

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"**



**FACOLTA' DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA**

**TESI DI LAUREA**

**IDENTIFICAZIONE DI ARMATURE NEL CALCESTRUZZO  
MEDIANTE TEST ELETTROMAGNETICO  
NON DISTRUTTIVO**

**Relatori  
Ch. mo Prof.  
MASSIMILIANO de MAGISTRIS  
Ch. mo Prof.  
GUGLIELMO RUBINACCI**

**Candidato  
MARIANGELA SPIEZIA  
Matr. 045/4468**

**Correlatore  
Dott. Ing.  
MAXIM MOROZOV**

**ANNO ACCADEMICO 2005-2006**

*Ai miei genitori*

## INDICE

<b>Introduzione</b> .....	4
<b>Capitolo 1</b> <b>IL METODO DELLE CORRENTI INDOTTE</b> .....	8
<i>1.1 Testing non distruttivo: generalità</i> .....	8
<i>1.1.1 Le tecniche di indagine non distruttiva e la scelta del metodo</i> .....	10
<i>1.2 Le correnti indotte</i> .....	14
<i>1.2.1 Concetti elettrici base delle correnti indotte</i> .....	17
<i>1.2.2 Effetti magnetici ed elettrici del materiale</i> .....	22
<i>1.2.3 Profondità di penetrazione delle correnti indotte</i> .....	23
<i>1.3 Le sonde utilizzate nel testing con correnti indotte</i> .....	25
<i>1.4 Limiti del metodo</i> .....	27
<i>1.5 Applicazioni e sviluppi</i> .....	28
<b>Capitolo 2</b> <b>ANALISI DELLE STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO</b> .....	30
<i>2.1 La sicurezza delle armature metalliche</i> .....	30
<i>2.2 Tecniche non distruttive per la diagnosi dello stato delle armature</i> .....	31
<i>2.2.1 Analisi indiretta del danno nella struttura metallica</i> .....	32
<i>2.2.2 Analisi del processo di corrosione</i> .....	34
<i>2.2.3 Diagnosi del punto di cedimento dell'acciaio</i> .....	36
<i>2.2.4 Analisi diretta delle aree in cui la struttura metallica appare deteriorata</i> .....	37

2.3 Rilevazione dei ferri d'armatura nel cemento armato .....	40
2.4 Il metodo proposto: impiego di sonde a impedenza .....	43
<b>Capitolo3</b>	
<b>DESCRIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CODICE DI CALCOLO AGLI ELEMENTI FINITI.....</b>	<b>49</b>
3.1 Generalità .....	49
3.2 Il modello numerico .....	50
3.2.1 Il problema non lineare .....	50
3.2.2 Formulazione del problema lineare.....	50
3.3 Soluzione del problema lineare delle correnti indotte con il metodo degli elementi finiti .....	54
3.4 Il problema inverso.....	56
<b>Capitolo 4</b>	
<b>RISULTATI SPERIMENTALI E VALIDAZIONE DEL MODELLO NUMERICO .....</b>	<b>61</b>
4.1 Introduzione .....	61
4.2 Apparato sperimentale.....	62
4.2.1 Analizzatore d'impedenza HP-4192A LF .....	62
4.2.2 Bobina d'induzione .....	63
4.3 Barre di ferro: calcolo di $\sigma$ e $\mu$ .....	65
4.3.1 Misura della conducibilità elettrica $\sigma$ .....	65
4.3.2 Determinazione della permeabilità magnetica $\mu_r$ .....	68
4.4 Risultati delle simulazioni .....	71

<i>4.5 Conclusioni</i> .....	76
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	78

## Introduzione

Le tecniche di controllo non distruttivo (NDT: non-destructive testing) trovano larga applicazione su prodotti e strutture di qualsiasi forma e dimensione. Lo scopo è quello di controllarne l'integrità e/o valutarne forma e dimensioni nel modo meno invasivo possibile, senza alterare o modificare le proprietà dell'oggetto sottoposto a test.



**Figura 1** Esempi di campi di applicazione delle prove non distruttive

Proprio per questa caratteristica vengono sovente utilizzate per monitorare l'integrità di particolari di sicurezza, di strutture portanti e di parti di impianti in esercizio.

I controlli non distruttivi trovano applicazione, non solo come controllo del prodotto finito, ma anche come supporto alla produzione, come test preliminari pre-lavorazione o come controlli in linea a valle di un processo che presenta rischi di integrità per i materiali.

Questi test sono diventati importanti strumenti per garantire la sicurezza e l'affidabilità dei prodotti contribuendo in modo determinante alla riduzione delle non conformità di prodotto e in definitiva ad una riduzione delle rotture in esercizio.

I campi di impiego dei metodi NDT sono molteplici, per cui si è sviluppata una vasta gamma di sistemi di indagine adatti a diversi scopi ed utilizzi, ognuno con i propri vantaggi e peculiarità.

Ogni metodo è fortemente caratterizzato dalle proprietà fisiche sfruttate che ne definiscono poi il campo di applicazione. Occorre quindi conoscere applicabilità e limiti dei vari metodi d'esame per poter stabilire fattibilità e metodo d'esecuzione dell'esame.

In particolare il testing non distruttivo di tipo elettromagnetico può essere inquadrato come il problema della ricostruzione della distribuzione delle equazioni costitutive elettromagnetiche di una regione dello spazio a partire da misure di campo, in presenza di una sollecitazione esterna del sistema.

Disporre di informazioni sulla distribuzione delle relazioni costitutive significa possedere informazioni, seppur indirette, sui materiali presenti, sulla geometria del sistema ed eventualmente sulla presenza e sulle caratteristiche dei difetti.

Nelle applicazioni in bassa frequenza (fino a centinaia di kHz) si utilizza in particolare l'effetto delle correnti indotte da un campo magnetico esterno (Eddy Current Testing, ECT); pertanto questo approccio è specializzato per mezzi conduttori e l'uso del modello semplificato quasi stazionario consente in generale buone accuratezze.

Il metodo delle correnti è tra quelli maggiormente utilizzati vista l'estrema facilità di automatizzazione, la possibilità di ottenere risultati immediati e l'utilizzo di una strumentazione che ben si adatta ad applicazioni sul campo.

Il principio di funzionamento del metodo consiste sostanzialmente nell'indurre, attraverso campi magnetici variabili, delle correnti nell'oggetto da testare. La presenza di un eventuale difetto, variando il percorso delle correnti indotte, provoca una modifica del campo da queste generato, che viene rilevata ai capi della stessa bobina inducente o di un'altra bobina atta allo scopo.

Il presente lavoro di tesi si propone di sviluppare un'evoluzione del metodo ECT, che permette di compiere ispezioni nel cemento armato basate sull'impiego di sonde a impedenza.

Il problema di verifica della sicurezza delle strutture in cemento armato, soprattutto a causa di numerosi crolli avvenuti senza cause apparenti, è sempre più sentito da progettisti e operatori del settore delle costruzioni e del restauro. Spesso, per le strutture esistenti non è reperibile il progetto esecutivo dell'opera, ciò impedisce di valutare se tali strutture sono in accordo con gli attuali criteri di progettazione. Si pone la necessità di conoscere la configurazione dell'armatura metallica nel calcestruzzo, il diametro dei ferri, la loro distanza ed eventualmente lo spessore del copriferro.

L'applicazione del test alle correnti indotte si basa sull'impiego di un'opportuna bobina che sonda la superficie delle barre di materiale metallico. Le correnti indotte nelle barre alterano il valore dell'impedenza equivalente della bobina inducente. Tale alterazione è direttamente legata alla posizione ed alle dimensioni delle barre della struttura metallica.

Gli strumenti commerciali disponibili, tuttavia, non forniscono la precisione e le prestazioni richieste, ma si limitano a fornire informazioni concise, generalmente ottenute per mezzo di calibrature appropriate dello strumento considerato, condotte su un insieme di modelli noti. Il limite di tale approccio dipende dal fatto che questi



strumenti operano in condizioni specifiche che, in pratica, non necessariamente sono verificate.

L'innovazione consiste nel fornire un modello numerico per l'interazione sonda-barra, che consenta di analizzare qualunque geometria esistente, al variare dei fattori coinvolti.

La tesi è articolata in quattro capitoli.

Nel primo capitolo viene riportata una panoramica delle varie tecniche di indagine non distruttiva, soffermandosi sul metodo delle correnti indotte, ed in modo particolare ai fattori elettrici e magnetici che influenzano la variazione d'impedenza.

Nel secondo capitolo sono illustrate le tecniche esistenti per l'esecuzione del test non distruttivo sul cemento armato. Viene, inoltre, illustrato il metodo proposto il cui obiettivo è quello di fornire gli strumenti e le tecniche adeguate per la produzione di immagini dell'armatura metallica nel calcestruzzo, a partire dalla formulazione del modello numerico.

Nel terzo capitolo sono descritte le caratteristiche del codice di calcolo agli elementi finiti per la soluzione di problemi 3D alle correnti indotte. Sono poi illustrate le ipotesi considerate nella generazione del codice, mirato all'esecuzione di un'analisi di sensibilità e alla ricerca dei parametri costruttivi della sonda proposta, al fine di ottimizzarne il funzionamento e la produzione dei risultati.

Nel quarto capitolo viene, invece, riportata l'analisi sperimentale di una configurazione efficiente del sistema sonda-barra realizzato in laboratorio.

Infine viene fatto un confronto dei risultati ottenuti dalle prove eseguite, le quali confermano la validità del sistema realizzato

# Capitolo 1

## IL METODO DELLE CORRENTI INDOTTE

### ***1.1 Testing non distruttivo: generalità***

Il *testing non distruttivo* (NDT) è un insieme di pratiche diagnostiche, atte a rilevare le caratteristiche strutturali dei materiali e a valutarne le anomalie o la difettosità senza alterarne lo stato fisico o la geometria.

La continua evoluzione dei materiali utilizzati nei vari settori industriali, finalizzata prevalentemente ad un incremento del grado d'affidabilità dei prodotti e/o manufatti, rappresenta ogni giorno la sfida tecnologica in ambito nazionale ed internazionale.

A riguardo l'NDT, e più in generale tutte le metodologie utilizzate nel settore della diagnostica e del monitoraggio, assumono un ruolo di fondamentale importanza sia per l'ottimizzazione dei processi industriali durante le fasi di produzione, sia per la valutazione dell'integrità strutturale dei manufatti e, di conseguenza, del loro grado di qualità ed affidabilità nei confronti degli utilizzatori. Tuttavia le numerose metodologie d'analisi attualmente disponibili, unitamente alla molteplicità dei materiali ispezionabili ed ai differenti campi d'applicazione (aeronautico, aerospaziale, energetico, metallurgico, elettronico, siderurgico, chimico, petrolchimico), fanno sì che l'affidabilità dei controlli, sia in produzione che in esercizio, risulti notevolmente influenzata da numerose variabili che incidono direttamente o indirettamente sui risultati dell'ispezione. Tra loro, particolare interesse assumono l'individuazione delle metodologie

d'analisi più idonee alla specificità del caso, la qualificazione delle procedure di controllo, le caratteristiche strumentali e funzionali della strumentazione impiegata e dei prodotti utilizzati.

L'NDT può essere eseguito dopo una o più fasi di costruzione (ad esempio colatura, forgiatura, saldatura, assottigliamento di un metallo) ed anche durante il funzionamento con lo scopo di evitare avarie causate da fenomeni come la crescita di una fessura e la corrosione.

I test sono condotti in modo da non intaccare l'utilizzo futuro dell'oggetto in esame. In altre parole, l'NDT consente di effettuare un'analisi del materiale o del componente senza danneggiarlo, è questo il motivo per cui costituisce un compromesso eccellente tra controllo di qualità ed efficienza dei costi.

La decisione di compiere o meno un test è spesso dettata da considerazioni economiche, connesse al costo del testing non distruttivo, a quello dovuto alla sostituzione di un componente che può venir meno durante il collaudo. Come compromesso, il produttore può decidere di correre un rischio calcolato, testando soltanto una frazione di un dato gruppo di prodotti e poi effettuando un'analisi statistica per verificare se l'intero gruppo è idoneo o meno per l'utilizzo. Questo tipo di operazione è spesso chiamata *controllo di qualità*. Uno stimolo importante verso una maggiore accuratezza nell'effettuare questi test è data dalle leggi nazionali e comunitarie sulla qualità dei prodotti; si ricordano in particolare due provvedimenti legislativi:

1. Direttiva CEE n°374/85, recepita con D.P.R. 27/05/88 n°224:

*“responsabilità civile per danno da prodotto difettoso”.*

2. Direttiva CEE n°83/189, recepita con Legge 21/06/86 n°317:

*“i requisiti minimi che un prodotto e/o servizio deve possedere per essere funzionale nei confronti dell'utente”.*

Da tali considerazioni si evince che un progettista deve conoscere al meglio il campo d'utilizzo del componente e gli eventuali stress a cui è sottoposto, così da prevederne formazione e crescita di difetti ed eventuali avarie collegate. Inoltre bisogna tenere presente dell'ambiente in cui opera un componente, potrebbe essere esposto a temperature o troppo basse o troppo alte, a pressioni fortemente variabili e all'azione di agenti corrosivi.

La valutazione non distruttiva (NDE: Non-Destructive Evaluation) è un termine spesso usato alternativamente al testing non distruttivo, tuttavia tecnicamente la NDE indica misure di natura più quantitativa. Per esempio, un metodo NDE potrebbe essere usato non solo per localizzare un difetto, ma anche per rivelarne informazioni quali la dimensione, la forma, l'orientamento oltre che la sua influenza sul tempo di vita rimanente delle strutture e delle parti costituenti.

Lo sviluppo di nuove apparecchiature, l'avanzamento nelle tecniche di modellazione e nel campo dei meccanismi di rottura ha reso possibile una procedura di testing interamente automatizzata, eliminando i rischi di errore umano (dovuto ad operazioni manuali) e incrementando notevolmente la velocità e l'efficacia del testing, .

### ***1.1.1 Le tecniche di indagine non distruttiva e la scelta del metodo***

Il testing non distruttivo può essere eseguito sia sui metalli che sui non metalli e il tipo di test utilizzato dipende da diversi fattori quali il tipo di materiale e le sue dimensioni, le condizioni ambientali, la posizione di interesse all'interno della struttura, la presenza di difetti interni o superficiali, l'idoneità nell'acquisizione e nel trattamento dei dati.

Una generica classificazione delle diverse tecniche di NDT è la seguente:

- metodi radiologici: raggi x, raggi gamma e fasci di neutroni;
- metodi acustici e oscillatori: misure con impedenze ultrasoniche e meccaniche;
- metodi elettrici e magnetici: corrente parassita, dispersione di flusso magnetico, ispezione con particelle magnetiche, analisi con le microonde e misure con caduta di potenziale e campo alternato;
- metodi visivi e ottici: interferometria, olografia e tinture penetranti;
- metodi termici: radiazione infrarossa e vernici termiche.

Per la completa ispezione di un oggetto è generalmente richiesta una combinazione di due o più metodi. La scelta del metodo dipende da diversi fattori quali:

1. valutazione della struttura e della composizione dei materiali;
2. misura delle dimensioni;
3. rivelazione dei difetti interni;
4. rivelazione dei difetti superficiali e sottosuperficiali.

1) Per quanto riguarda la composizione del materiale bisogna prendere in considerazione la natura del materiale stesso o dei costituenti (se siamo in presenza di una lega).

I fattori connessi alla struttura invece includono la durezza dei metalli, la profondità nelle leghe, il contenuto di impurità e il grado di sollecitazioni interne. Questi fattori modificano i valori delle costanti elastiche, della conducibilità elettrica, delle proprietà magnetiche e della permeabilità elettrica.

Le costanti elastiche sono connesse alla velocità del suono  $c$  (per un materiale isotropo di densità  $\rho$ ,  $c = (q/\rho)^{1/2}$  dove  $q$  è il modulo elastico appropriato.). Il valore di  $c$  è determinato utilizzando il metodo ultrasonico pulse-echo.

La permeabilità elettrica può essere determinata utilizzando le microonde elettromagnetiche.

