

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

TESI DI LAUREA

**DIAGNOSTICA AUTOMATICA NON DISTRUTTIVA ALLE CORRENTI INDOTTE CON
APPLICAZIONE A CASI DI INTERESSE PER L'INDUSTRIA AERONAUTICA**

RELATORE

CH.MO PROF.

GUGLIELMO RUBINACCI

CANDIDATO

RAFFAELE TAMMARO

MATR.: 045/4201

CORRELATORI

DOTT. GIOVANNI CAVACCINI (ALENIA AERONAUTICA S.P.A.)

DOTT. SALVATORE GAETA (O.M.P.M. S.R.L.)

ANNO ACCADEMICO 2006/2007

Ai miei genitori

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1	5
1.1 Metodi di indagine non distruttiva	5
1.1.1 Liquidi o tinture penetranti.....	6
1.1.2 Particelle magnetiche (metodo magnetoscopico).....	9
1.1.3 Ultrasuoni.....	13
1.1.4 Metodo Radiografico.....	15
1.1.5 Esame Visivo	17
1.1.6 Metodo delle correnti indotte	18
Capitolo 2	20
2.1 Equazioni di Maxwell e relazioni costitutive	20
2.2 Approssimazione in "bassa frequenza"	21
2.3 Metodo delle correnti indotte (Eddy Current)	25
2.3.1 Piano delle impedenze	26
2.3.1.1 La conducibilità del materiale.....	29
2.3.1.2 La geometria del campione e della bobina	30
2.3.1.3 La permeabilità magnetica del materiale.....	32
2.4 Descrizione del sistema Sonda – Campione	33
2.5 Modelli di difetti	37
2.6 Modello matematico agli elementi finiti.....	39
2.6.1 Formulazione del problema lineare delle correnti indotte	39
2.6.2 Formulazione del problema delle correnti indotte in presenza di materiale magnetico	43
2.6.3 Ricostruzione del difetto	45
Capitolo 3	46
3.1 Analizzatore di impedenza HP 4192LF DIGITAL LCR METER	46
3.2 Hocking Phasec2D	48
3.3 Tipi di sonde utilizzate nel testing con correnti indotte.....	49
3.4 Robot Melfa RV-1a	55

Capitolo 4	57
4.1 Automazione delle misure	57
4.2 Elaborazione dei dati	65
4.3 Software di ricostruzione del difetto	68
Capitolo 5	71
5.1 Prove di laboratorio su piastra di alluminio con cricca EDM da 3 mm	71
5.2 Test eseguito su di un componente di interesse aeronautico	82
5.3 Conclusioni e prospettive future	101
Appendice A	102
A.1 Moduli utilizzati per la movimentazione del robot	102
A2 Moduli utilizzati per l'acquisizione dei dati tramite il difettoscopio Phasec2D	129
A3 Moduli utilizzati per l'acquisizione dei dati tramite analizzatore di impedenza HP4192A DIGITAL LCR METER	137
Bibliografia	145

Introduzione

Con il completamento dell'assetto del Mercato Europeo, avvenuto nel 1993, è stata liberalizzata la circolazione dei prodotti nei Paesi membri della Comunità Economica Europea. Ciò ha fatto sì che le aziende prendessero coscienza del fatto che i loro prodotti dovessero garantire:

- una elevata qualità
- una elevata affidabilità
- competitività economica

per avere successo sia in ambito nazionale che internazionale.

Per ottenere, quindi, prodotti di elevata qualità ed affidabilità, le aziende devono essere in grado di prevenire eventuali difetti che possono compromettere sia le proprietà che le prestazioni dei prodotti stessi.

In tale contesto, il *Testing non Distruttivo* (NDT: Non Destructive Testing)(figura 1.1) e la Normativa Tecnica Nazionale ed Internazionale che ne regola l'applicazione, assumono un ruolo di fondamentale importanza per assicurare la qualità e l'affidabilità di un prodotto.

Infatti, con la Direttiva CEE n°374/85, recepita con D.P.R. 27/05/88 n°224: “*Responsabilità civile per danno da prodotto difettoso*”, fu introdotto nel nostro Paese un regime di parziale responsabilità oggettiva del produttore per danni causati dai propri prodotti.



figura 1.1: esempi di campi di applicazione delle prove non distruttive

Per le aziende produttrici, quindi, è divenuto di fondamentale importanza l'esecuzione dei test non distruttivi per svariati motivi:

- assicurare l'assenza di difetti che possono determinare guasti

- valutare le dimensioni dei vari oggetti
- determinare sia le proprietà fisiche che strutturali del materiale esaminato.

Come si può facilmente intuire, l'NDT può essere utilizzato sia durante la fase di costruzione di un prodotto (come ad esempio saldatura, colatura, forgiatura) sia durante il funzionamento del prodotto stesso.

