diversi valori di $Z_s$. I grafici relativi al valore assoluto del campo elettrico per ogni configurazione e dell'RCS non sono riportati in quanto mostrano degli andamenti analoghi con quanto mostrato in Figg. 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8 e risulterebbero di difficile comprensione a causa dell'elevato numero di curve rappresentate. Un risultato che invece è di interesse è il valore medio dell'RCS in funzione dell'impedenza superficiale (utilizzando la formula 4.2): nella Fig. 6.12 sono rappresentati sovrapposti per ogni valore di raggio della parte metallica.

Come è possibile osservare non è stato eseguito lo stesso numero di simulazioni per ogni raggio, in quanto richiedono circa 9 ore ciascuna [2]. Da questi punti è stata eseguita un'interpolazione per ogni configurazione dell'impianto (Fig. 6.13), utilizzando il software Matlab (V R2021a) tramite la funzione "spline": è da considerare che i valori estremi di ogni curva non sono significativi, in quanto non garantiscono una accurata approssimazione. Da questa analisi è stato possibile individuare il valore minimo dell'RCS medio e l'impedenza superficiale corrispondente utili per comprendere l'andamento della struttura per poi passare a un impianto conico (Tab. 6.3).

Si osserva che il trend per quanto riguarda $Z_s$ è decrescente al crescere delle dimensioni dell'impianto, mentre i valori dell'RCS medio oscillano. Per verificare l'efficacia dei valori ottenuti è stato riportato il valore assoluto del campo elettrico in Fig. 6.14, per i diversi valori di raggio e impedenza superficiale ottimale corrispondente: si può notare come nell'intervallo di $\theta$ che va da 0° a 180° le curve si sovrappongono a quella relativa al modello senza impianto, diversamente dal modello con impianto metallico (Fig. 4.5).

[2] Utilizzando un calcolatore come quello descritto nel paragrafo 3.1

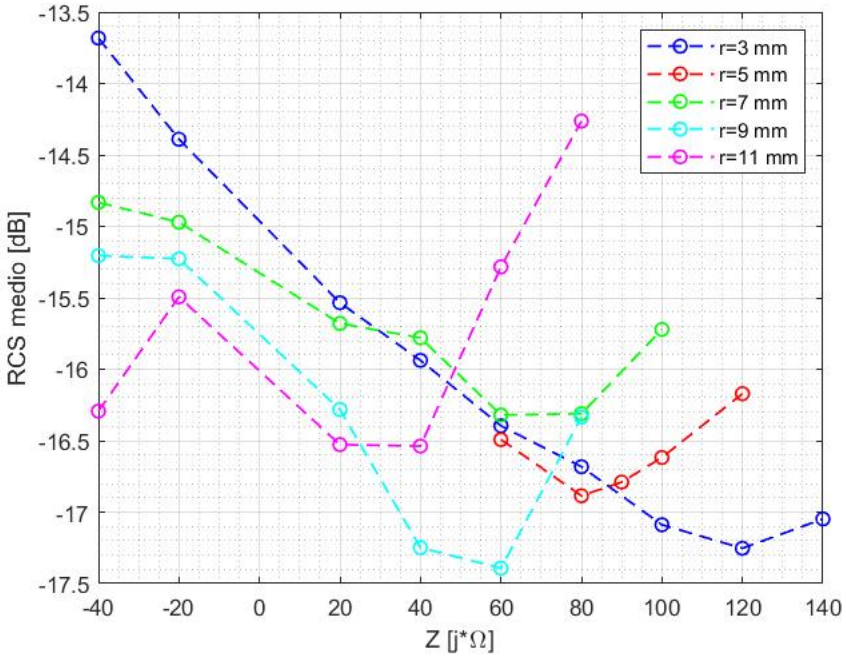


Figura 6.12. RCS medio al variare dell'impedenza superficiale e del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

Tabella 6.1. Valori di impedenza superficiale che minimizzano l'RCS medio al variare del raggio dell'impianto metallico

| Raggio metallo [mm] | $Z_s$ [jΩ] | RCS medio [dB] |
|---|---|---|
| 3 | 119 | -17.25 |
| 5 | 78 | -16.88 |
| 7 | 69 | -16.42 |
| 9 | 52 | -17.49 |
| 11 | 31 | -16.71 |

Per quanto riguarda invece la faccia esposta all'onda incidente i valori nei dintorni di 270° sono diversi, ma non significativi siccome nel calcolo dell'RCS (4.3) la differenza è rapportata a un valore di campo elevato.

Per avere una relazione dalla quale estrapolare l'impedenza superficiale per qualsiasi raggio, è stato eseguito una regressione con una curva polinomiale quadratica "Poly2" in Matlab, ottenendo il grafico in Fig. 6.16 descritto dalla

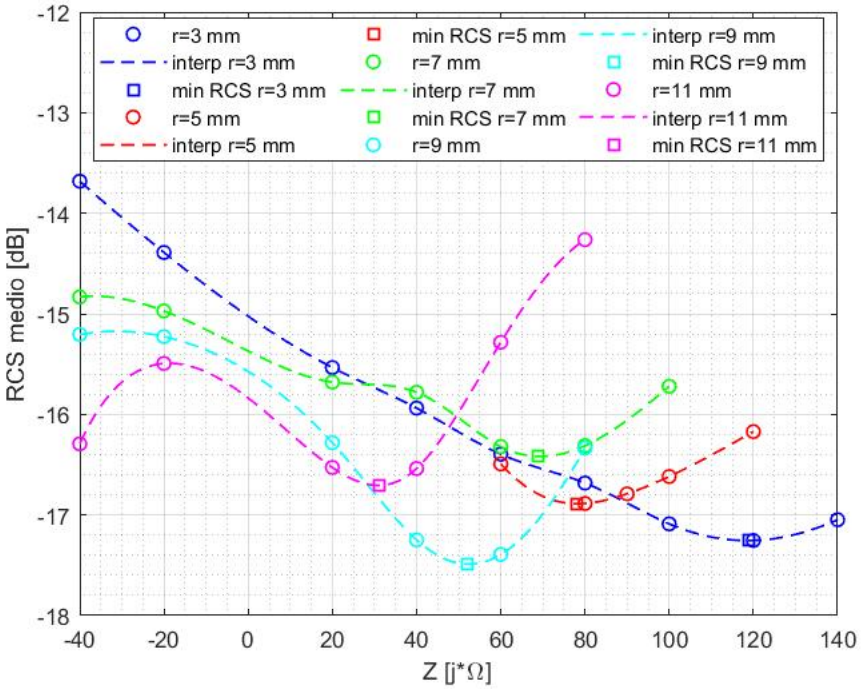


Figura 6.13. Interpolazione dell'RCS medio al variare dell'impedenza superficiale e del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

funzione 6.1.