Le proprietà dei metalli ferromagnetici e delle leghe possono essere determinate utilizzando metodi magnetici.

Per la misura della conducibilità elettrica infine è efficace il metodo della corrente parassita.

2) La misura delle dimensioni (ad esempio lo spessore) è normalmente effettuata con tecniche visuali (ottiche), ultrasoniche, con le correnti indotte o con le microonde. I metodi visuali sono tuttavia raramente utilizzati, mentre quelli ultrasonici consentono di determinare spessori di diversi metri in un gran numero di metalli, anche se lo stesso non si può dire per i non metalli. D'altra parte, le microonde elettromagnetiche si sono dimostrate altamente efficaci per misurare le dimensioni di molti oggetti di plastica. Il testing con le microonde può anche determinare gli spessori di oggetti metallici a facce parallele. Il metodo delle correnti parassite infine può essere utilizzato per misurare gli spessori di lamine metalliche molto sottili ed anche di rivestimenti dielettrici (ad esempio vernici) su substrati metallici.

3) La più comune applicazione del testing non distruttivo è probabilmente la rivelazione dei difetti interni. I metodi radiologici (raggi X e raggi gamma) sono maggiormente utilizzati per questo scopo. Essi hanno il vantaggio di produrre un'immagine prontamente

visibile e spesso ad alta risoluzione della regione interna dell'oggetto sotto test.

I principali svantaggi sono rappresentati dalla necessità di proteggersi dai rischi legati alle radiazioni ionizzanti (il che richiede un'area protetta e il continuo controllo della salute del personale) e dal fatto che la profondità di penetrazione della radiazione nell'oggetto da testare può essere molto limitata (ad esempio 4-5 cm o meno in alcuni metalli, molto di meno in alcuni polimeri).

Per la rivelazione dei difetti interni possono essere utilizzati metodi ultrasonici che risultano adatti ad individuare le posizioni dei difetti in una singola operazione e non sono soggetti ai rischi legati alle radiazioni.

Infine le microonde possono essere utilizzate per misurare i difetti interni in oggetti non metallici ma generalmente con un grado di precisione inferiore rispetto agli ultrasuoni.

4) La rivelazione delle fessure superficiali è ottenuta mediante i metodi delle tinture penetranti e delle particelle magnetiche. Il metodo delle tinture penetranti tuttavia non può essere utilizzato per rilevare difetti sotto-superficiali, mentre il metodo delle particelle magnetiche è adatto per i metalli ferromagnetici e richiede l'applicazione di un forte campo magnetico.

I metodi elettromagnetici sono generalmente i più accurati per misurare le profondità delle rotture superficiali in campioni di metallo. La tecnica delle correnti parassite risulta invece precisa per cricche meno profonde, mentre per le rotture più profonde si utilizzano le misure con campo alternato. Il metodo della dispersione del flusso magnetico può essere usato per misurare le rotture superficiali e sotto-superficiali, ma solo per materiali ferromagnetici, e richiede

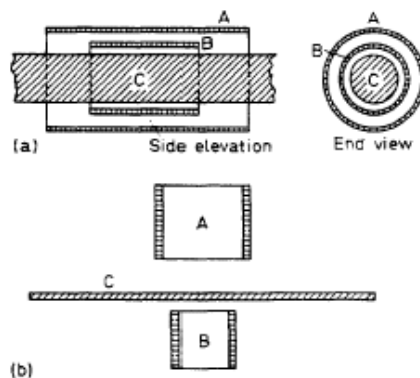
l'applicazione di un forte campo magnetico. E' spesso usato per testare ampi tubi.

Tra le numerose tecniche non distruttive brevemente presentate si affronterà in particolare nei successivi paragrafi il metodo delle correnti indotte.

## 1.2 Le correnti indotte

Il test non distruttivo con correnti indotte (ECT: Eddy Current Testing) consiste fondamentalmente nell'indurre dei campi elettromagnetici alternati nel materiale in esame al fine di analizzare le proprietà, eventuali discontinuità e variazioni nella geometria e nelle dimensioni del materiale testato.

I campi elettromagnetici alternati sono solitamente creati dal flusso di correnti elettriche in bobine o *array* di conduttori, detti *sonde*.



**Figura 1.1** Eddy Current Testing: posizione della sonda.



Tali sonde sono posizionate in prossimità della superficie del materiale da analizzare e generano all'interno del campione conduttore correnti elettriche di piccola intensità (Figura 1.1). Questo fenomeno si può spiegare grazie alla legge di Faraday:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

la quale stabilisce che ogni volta che un campo magnetico variabile si concatena con un conduttore, in questo si generano delle correnti indotte, cui in generale si associano fenomeni dissipativi di energia; esse sono perciò chiamate correnti parassite o anche correnti di Foucault.

Considerando la formulazione integrale della legge di Faraday, applicata alla superficie S dal contorno C si ha la seguente:

$$\oint_C E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot ds \quad (2)$$

La legge di Ohm  $J = \sigma E$  consente di ricavare la relazione tra la densità di corrente e il flusso magnetico:

$$\oint_C \frac{J}{\sigma} \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int_S B \cdot ds \quad (3)$$

L'equazione (3) descrive la generazione di corrente per mezzo di un campo magnetico variabile nel tempo.

Dalla legge di Ampère:

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

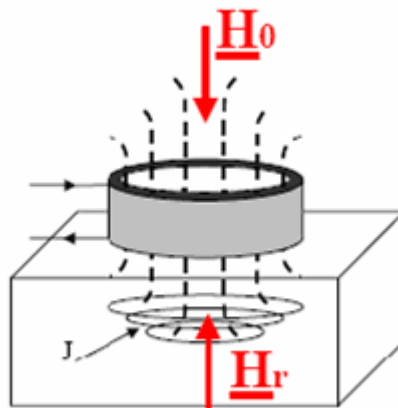
la cui forma integrale è la seguente:

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad (5)$$

si deduce che il flusso delle correnti indotte genera a sua volta un proprio campo magnetico variabile, il quale è sempre in opposizione a quello della bobina.

Il campo magnetico, prodotto dalle correnti indotte, è tipicamente ortogonale al flusso della corrente e si oppone al campo magnetico primario. Questa opposizione provoca una variazione nelle componenti dell'impedenza della bobina induttrice.

La bobina e il campione metallico rappresentano, rispettivamente, il primario e il secondario di un trasformatore e l'impedenza della bobina dipende dal comportamento delle correnti indotte. Per cui il campo magnetico associato,  $\mathbf{H}$  induce un flusso di correnti elettriche - le correnti parassite appunto - che seguono traiettorie circolari nei piani perpendicolari alla direzione di  $\mathbf{H}$  (Fig. 1.2).



**Figura 1.2** Il campo generato dalla bobina ( $H_0$ ) e il campo di reazione dovuto alle correnti indotte nel materiale ( $H_r$ ).

Come risultato si verificano variazioni dell'impedenza della bobina; determinando il valore di tale impedenza, si valutano intensità e fase delle correnti parassite, le quali dipendono dalla conducibilità elettrica e dalla permeabilità magnetica del materiale in esame. I valori rilevati possono essere correlati, mediante taratura con campioni di riferimento, all'entità dei difetti o alle caratteristiche chimico-strutturali quali composizione chimica e stato di trattamento termico del materiale oggetto del controllo.

### **1.2.1 Concetti elettrici base delle correnti indotte**

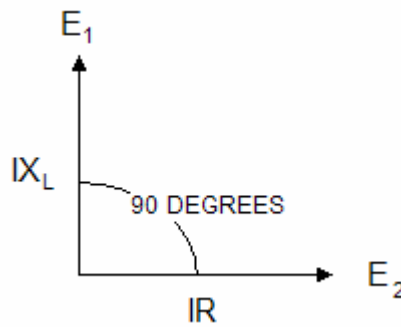
Quando una corrente alternata passa in una bobina per test con correnti indotte, questa fluisce attraverso una reattanza induttiva  $X_L$  ed una resistenza  $R$ . Si possono identificare una tensione per l'induttanza reattiva ed una per la resistenza:

$$E_1=IX_L \quad (6)$$

$$E_2=IR \quad (7)$$

Le due tensioni sono tra loro sfasate di  $90^\circ$  (Fig. 1.3) e, poiché il valore della corrente che fluisce nella reattanza induttiva e nella resistenza è lo stesso ad ogni istante, i valori delle tensioni possono essere divisi per il valore della corrente così da ottenere i relativi valori di reattanza induttiva e resistenza. Il diagramma che ne risulta è detto *diagramma dei fasori* e si utilizza per mostrare le relazioni di ampiezza e fase di segnali di corrente alternata aventi frequenza uguale (Fig. 1.4).

Una variazione dei valori di  $X_L$  e  $R$  comporta una modifica della caduta di potenziale del circuito che è strettamente legata a tali parametri; tale caduta di potenziale viene associata ad un diverso fasore  $Z$  nel piano delle impedenze.



**Figura 1.3** Piano delle tensioni.

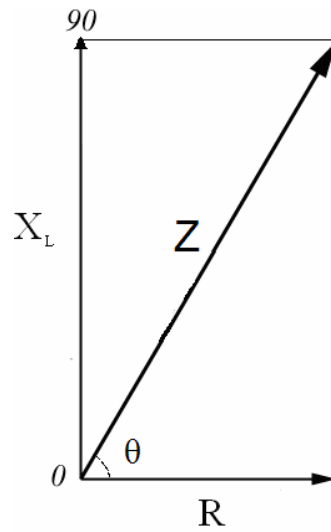
La caduta di potenziale totale è il fasore o vettore somma di  $E_1$  e di  $E_2$ :

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} \quad (8)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} X_L / R \quad (9)$$

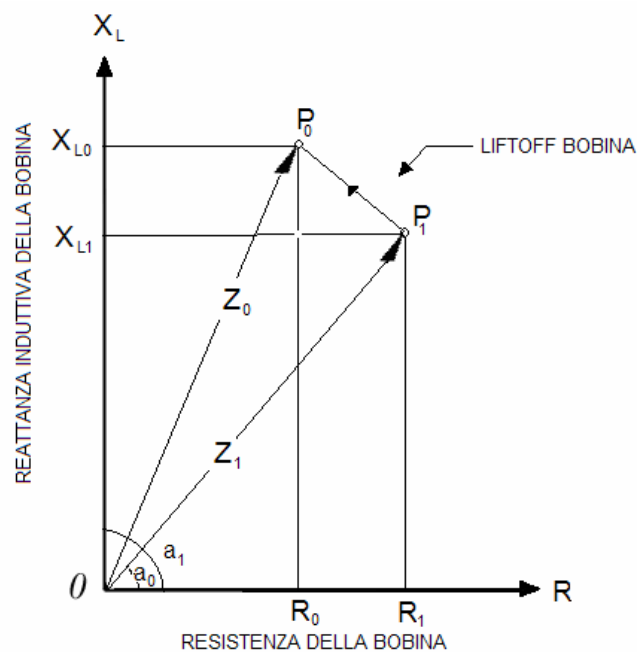
I valori di queste componenti del potenziale dipendono dalla resistenza, dalla reattanza e dalla frequenza. In generale la bobina è caratterizzata da una reattanza induttiva  $X_L$  (dove la frequenza del campo in corrente alternata è in hertz e l'auto-induttanza  $L$  della bobina è in Henry) e da una resistenza ohmica  $R$ .

In assenza di materiale da testare la bobina avrà un'impedenza caratteristica rappresentata da un punto sul piano di impedenze di coordinate  $X_{L0}$  ed  $R_0$ .



**Figura 1.4** Piano delle impedenze

Se la bobina è posta sul materiale sotto test, il campo originale della bobina è modificato dal campo associato alle correnti indotte. Questa variazione di campo produce esattamente lo stesso effetto che si otterrebbe se cambiassero le caratteristiche della bobina utilizzata per il test.



**Figura 1.5** Rappresentazione delle caratteristiche della bobina nel piano delle impedenze.

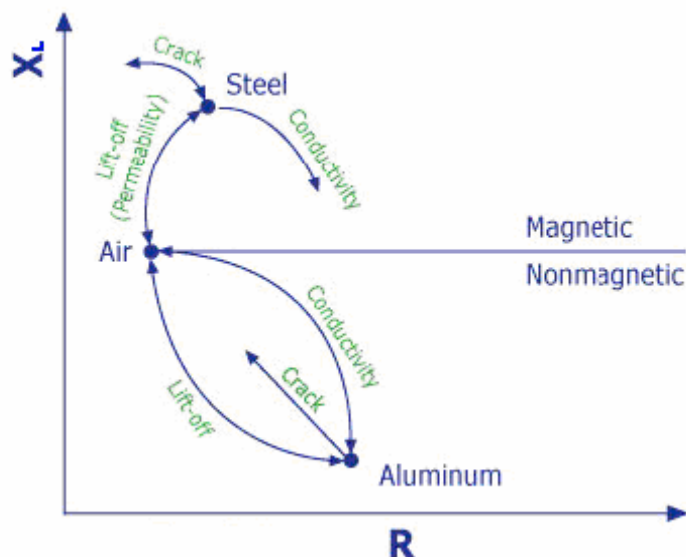
L'influenza che l'oggetto sotto test ha sulla bobina può essere descritta efficacemente da una variazione nelle caratteristiche della bobina. Quindi l'impedenza apparente  $P_0$  della bobina in aria è sostituita da una nuova impedenza  $P_1$  (corrispondente ad un nuovo valore di  $X_L$  e di  $R$ ), per effetto del materiale in esame (Fig. 1.5).

L'ampiezza e la direzione dello spostamento dell'impedenza da  $P_0$  a  $P_1$  dipendono dalle proprietà dell'oggetto test e dalle caratteristiche della strumentazione.

Proprietà indicative del materiale in esame sono la conducibilità elettrica  $\sigma$ , le dimensioni del materiale in questione, la permeabilità magnetica  $\mu$  e la presenza di discontinuità quali cricche.

Per quanto riguarda la strumentazione, i fattori da considerare sono la frequenza del campo in corrente alternata nella bobina, grandezza e forma della bobina e liftoff (distanza della sonda dall'oggetto test).

Il grafico in figura 1.6 riporta i cambiamenti che si verificano sull'impedenza di una bobina durante misura con ECT.



**Figura 1.6** Variazioni d'impedenza.

La parte superiore del piano di impedenze è il dominio magnetico dove le reazioni derivano dai materiali ferromagnetici. La parte inferiore contiene le risposte provenienti dai materiali non ferromagnetici.

In particolare i due materiali considerati sono l'acciaio per il caso ferromagnetico e l'alluminio per quello non ferromagnetico.

Consideriamo prima il caso dell'alluminio. Quando la sonda (bilanciata in aria) viene posta sul materiale, la componente reattiva dell'impedenza della bobina diminuisce in presenza del materiale non ferromagnetico. Tale variazione è dovuta al flusso delle correnti indotte nel materiale, e alla generazione di un campo secondario che cancella parzialmente quello primario della bobina.

In presenza di cricche o lesioni nel materiale, riescono a crearsi sullo stesso meno correnti indotte, provocando una conseguente diminuzione di  $R$  ed un aumento della  $X_L$ . Nel caso di un materiale magnetico, come l'acciaio, in presenza del campo magnetico primario della bobina i domini magnetici del materiale si allineano con il campo, incrementando la densità del flusso magnetico. Questo effetto è descritto dall'equazione:

$$B = \mu H \quad (10)$$

Dove:

$B$  = densità del flusso magnetico;

$\mu$  = permeabilità magnetica relativa;

$H$  = intensità del campo magnetico.

Come conseguenza si ha un forte aumento della  $X_L$ . Sfruttando tali variazioni si determinano informazioni sul materiale, quali dimensioni forma e la presenza o meno di lesioni.

### **1.2.2 Effetti magnetici ed elettrici del materiale**

Il flusso delle correnti indotte all'interno del campione conduttore è direttamente influenzato dalla conducibilità elettrica e dalla permeabilità magnetica del materiale oggetto di test.