Inoltre, il costruttore, per motivi di natura puramente economici, dovuti all'eccessivo costo dell'NDT, può effettuare quello che viene comunemente definito *Controllo di Qualità*, ovvero, decide di effettuare il testing non distruttivo solo su una frazione di un dato gruppo di prodotti e poi, tramite un'analisi statistica, decide se tale gruppo di prodotti è idoneo o meno all'utilizzo.

Ovviamente, l'utilizzo dell'NDT assume un valore particolare in quei settori dove una costante verifica dei cicli produttivi e dell'affidabilità dei manufatti risulta di interesse prioritario; basti pensare a quei settori quali il nucleare, il petrolchimico, l'aerospaziale e similari, ove la qualità dei prodotti è di fondamentale importanza per la sicurezza di mezzi e persone, nonché per la salvaguardia dell'ambiente.

Il testing non distruttivo può essere eseguito sia sui metalli che sui non metalli ed è possibile individuare vari metodi di esecuzione del testing:

1. *metodi acustici ed oscillatori*: misure con impedenze ultrasoniche e meccaniche
2. *metodi radiologici*: raggi x, raggi gamma e fasci di neutroni
3. *metodi visivi e ottici*: interferometria, olografia e tinture penetranti
4. *metodi termici*: radiazione infrarossa e vernici termiche
5. *metodi elettrici e magnetici*: corrente parassita, dispersione del flusso magnetico, ispezione con particelle magnetiche, analisi con le microonde e misure con cadute di potenziale e campo alternato.

Per la completa ispezione di un oggetto è richiesto l'utilizzo di almeno due metodi e la scelta dei metodi è dovuta a vari fattori:

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

1) Per la determinazione della composizione dei materiali bisogna tener conto di vari fattori riguardanti sia la natura che la struttura del materiale stesso. Questi fattori modificano i valori delle costanti elastiche, della conducibilità elettrica, delle proprietà magnetiche e della permittività elettrica.

Le costanti elastiche sono connesse alla velocità del suono, quindi per la loro determinazione si utilizza il metodo ultrasonico.

La permittività elettrica può essere determinata mediante l'utilizzo delle microonde elettromagnetiche.

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

Per la misura della conducibilità elettrica è efficace il metodo delle correnti indotte.

2) La misura delle dimensioni è invece normalmente effettuata tramite l'utilizzo del metodo visivo, ultrasonico, delle correnti indotte e delle microonde.

Il metodo visivo è usato raramente.

Il metodo ultrasonico viene utilizzato per determinare spessori anche di alcuni metri in un gran numero di metalli (lo stesso non si può dire per i non metalli).

Le microonde elettromagnetiche vengono di norma usate per determinare le dimensioni di molti oggetti di plastica.

Infine, il metodo delle correnti indotte viene utilizzato, in genere, per misurare lo spessore di lamine metalliche molto sottili ed anche di rivestimenti dielettrici (ad esempio vernici) su substrati metallici.

3) Per la rilevazione dei difetti interni, la tecnica più comunemente utilizzata è quella che prevede l'utilizzo dei raggi x. Questa tecnica produce un'immagine prontamente visibile e ad alta risoluzione, dell'interno dell'oggetto sotto test, ma tuttavia, sia per motivi di natura logistica (l'esecuzione della tecnica richiede l'utilizzo di una stanza opportunamente attrezzata, non sempre disponibile nelle aziende), sia per la pericolosità dovuta ad una continua esposizione dell'operatore alle radiazioni ionizzanti (il che comporta un continuo controllo della salute dell'operatore stesso), sia per la possibilità di avere una profondità di penetrazione della radiazione nell'oggetto sotto esame molto limitata (50 mm o meno in alcuni metalli), si sono sviluppate e utilizzate, negli ultimi tempi, altre tecniche meno pericolose per la salute degli addetti ai lavori e che non richiedono l'utilizzo di strutture fisse ed ingombranti ma bensì di strutture trasportabili. Tra queste evidenziamo la tecnica ad ultrasuoni adatta ad individuare la posizione del difetto in una singola operazione e la tecnica che prevede l'uso delle microonde, utilizzata maggiormente per determinare la posizione dei difetti in oggetti non metallici, ma con un grado di accuratezza inferiore rispetto agli ultrasuoni.

4) La rilevazione di fessure superficiali è ottenuta mediante i metodi delle tinture penetranti e delle particelle magnetiche.

Il primo metodo non può tuttavia, essere utilizzato per rilevare difetti sottosuperficiali, mentre il secondo metodo è adatto solo per metalli ferromagnetici e richiede l'applicazione di un forte campo magnetico.

Quindi si evince che:

- I metodi elettromagnetici sono più accurati per misurare le profondità delle rotture superficiali in campioni di metallo.
- Il metodo della dispersione del flusso magnetico può essere usato per misurare le rotture superficiali e sottosuperficiali, ma solo per materiali ferromagnetici, e richiede l'applicazione di un forte campo.

Come si può ben immaginare, il progresso tecnologico e l'affinamento delle tecniche di modellizzazione dei difetti sta spingendo, negli ultimi anni, sempre più verso una maggiore automatizzazione della procedura di testing non distruttivo, riducendo di fatto l'errore umano e aumentando la velocità di esecuzione del testing.