$$Z_s = 0.5714 \cdot r_{metallo}^2 - 18.1000 \cdot r_{metallo} + 163.9286 \tag{6.1}$$

Per comprendere invece la variazione non regolare che si ha per l'RCS medio come riportato in Tab. 6.3, esso è stato calcolato nuovamente in corrispondenza dell'impedenza superficiale che massimizza il cloaking per ogni valore di raggio (Fig. 6.15), utilizzando in questo caso la formula 4.3, per avere un risultato più accurato, come quello in Fig. 6.17.

Rapportando ciascun risultato all'RCS medio per quello realtivo alla gamba senza nessun impianto (Fig. 3.2) calcolato tramite la relazione 6.2, e valutando la variazione percentuale rispetto ad esso (formula 6.3), si ha in trend decrescente al crescere delle dimensioni dell'impianto, con un'eccezione nell'intorno del valore di 7 mm, come riportato in Fig. 6.18.

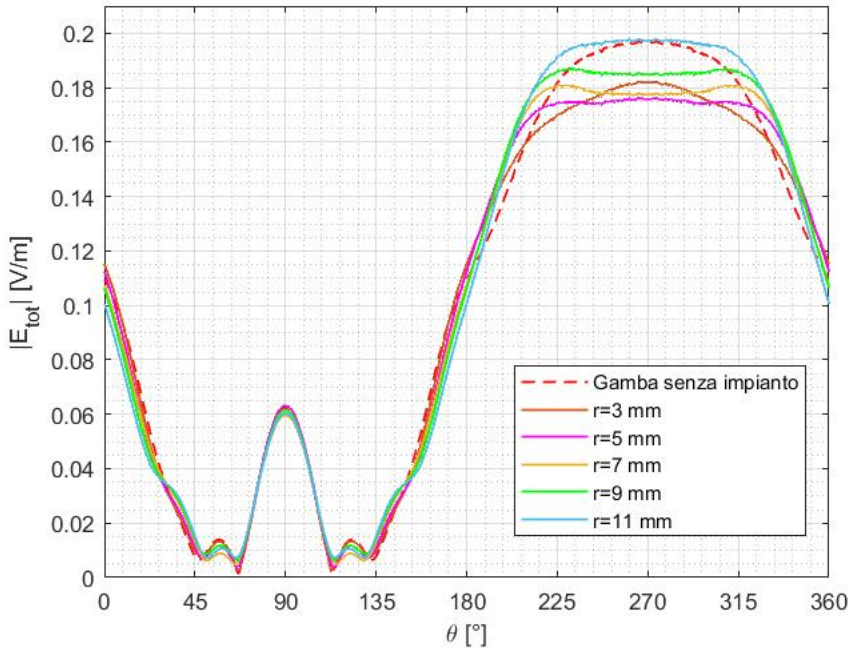


Figura 6.14. Valore assoluto del campo elettrico del modello con impianto con cloaking per diversi valori di raggio con impedenza superficiale ottimale valutato lungo la curva di raggio 50 mm

$$RCS_{gamba\ dB} = 10\log_{10}\left[2\pi r\left(\frac{|E_{gamba}-E_{onda\ piana}|^2}{|E_{onda\ piana}|^2}\right)\right] \tag{6.2}$$

$$Variazione_{RCSmedio} = \left(\frac{|RCSmedio_{cloak}-RCSmedio_{gamba}|}{RCSmedio_{gamba}}\right)\cdot 100 \tag{6.3}$$

Questo comportamento potrebbe essere causato da una risonanza interna in corrispondenza del materiale osseo; infatti se si prende in considerazione la sua costante dielettrica relativa, pari a 12.45, ponendo come riferimento il valore di raggio della parte metallica pari a 7 mm, si ottiene uno spessore dell'osso di 6.95 mm (6.4). La velocità di propagazione dell'onda all'interno di questo materiale risulta essere di $84.965{\cdot}10^6$ m/s (6.5) considerando la costante magnetica relativa pari all'unità. La frequenza di tutte le simulazioni è stata 2.45 GHz, dunque valutando la lunghezza d'onda si ha 0.03467 m, con una $\lambda/4$ pari a 8.67 mm (6.6). Questa distanza però è lo spessore

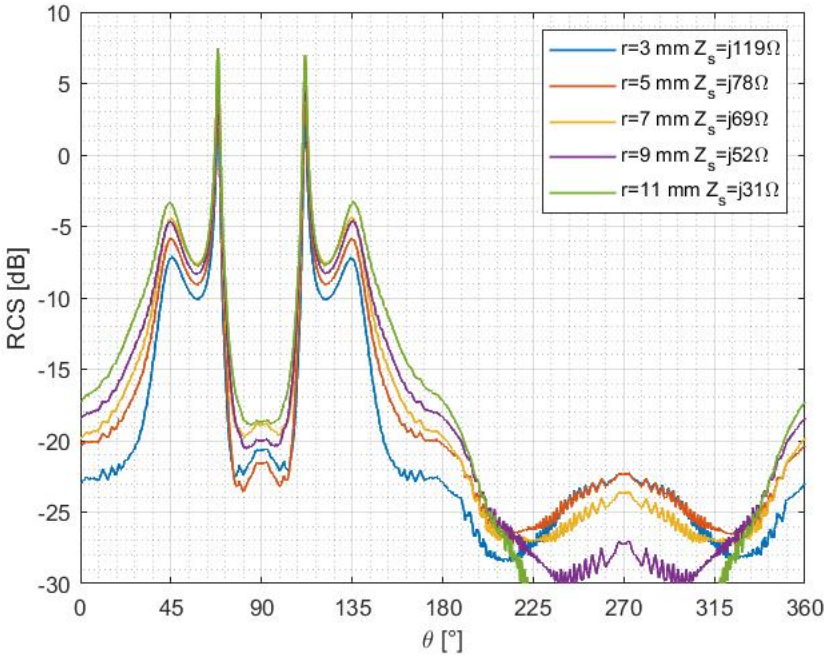


Figura 6.15. RCS del modello con impianto con cloaking per diversi valori di raggio con impedenza superficiale ottimale valutato lungo la curva di raggio 50 mm