La conducibilità  $\sigma$  di un materiale può essere definita come la sua capacità di attivare una corrente, di lunghezza ed area trasversale unitari, quando ai suoi capi è applicata una data tensione. La conducibilità propria del materiale è sempre la stessa, tuttavia ci sono dei fattori interni che possono causare una sua variazione. Questi sono:

1. *Durezza.* Quando un metallo è assoggettato ad un trattamento termico o ad un eccessivo calore durante il funzionamento, questo diventa più duro o più molle, a seconda del materiale, e causa un cambiamento interno nella struttura del materiale che porta ad una variazione della conducibilità.

2. *Temperatura e sollecitazioni residue.* Anche la temperatura ambiente e le sollecitazioni interne residue hanno un effetto sulla conducibilità. Un aumento nella temperatura del materiale, normalmente, comporta una diminuzione della conducibilità, mentre le sollecitazioni interne causano variazioni imprevedibili.

3. *Rivestimenti conduttivi.* La presenza e lo spessore di un rivestimento conduttivo su un materiale conduttore influenzano la conducibilità equivalente, esattamente come avverrebbe con una lega.



La permeabilità magnetica  $\mu$  è il fattore di proporzionalità tra  $\mathbf{B}$  ed  $\mathbf{H}$  (Eq. 10). Quando una bobina eccitatrice è posizionata su un campione di materiale ferromagnetico non magnetizzato, il campo viene intensificato dalle proprietà magnetiche del materiale e causa una forte variazione nella sua impedenza. Queste variazioni, spesso, sono così grandi rispetto a quelle causate da cambiamenti nella conducibilità, che maschererebbero tutte le altre variazioni.

Quando la geometria del campione lo permette, questo effetto può essere superato magnetizzando il materiale fino alla saturazione, utilizzando una bobina separata che viene alimentata da una corrente continua.

La saturazione magnetica elimina in modo efficace le variazioni di campo dovute alle variabili magnetiche, e in questo modo permette alle altre variabili di essere misurate. Dopo che il controllo è completato, il pezzo deve essere demagnetizzato.

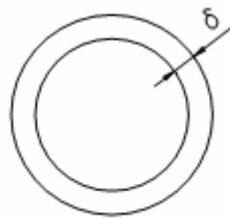
### **1.2.3 Profondità di penetrazione delle correnti indotte**

Le correnti indotte non si distribuiscono uniformemente all'interno del materiale, ma tendono a concentrarsi vicino alla superficie e progressivamente diventano meno intense, all'aumentare della distanza dalla superficie del materiale. Tale tendenza delle correnti ad intensificarsi in superficie è nota come *effetto pelle*.

E' utile definire, matematicamente, la profondità standard di penetrazione:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (11)$$

Nello strato del materiale, avente spessore pari alla profondità di penetrazione  $\delta$ , la densità di corrente decresce esponenzialmente del 37% rispetto al valore in superficie. Come si può osservare dall'equazione (11), la profondità di penetrazione delle correnti indotte dipende dalla conducibilità, dalla permeabilità magnetica e dalla frequenza della corrente che alimenta la bobina eccitatrice; in particolare, la penetrazione diminuisce all'aumentare della conducibilità e della permeabilità.



**Figura 1.7** Profondità di penetrazione

Naturalmente, l'azione della permeabilità è assente nei materiali non ferromagnetici. L'unico parametro d'esame controllabile dall'esterno, suscettibile ad influenzare la profondità di penetrazione è la frequenza.

A frequenze abbastanza basse, i campi magnetici e le correnti indotte penetrano più profondamente nel materiale. A frequenze più alte, le correnti indotte sono limitate ad uno strato sottile appena sotto la superficie e quindi le condizioni delle sezioni più profonde non possono essere verificate, mentre viene accresciuta la sensibilità delle correnti indotte verso le discontinuità superficiali.

Va ricordato che le correnti indotte non cessano di esistere oltre la profondità standard di penetrazione. Il materiale deve presentare uno

spessore di due o tre volte  $\delta$ , per annullare l'effetto sull'impedenza della bobina eccitatrice.

### **1.3 Le sonde utilizzate nel testing con correnti indotte**

La caratteristica più importante del testing con correnti parassite è il modo in cui le correnti parassite sono indotte e rilevate nel materiale sotto test. Questo dipende dalla forma della sonda, che può contenere sia una che più bobine. Una bobina consiste in un tratto di filo avvolto in maniera elicoidale attorno ad un pezzo di tubo o asta cilindrici, chiamato former. L'avvolgimento di solito presenta più di uno strato così da incrementare il valore dell'induttanza per una data lunghezza della bobina. Nel testing con corrente parassita è consigliabile utilizzare fili fatti di rame o di altri metalli non ferrosi per evitare effetti di isteresi magnetica. Lo scopo principale del former è quello di fornire una sufficiente rigidità alla bobina per evitare deformazioni. I former utilizzati per bobine con diametri superiori ad alcuni millimetri generalmente hanno la forma di tubi o anelli fatti di materiale dielettrico. La regione all'interno del former è detta nucleo, il quale può consistere sia in un materiale solido che soltanto in aria. Le bobine di piccolo diametro sono di solito avvolte direttamente su un nucleo solido, che agisce da former.

Un valore preciso dell'induttanza  $L$  di una bobina è dato [1] da:

$$L = Kn^2\pi[(r_o^2 - r_c^2) - \mu_r r_c^2] \mu_0 / l \quad (12)$$

dove  $r_0$  è il raggio medio della bobina,  $r_c$  il raggio del nucleo,  $l$  la lunghezza della bobina,  $n$  il numero di giri,  $\mu_r$  la permeabilità magnetica relativa del nucleo,  $\mu_0$  la permeabilità dello spazio libero che è effettivamente uguale alle permeabilità dei materiali sia del filo che del former e  $K$  una costante adimensionale caratteristica della lunghezza e dei raggi esterni ed interni.

E' importante sottolineare che la corrente che attraversa la bobina deve essere più bassa possibile; una corrente troppo alta infatti può produrre (a) un innalzamento della temperatura, quindi una dilatazione della bobina, il che aumenta il valore di  $L$ , (b) isteresi magnetica la quale pur essendo piccola è comunque rilevabile quando viene utilizzato un nucleo di ferrite e (c) per i materiali ferromagnetici, un'eccessiva isteresi magnetica accompagnata da non linearità del segnale d'uscita, il che comporta l'apparizione di frequenze armoniche.

Le posizioni base della sonda sono le seguenti:

- accerchiamento: per testare esternamente tubi ed aste cilindrici.
- assiale interna: per testare internamente tubi cilindrici.
- scansione superficiale: dove l'asse della bobina è perpendicolare alla superficie, inclusa la superficie interna di un tubo.

Le sonde ad accerchiamento ed assiale interna consentono una rapida analisi e sono utili per misurare le proprietà di campioni omogenei, come la conducibilità elettrica, la permeabilità magnetica e le dimensioni. Le sonde a scansione superficiale sono normalmente utilizzate per la valutazione localizzata delle discontinuità, dei difetti e di altre variazioni strutturali. Il raggio di una bobina a scansione superficiale dovrebbe essere sufficientemente piccolo affinché la superficie immediatamente sotto di essa sia effettivamente piana, e il

raggio ottimale dipende dal grado di curvatura della superficie analizzata e dal grado richiesto di sensibilità di rilevazione, prendendo in considerazione che una riduzione del raggio della bobina comporta un più basso valore dell'induttanza (equazione 12). I raggi delle bobine ad accerchiamento ed assiale interna sono determinati a partire dai raggi dei tubi e delle aste sotto test mentre i raggi delle bobine a scansione superficiale dipendono dal tipo di applicazione.

La velocità e la precisione della scansione possono essere migliorate con l'utilizzo di un dispositivo meccanico; la velocità della scansione, inoltre può essere aumentata utilizzando un array di sonde che sono opportunamente spaziate per consentire una totale copertura della superficie.

#### **1.4 Limiti del metodo**

Le limitazioni del metodo sono in stretta relazione con le caratteristiche dei materiali in prova.

In generale, l'eddy current test è applicabile solo per esaminare materiali con una conducibilità elettrica elevata, come i metalli e le leghe, o composti con strati conduttivi o fibre di rinforzo. L'ECT può in ogni caso essere usato per misurare lo spessore degli strati non conduttivi sulla superficie di un materiale metallico conduttivo: per l'*effetto liftoff*, il rivestimento separa la sonda test dal materiale conduttivo a causa dello spessore del materiale non conduttivo o lamierino.

Il metodo alle correnti indotte fornisce la massima sensibilità per le superfici e gli strati sottosuperficiali del materiale in esame adiacenti alla sorgente di eccitazione. In alcuni casi, è difficile o addirittura

impossibile penetrare al centro di campioni di grande spessore a causa dell'effetto pelle (*skin effect*) che produce un'attenuazione del campo elettromagnetico ad una certa profondità al di sotto della superficie. Le correnti indotte tendono a fluire solo negli strati paralleli alla superficie a cui il campo è applicato perpendicolarmente e in genere non sono sensibili alle discontinuità disposte parallelamente alla superficie. Le correnti indotte rilevano la presenza delle discontinuità trasversali rispetto al flusso della corrente all'interno del materiale in esame, poiché tali discontinuità interrompono, allungano o deformano i percorsi della corrente.

### **1.5 Applicazioni e sviluppi**

Il metodo EC è di grande versatilità, in quanto permette ogni tipo di applicazione che possa essere correlata alle variazioni delle caratteristiche chimico-fisiche di un qualsiasi conduttore. In altri termini, attraverso la bobina di prova può essere rilevata anche la minima disomogeneità di un materiale, sia essa determinata da variazioni di tipo geometrico, elettrico o magnetico, quindi, adattando il metodo a ciascuna specifica esigenza, si possono eseguire controlli per rilevare:

- Disomogeneità associate alla geometria del materiale quali cricche, deformazioni, inclusioni, variazioni di spessore, ossidazioni.
- Spessori di riporti non conduttivi su base conduttiva, o di riporti conduttivi su base di diversa conduttività.

- Variazioni associate alla conduttività del materiale, disomogeneità delle leghe, surriscaldamenti localizzati, errori di trattamento termico.
- Variazioni associate alla permeabilità del materiale attraverso la misura dell'intensità dei campi magnetici.

Il metodo di indagine con correnti indotte, oltre ad una grande varietà di applicazioni, offre numerosi altri vantaggi: elevata sensibilità d'esame, grande affidabilità, rapidità di esecuzione, basso costo di esercizio. Inoltre, risulta di grande utilità il poter eseguire l'indagine senza che vi sia contatto diretto tra sonda e pezzo in prova, permettendo l'esame di pezzi in movimento.

## Capitolo 2

# ANALISI DELLE STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO

### *2.1 La sicurezza delle armature metalliche*

Il problema della verifica della sicurezza delle strutture in cemento armato, in seguito al forte sviluppo nell'edilizia e nella creazione di infrastrutture, e anche a causa di numerosi crolli avvenuti senza cause apparenti, è sempre più sentito da progettisti e operatori del settore delle costruzioni e del restauro. I processi di diagnosi e monitoraggio strutturale assumono crescente importanza, tanto in ambito tecnico quanto in campo normativo.

Le costruzioni esistenti devono essere sottoposte a valutazione della sicurezza, poiché le armature metalliche possono nel tempo corrodersi e perdere la loro iniziale robustezza diventando insufficienti a supportare il carico per il quale erano state originariamente progettate. Spesso, per tali strutture non è reperibile il progetto esecutivo dell'opera, ciò impedisce di un piano di manutenzione adeguato, la progettazione di interventi di ripristino ottimali in termini di curabilità, ma soprattutto non consente di stabilire se gli edifici in questione sono in accordo con le attuali norme di progettazione.

Nei paragrafi successivi, dopo una trattazione di alcune tecniche non distruttive sviluppate per rivelare eventuali difetti delle armature metalliche, viene affrontato il problema dell'individuazione dei ferri nel calcestruzzo, della loro forma ed orientamento, che è lo scopo principale di questo lavoro di tesi.



## **2.2 Tecniche non distruttive per la diagnosi dello stato delle armature.**

Uno dei maggiori problemi di durabilità è la corrosione dei ferri dell'armatura, causata principalmente dall'esposizione delle barre ad ioni cloruro provenienti dagli elementi costitutivi del calcestruzzo o penetrati dall'ambiente clorurato circostante. Altre cause di corrosione dei ferri sono la carbonatazione o la penetrazione di gas acidi. Ci sono inoltre alcuni fattori legati alla qualità del calcestruzzo quali presenza di impurità o cricche superficiali e altri dipendenti dall'ambiente esterno quali l'umidità, la temperatura, l'ossigeno e le correnti parassite.

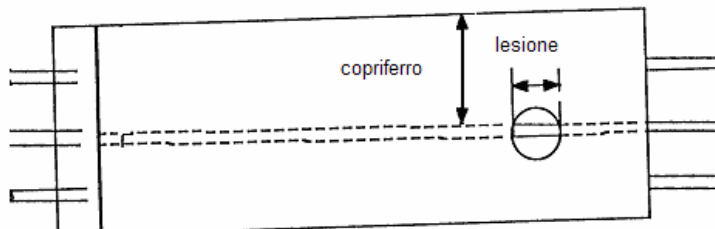
Esistono numerose tecniche non distruttive per la diagnosi dello stato delle armature metalliche. E' spesso molto complesso diagnosticare il danno delle armature con tecniche diagnostiche convenzionali.



**Figura 2.1.** Ispezioni di ponti con tecniche NDT.

La presenza del cemento non consente ovviamente un'analisi visiva diretta e rende l'ispezione ad *ultrasuoni* molto difficile per la natura porosa e non uniforme dell'aggregato di cemento. Le ispezioni con *raggi X* forniscono un'immagine fotografica della struttura in calcestruzzo consentendo, in questo modo, di localizzare l'armatura metallica. Tuttavia i costi elevati, il pericolo dell'impianto ad alta

tensione e i fattori di sicurezza rendono difficile da attuare sul campo questa tecnica.



**Figura 2.2.** Geometria della struttura in cemento armato.

Tra le tecniche sviluppate per rispondere a questo specifico obiettivo possiamo evidenziare quattro approcci fondamentali:

- analisi del danno al cemento che evidenzia indirettamente problemi alla struttura metallica di rinforzo
- analisi dell'evidenza di un processo di corrosione in atto
- diagnosi del momento di cedimento dell'acciaio
- analisi diretta delle aree in cui la struttura metallica appare deteriorata.

### **2.2.1 Analisi indiretta del danno nella struttura metallica**

Tra le tecniche relative al primo punto ricordiamo quelle radar, in grado di evidenziare le delaminazioni nel cemento armato prodotte dalla corrosione.

Il Ground Penetrating Radar (GPR) è un dispositivo utilizzato a tale scopo. Il suo funzionamento si basa sulla trasmissione, tramite un'antenna, di impulsi elettromagnetici nella struttura da esaminare.

Tali impulsi viaggiano attraverso diversi materiali con differente velocità. La variazione di velocità è strettamente legata alla qualità del materiale e alle sue proprietà dielettriche. Il cambiamento della costante dielettrica che si verifica alle interfacce, come tra cemento armato e aria, o tra due differenti tipi di roccia, causa un cambiamento nella forma d'onda.

I segnali riflessi giungono ad un'antenna ricevente, isolata dall'antenna trasmittente, o nello stesso *casing*. I segnali sono positivi, quando passano da un materiale dielettrico più debole ad uno più forte (es. dall'aria al calcestruzzo), mentre sono negativi in caso contrario. I sistemi GPR, disponibili in commercio, operano in un range di frequenza che va da 20MHz a 2GHz.

Il dispositivo radar opera tra un'antenna trasmittente ed una ricevente che raccoglie le forme d'onda riflesse. Un'unità di controllo gestisce le funzioni del GPR quali la velocità di scansione, i filtri del segnale, le misure di amplificazione e di tempo. Il Ground Penetrating Radar può essere usato per la rivelazione di delaminazioni, crepe, cavità e ferri dell'armatura nelle strutture in cemento armato con ragionevole precisione (Fig. 2.3).