Il processo di automatizzazione del testing, si basa di fatto sulla realizzazione di una procedura automatica della fase di scansione del componente contenente il difetto e sulla realizzazione di una procedura automatica riguardante la scelta della tipologia e delle caratteristiche del difetto riscontrato. Per quest'ultima fase si tenta di seguire una delle seguenti metodologie:

- Metodo basato sull'analisi dei segnali: dove i segnali ottenuti dalla fase di scansione del campione, vengono confrontati con segnali ottenuti da campioni contenenti difetti noti e prodotti artificialmente in laboratorio.
- Metodo basato sui modelli: dove i segnali ottenuti dalla fase di scansione vengono confrontati con quelli prodotti da un calcolo numerico secondo il modello degli elementi finiti.

Per cui, l'obiettivo di questa tesi è quello di validare una procedura di analisi automatica su componenti reali, di interesse in ambito aeronautico, e studiare la reale possibilità di applicazione, in ambito aziendale, di tale procedura.

Capitolo 1

In questo capitolo introdurremo le principali tecniche utilizzate nei testing non distruttivi, evidenziando sia i vantaggi che gli svantaggi di ogni singola tecnica.

1.1 Metodi di indagine non distruttiva

Le tecniche di indagine non distruttive, sono quelle particolari tecniche che lasciano inalterato il campione o, in ogni modo, non ne compromettono la funzionalità al termine della prova. Una prima classificazione di tali tecniche si ottiene in:

- NDE: Non Destructive Evaluation ;
- NDT : Non Destructive Testing ;
- NDI : Non Destructive Inspection.

Dove la NDT si concentra sulla scoperta dei difetti e sugli aspetti pratici della tecnica; la NDI sulla quantificazione dei difetti mentre la NDE sulla valutazione dell'importanza dei difetti.

Un ulteriore classificazione è data in prove attive o passive e in prove superficiali, sottosuperficiali o volumetriche.

Le “*tecniche attive*” sono quelle in cui una forma di energia è introdotta nel provino e se ne rivela una variazione significativa in presenza di un'anomalia. Metodi magnetici, correnti parassite, ultrasuoni e radiografia appartengono a questa categoria.

Le “*tecniche passive*” si limitano ad osservare il provino sotto l'influenza di una tipica condizione di carico o di un ciclo di prova. Per le tecniche passive la presenza di un difetto è determinata dalla risposta o reazione del provino. Appartengono a questa categoria i metodi visivi, i liquidi penetranti e alcuni metodi magnetici.

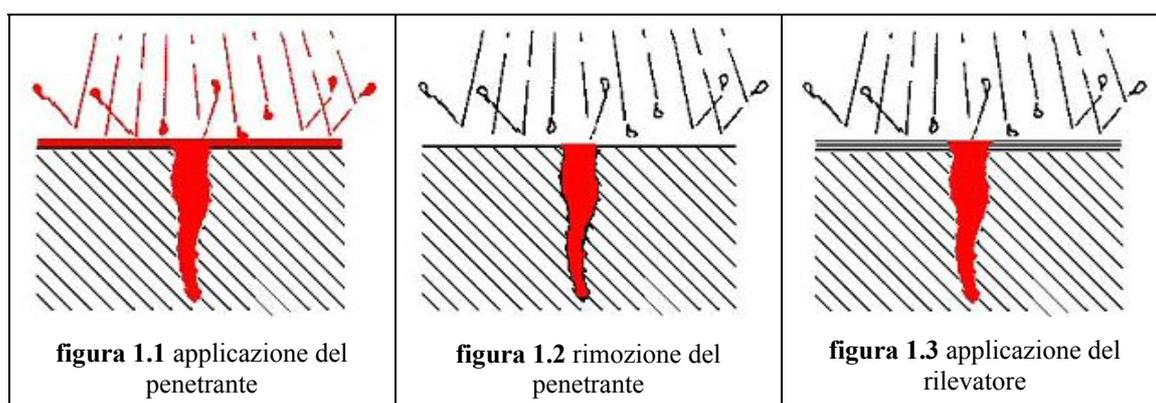
Le “*tecniche superficiali*” sono quelle in grado di rilevare solo i difetti di origine superficiale. Appartengono a tale categoria i liquidi penetranti e le correnti parassite che però sono in grado di rilevare anche i difetti appena sotto la superficie. Processi di analisi sempre più raffinati possono aumentare la profondità di ispezione, tuttavia rimangono dei limiti, legati alla superficie, che segnano la differenza tra questi metodi e quelli “*volumetrici*” cui appartengono gli ultrasuoni e la tecnica radiografica.

La scelta di una tecnica o di un'altra, dipende dal materiale, dalla dimensione dell'elemento, dall'orientazione e dal tipo di difetto che ci si aspetta di individuare e dall'ambiente in cui è eseguita l'ispezione.

Proponiamo di seguito, alcuni dei metodi più utilizzati per le prove non distruttive.