dell'osso relativo all'eventuale risonanza; se si calcola però il raggio metallico corrispondente riferendosi al grafico valutato precedentemente, si ottiene un valore di 5.28 mm (6.7). Come si può notare non è esattamente del pari a 7 mm, ma se si considera che è stata trascurata la maggiore complessità della struttura, con strati esterni che alterano l'onda piana incidente prima di raggiungere la zona interna, e che le simulazioni sono state eseguite solo per alcuni valori e non quelli intermedi, il risultato è plausibile con un interferenza in corrispondenza di uno spessore pari a un quarto della lunghezza d'onda.

$$\begin{aligned} d_{osso} &= r_{osso} - d_{imped.sup.} - d_{Al_2O_3} - r_{metallo} \\ &= 15mm - 0.05mm - 1mm - 7mm = 6.95mm \end{aligned} \tag{6.4}$$

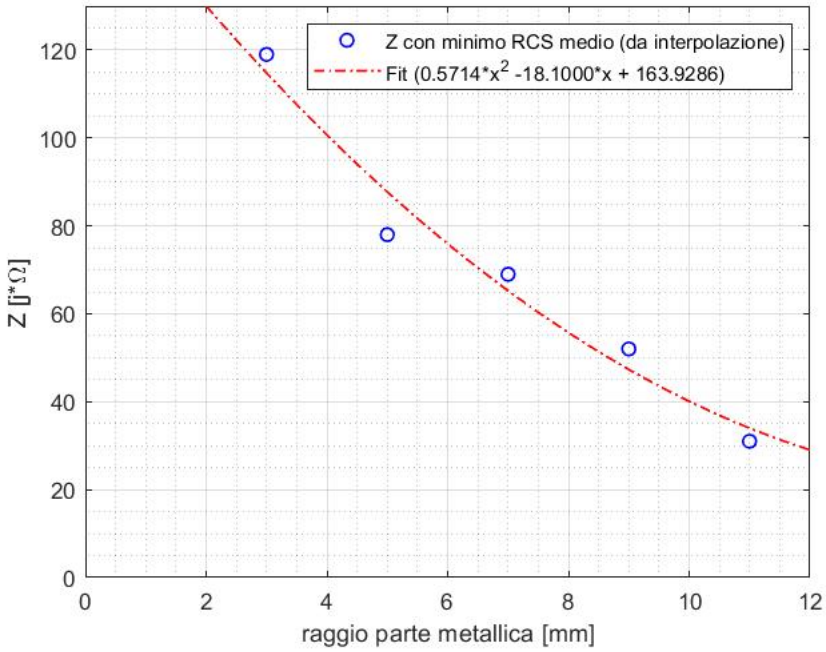


Figura 6.16. Regressione quadratica dell'impedenza che minimizza l'RCS al variare del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot \mu_r \mu_0}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{12.45 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} F/m \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m}} \\ &= 84.965 \cdot 10^6 m/s \end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned} \lambda/4 &= \frac{v}{4 \cdot f_0} \\ &= \frac{84.965 \cdot 10^6 m/s}{4 \cdot 2.45 GHz} \\ &= 0.00867m = 8.67mm \end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned} r_{metallo} &= r_{osso} - d_{imped_sup} - d_{Al_2O_3} - d_{osso} \\ &= 15mm - 0.05mm - 1mm - 8.67mm = 5.28mm \end{aligned} \tag{6.7}$$

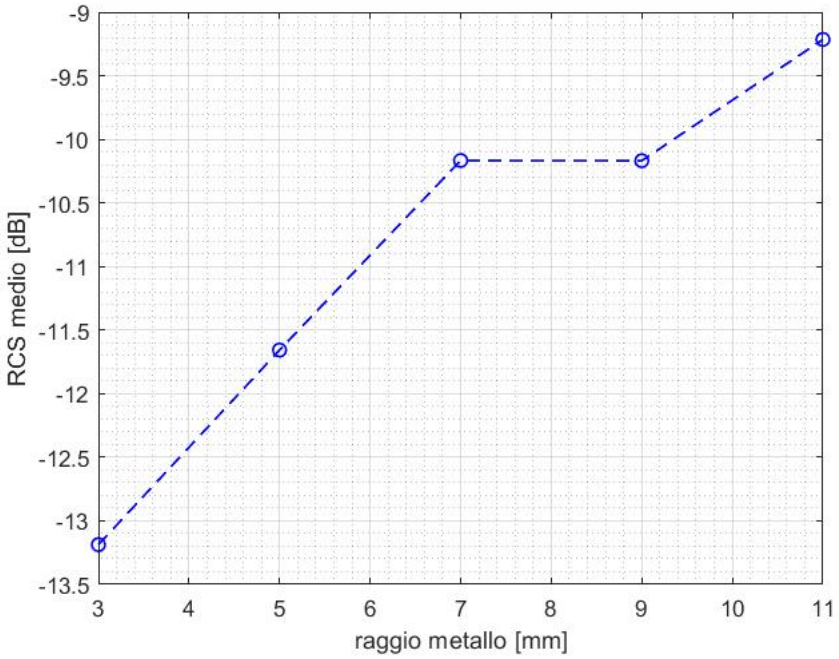


Figura 6.17. RCS medio con impedenza superficiale ottimale al variare del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