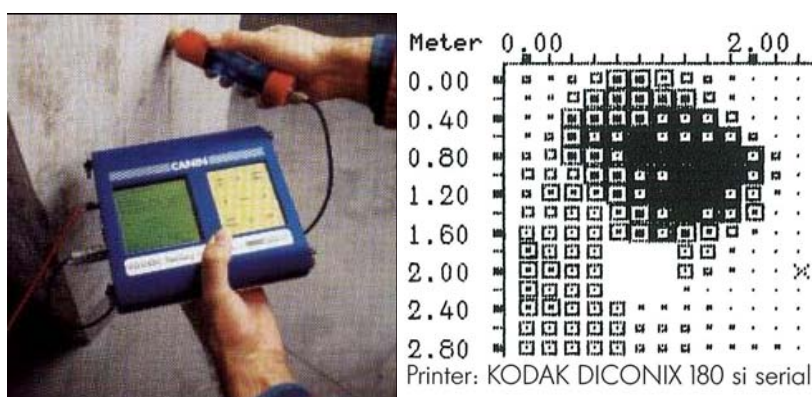


**Figura 2.3** Ground Penetrating Radar per la rivelazione di delaminazioni, crepe, cavità e ferri dell'armatura nelle strutture in cemento armato.

Lo svantaggio di tale approccio è dovuto al fatto che viene data un'informazione sulle condizioni del cemento armato più che sulla struttura metallica al suo interno.

### **2.2.2 Analisi del processo di corrosione**

Della seconda categoria fanno parte i metodi di monitoraggio della corrosione. La corrosione del ferro nel cemento armato è processo elettrochimico; esso rappresenta un elemento galvanico, simile ad una pila, che produce una corrente elettrica misurabile come un campo elettrico sulla superficie del cemento armato. La distribuzione di potenziale può essere misurata con un elettrodo detto appunto half-cell potential. Eseguendo misure sull'intera superficie si rilevano le distinzioni tra le zone corrose e quelle intatte. A tal proposito lo strumento CANIN half-cell potential, commercializzato dalla Proceq, è dotato di un display sul quale si possono rappresentare 240 valori misurati, e di una memoria intelligente che può contenere 120.000 misure diverse, consentendo di analizzare una superficie di 4000 m<sup>2</sup>.



(a)

(b)

**Figura 2.4** CANIN Half-Cell Potential per misure di corrosione, prodotto da Proceq(a); display grafico (b).

Tali metodi, nel misurare una distribuzione di potenziale legata al processo elettrochimico, danno in genere indicazioni solo qualitative sull'esistenza di un processo di corrosione in atto, senza fornire elementi utili al dimensionamento quantitativo del danno nel ferro.

Le condizioni ambientali in ciascuna struttura possono poi significativamente alterare la precisione delle misure. Più precisa, in questo contesto, appare la diagnostica attraverso la cosiddetta resistenza di polarizzazione che si ottiene misurando la corrente direttamente legata al processo di corrosione.

La quantificazione della corrosione dipende dall'integrale nel tempo della misura effettuata ed è pertanto possibile avere una stima della sola parte del fenomeno tenuta sotto osservazione, mancando in questo caso l'informazione relativa allo stato di corrosione iniziale delle barre.



**Figura 2.4.** Geocor 6, commercializzato dalla James Instrument.

In particolare, James Instrument Geocor 8 rappresenta l'ultima tecnologia per la determinazione del grado di corrosione delle barre nel calcestruzzo. La resistenza di polarizzazione è misurata mediante due elettrodi, l'elettrodo contatore (CE) esterno e l'elettrodo di

guardia (GE) centrale. La necessità dei due elettrodi deriva dal fatto che bisogna confinare l'area della struttura da analizzare per una corretta valutazione del grado di corrosione.

Il processo è anche in questo caso influenzato dalle condizioni ambientali, ma, pur presentando un certo numero di difficoltà nell'applicazione sul campo, è sicuramente tra gli approcci oggi più validi disponibili per una stima semi-quantitativa.

### ***2.2.3 Diagnosi del punto di cedimento dell'acciaio***

La diagnosi del punto di cedimento dell'acciaio consiste nel monitorare l'emissione acustica conseguente alla rottura di funi.

L'emissione acustica è il termine usato per indicare il transitorio di una forma d'onda rilasciata da un solido sotto sforzo. Nelle strutture in cemento armato, la principale fonte di emissione d'onda potrebbe essere lo sviluppo di cricche o lo slittamento tra il cemento armato e i ferri dell'armatura.

Sulla superficie della struttura da esaminare sono disposti dei trasduttori che ricevono e registrano queste onde di sforzo. La variazione del tempo d'arrivo delle forme d'onda, rilevate da ogni trasduttore, consente di localizzare la fonte di emissione. L'aumento dell'emissione d'onda nella struttura, è interpretata come una situazione pericolosa.

Tale approccio, tuttavia, non è esauriente perché è in grado solo di diagnosticare il danno che avviene durante la fase diagnostica.

#### **2.2.4 Analisi diretta delle aree in cui la struttura metallica appare deteriorata**

L'analisi diretta delle aree in cui l'armatura metallica può essere danneggiata viene condotta mediante diverse tecniche basate sull'impiego di sensori elettromagnetici.

Ricordiamo in particolare l'uso della misura di flusso magnetico residuo e disperso in condizioni stazionarie per diagnosticare rotture in cavi [3].

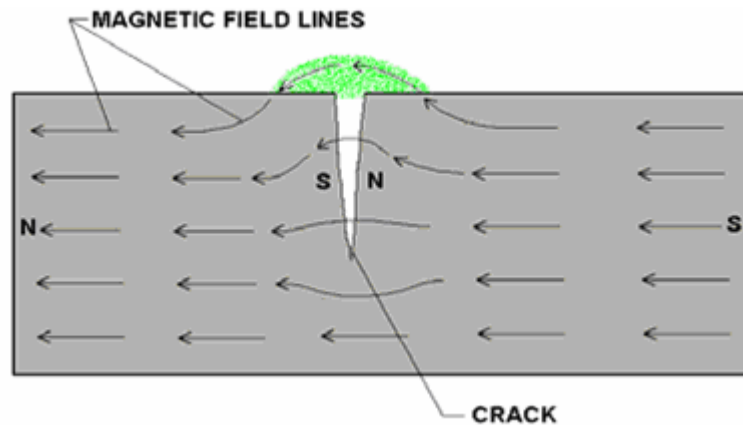
Con questi metodi, viene indotto un campo magnetico all'interno dell'oggetto da testare. In presenza di cricche o discontinuità la permeabilità magnetica subisce variazioni all'interno della regione di interesse producendo come risultato il flusso disperso. L'intensità del flusso disperso consente di valutare le discontinuità e la loro forma.

La figura 2.5, infatti, mostra come le discontinuità della permeabilità magnetica, causate dalla presenza di una fessura che simula un difetto in una sbarra ferromagnetica magnetizzata, modificano la distribuzione delle linee di flusso magnetico indotto (il flusso esce fuori dall'oggetto).

In realtà la dispersione del flusso si verifica non solo sulla superficie contenente la fessura ma anche su quella opposta, anche se qui la densità del flusso disperso ha un'ampiezza minore.

I metodi del flusso magnetico sono composti da due fasi:

- 1) la magnetizzazione dell'oggetto;
- 2) l'uso di un rivelatore sensibile al flusso magnetico per misurare il flusso deviato dalle discontinuità.



**Figura 2.5** Dispersione del flusso magnetico in presenza di un taglio che simula una fessura in una sbarra ferromagnetica magnetizzata. Le linee tratteggiate indicano il flusso magnetico.

Le tecniche di magnetizzazione si sono sviluppate in modo da adeguarsi alla geometria degli oggetti da analizzare, tra i metodi usati citiamo: l'uso di corrente applicata all'oggetto, conduttori che trasmettono correnti attraverso parti cave, gioghi e bobine.

Il flusso magnetico disperso prodotto dalle discontinuità nell'oggetto in esame, viene rivelato per mezzo di diversi sensori quali bobine, sonde Hall, magnetodiodi, microsonde Förster, particelle magnetiche. I segnali provenienti dalle sonde sono elaborati elettronicamente e presentati in modo da indicare la presenza di discontinuità.

Nella tecnica del campo magnetico residuo proposta, il cavo di acciaio è magnetizzato utilizzando un giogo magnetico che percorre la lunghezza del metallo da esaminare. Dopo che il giogo è stato rimosso il campo magnetico residuo, prodotto dalla rimanente magnetizzazione dell'oggetto d'acciaio, viene misurato.

La copertura in cemento armato ostacola il contatto diretto tra il giogo e l'acciaio, pertanto la magnetizzazione dell'acciaio è più bassa di quanto potrebbe essere in una situazione di contatto diretto. La rivelazione dei campi magnetici residui alle rotture del cavo o in altre



aree danneggiate è ancora possibile una volta che il giogo magnetico sia stato rimosso dalla zona da ispezionare.

La tecnica utilizzata per l'analisi del flusso magnetico disperso, è simile a quella descritta sopra per le misure di flusso residuo. In questo caso, il giogo magnetizzante e la barra sono a diretto contatto durante l'esame del flusso magnetico disperso. Inoltre, la misura del flusso disperso intorno al difetto sui cavi è effettuata quando l'oggetto da esaminare è ancora attivamente magnetizzato dal giogo e non quando il giogo è stato rimosso. Il metodo del flusso magnetico disperso è utilizzato anche per la diagnosi di difetti nei ponti.

I risultati, ottenuti sperimentalmente, confermano che il metodo di misura del flusso residuo è una tecnica per analizzare il ferro nel cemento armato prima e dopo la sollecitazione. Tale metodo è molto sensibile al modo in cui la barra viene magnetizzata. Piccole variazioni nelle tecniche di magnetizzazione generano livelli e forme del segnale diversi, di conseguenza l'interpretazione del segnale sul campo potrebbe essere complicata. Ad una forte variazione nella tecnica di magnetizzazione, come quelle prodotte nel caso in cui il ferro è magnetizzato in prossimità di una sua estremità o nel suo centro, corrisponde una variazione del segnale altrettanto ampia. Per ogni applicazione è necessario scegliere con cura la tecnica di magnetizzazione adeguata. La sensibilità alla tecnica di magnetizzazione, oltre alle difficoltà inerenti il trasporto dal laboratorio di ricerca al campo di applicazione, rendono i risultati di questo metodo di analisi della struttura metallica meno rilevanti sul campo rispetto a quelli più significativi che si ottengono sperimentalmente.

### **2.3 Rilevazione dei ferri d'armatura nel cemento armato**

La valutazione dell'idoneità statica e sismica di edifici esistenti in c.a. costruiti in Italia prevalentemente durante l'ultimo dopoguerra rappresenta una delle problematiche più attuali dell'Ingegneria strutturale, anche per le indubbe implicazioni di carattere socio-economico che la denotano.

La ricostruzione dei procedimenti e degli schemi adottati in fase di progetto non risulta immediata per il fatto che spesso non sono disponibili gli elaborati originali dai quali sarebbe possibile desumerli in maniera univoca.

Bisogna inoltre osservare che da un lato l'effettiva realizzazione della struttura può aver introdotto "anomalie" rispetto a quanto previsto nel progetto, dall'altro l'assetto attuale delle strutture può non essere quello previsto originariamente.

La determinazione della quantità e della disposizione delle armature e la necessità di doverlo esplicitare con prove prevalentemente non distruttive, costituisce un altro elemento critico.

La rilevazione della posizione e del diametro delle armature può essere effettuata mediante uno strumento detto Pachometro.

Lo strumento consiste in una sonda emettitrice di campo magnetico collegata ad un'unità di elaborazione digitale ed acustica.

La sonda è fatta scorrere lungo la superficie e dall'assorbimento del campo magnetico si è in grado di determinare la posizione delle armature, lo spessore del copriferro e, con buona approssimazione, il diametro dei ferri.

Lo strumento sfrutta il principio delle correnti passive, con i seguenti vantaggi:

- Non vi sono condizionamenti dovuti agli effetti ionici dell'umidità nel calcestruzzo stagionato e interferenze dovute alla presenza di aggregati magnetici;
- Le variazioni termiche non influiscono sul normale funzionamento;
- Le interferenze elettriche non creano disturbo;
- Precisione delle misure;
- Ripetibilità dei risultati.

In figura 2.6 è riportato il pachometro commercializzato dalla Protoval; si tratta di uno strumento compatto e maneggevole.



**Figura 2.6** Elcometer Protoval 3312 Model B Concrete Covermeter.

Gli strumenti commerciali, disponibili sul mercato, ancora non garantiscono un grado di accuratezza e le prestazioni richieste nel settore dell'ingegneria civile. Le informazioni fornite riguardano la distanza della barra (spessore del *copriferro*), il suo diametro, eventualmente la presenza di un difetto. Tali informazioni sono generalmente ottenute per mezzo di calibrature appropriate dello strumento in uso, condotte su un insieme di modelli noti a priori. Viene stabilita la taratura dello strumento per analizzare una determinata configurazione dell'armatura metallica, quindi le

condizioni in cui opera l'attrezzatura sono caratteristiche di una specifica geometria del sistema, in pratica, non è detto che le condizioni ipotizzate siano effettivamente verificate.

Infine anche i sistemi di diagnostica a microonde vengono utilizzati con l'obiettivo di identificare posizione e dimensione delle barre costituenti la struttura metallica di rinforzo.

Le tecniche di scansione a microonde sono in grado di monitorare la distribuzione della corrente indotta sulle barre dall'onda elettromagnetica incidente sulla superficie delle barre. La risoluzione è dipendente dalla frequenza dell'onda incidente ed è tanto più elevata quanto più è elevata la frequenza. D'altra parte, però, la presenza del cemento armato produce un'attenuazione dell'onda incidente che cresce con la frequenza. Esiste pertanto un ambito di frequenze che rappresentano un buon compromesso tra risoluzione e capacità di penetrazione.

In vista della simulazione numerica e, quindi, della possibilità di ottenere informazioni diagnostiche quantitative, l'ispezione a microonde si presenta più complessa poiché va opportunamente identificato il legame costitutivo elettromagnetico delle barre, vi è inoltre l'incertezza dovuta alla relazione costitutiva elettromagnetica del cemento.

Per superare le limitazioni evidenziate, si è sviluppato un metodo che fornisce le tecniche e gli strumenti adeguati a rappresentare i ferri nel calcestruzzo a partire da un modello numerico valido, qualunque siano i fattori coinvolti.

## ***2.4 Il metodo proposto: impiego di sonde a impedenza***

Le risorse di calcolo oggi a disposizione consentono di risolvere problemi impensabili fino a qualche anno fa. Nell'ambito della diagnostica elettromagnetica dei materiali conduttori, ciò ha reso possibile lo sviluppo di sofisticati algoritmi di inversione per determinare le caratteristiche elettromagnetiche di un mezzo materiale quali la conducibilità elettrica, la permeabilità magnetica etc. o, partendo da queste ultime, informazioni sulla posizione dell'armatura metallica, sulla presenza di difetti, sullo stato tensionale, etc.

Ad oggi, i metodi per la soluzione del problema diretto (predizione delle misure in corrispondenza di materiali e sorgenti di eccitazione assegnati) hanno raggiunto ottimi livelli di accuratezza ad un contenuto costo computazionale. Ciò è indispensabile sia per la realizzazione di metodi ed algoritmi di inversione quantitativi, che per la progettazione assistita dal calcolatore di sonde e sistemi per la diagnostica elettromagnetica.

Il metodo di diagnosi, sviluppato nel seguente progetto, si propone di fornire una tecnica per la formazione di immagini della struttura metallica interna al calcestruzzo che sia indipendente dai diagrammi di taratura. L'idea è quella di ottenere informazioni diagnostiche quantitative sull'interazione sonda-barra, a partire da una simulazione numerica che sfrutta un sofisticato algoritmo per la trattazione dei dati. L'obiettivo è realizzare un metodo adeguato e pratico per applicazioni sul campo.

Il sistema analizzato è costituito da una sonda, in questo caso si tratta della semplice bobina, e dalla barra di materiale metallico.

Le correnti indotte nella barra alterano il valore dell'impedenza equivalente della bobina inducente. Tale alterazione è direttamente

legata alla posizione e alle dimensioni delle barre della struttura metallica.