1.1.1 Liquidi o tinture penetranti

Questa tecnica di prova non distruttiva sfrutta la capacità di alcuni liquidi di penetrare, per capillarità e non per gravità, all'interno dei difetti superficiali (cricche, cavità, ecc). La bassa tensione superficiale e la buona bagnabilità di questi liquidi, ne assicurano la penetrazione anche all'interno di discontinuità sottilissime. Dopo l'applicazione e la penetrazione del liquido (figura 1.1), la parte eccedente dello stesso viene rimossa dalla superficie mediante lavaggio con acqua corrente fredda (figura 1.2)(ciò è possibile in quanto l'acqua presenta una tensione superficiale più elevata e bagnabilità peggiore rispetto al penetrante, di conseguenza, l'acqua non è in grado di rimuovere il penetrante dalle fessure nel quale è penetrato per capillarità). Dopo il lavaggio, sfruttando ancora una volta il principio della capillarità, viene estratto il liquido penetrante rimasto all'interno delle difettosità; l'operazione viene compiuta stendendo sulla superficie del pezzo uno strato di polvere bianca di opportuno spessore (rivelatore)(figura 1.3). Il liquido penetrante "risalito" per capillarità, lascerà nel rivelatore un segnale avente dimensioni molto maggiori rispetto al difetto che lo ha generato. Le indicazioni verranno poi osservate in luce bianca o in luce di Wood a seconda che siano utilizzati liquidi penetranti a contrasto di colore o fluorescenti. La visualizzazione del difetto, avviene quindi, direttamente sull'oggetto posto sotto esame, per contrasto tra penetrante e rivelatore.



Il metodo di ispezione coi liquidi penetranti, è particolarmente idoneo per evidenziare e localizzare discontinuità superficiali, quali cricche, porosità, ripiegature, in modo veloce ed economico e con grande accuratezza su tutte le tipologie di materiali, acciai, leghe di rame, leghe di alluminio, vetro, plastica ad altro. I liquidi penetranti possono essere applicati con successo su quasi tutti i componenti, indipendentemente dalla geometria o dai materiali che li caratterizzano.

Gli unici esclusi sono quei componenti particolarmente porosi in superficie come ad esempio i getti di ghisa.

Vantaggi dell'esame con Liquidi Penetranti:

- È applicabile a tutti i materiali;
- È relativamente di facile esecuzione ed interpretazione;
- È eseguibile anche su pezzi o particolari aventi scarsa accessibilità;
- Richiede attrezzature di costo molto ridotto rispetto agli altri controlli.

Limiti dell'esame con Liquidi Penetranti:

- Rileva solo discontinuità sfocianti sulla superficie;
- Le discontinuità contenenti sostanze estranee non sono rilevate;
- La superficie dell'oggetto sotto esame va preparata in maniera più accurata che negli altri tipi di controlli;
- Non è normalmente applicabile all'esame di superfici troppo rugose o porose;
- Si presta all'automazione solo per quanto riguarda la parte esecutiva, mentre l'interpretazione dei risultati deve essere fatta da personale qualificato.

L'utilizzo della tecnica dei liquidi penetranti, è stata parte integrante del tirocinio tenutosi presso l'azienda OMPM s.p.a. di Anghi (SA). In tale azienda, viene utilizzata una struttura del tutto simile a quella evidenziata in figura 1.4 per eseguire il test.

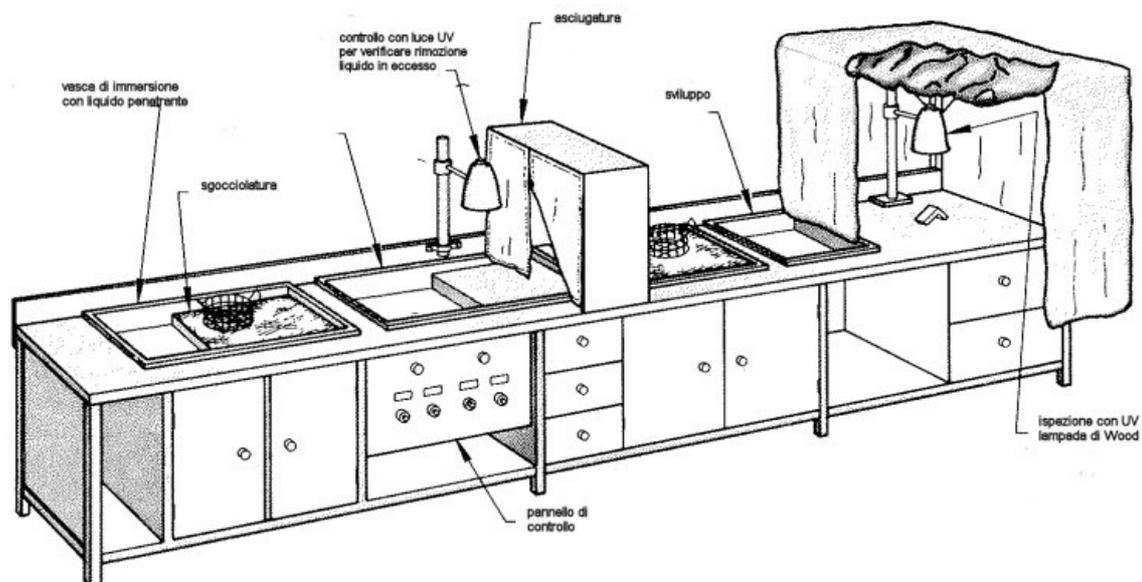


figura 1.4 Stazione per l'esecuzione del test Liquidi Penetranti

Valutiamo più nel dettaglio l'esecuzione della procedura.