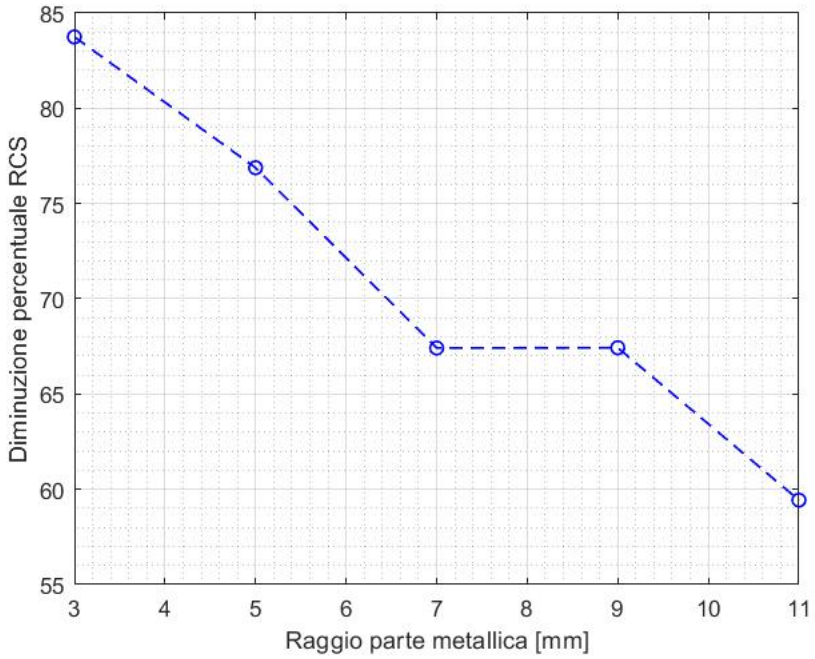


Figura 6.18. Variazione relativa dell'RCS rispetto al caso del modello senza impianto al variare del raggio metallico del modello con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

# Capitolo 7

# Simulazioni impianto conico con cloaking mediante $Al_2O_3$

## 7.1 Modello gamba con impianto conico con strato di $Al_2O_3$ di 1 mm

Grazie alle analisi svolte in precedenza con modelli a geometria variabile è stato possibile simulare un modello di impianto conico, con raggio della parte metallica che varia da 11 mm a 3 mm con lunghezza di 10 cm come in Fig. 7.1 e 7.2. Lo spessore degli strati di materiale organico, di $Al_2O_3$ e impedenza superficiale sono stati lasciati inalterati, in modo da poter confrontare i risultati con quelli ottenuti con il modello cilindrico.

Sono state definite 7 curve di raggio 50 mm parallele al paino (x,y) (Fig. 7.1), poste tra loro a una distanza di 12.5 mm. In questo modo è stato possibile estrapolare il valore di campo elettrico in corrispondenza dei raggi dell'impianto pari a 5 mm, 7 mm e 9 mm, e nei valori intermedi a essi, ovvero 4 mm, 6 mm, 8 mm, e 10 mm. Lo strato di impedenza superficiale è stato suddiviso lungo l'asse z in 9 sezioni (Fig. 7.3), assegnando a ognuna uno specifico valore. La discontinuità presente non è stato possibile eliminarla perchè in CST Studio non è permesso definire un valore di impedenza superficiale dipendente dalla posizione (come ottenuto in Fig. 6.16); è stato deciso dunque di discretizzarla, utilizzando i valori ottimali ottenuti dal grafico in Fig. 6.16 in prossimità dei raggi metallici corrispondenti. L'altezza di ogni

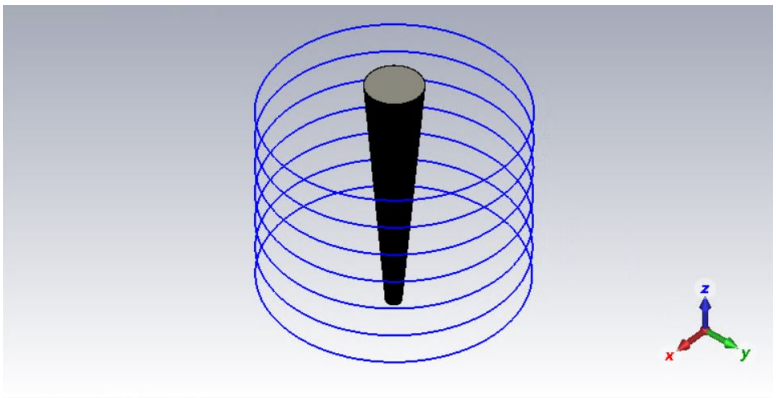


Figura 7.1. Impianto conico e curve di raggio 50 mm distanti 12.5 mm ciascuna

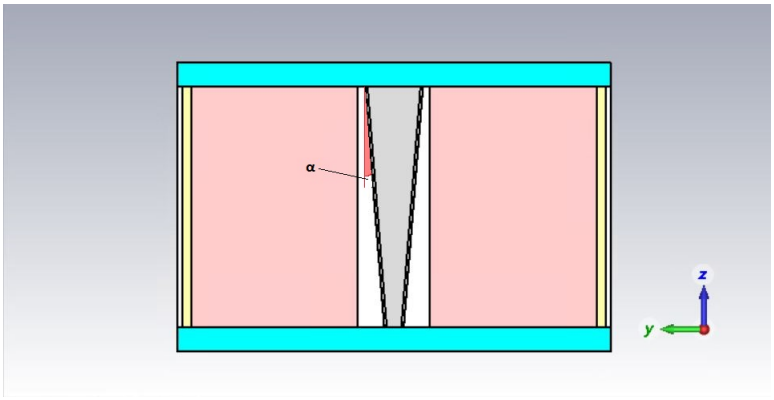


Figura 7.2. Sezione a x=0 del modello della gamba con impianto conico con cloaking

strato è di 12.5 mm per quelli centrali mentre per le estremità, 3 mm e 11 mm, lo strato si estende per soli 6.25 mm.

## 7.2 Campo elettrico impianto conico

E' stato valutato il campo elettrico per entrambe le configurazioni, ed è possibile notare come, a differenza del caso cilindrico, siano presenti in modo significativo anche le componenti lungo la direzione $\hat{x}$ e $\hat{y}$ (Figg. 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9).