Lo sviluppo di un sistema quantitativo per la formazione di immagini richiede un modello numerico adeguato. La generazione del modello dell'interazione tra la sonda e la barra è una questione complessa principalmente per due ragioni: la caratteristica non lineare del materiale ferromagnetico e l'effetto pelle del campo indotto nelle barre di ferro.

La presenza di una caratteristica non lineare, eventualmente variabile con la frequenza, potrebbe spingere alla scelta di un modello numerico non lineare complicando notevolmente il sistema considerato. La questione della non linearità può essere superata agevolmente, osservando che, nelle analisi condotte, la densità del flusso magnetico prodotto dalla bobina inducente è sufficientemente bassa e quindi gli effetti non lineari possono essere trascurati. La verifica sperimentale dell'approssimazione fatta viene affrontata nel capitolo 4.

Per illustrare in termini specifici la distribuzione delle correnti indotte nel mezzo conduttore e le conseguenze dell'effetto pelle bisogna ricorrere alle leggi di diffusione magnetica.

La densità di corrente  $J$ , così come l'intensità del campo magnetico, è incognita, dalla legge di Ampere si ha:

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

La legge di Ohm indica la proporzionalità di  $J$  con l'intensità del campo elettrico:

$$J = \sigma E \quad (2)$$

Il campo elettrico indotto in accordo con la legge di Faraday:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial \mu H}{\partial t} \quad (3)$$

Si ipotizza che il conduttore abbia una conducibilità  $\sigma$  e una permeabilità  $\mu$  uniformi. Nel caso di magnetizzazione lineare, la legge di continuità del flusso magnetico è:

$$\nabla \cdot \mu H = 0 \quad (4)$$

Nell'approssimazione magneto-quasi-statica, la densità di corrente  $J$  è solenoidale come si osserva considerando la divergenza della legge di Ampere:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (5)$$

Ricavando  $E$  dalla legge di Ohm,(2), e sostituendo nella (3) otteniamo in un'unica equazione il legame tra l'induzione magnetica e la densità di corrente indotta:

$$\nabla \times \left( \frac{J}{\sigma} \right) = -\frac{\partial \mu H}{\partial t} \quad (6)$$

La densità di corrente viene poi eliminata da questa espressione utilizzando la legge di Ampere, (1). Il risultato è un'espressione contenente solo l'intensità del campo magnetico  $H$ :

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times H}{\sigma} \right) = -\frac{\partial \mu H}{\partial t} \quad (7)$$

L'espressione può essere ulteriormente semplificata nell'ipotesi in cui  $\sigma$  e  $\mu$  sono costanti, perché si possono portare fuori degli operatori. Inoltre, si osserva dalla (4) che  $H$  è solenoidale e l'uso dell'identità vettoriale<sup>1</sup> porta all'equazione:

$$\frac{1}{\sigma\mu} \nabla^2 H = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (8)$$

In ogni punto del materiale avente conducibilità e permeabilità uniforme, l'intensità del campo magnetico verifica questa equazione di diffusione. La distribuzione della densità di corrente si ricava dalla legge di Ampere, dopo aver trovato  $H$  risolvendo questa equazione con le condizioni al contorno adeguate.

Un'onda elettromagnetica sinusoidale che si propaga nel mezzo conduttore, lungo la direzione  $z$  è descritta dall'equazione :

$$\frac{1}{\mu\sigma} \frac{\partial^2 H_z}{\partial z^2} = \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (9)$$

L'ampiezza dell'onda si attenua lungo  $z$  secondo il coefficiente di attenuazione  $\alpha = \sqrt{\omega\mu\sigma/2}$  provocando una distribuzione delle correnti indotte non uniforme all'interno dell'oggetto in esame. Lo spessore dello strato del metallo attraversato dalle correnti indotte diminuisce all'aumentare della profondità. In pratica le correnti indotte si

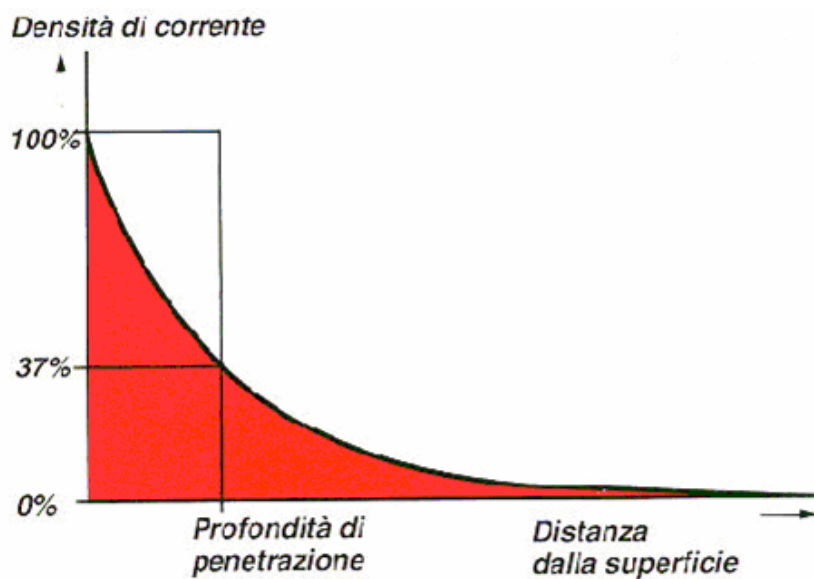
---

<sup>1</sup>  $\nabla \times \nabla \times H = \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H$



concentrano nello strato superficiale del materiale e questo fenomeno viene indicato come effetto pelle.

La figura 2.7 riporta le variazioni dell'intensità delle correnti indotte in funzione della profondità sotto la superficie del conduttore. La profondità, alla quale la densità delle correnti indotte è  $1/e$  (37% o 8.7db) del valore in superficie è definita come profondità di penetrazione standard (fig 2.7).



**Figure 2.7** Variazione della densità di corrente all'aumentare della profondità dalla superficie

La profondità di penetrazione standard è data dalla seguente formula:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\sigma\mu}} \quad (10)$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità espressa in S/m,  $\mu$  è la permeabilità magnetica espressa H/m e  $f$  è la frequenza espressa in Hz.

Dall'espressione di  $\delta$  segue che la profondità di penetrazione diminuisce in seguito all'aumento di uno dei seguenti fattori:

1. frequenza;
2. conducibilità elettrica del materiale;
3. permeabilità magnetica.

L'influenza dell'ultimo fattore è rilevante. La profondità di penetrazione nei materiali ferromagnetici è molto piccola per valori di frequenze intermedie.

Come conseguenza dell'effetto pelle, il modello numerico, che verrà descritto più approfonditamente nel prossimo capitolo, si fonda sull'approssimazione delle barre piene di ferro con un tondino di spessore determinato. In questo modo, sono presi in considerazione solo gli strati più esterni delle barre, dove il campo si porta a zero lungo spessori dell'ordine di grandezza della profondità di penetrazione, oltre tale profondità il mezzo conduttore non è interessato dal flusso delle correnti indotte.

## Capitolo 3

### DESCRIZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL CODICE DI CALCOLO AGLI ELEMENTI FINITI

#### 3.1 Generalità

L'approccio numerico applicato ai problemi di elettromagnetismo consiste, genericamente, in una procedura detta di *discretizzazione* che consente di riformulare il problema di partenza, descritto dal sistema di equazioni differenziali di Maxwell in termini delle grandezze del campo  $\rho$ ,  $J$ ,  $E$ ,  $H$ ,  $B$  e  $D$ , in un problema algebrico di dimensione finita.

La soluzione si ottiene utilizzando diversi metodi di discretizzazione, quali il metodo delle differenze finite, le differenze finite nel dominio del tempo, il metodo degli elementi finiti, edge elements o il metodo di integrazione finita.

In particolare, la caratteristica principale del metodo agli elementi finiti è la discretizzazione del dominio continuo di partenza in un dominio discreto (*mesh*) mediante l'uso di primitive (*elementi finiti*) di semplice forma (triangoli e quadrilateri per domini 2D, esaedri e tetraedri per domini 3D). Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è assunta essere espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette *funzioni di base* o *funzioni di forma* (shape functions).

Il risultato è una discretizzazione con una mesh che non è uniforme in tutto il dominio, poiché si infittisce nelle regioni critiche del dominio che presentano contorni frastagliati, disomogeneità, spigoli o quant'altro, e si dirada altrove.

Nelle regioni di maggiore variabilità della soluzione si andrà ad infittire il numero di triangoli e ciò consentirà di ottenere una migliore approssimazione della soluzione.

## **3.2 Il modello numerico**

### **3.2.1 Il problema non lineare**

La caratteristica non lineare dei materiali ferromagnetici, potrebbe spingere alla scelta di un modello non lineare non facilmente formulabile.

Le analisi condotte, e descritte nel capitolo 4, dimostrano che la densità del flusso magnetico, prodotto dalla bobina inducente, è bassa. Ciò consente di trascurare gli effetti non lineari. In seguito a quest'osservazione la trattazione del problema può essere affrontata, con buona approssimazione, nella sua forma lineare.

### **3.2.2 Formulazione del problema lineare**

Il modello numerico considerato in questo lavoro, è basato su una formulazione integrale che esegue la discretizzazione solo dello strato più esterno (avente spessore di ordine di grandezza pari a quello della

profondità di penetrazione) delle barre. Per frequenze alle quali la profondità di penetrazione è minore del diametro delle barre si può adottare l'ipotesi esemplificativa di sostituire alla barra un tondino cavo di spessore fissato pari a  $\Delta$ , consentendo di ridurre considerevolmente il numero di elementi per la mesh, le incognite e il costo computazionale dell'algoritmo.

La formulazione integrale, descritta nei paragrafi successivi, richiede la discretizzazione delle sole regioni conduttive e/o magnetiche quindi le barre in ferro e il nucleo magnetico della sonda.

La descrizione del problema delle correnti indotte avviene tramite le equazioni di Maxwell nel caso quasi stazionario.

Per ricavare il modello matematico delle correnti indotte dalle equazioni di Maxwell si trascura l'effetto delle correnti di diffusione  $\partial D/\partial t$ .

Questa approssimazione è consentita perché in un conduttore metallico, la corrente di diffusione  $\partial(\varepsilon E)/\partial t$  è sempre trascurabile rispetto alle correnti di conduzione  $\sigma E$  nei tempi di osservazione, per esempio, il periodo  $T$  dei problemi a regime è maggiore del tempo di rilassamento della carica elettrica  $\tau_r = \varepsilon/\sigma$ . Per trascurare l'influenza della corrente di diffusione nella regione di non conduzione, la lunghezza caratteristica del problema deve essere inferiore alla lunghezza d'onda e l'energia immagazzinata dal campo elettrico deve essere una frazione trascurabile di quella totale.

Indicando con  $V$  il volume di interesse, nella regione di conduzione  $V_C$ , il modello matematico è definito dalle seguenti equazioni di campo:

$$\nabla \times H = J, \quad \text{in } V_C \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \text{in } V_C \quad (2)$$

e dalle proprietà costitutive del materiale

$$B = B(H), \quad \text{in } V \quad (3)$$

$$J = \sigma E + J_S, \quad \text{in } V_C \quad (4)$$

dove  $J_S$  rappresenta il termine sorgente.

Nella regione esterna  $V - V_C$  non conduttiva, le equazioni di campo sono quelle del problema magnetostatico:

$$\nabla \times H = J_S, \quad \text{in } V - V_C \quad (5)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad \text{in } V - V_C \quad (6)$$

e l'equazione costitutiva è

$$B = B(H), \quad \text{in } V - V_C \quad (7)$$

Nell'approssimazione magneto-quasi-statica, la densità di corrente  $J$  è solenoidale ( $\nabla \cdot J = 0$ ), ciò consente di introdurre il potenziale vettore  $T$  nel modo seguente:

$$J = \nabla \times T \quad (8)$$

Analogamente dalla (6) segue la definizione del potenziale vettore magnetico  $A$ :

$$B = \nabla \times A \quad (9)$$

Da questa definizione e dalla legge di Faraday

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (10)$$

si deriva che la somma del campo elettrico e della derivata temporale del potenziale vettore magnetico è irrotazionale:

$$\nabla \times (E + j\omega A) = 0 \quad (11)$$

La somma può essere espressa come il gradiente di un potenziale elettrico scalare  $\varphi$ . In genere, al fine di operare con matrici simmetriche nella formulazione numerica, si fa riferimento al potenziale scalare  $\Phi$  le cui dimensioni sono quelle di un flusso magnetico, che è l'integrale nel tempo del potenziale elettrico scalare  $\varphi$ . In seguito a queste considerazioni, il campo elettrico sarà espresso nel modo seguente:

$$E = -j\omega A - \nabla\Phi \quad (12)$$

e ricavando J dalla relazione  $J = \sigma E$  si ha:

$$J = \sigma(-j\omega A - \nabla\Phi) \quad (13)$$

La legge di Ampere e la relazione costitutiva  $B = \mu_0 H$  in  $\mathbb{R}^3$ , permettono di rappresentare A in termini di una densità di corrente sinusoidale:

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \frac{J(r')}{|r - r'|} dV' \quad (14)$$

da cui

$$J = -j\omega \left[ \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \frac{J}{|r-r'|} dV' - \nabla\Phi \right] \quad (15)$$

### **3.3 Soluzione del problema lineare delle correnti indotte con il metodo degli elementi finiti**

In questa formulazione, le incognite considerate sono il potenziale vettore  $\mathbf{T}$  ( $J = \nabla \times T$ ), definito nella regione di conduzione  $V_c$  (dove la densità di corrente  $\mathbf{J}$  è data dal suo rotore) e il vettore di magnetizzazione  $\mathbf{M}$ , definito nella regione magnetica  $V_f$ , che in questo caso coincide con  $V_c$ . La densità di corrente viene espressa in termini di funzioni di base a elementi vettoriali (*edge element shape functions*)  $N_k$ :

$$J(r) = \sum_{k=1}^n I_k N_k(r) \quad (16)$$

Si assume il vettore di magnetizzazione  $\mathbf{M}$  uniforme in ogni elemento finito all'interno del ferro, quindi può essere espresso in termini di funzioni a impulsi (*pulse function*)  $P_k$  nel modo seguente:

$$M(r) = \sum_1^m M_k P_k(r) \quad (17)$$

Ricordando le equazioni costitutive elettrica ( $J = \sigma E$ ) e magnetica ( $M = (\mu_r - 1) / \mu_r \mu_0 B$ ) si ottiene il modello numerico:



$$\int_{V_m} \mathbf{P}_k \cdot [\mathbf{M} - k\mathbf{B}] dV = 0, \forall k \quad (18)$$

$$\int_{V_c} \nabla \times \mathbf{N}_k \cdot \left[ \frac{\mathbf{J}}{\sigma} + j\omega\mathbf{A} \right] dV = 0, \forall k \quad (19)$$

Da cui segue il sistema algebrico lineare:

$$(\underline{\underline{R}} + j\omega\underline{\underline{L}})\underline{\underline{I}} + j\omega\underline{\underline{F}}\underline{\underline{M}} = \underline{\underline{U}} \quad (20)$$

$$(k^{-1}\underline{\underline{D}} - \underline{\underline{E}})\underline{\underline{M}} - \underline{\underline{F}}^T \underline{\underline{I}} = \underline{\underline{W}} \quad (21)$$

dove  $k = (\mu_r - 1) / \mu_0 \mu_r$ ,  $\underline{\underline{I}}$  è il vettore colonna dei coefficienti di espansione complessi della densità di corrente  $\mathbf{J}$  in funzione delle funzioni base  $(\nabla \times \mathbf{N}_k)$ ,  $\underline{\underline{M}}$  è il vettore colonna dei coefficienti di espansione complessi della magnetizzazione funzione delle funzioni base  $\mathbf{P}_k$ , e

$$R_{ij} = \int_{V_c} \nabla \times \mathbf{N}_i \cdot \sigma^{-1} \nabla \times \mathbf{N}_j dV \quad (22)$$

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \int_{V_c} \frac{\nabla \times \mathbf{N}_i(\mathbf{r}) \cdot \nabla \times \mathbf{N}_j(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV dV' \quad (23)$$

$$E_{ij} = D_{ij} - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\partial V_{f,i}} \int_{\partial V_{f,j}} \frac{P_{n,i}(\mathbf{r}) P_{n,j}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dS dS' \quad (24)$$

$$F_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \int_{V_f} \frac{\nabla \times \mathbf{N}_i(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{P}_j(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV dV' \quad (25)$$

$$U_j = -j\omega \int_{V_c} \nabla \times \mathbf{N}_j \cdot \mathbf{A}^0 dV \quad (26)$$

$$D_{ij} = \int_{V_f} \mathbf{P}_i \cdot \mathbf{P}_j dV \quad (27)$$

$$W_j = \int_{V_f} \mathbf{P}_j \cdot \mathbf{B}^0 dV, \quad (28)$$

$A^0$  e  $B^0$  sono rispettivamente il potenziale vettore e la densità del flusso magnetico prodotti dalle sorgenti,  $V_c$  e  $V_f$  sono rispettivamente i domini conduttivo e magnetico e  $V_{fj}$  è il j-esimo elemento della mesh, utilizzata per discretizzare il dominio magnetico  $V_f$ .