Il primo "step" da seguire prevede la fase di pulizia del campione da esaminare dove in funzione delle dimensioni, della forma e della numerosità dei campioni da sottoporre al test, si può

pensare di utilizzare o meno una macchina lavapezzi che tramite un particolare tipo di solvente (Metilchetone) garantisce un'accurata pulizia dei campioni da esaminare.

Il secondo "step" da seguire, prevede l'immersione del campione all'interno del liquido penetrante. Per fare ciò vi è un'apposita vasca propriamente detta "Vasca di immersione liquidi penetranti" dove il componente da testare viene immerso nel liquido all'interno della vasca. È prevista anche una zona dove i pezzi, una volta tolti dalla vasca, vengono posti a sgocciolare. La vasca deve essere dotata di un coperchio, facilmente rimovibile, onde preservare il liquido dalle impurità.

Il terzo "step" prevede il risciacquo del campione all'interno della "Vasca di risciacquo" dove i campioni provenienti dalla sgocciolatura vengono lavati. Il lavaggio può essere effettuato manualmente o all'interno di piccoli cestelli in filo metallico. Allo scopo l'acqua, la cui temperatura non deve essere inferiore ai 10 °C, può essere spruzzata mediante un erogatore spray.

Il quarto "step" prevede l'asciugatura dei campioni all'interno della "Stazione di asciugatura" la quale è costituita da una camera con aria calda a ricircolo. La camera deve avere dimensioni sufficienti a permettere un'agevole maneggevolezza dei pezzi da asciugare. Temperatura e flusso dell'aria, unitamente al tempo di permanenza e movimentazione dei pezzi, sono tutti parametri da bilanciare in funzione delle dimensioni e forma dei pezzi controllati.

Il quinto "step" prevede l'applicazione del rivelatore sui campioni e ciò avviene all'interno della "Stazione di sviluppo" dove tipo e posizionamento della stazione di sviluppo dipendono dall'utilizzo o meno di uno sviluppatore a secco o a umido.

Nel caso venga utilizzato uno sviluppo a secco, la stazione di sviluppo sarà immediatamente dopo la stazione di asciugatura mentre, nel caso di utilizzo di sviluppo a umido, la stazione sarà immediatamente prima di quella di asciugatura (e cioè dopo la stazione di risciacquo). La stazione "a secco" (quella presente in azienda) consiste di un semplice cestello contenente la polvere di sviluppo. I pezzi asciugati vengono immersi nella polvere e la polvere in eccesso allontanata per scuotimento del pezzo. Nel caso di pezzi aventi dimensioni tali da non permetterne l'immersione nella polvere, questa viene posta sulle superfici da controllare, eliminandone poi l'eccesso sempre per scuotimento. Il cestello contenente lo sviluppatore deve essere provvisto di un coperchio, facilmente rimovibile, onde preservare lo sviluppatore, quando non è utilizzato, dalla polvere e dalle impurità.

Il sesto "step" prevede l'ispezione dei campioni all'interno della "Stazione di Ispezione" dove i campioni possono essere agevolmente maneggiati sotto una luce appropriata. Nel caso della tecnica a liquidi fluorescenti la superficie è protetta da una tenda che crei una sorta di "camera oscura" nella quale impiegare la lampada di Wood.

Nel caso della tecnica visibile, la tenda non è necessaria.

Il settimo ed ultimo “step” prevede la pulitura dei campioni per rimuovere le tracce di liquido penetrante e di rivelatore rimaste.

1.1.2 Particelle magnetiche (metodo magnetoscopico)

Il controllo non distruttivo per mezzo di particelle magnetiche è un metodo per la localizzazione di discontinuità superficiali e sub-superficiali in materiali ferromagnetici.

Il test si basa sul fatto che quando l'oggetto da testare è magnetizzato, le discontinuità che si trovano in un senso generalmente trasversale al campo magnetico determinano una deviazione delle linee di flusso del campo magnetico stesso.

Se il difetto poi affiora in superficie, parte delle linee di flusso del campo magnetico vengono disperse oltre la superficie stessa. Per evidenziare il difetto sarà sufficiente spruzzare le superfici con adatte sospensioni di polveri ferromagnetiche, colorate o fluorescenti. Le particelle si concentreranno allineandosi lungo le linee di flusso del campo magnetico, formando un "profilo" della discontinuità che generalmente ne indica la posizione, la dimensione, la forma e l'estensione. Le particelle così concentrate sulla difettosità saranno rese visibili mediante illuminazione con una lampada di Wood.