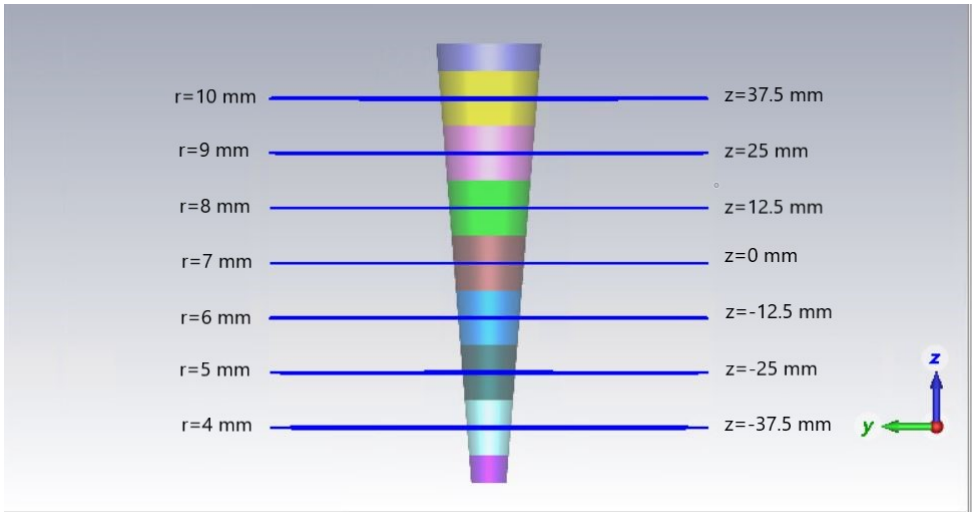


Figura 7.3. Impianto conico e curve di raggio 50 mm distanti 12.5 mm ciascuna

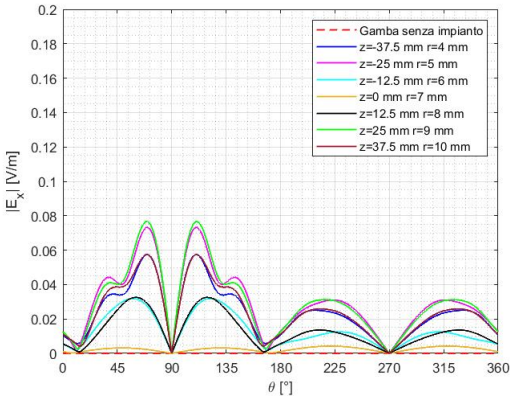


Figura 7.4. Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{x}$ del modello con impianto metallico conico, valutato lungo curva di raggio 50 mm

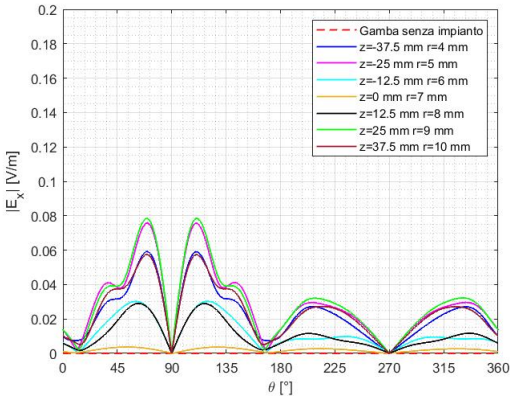


Figura 7.5. Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{x}$ del modello con impianto conico con cloaking, valutato lungo curva di raggio 50 mm

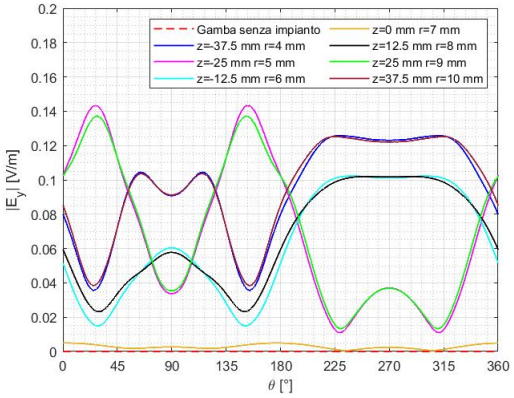


Figura 7.6. Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{y}$ del modello con impianto metallico conico, valutato lungo curva di raggio 50 mm

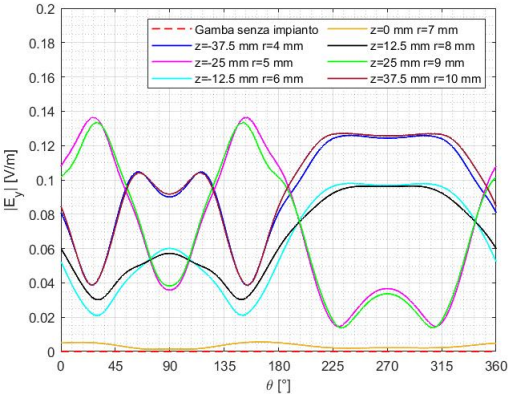


Figura 7.7. Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{y}$ del modello con impianto con conico cloaking, valutato lungo curva di raggio 50 mm

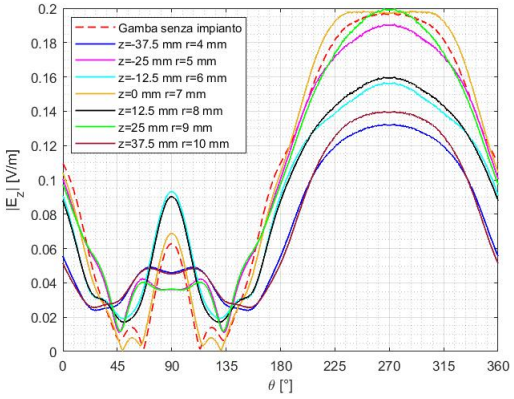


Figura 7.8. Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{z}$ del modello con impianto metallico conico, valutato lungo curva di raggio 50 mm

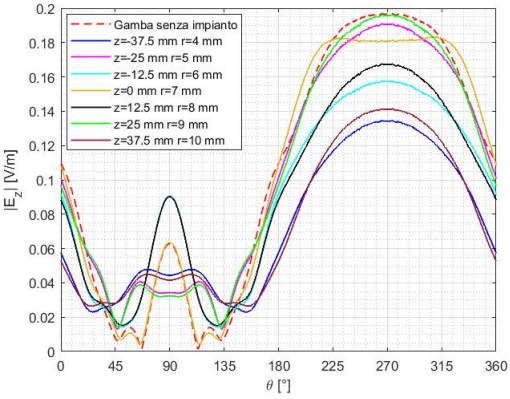


Figura 7.9. Valore assoluto campo elettrico direzione $\hat{z}$ del modello con impianto conico con cloaking, valutato lungo curva di raggio 50 mm