Dopo alcune manipolazioni, si può dimostrare che la variazione d'impedenza dovuta alla presenza delle barre può essere espressa nel modo seguente:

$$\delta Z = \frac{j\omega}{\bar{i}^2} \left[ \int_{V_c} \mathbf{J} \cdot \mathbf{A}^0 dV + \int_{V_f} \mathbf{M} \cdot \mathbf{B}^0 dV \right] \quad (29)$$

dove  $\bar{i}$  rappresenta la corrente che fluisce nella bobina induttiva.

### **3.4 Il problema inverso**

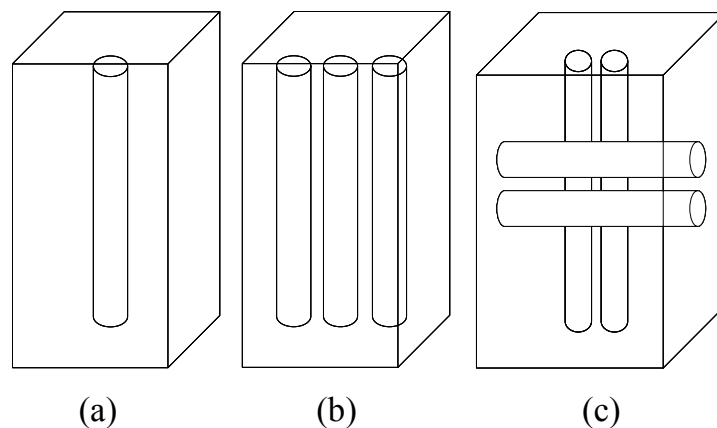
L'individuazione della posizione e la ricostruzione della geometria della struttura metallica nel cemento armato, a partire dal segnale rilevato rientra nell'ambito dei problemi inversi.

Il problema inverso è, tipicamente, riformulato in termini di minimizzazione di un opportuno funzionale di errore e gli associati algoritmi di minimizzazione richiedono la soluzione di un numero di problemi diretti che cresce molto rapidamente (più che linearmente) con il numero di parametri incogniti.

In questo caso specifico, caratteristica fondamentale del metodo d'inversione è la capacità di essere indipendente dalla particolare configurazione geometrica.

L'innovazione del metodo sta proprio nel fornire una tecnica utile qualunque sia la geometria delle barre dell'armatura (Fig. 3.1) e che soprattutto possa essere applicata nei casi in cui le configurazioni interne al calcestruzzo non siano note a priori.

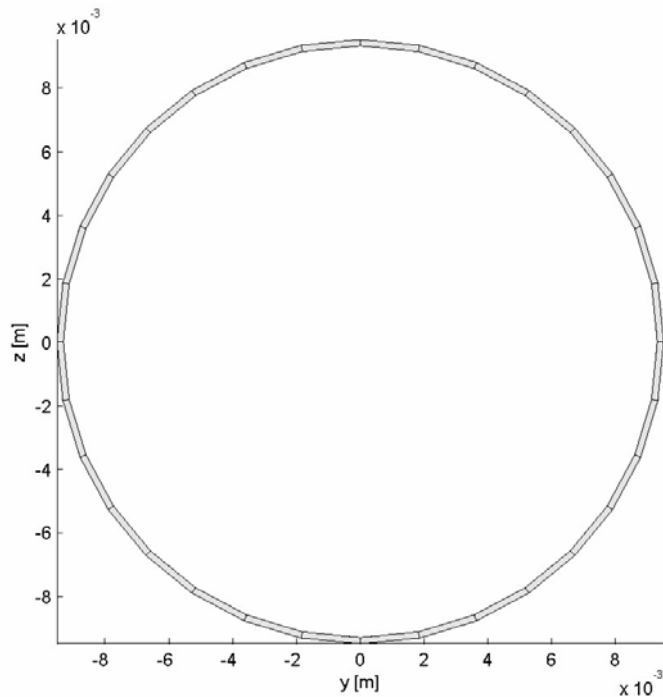
Il codice di calcolo utilizzato per le simulazioni è il risultato di un lavoro condotto in collaborazione con l'università di Cassino. Tale codice è in ambiente Fortran e sfrutta un'interfaccia in Matlab.



**Figura 3.1** Tre possibili configurazioni di complessità crescente: barra singola(a), sistema di più barre(b), file di barre perpendicolari(c).

Parte di questo lavoro di tesi è stato incentrato sulla validazione e ottimizzazione del codice operando esclusivamente con Matlab.

Al fine di ridurre il costo computazionale dell'algoritmo di calcolo e i tempi di esecuzione delle simulazioni, si ipotizzano le barre di ferro cave, assimilabili a tondini di spessore predefinito (figura 3.2).



**Figura 3.2** Sezione trasversale del tondino

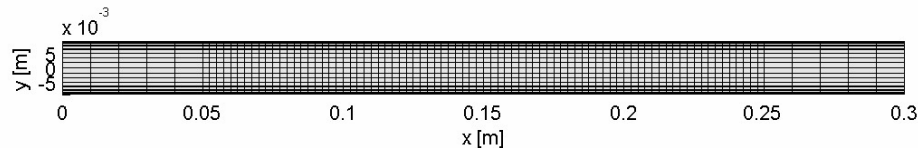
Questa ipotesi è confermata dall'effetto pelle nei conduttori di ferro che comporta, come conseguenza, la concentrazione delle correnti indotte negli strati superficiali delle barre.

La procedura di simulazione per l'ECT prevede come primo passo l'impostazione dei parametri che influenzano il sistema quali:

- a. frequenza
- b. conducibilità elettrica delle barre
- c. permeabilità magnetica.

In seguito si procede alla realizzazione della mesh del tondino. Lungo la direzione longitudinale, la discretizzazione viene realizzata in metà barra, l'altra metà viene discretizzata per simmetria. La metà del tondino considerata è suddivisa, dal centro verso l'estremità, in due sezioni di lunghezza  $h1_t$  e  $h2_t$ ; per ognuna delle due sezioni viene

stabilito il numero di elementi, rispettivamente  $n_{h1}$  e  $n_{h2}$  che andranno a realizzare la mesh del tondino. Il numero di elementi della mesh del tondino è maggior nel centro della barra, si va riducendo verso l'estremità.



**Figura 3.3** Mesh del tondino: sezione longitudinale

Nella direzione trasversale, la discretizzazione viene effettuata su un quarto della barra, si indicano il numero di elementi in cui si vuole suddividere il tondino lungo la circonferenza.

Nel file .m di Matlab, utilizzato per l'impostazione dei dati, vengono indicati i parametri geometrici del sistema analizzato riguardanti sia i tondini che la bobina (coil).

Per quel che riguarda i tondini, i parametri per stabilire la geometria della struttura metallica sono: il diametro esterno, lo spessore del tondino, la distanza tra due barre parallele, la distanza tra file di barre che si incrociano perpendicolarmente tra di loro.

Il codice prevede la possibilità di compiere simulazioni con una o più bobine di forma sia circolare sia rettangolare. I fattori fisici e geometrici delle bobine riguardano: la distanza tra *coils* (nel caso si considerino array di bobine), il diametro interno della bobina, l'altezza, il numero di avvolgimenti, lo spessore radiale, la corrente.

Anche per la bobina si esegue una opportuna discretizzazione indicando il numero di elementi nella direzione radiale e lungo le direzioni spaziali  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Nel capitolo successivo viene affrontata una configurazione efficiente del sistema barra-coil, confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni con quelli delle misure.

## Capitolo 4

### RISULTATI SPERIMENTALI E VALIDAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

#### *4.1 Introduzione*

Il test alle correnti indotte viene applicato per rilevare l'interazione che si stabilisce tra le barre di ferro, tipiche dell'armatura metallica interna al cemento armato, e la bobina che costituisce la nostra sonda. La bobina è l'induttore di corrente e genera le correnti all'interno della barra che è il conduttore. In presenza del ferro, l'impedenza dalla bobina varia ed è proprio questa variazione d'impedenza che vogliamo rilevare in modo da usare il metodo delle correnti indotte per lo scopo desiderato.

Il punto di partenza per l'analisi del sistema è la validazione del codice di calcolo descritto nel capitolo precedente. Come già detto la procedura di simulazione comprende la scelta dei parametri elettrici e magnetici ( $f$ ,  $\sigma$ ,  $\mu$ ), la definizione della geometria della configurazione tondino e coil, la generazione di una discretizzazione (mesh) efficiente.

La simulazione fornisce come risultato la variazione d'impedenza  $\Delta Z$  della bobina in aria e in presenza della barra di ferro. Tali risultati vengono confrontati con la variazione d'impedenza rilevata tramite il misuratore d'impedenza.

## 4.2 Apparato sperimentale

### 4.2.1 Analizzatore d'impedenza HP-4192A LF

L'impedenza della bobina è stata misurata con il misuratore d'impedenza della Hewlett-Packard modello 4192A (figura 4.1).



**Figura 4.1** Impedenzimetro HP Model 4192A LF

L'analizzatore d'impedenza HP 4192A LF presenta due display A e B, dove vengono visualizzate le misure dei parametri selezionati con una risoluzione di 4 cifre e la specifica unità di misura. Un terzo display visualizza la frequenza. Il range di frequenze dello strumento è 5Hz-13MHz. Nella modalità NORMAL il 4192A produce approssimativamente quattro misure al secondo. Esiste anche la possibilità di operare nella modalità AVERAGE



(approssimativamente una misura al secondo) per ottenere misure ad alta risoluzione e ripetibili, e la modalità HIGH SPEED che effettua dieci misure al secondo.

Nelle misure d'impedenza il 4192A può fornire undici parametri d'impedenza – valore assoluto dell'impedenza ( $|Z|$ ), il valore assoluto dell'ammettenza ( $|Y|$ ), l'angolo di fase  $\theta$ , la resistenza (R), la reattanza (X), la conduttanza (G), la suscettanza (B), l'induttanza (L), la capacità (C), il fattore di dissipazione (D), il fattore di qualità (Q). Il range di misura di  $|Z|/R/X$  è 0.1 m $\Omega$ -1.2999 M $\Omega$ ; per  $|Y|/G/B$  è 1 ns\_12.999 s;  $\theta$  va da  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ ; per L è 0.01 mH-1kH; C 0.1pF-100mF; per  $D$  0.0001-19.999 e per Q 0.1-1999.9. Tutte le misure sono ottenute con una precisione dello 0.1% e una risoluzione di 4 cifre.

#### 4.2.2 Bobina d'induzione

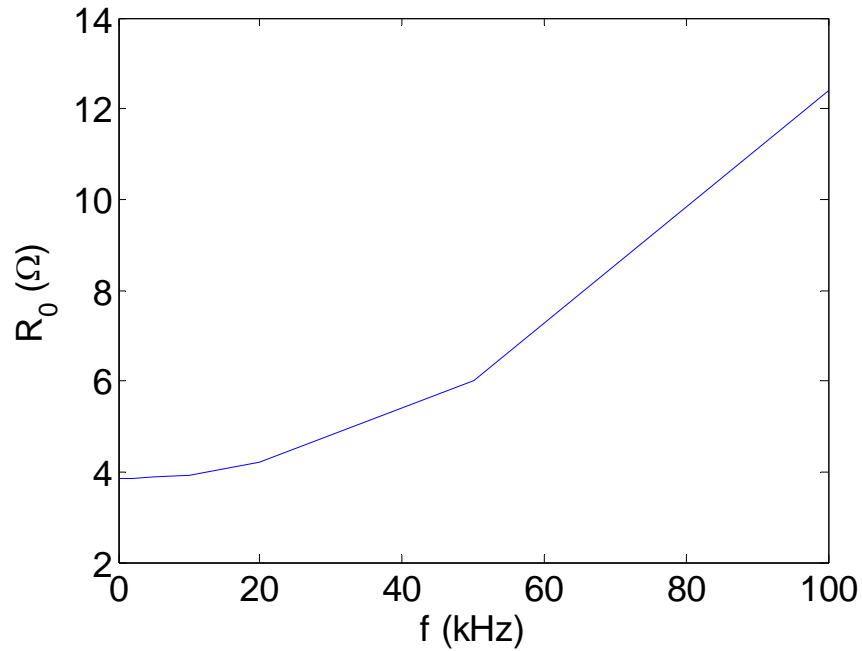
La bobina utilizzata per condurre il test ha le seguenti dimensioni:

- diametro medio 36.25 mm;
- altezza 5mm;
- numero di avvolgimenti 128.

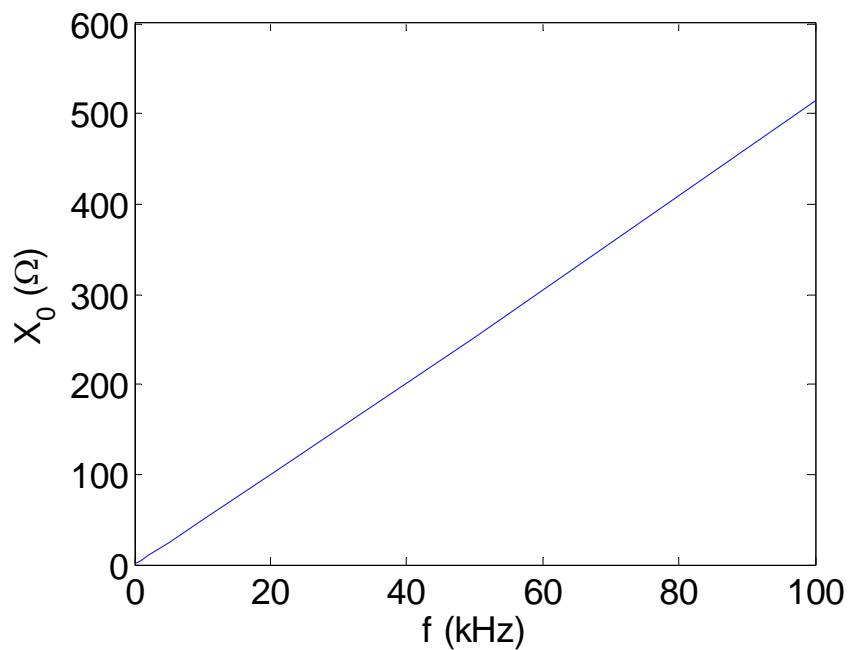
L'impedenza della bobina in aria, è stata misurata con l'impedenzometro alle frequenze di eccitazione comprese tra 100Hz fino a 100KHz. La misura fornisce la variazione dell'impedenza con la frequenza nella sua parte reale R e immaginaria  $X_L$ , dove R e  $X_L$  sono rispettivamente la resistenza equivalente e la reattanza che compaiono in Z nella seguente forma:

$$Z = R + iX_L$$

La variazione della parte reale ed immaginaria dell'impedenza in funzione della frequenza misurata con l'impedenzometro è riportata nelle figure 4.2 e 4.3.