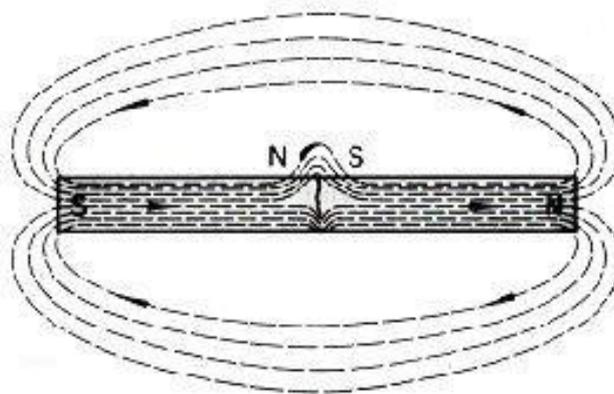


figura 1.5 fuga di campo in corrispondenza di una cricca

Il metodo Magnetoscopico si presta alla rilevazioni di cricche (sia superficiali che sub-superficiali), inclusioni, ripiegature, ecc.. Casi tipici di applicazione del metodo Magnetoscopico sono le fusioni in acciaio, i fucinati, gli stampati.

Importante per la rilevazione dei difetti, è che questi siano orientati in modo da essere intercettati dalle linee di forza del flusso magnetico indotto con un angolo sufficientemente grande in modo

da ottenere una distorsione localizzata delle linee di forza; per tale ragione, lo stesso oggetto deve essere magnetizzato in almeno due direzioni fra loro ortogonali (figura 1.6 e figura 1.7).

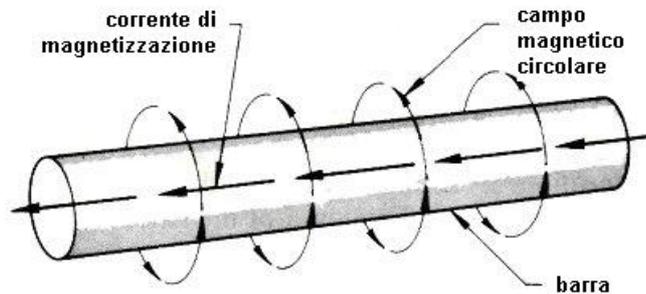


figura 1.6 magnetizzazione circolare

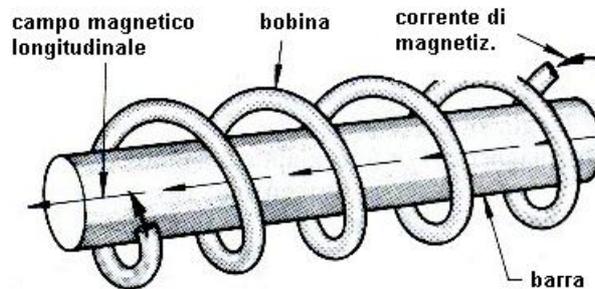


figura 1.7 magnetizzazione longitudinale

I vantaggi del metodo Magnetoscopico sono:

- La procedura è di facile apprendimento;
- Può essere facilmente automatizzato, tranne che nell'osservazione visiva;
- Raggiunge elevate sensibilità;
- È applicabile anche su pezzi con moderati strati ricoperti;
- L'interpretazione delle indicazioni è relativamente semplice;
- Presenta una buona accessibilità.

I limiti del metodo Magnetoscopico sono:

- Si può applicare solo ai materiali ferromagnetici e per rilevare difetti superficiali o subsuperficiali;
- Scarsa sensibilità per i difetti rotondeggianti;
- L'esame è normalmente limitato a zone facilmente accessibili;
- La smagnetizzazione, se necessaria, può essere difficoltosa qualora vengano richiesti valori di magnetismo residuo molto bassi.

Anche la tecnica magnetoscopica è stata visionata durante il tirocinio tenutosi presso l'azienda OMPM s.p.a. di Angri (SA). Valutiamo come vengono eseguiti i test sui campioni.

Ricordando che la caratteristica fondamentale del controllo mediante particelle magnetiche è che il pezzo da controllare deve essere opportunamente magnetizzato, in modo tale che le particelle magnetiche siano attratte dalle fughe di campo create dalle discontinuità del materiale. Solitamente il campo magnetico necessario è creato da correnti elettriche.

Lo strumento più comunemente utilizzato per la magnetizzazione dei pezzi ed il conseguente controllo mediante particelle magnetiche è il magnetoscopio. In azienda è stato utilizzato un magnetoscopio "a bancale" che consente di controllare campioni aventi dimensioni fino ai 1250 mm di lunghezza ed ai 250 mm di diametro.

In figura 1.8 è mostrato lo schema di un tipico magnetoscopio a bancale dotato di teste di contatto, per generare campi magnetici circolari, e bobina di magnetizzazione, per generare campi magnetici longitudinali.