Prendendo in considerazione tutti i contributi e valutando il modulo del campo elettrico totale, mediante la formula 7.1, sono stati ricavati gli andamenti in Figg. 7.10 e 7.11: escludendo il valore di raggio metallico pari a 7 mm, per il quale il cloaking funziona adeguatamente, in tutti gli altri casi si ottiene un risultato ben diverso rispetto a quanto trovato nelle analisi del capitolo precedente.

$$|E_{tot}| = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2} \tag{7.1}$$

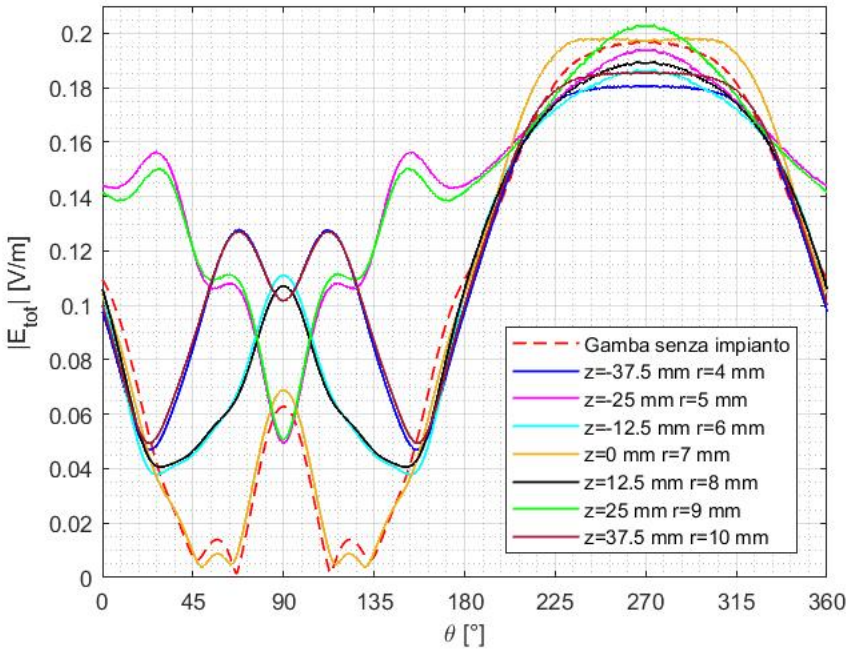


Figura 7.10. Valore assoluto campo totale del modello con impianto metallico conico valutato lungo le curve di raggio 50 mm

Dai grafici riportati viene evidenziato come per raggio metallico pari a 7 mm l'azione dello strato di ossido sommato a quello di impedenza superficiale sia efficace: il valore assoluto del campo totale ricalca in maniera corretta l'andamento di quello corrispondente alla gamba senza impianto, in particolar modo per $\theta \in (0°, 180°)$.

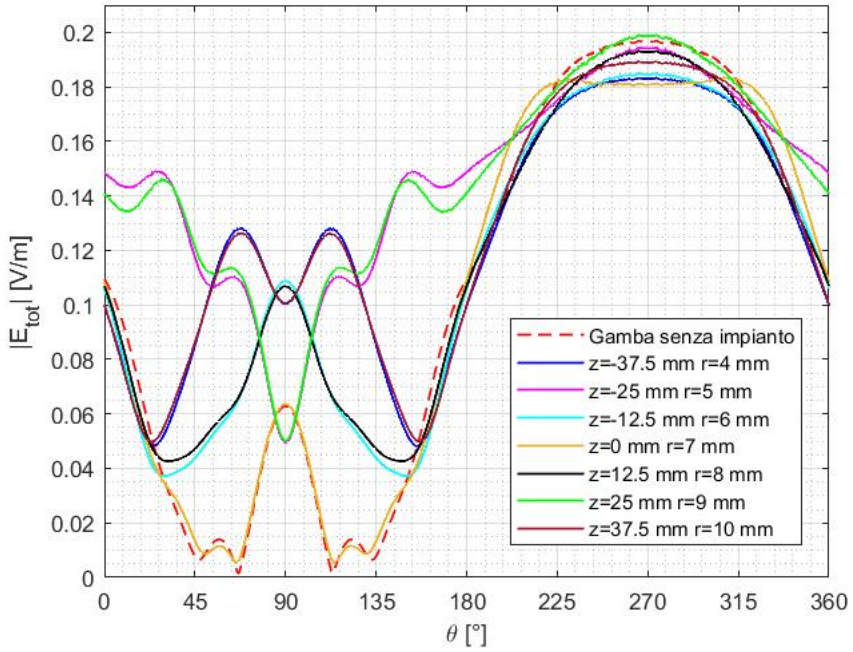


Figura 7.11. Valore assoluto campo totale del modello con impianto conico con cloaking valutato lungo le curve di raggio 50 mm

## 7.3 RCS impianto conico

E' stato valutato anche l'RCS, secondo la formula 4.3 prendendo come campo elettrico quello totale, sia per il modello con impianto senza cloaking, sia per quello con lo strato di $Al_2O_3$ e impedenza superficiale, ottenendo i risultati in Figg. 7.12 e 7.13.

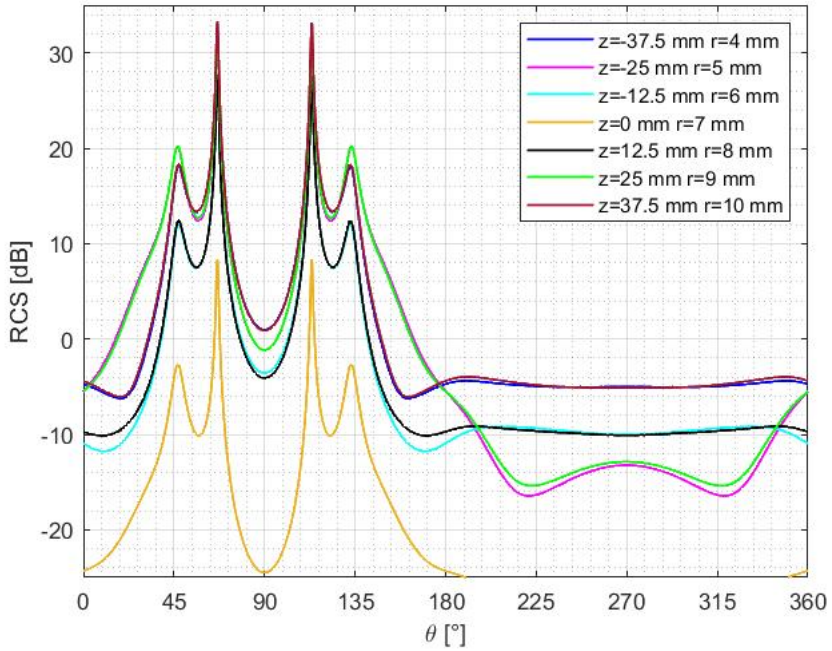


Figura 7.12. RCS impianto metallico conico valutato lungo le curve di raggio 50 mm

Si nota che i valori massimi sono situati nelle stesse posizioni delle analisi precedenti, ovvero per $\theta$ pari a 68° e 112°, ma come previsto il modulo è maggiore a causa della differenza significativa del campo totale rispetto al caso del modello senza impianto.