**Figura 4.2** Misura della parte reale dell'impedenza con la frequenza



**Figura 4.3** Misura della parte immaginaria dell'impedenza con la frequenza

### **4.3 Barre di ferro: calcolo di $\sigma$ e $\mu$**

Le barre di ferro prese in esame per condurre il test hanno un diametro di circa 19 mm. L'incertezza nella misura del diametro dipende dalla presenza di scanalature sui ferri che rendono la superficie irregolare (figura 4.4)



**Figura 4.4** Le barre di ferro oggetto del test

Per portare a termine un confronto attendibile delle misure con le simulazioni numeriche, si è posta la necessità di misurare in modo esatto i parametri del materiale che influiscono sul metodo, in particolare sulla profondità di penetrazione e di conseguenza sulla scelta dello spessore del tondino. Questa osservazione ha condotto alla determinazione precisa della conducibilità elettrica  $\sigma$  delle barre e della loro permeabilità magnetica relativa  $\mu_r$ .

#### **4.3.1 Misura della conducibilità elettrica $\sigma$**

La conducibilità elettrica della barra di ferro in esame, è stata ricavata dalla misura della resistività elettrica  $\rho$ , tenuto conto della relazione:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Per la misura della resistività si è fatto ricorso al metodo della caduta di potenziale. La barra di ferro è stata inserita in un circuito di misura a 4 morsetti: 2 amperometrici (A e A') e 2 voltmetrici (V e V') (figura 4.5).

Sono stati utilizzati contatti voltmetrici interni a coltello che presentano una resistenza di contatto molto elevata (le resistenze di contatto sono inversamente proporzionali all'area di contatto); i contatti amperometrici usati, sono esterni del tipo a pressione ed hanno una superficie di contatto molto estesa in modo da ridurre al minimo le resistenze di contatto.



**Figura 4.5** Resistore a 4 morsetti

Facendo riferimento al circuito di misura in figura 4.6 si è scelta una resistenza campione  $R_c$  pari a  $1m\Omega$ . Misurando la caduta di potenziale ai suoi capi si è ottenuto il valore medio di  $V_c=30.68$  mV.

La caduta di potenziale ai capi della barra ( $R_x$ ) è risultata  $V_x=14.21$ mV.

Noti questi valori è stata calcolata la resistenza della barra dalla relazione:

$$R_x = R_c \cdot \frac{V_x}{V_c}$$

risultando  $R_x = 0.463\Omega$ .

La resistività è stata calcolata dalla relazione:

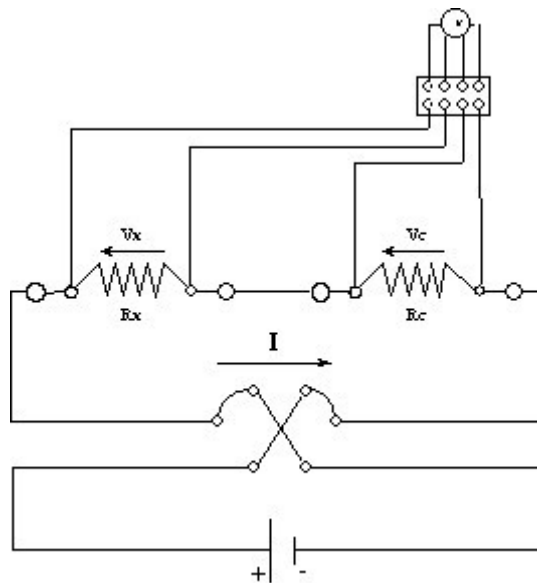
$$\rho = R_x \cdot \frac{S}{l_v}$$

osservando che  $l_v$  è la distanza tra i due contatti voltmetrici ed è pari a 42cm,  $S$ (sezione del conduttore) è data dalle seguenti relazioni:

$$S = \frac{V}{l_t}$$

$$V = \frac{P}{P_s}$$

Con  $V$  volume,  $l_t$  è la distanza tra i contatti amperometrici ed pari a 70.05 cm,  $P$  e  $P_s$  sono rispettivamente il peso e il peso specifico del ferro ( $P=1086.5$  g,  $P_s= 7,85\text{kg/dm}^3$ ).



**Figura 4.6** Schema elettrico del metodo della caduta di potenziale

Sostituendo i valori indicati si è giunti al calcolo di  $S$  e quindi di  $\rho$ :

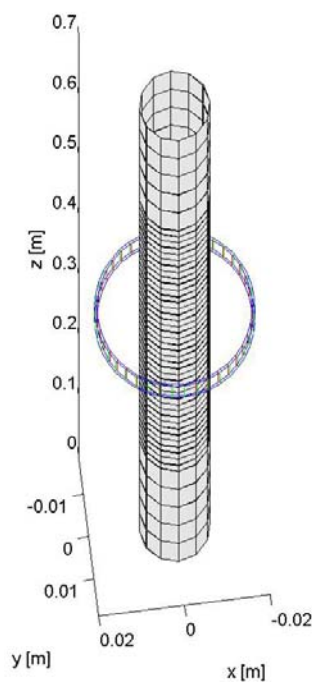
$$\rho = 0.217 \cdot 10^{-6}$$

Infine è stato ricavato il valore di conducibilità cercato:

$$\sigma = 4.61 \text{MS/m} .$$

### 4.3.2 Determinazione della permeabilità magnetica $\mu_r$

La permeabilità magnetica relativa  $\mu_r$  è stata determinata con un approccio best fit, ipotizzando  $\mu_r$  indipendente dalla frequenza. E' stato riprodotto in femlab il modello tondino-coil nella configurazione axialsimmetrica.



**Figura 4.7** Configurazione axialsimmetrica tondino-coil

Il modello femlab è realizzato applicando la modalità di corrente Axisymmetric Quasi-statics Azimuthal. La bobina è costruita sfruttando la simmetria assiale del problema. Il sistema è posizionato nel piano  $r$ - $z$  ed è disegnata solo la parte in cui  $r > 0$ , in modo tale che la geometria 3D viene ricostruita facendo ruotare intorno all'asse  $z$  la metà del piano.

La variabile dipendente, in questa modalità di funzionamento, è la componente azimuthale del potenziale vettore magnetico, che verifica la seguente relazione:

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)A_\varphi + \nabla \times (\mu^{-1}\nabla \times A_\varphi) = \frac{\sigma V_{loop}}{2\pi r}$$

Dove  $\omega$  è la frequenza angolare,  $\sigma$  la conducibilità,  $\mu$  la permeabilità,  $\varepsilon$  la costante dielettrica e  $V_{loop}$  è la tensione applicata alla bobina; all'esterno della bobina,  $\sigma$  è nulla.

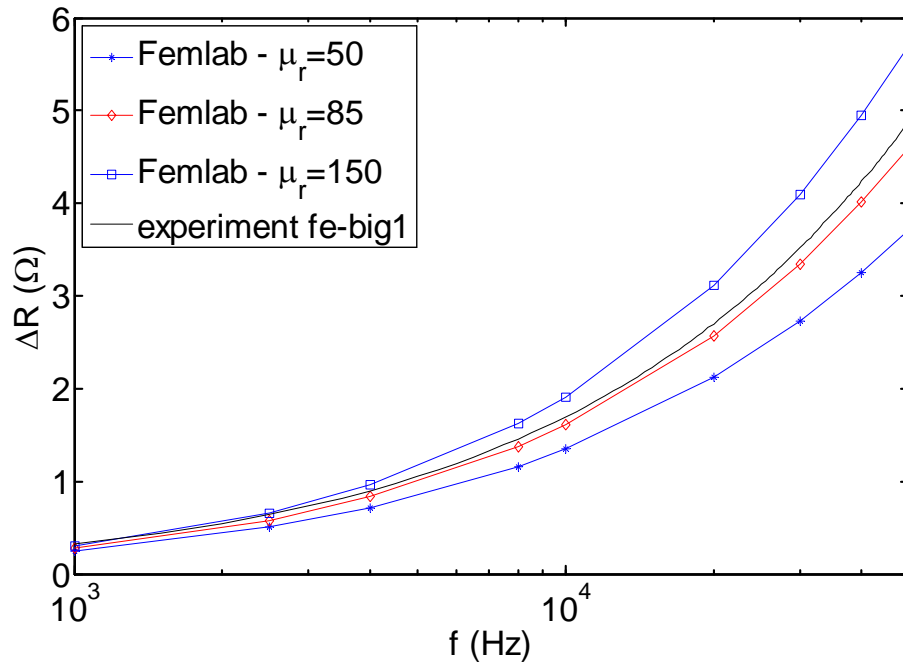
Le condizioni al contorno sono utilizzate per i contorni esterni e per gli assi di simmetria. Ai contorni esterni si usa l'isolamento magnetico, in altre parole si pone il potenziale vettore pari a zero e ciò corrisponde al flusso magnetico nullo. Dalla simmetria al contorno scaturisce una condizione di simmetria. Il potenziale magnetico è continuo attraverso il contorno interno tra gli avvolgimenti di rame e l'aria circostante.

La semplificazione della configurazione axialsimmetrica con la bobina che circonda la barra è stata utilizzata per confrontare, nel range di frequenze da 1kHz a 50 KHz, i valori d'impedenza misurati con quelli risultanti dalla simulazione per diversi valori di  $\mu_r$ .

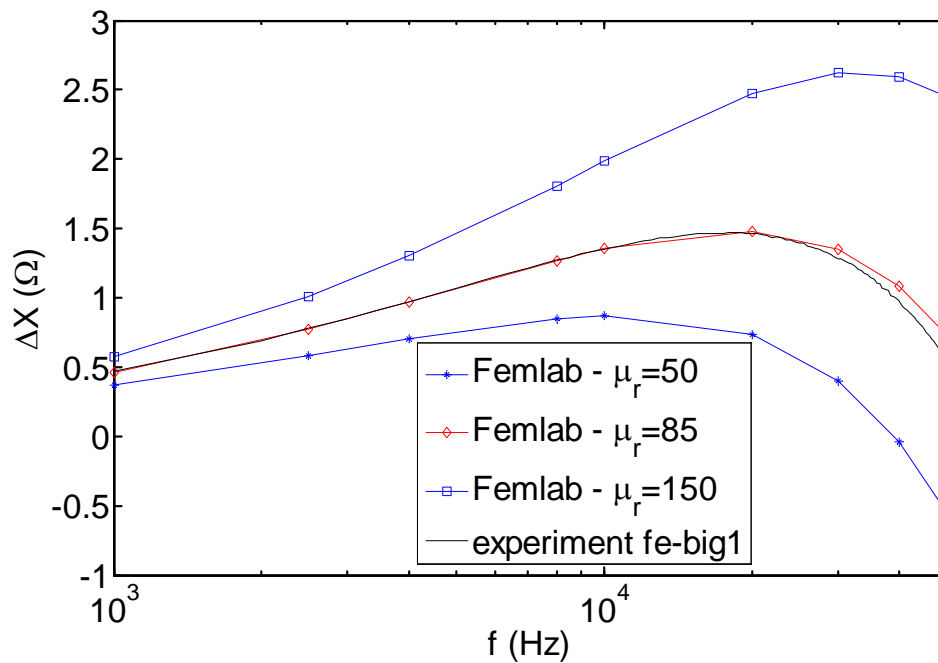
Come si può osservare, dalle figure 4.8 e 4.9, la migliore aderenza (*best fit*), sull'intero range di frequenza, si ottiene per  $\mu_r=85$ .

Il risultato ottenuto conferma le ipotesi fatte per semplificare il modello:

- a. gli effetti non lineari possono essere trascurati considerando il problema lineare;
- b.  $\mu_r$  resta costante alle frequenze di interesse.



**Figura 4.8** Variazione della parte reale dell'impedenza, a causa delle correnti indotte nelle barre, in funzione della frequenza. Curve di best fit per il calcolo della  $\mu_r$



**Figura 4.9** Variazione della parte immaginaria dell'impedenza, a causa delle correnti indotte nelle barre, in funzione della frequenza. Curve di best fit per il calcolo della  $\mu_r$



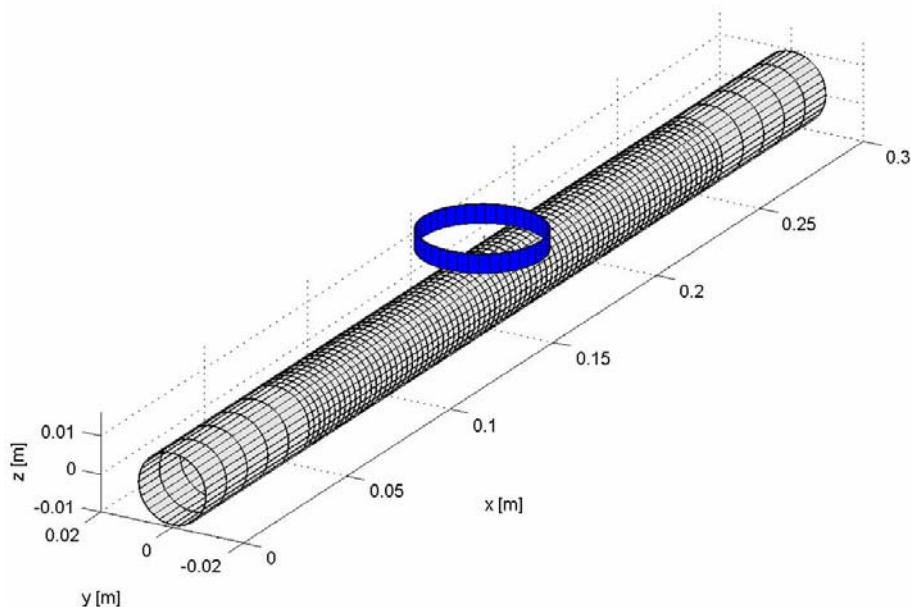
#### 4.4 Risultati delle simulazioni

In base alle informazioni rilevate, sono state condotte una serie di simulazioni al fine di convalidare il modello numerico esposto nel precedente capitolo.

Nel codice di calcolo, i valori di conducibilità elettrica e permeabilità magnetica relativa vengono fissati rispettivamente a  $4.61MS/m$  e 85, con una notevole semplificazione del problema che può essere considerato lineare.

Per quanto riguarda il costo computazionale dell'algoritmo, un'altra semplificazione si ottiene discretizzando lo strato esterno della barra dove sono principalmente concentrate le correnti indotte, piuttosto che l'intero spessore del ferro.

La mesh della configurazione tondino-coil, utilizzata nelle simulazioni è riportata in figura 4.10.



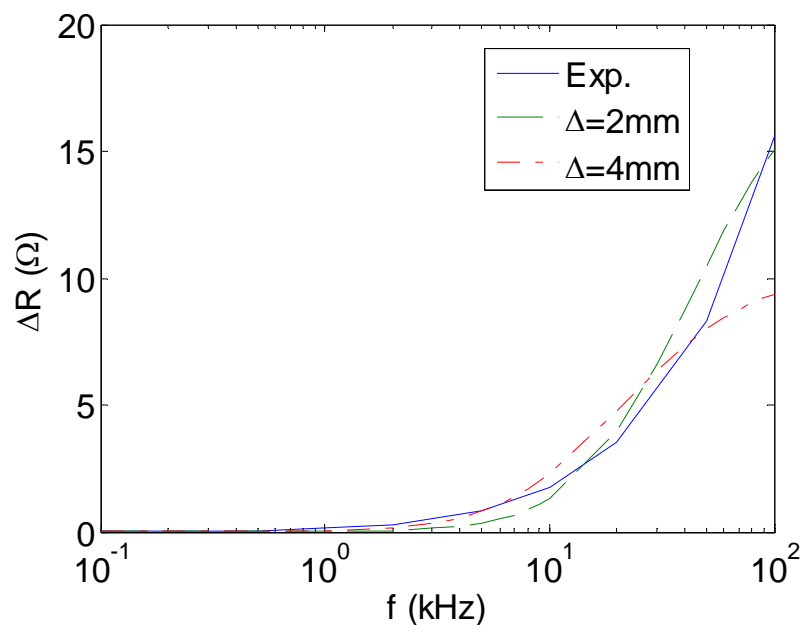
**Figura 4.10** Discretizzazione agli elementi finiti. Solo una shell sottile della barra è stata discretizzata

Proprio la determinazione dello spessore del tondino e quindi della *shell* da discretizzare costituisce una scelta critica del problema.