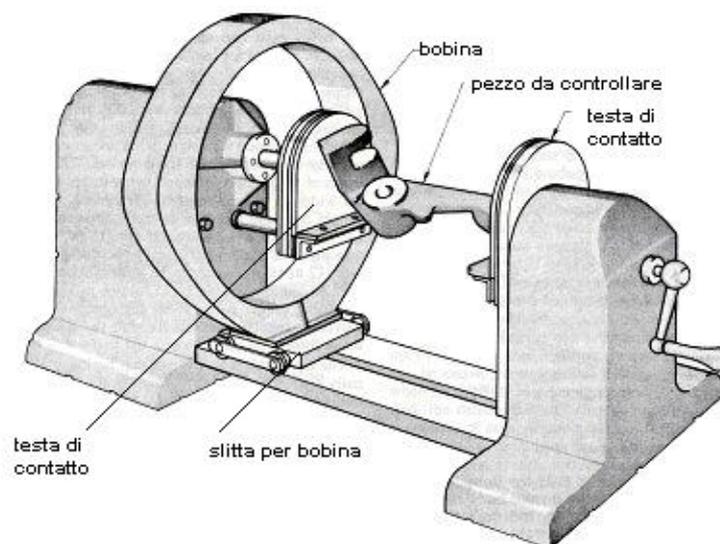


figura 1.8 Magnetoscopio a Bancale

Il pezzo da testare viene serrato tra le teste di contatto. Successivamente il passaggio di corrente elettrica genera un campo magnetico le cui linee di forza risultano perpendicolari alla direzione della corrente ed allo stesso tempo possiedono un senso di rotazione ben definito (campo magnetico circolare) che permetterà di controllare le eventuali discontinuità posizionate "longitudinalmente". Una successiva magnetizzazione eseguita con la bobina permetterà poi di controllare le discontinuità poste trasversalmente. Per il controllo di pezzi particolarmente grandi possono essere richieste più magnetizzazioni.

L'intensità del campo magnetico necessario per la magnetizzazione di un campione cilindrico deve essere calcolato in funzione della lunghezza (L) e dal diametro (D). Mentre nel caso di pezzi non cilindrici si prende in considerazione la diagonale maggiore (D) del pezzo.

Nel caso in cui il rapporto $L/D > 4$ la corrente si calcola:

$$\frac{\text{Ampere}}{\text{Spire}} = \frac{35000}{\frac{L}{D} + 2} \quad (1.1)$$

Se invece il rapporto $L/D < 4$ la corrente si calcola:

$$\frac{\text{Ampere}}{\text{Spire}} = \frac{45000}{\frac{L}{D}} \quad (1.2)$$

Nel caso di pezzi di grosse dimensioni la corrente di magnetizzazione deve essere compresa fra 1200 e 4500 [A/Spire].

L'intensità di corrente calcolata deve essere divisa per il numero di spire contenute nella bobina.

Per l'esecuzione del test, bisogna prevedere un'accurata pulizia del campione da esaminare, infatti le superfici da esaminare devono essere pulite ed asciutte, esenti da polvere, scorie, spruzzi di saldatura, grasso o qualsiasi altra cosa che potrebbe falsare il risultato dell'esame. Per la pulizia si possono usare sgrassanti, spazzole, solventi o altro.

Nel caso di superfici irregolari è necessario molare tutto quello che può mascherare le indicazioni di discontinuità.

Dopo la fase di pulizia, si passa all'applicazione delle particelle magnetiche.

Possono essere utilizzati tre tipi di particelle magnetiche:

- a secco
- ad umido
- bombolette spray

Valutiamo separatamente questi tre metodi di applicazione.

Metodo a secco

Il metodo a secco consiste nell'applicare con un soffio le particelle in polvere; questa operazione deve essere effettuata durante il passaggio di corrente e interrotta prima della fine del passaggio. Anche la rimozione della polvere in eccesso viene effettuata, prima di staccare la corrente, con leggero soffio d'aria.

La valutazione delle indicazioni deve essere eseguito durante il ciclo di magnetizzazione e durante la rimozione della polvere in eccesso.

Metodo a umido

Il liquido, contenente le particelle magnetiche, viene spruzzato sulla superficie da esaminare, prima e durante il passaggio di corrente. E' importante che l'impulso di corrente sia sufficientemente lungo, per permettere alle particelle di muoversi attraverso il liquido.

Con questo metodo, la valutazione delle eventuali indicazioni deve essere eseguito durante o dopo il ciclo di magnetizzazione.

Metodo con le bombolette spray

Questo è il metodo più utilizzato perché rapido e comodo dato che si utilizzano delle bombolette spray con le particelle magnetiche in soluzione già pronte per l'uso. Prima dell'utilizzo la bomboletta deve essere agitata con cura in modo da omogeneizzare le particelle nel contenitore.

Il liquido deve essere spruzzato omogeneamente durante la magnetizzazione sulla superficie da esaminare.