Solo nel caso di raggio pari a 7 mm i valori dell'RCS sono paragonabili a quanto trovato con la configurazione cilindrica (Fig. 6.15). Per quanto riguarda invece gli altri, l'andamento che si osserva è differente dal caso precedentemente analizzato. La spiegazione dal punto di vista numerico può essere eseguita osservando il campo in Fig. 7.10 e 7.11: il valore assoluto si discosta da quello del modello senza impianto nell'intervallo tra 45° e 135°, e se si considera il rapporto che viene effettuato tra il campo riflesso e quello

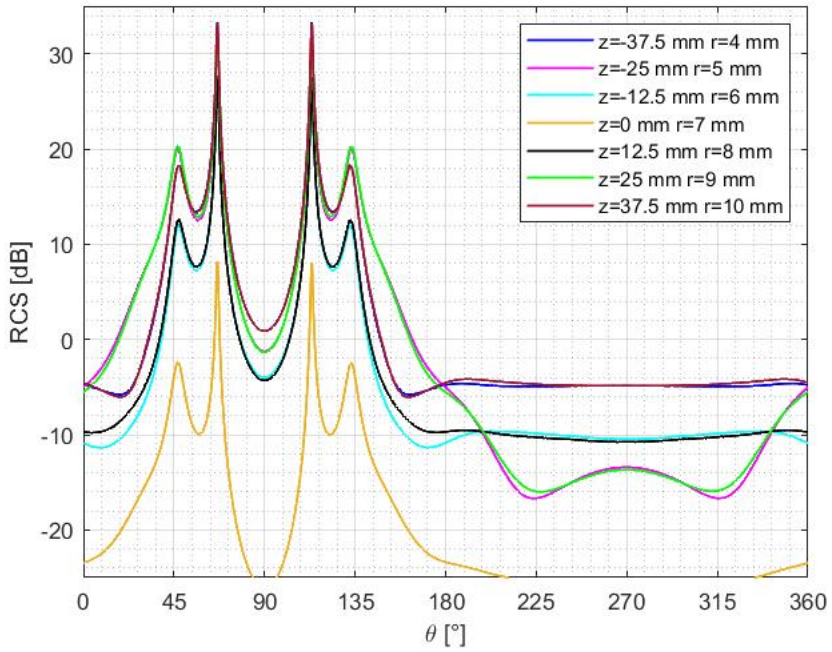


Figura 7.13. RCS impianto con cloaking valutato lungo le curve di raggio 50 mm

della sola gamba (formula 4.3), si ottiene un valore decisamente più elevato rispetto ai casi precedenti.

Osservando invece l'onda incidente, si ha che nel caso di modello cilindrico essa ha un incidenza TEM, cioè con direzione del campo elettrico e magnetico parallele al piano tangente al livello dell'osso; il campo dunque presenta una componente lungo $\hat{z}$, mentre lungo $\hat{x}$ e $\hat{y}$ il modulo è dell'ordine di $10^{-8}$, dunque trascurabile. Se invece si passa ad una struttura più complessa, come nel caso di quella conica, l'incidenza diventa TM, siccome il piano tangente all'impianto presenta un angolo $\alpha$=4.57° (Fig. 7.2). Si ottengono dunque componenti anche lungo la direzione $\hat{x}$ e $\hat{y}$, da tenere in considerazione nella valutazione dell'RCS. Questo fenomeno è causato dall'incidenza del'onda sull'impianto: se si considera infatti il circuito equivalente, semplificando la struttura come se fosse composta da più piani paralleli sovrapposti, si ottiene una serie di linee di trasmissione corrispondenti ai vari tipi di materiali, come mostrato in Fig. 7.14, terminata da un corto circuito che fa riferimento alla parte metallica.

La linea corrispondente alla sezione di materiale osseo varia la sua impedenza caratteristica $Z_{\infty\, Osso}$ in base alla posizione lungo l'asse z, cioè in base

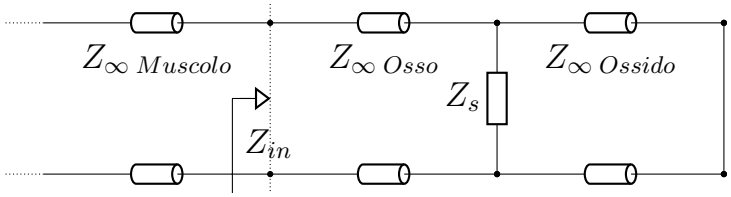


Figura 7.14. Circuito equivalente.

al raggio metallico. L'unico caso particolare si ha nell'intorno di 7 mm, dove è stato valutata nel capitolo precedente una risonanza, con una lunghezza della linea pari a $\lambda/4$. Dunque l'incidenza di modo TM non risulta essere equivalente a quella TEM: uno studio futuro che può essere condotto è quello relativo a un onda incidente obliqua, per valutare in modo esatto come varia il campo riflesso.

Altro fenomeno da tenere in considerazione è la corrente superficiale: essa infatti, estrapolandola dalla simulazione con impianto conico con cloaking, presenta dei loop di corrente intorno alla parte metallica, creando dunque un dipolo magnetico che irradia e crea interferenza nel resto del modello. Il senso di rotazione di tale corrente però non è fisso, ma varia in base allo spessore della parte metallica: in Figg. 7.15 e 7.16 sono stati riportati due esempi, in corrispondenza di z=-37.5 mm e z=12.5 mm. Questo dunque può essere motivo di studio per un analisi più approfondita, mirata a comprendere come questo fenomeno influenzi il campo totale.