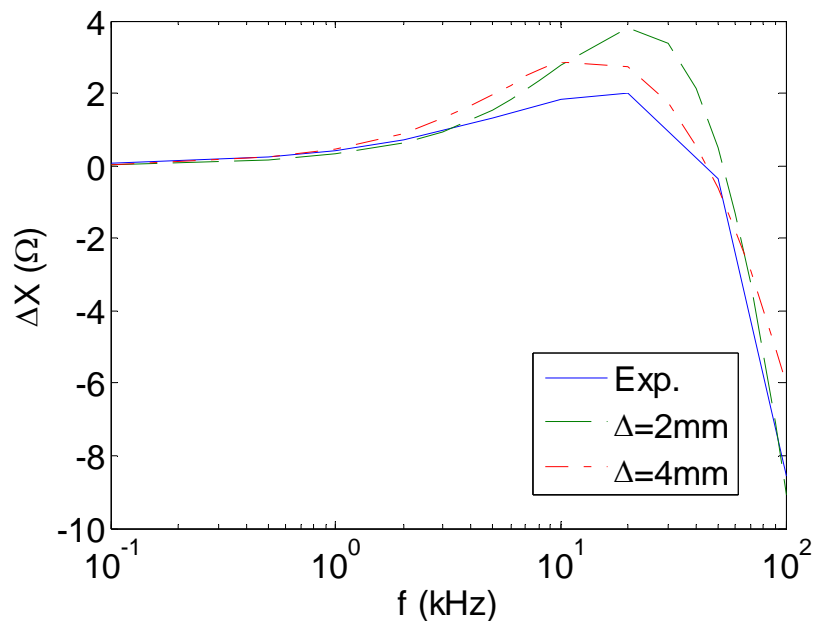
Sono stati considerati due differenti valori per lo spessore  $\Delta$  della *shell*: 2mm e 4mm.

Eseguendo le simulazioni con i due spessori del tondino si è visto che questi due valori sono più adeguati ognuno per range di frequenza differenti.

In particolare, come si osserva dalla figura 4.11 e 4.12,  $\Delta=2\text{mm}$  è più indicato per valori di frequenza più elevati;  $\Delta=4\text{mm}$ , invece, è più appropriato per frequenze più basse.



**Figura 4.11** Parte reale dell'impedenza: confronto tra i dati misurati (linea continua) e i risultati sperimentali, ottenuti per  $\Delta=2\text{mm}$  (linea verde tratteggiata) e per  $\Delta=4\text{mm}$  (linea rossa tratto-punto)



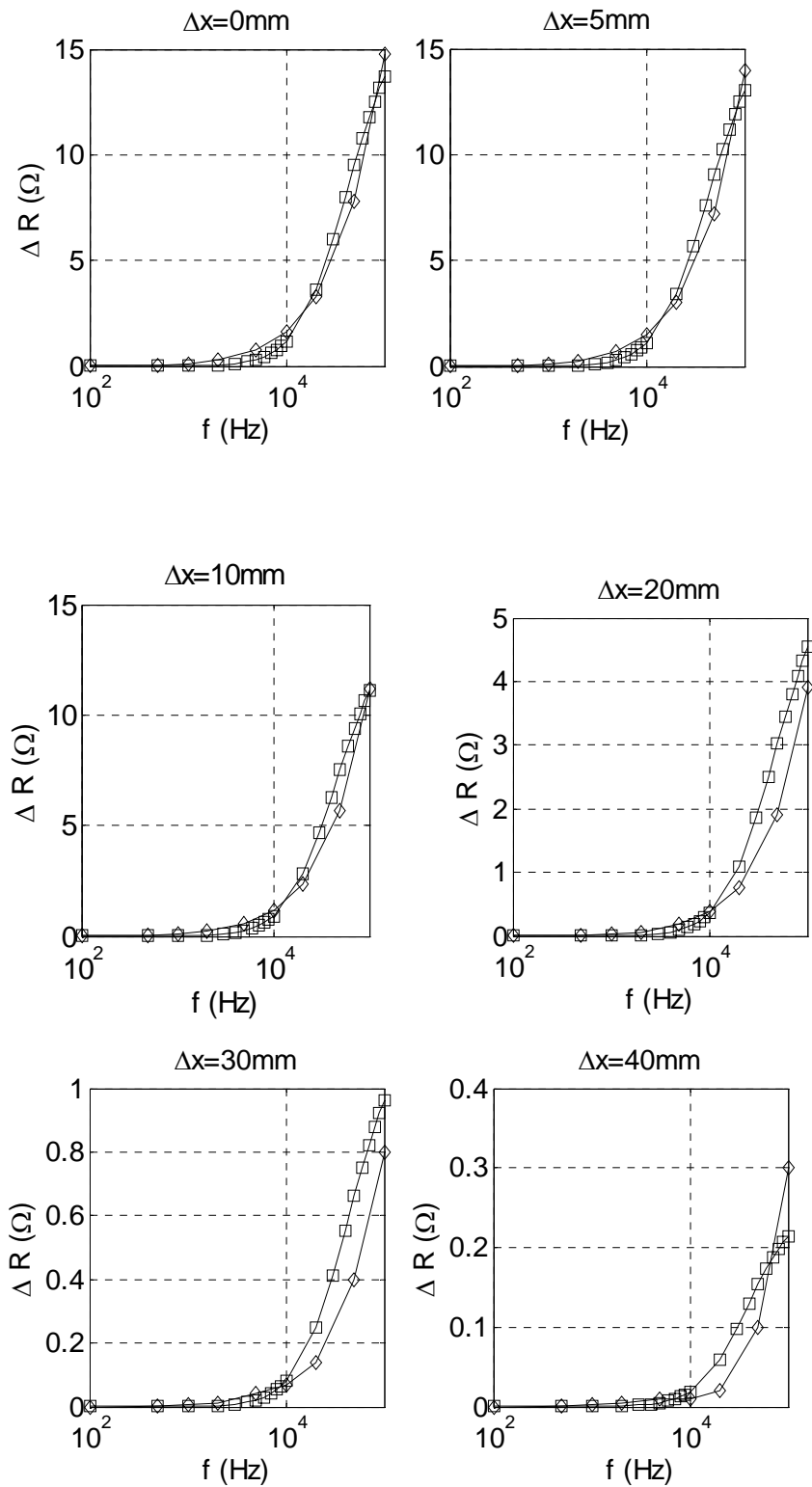
**Figura 4.12** Parte immaginaria dell'impedenza: confronto tra i dati misurati (linea continua) e i risultati sperimentali, ottenuti per  $\Delta=2\text{mm}$  (linea verde tratteggiata) e per  $\Delta=4\text{mm}$  (linea rossa tratto-punto)

Le figure 4.13 e 4.14 riportano il confronto tra il segnale misurato e quello calcolato in presenza della barra di ferro.

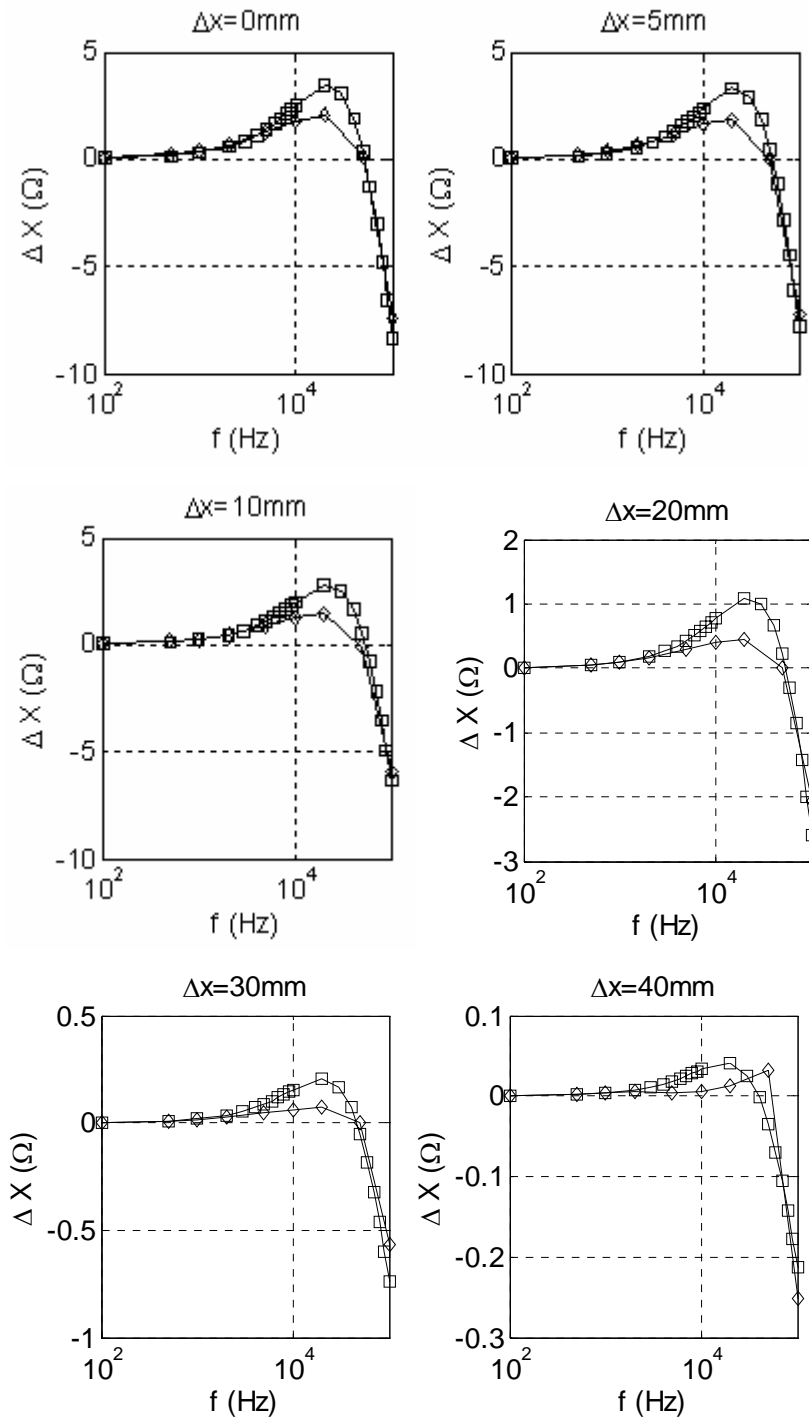
La simulazione fornisce, come risultato, la differenza tra il valore d'impedenza della bobina in aria e quello che viene ad assumere quando il coil è posto in prossimità della barra di ferro.

All'interno del codice c'è la possibilità di modificare la geometria del sistema impostando le dimensioni della barra e della bobina oltre ai parametri relativi alla loro posizione reciproca.

Le curve dei valori misurati sono ottenute dalle misure condotte con l'impedenziometro HP 4192A LF nello stesso range di frequenza (100Hz-100kHz) imposto nella simulazione.



**Figura 4.13** Parte reale della variazione d'impedenza, dovuta alla presenza della barra di ferro con un lift-off  $\Delta z = 5\text{mm}$  e per diversi valori di  $\Delta x$ , che indica la distanza laterale della bobina dalla barra: misura (diamonds), risultato della simulazione (squares).  $\Delta = 2\text{mm}$ .



**Figura 4.14** Parte immaginaria della variazione d'impedenza, dovuta alla presenza della barra di ferro con un lift-off  $\Delta z=5\text{mm}$  e per diversi valori di  $\Delta x$ , che indica la distanza laterale della bobina dalla barra: misura (diamonds), risultato della simulazione (squares).  $\Delta = 2\text{mm}$ .

Per poter compiere un adeguato confronto dei dati misurati con quelli calcolati, sono stati rilevati prima i valori d'impedenza della singola bobina, poi è stato condotto un secondo ciclo di misure avvicinando la barra di ferro alla bobina. Infine è stata fatta la differenza tra i valori rilevati nei due processi di misura, ricavando in questo modo la variazione d'impedenza rappresentata nella sua parte reale  $\Delta R$  e in quella immaginaria  $\Delta X$ .

La barra è stata disposta su un piano orizzontale e la bobina viene spostata lateralmente sulla superficie del ferro. Con  $\Delta z$  è stata indicata la distanza verticale della base della bobina dalla barra (lift-off), in figura  $\Delta z = 5$  mm. La distanza laterale,  $\Delta x$ , del centro della bobina dall'asse della barra è fatta variare tra 0 mm e 40 mm.

Dai grafici si osserva che i risultati delle simulazioni sono accettabilmente vicini a quelli delle misure, nell'intervallo di frequenza considerato.

#### **4.5 Conclusioni**

Il lavoro sperimentale è stato incentrato principalmente sulla rilevazione della barra e sul dimensionamento della configurazione geometrica.

I principali risultati ottenuti riguardano l'individuazione di uno specifico modello numerico dell'interazione sonda-barra, e un'analisi critica dei parametri che devono essere considerati per la rappresentazione quantitativa delle barre.

I test sperimentali sono stati condotti al fine di convalidare il modello numerico e le sue ipotesi. In particolare, è stato osservato che gli

effetti nonlineari dei materiali ferromagnetici possono essere trascurati, e la permeabilità magnetica si può ritenere costante in un ampio range di frequenza. Queste ipotesi sono importanti perché consentono di ricavare un modello numerico accurato e di sviluppare un algoritmo per la rappresentazione di immagini della struttura metallica con un ridotto costo computazionale.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Blitz J (1997) *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing*, second edition, published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK
- [2] Shamsad Ahmad, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review
- [3] Makar J.M. ; Desnoyers R., Magnetic field techniques for the inspection of steel under concrete cover
- [4] G. Miller, P.Gaydecski, S. Quek, B.T. Fernandes, M.A.M. Zaid, "Detection and imaging of surface corrosion on steel reinforcing bars using a phase-sensitive inductive sensor intended for use with concrete", *NDT&E International*, 36 (2003) 19-26
- [5] Albanese R. and G. Rubinacci (1998) Finite Element Methods for the Solution of 3D Eddy Current Problems, *Advances in Imaging and Electron Physics* 102 1-86.
- [6] Albanese R., G. Rubinacci, F. Villone (2001) Crack simulation in the presence of linear ferromagnetic materials using an integral formulation, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (V)*, (J. Pavo et al. Eds.), pp16-21, IOS press
- [7] Tamburrino A., G. Rubinacci (2006) Fast Methods for Quantitative Eddy-Current Tomography of Conductive Materials", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 42, no. 8, pp. 2017-2028
- [8] F.Trevisan, F.Villone, *Modelli numerici per campi e circuiti*, SGEditoriali, Padova, 2003
- [9] J. Pávó and K. Miya, "Reconstruction of crack shape by optimization using eddy current field measurement," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no.5, pp. 3407–3410, Sep. 1994.



- [10] J. Pavo, "Approximate methods for the calculation of the ECT signal of a crack in a plate coated by conducting deposit," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 2, pp. 659–662, Mar. 2004.
- [11] F. Trevisan, "3-D eddy current analysis with the cell method for NDE problems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 2, pp. 1314–1317, Mar. 2004.
- [12] M. Morozov, G. Rubinacci, A. Tamburrino, S. Ventre, and F. Villone *et al.*, "Crack detection in subsurface layers of riveted aluminium structures," *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, vol. VIII, pp. 207–214, 2004.
- [13] R. Albanese, G. Rubinacci, A. Tamburrino, and F. Villone, "Phenomenological approaches based on an integral formulation for forward and inverse problems in eddy current testing," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 12, no. 3–4, pp. 115–137, 2000.
- [14] HP 4192A LF Impedance Analyzer Operation Manual
- [15] M. de Magistris, M. Morozov, G. Rubinacci, A. Tamburrino and S. Ventre *Electromagnetic Inspection of Concrete Rebars OIPE* (2006)
- [16] <http://www.foerster.it>
- [17] <http://www.proceqeuropa.com>
- [18] [NDT James non destructive testing systems test equipment for field use](#)