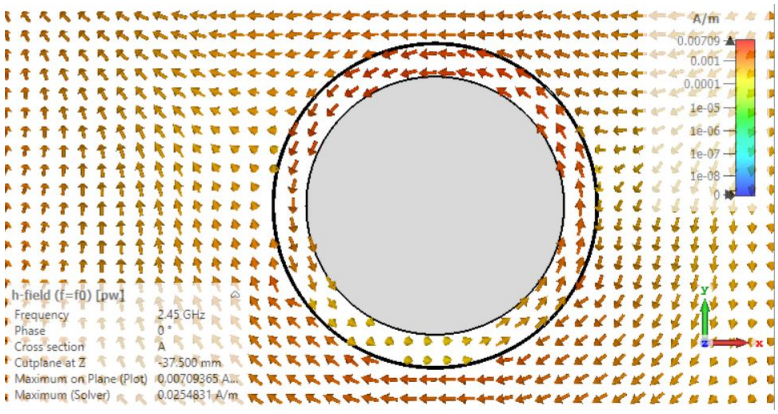


Figura 7.15. Corrente superficiale in corrispondenza di z=-37.5 (r=4 mm)

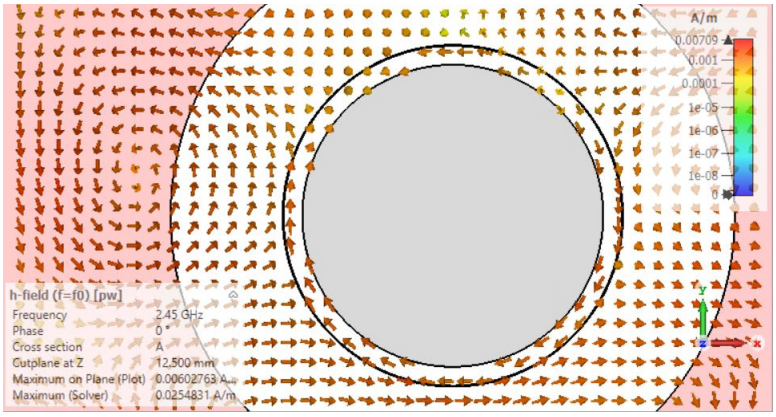


Figura 7.16. Corrente superficiale in corrispondenza di z=12.5 (r=9 mm)

# Capitolo 8

# Conclusioni

Le simulazioni svolte hanno mostrato come per un modello di gamba con impianto osseo metallico, semplificando la struttura a un insieme di strati di materiale organico differente, sia possibile ridurre l'RCS applicando la tecnica del Mantle Cloaking. Utilizzando un impianto di forma cilindrica è stato possibile ricavare la dipendenza del campo totale rispetto al raggio, e trovare il valore di impedenza superficiale ottimale che minimizza il contributo dell'RCS medio, valutato lungo una curva di raggio 50 mm. E' stata dunque estrapolata una funzione per definire la relazione tra raggio metallico e $Z_s$, in modo da poterla utilizzare nel caso più realistico, ovvero quello con impianto di forma conica. Passando quindi a questa nuova configurazione, e definendo l'impedenza superficiale in modo discretizzato a causa delle limitazioni del software, è stato valutato come l'incidenza TEM non abbia lo stesso comportamento di quella TM, causando interferenze e valori di campo significativamente diversi da quanto simulato nel caso ideale. I risultati trovati quindi aprono la strada a nuovi studi, con configurazioni diverse di onda incidente e analisi delle correnti superficiali e del loro effetto.

# Bibliografia


[1] P. Alitalo, S. Tretyakov, "Electromagnetic cloaking with metamaterials", materialstoday, Vol.12, Issue 3, pp. 22-29 (2009).

[2] R. W. Wood, "The invisibility of transparent objects", Phys. Rev. 15(2), 123-124 (1902).

[3] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of $\eta$ and $\mu$", Sov. Phys. Usp. 10(4), 509-514 (1968).

[4] S. A. Schelkunoff, "The impedance concept and its application to problems of reflection, refraction, shielding, and power absorption", Bell Syst. Tech. J. 17, 17 (1938).

[5] A. J. Devaney and E.Wolf, "Radiating and nonradiating classical current distributions and the fields they generate", Phys. Rev. D 8, 1044 (1973).

[6] G. Gbur, "Invisibility physics: Past, present, and future, in Progress in Optics", Vol. 58, edited by E. Wolf (Elsevier, Amsterdam, 2013), Chap. 2, pp. 65–114.

[7] U. Leonhardt, "Optical conformal mapping", Science 312, 1777 (2006).

[8] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling electromagnetic fields", Science 312, 1780-1782 (2006).

[9] A. Alù and N. Engheta, "Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings", Phys. Rev. E 72(1), 016623 (2005).

[10] A. Alù, "Mantle cloak: invisibility induced by a surface", Phys. Rev. B 80, 245115 (2009).

[11] P.-Y. Chen and A. Alù, "Mantle cloaking using thin patterned metasurfaces", Phys. Rev. B 84, 205110 (2011).

[12] G. Mie, "Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen", Annalen der Physik, vol. 330, p. 377, (1908).

[13] M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light", 7th expanded ed. (Cambridge University, 2001), Chap. 11.

[14] B. Cappello, L. Matekovits, "Harmonic analysis and reduction of the scattered field from electrically large cloaked metallic cylinders", Applied Optics, Vol. 59, No. 12, pp. 3742-3750 (2020).

[15] R. S. Schofield, J. C. Soric, D. Rainwater, A. Kerkhoff and A. Alù, "Scattering suppression and wideband tunability of a flexible mantle cloak for finite-length conducting rods", New Journal of Physics 16 (2014) 063063

[16] A. Monti, L. Tenuti, G. Oliveri, A. Alù, A. Massa, A. Toscano and F. Bilotti, "Design of multi-layer mantle cloaks",2014 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, 2014, pp. 214-216, doi: 10.1109/MetaMaterials.2014.6948651.

[17] Y. Katsuta, R. Akahane and K. Yahagi, "Electrical Properties of Rutile ($TiO_2$) Thin Film", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 10, No. 8 (1971)