La valutazione delle eventuali indicazioni, deve essere eseguito dopo il ciclo di magnetizzazione.

1.1.3 Ultrasuoni

L'ispezione mediante ultrasuoni è un metodo non distruttivo in cui onde sonore ad alta frequenza sono introdotte nel materiale da esaminare, allo scopo di evidenziare difetti superficiali o interni, misurare lo spessore dei materiali, misurare la distanza e la dimensione delle difettosità. I campi di applicazione del metodo ultrasonoro si estendono al controllo di saldature, misurazione di spessori, controllo di lamiere e controllo di fucinati.

La tecnica si basa essenzialmente sul fenomeno della trasmissione di un'onda acustica nel materiale. Le onde ultrasonore possono essere di tipo trasversale e di tipo longitudinale ed hanno una capacità di penetrazione nel materiale che è inversamente proporzionale alla loro frequenza. Queste possono essere inviate nel materiale da esaminare ed in esso si propagheranno con la stessa frequenza del generatore e con una velocità che dipende dal materiale attraversato.

Il fascio ultrasonoro in uscita dal trasduttore è caratterizzato dalla sua forma geometrica mentre il segnale ultrasonoro in ricezione (riflesso o trasmesso) è caratterizzato da due parametri fondamentali:

- ampiezza "a": ovvero il valore di picco dell'impulso mostrato sullo schermo dello strumento in una rappresentazione detta A-scan.
- tempo di volo "t": ovvero il tempo intercorso tra l'impulso trasmesso e quello ricevuto; sullo schermo dell'apparecchio tale tempo è indicato dalla distanza tra i due impulsi. Il tempo di volo fornisce la misura indiretta del percorso effettuato dall'onda ultrasonora nel mezzo.

In altre parole il segnale di partenza degli ultrasuoni (chiamato "eco di partenza") e quello riflesso dalla superficie opposta a quella d'entrata (chiamato "eco di fondo"), vengono visualizzati sullo schermo dello strumento con dei picchi, la cui distanza risulta proporzionale al tempo che gli ultrasuoni impiegano per percorrere il viaggio di andata e di ritorno dalla sonda alla superficie riflettente presente all'interno del materiale. Se durante tale percorso il fascio ultrasonoro incontra delle discontinuità sarà riflesso, assorbito, deviato o diffratto e tra i due precedenti picchi (eco di partenza ed eco di fondo), ne compariranno altri che rappresentano delle indicazioni relative al tipo di discontinuità incontrate.

A seconda della geometria e del tipo di materiale in esame, possono essere impiegate differenti tecniche operative: alcune prevedono l'utilizzo di sonde che fungono contemporaneamente da trasmettitori e ricevitori degli ultrasuoni (tecnica in Riflessione)(figura 1.9), altre invece utilizzano due trasduttori diversi, uno per l'emissione e l'altro per la ricezione (tecnica in Trasparenza)(figura 1.10).

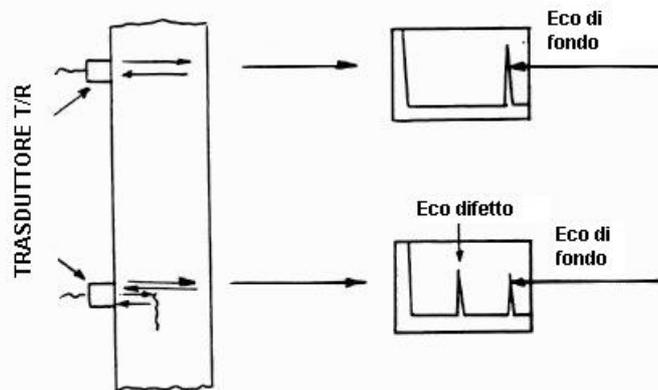


figura 1.9 tecnica della Riflessione

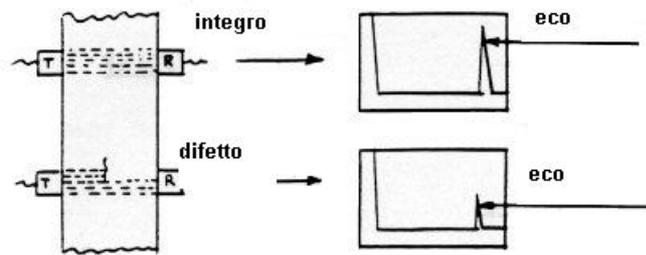


figura 1.10 tecnica della Trasparenza

I vantaggi del metodo ultrasonoro sono:

- Portabilità delle apparecchiature per un utilizzo in campo;
- Facilità di esecuzione.

I limiti del metodo ultrasonoro sono:

- Difficoltà nel controllo di oggetti a geometria complessa;
- Difficoltà a controllare i materiali ad alta attenuazione acustica (legno, calcestruzzo);
- Sensibilità di esame condizionata dallo stato superficiale del pezzo;
- Relativa difficoltà nell'interpretazione dei segnali, che richiede una lunga esperienza da parte del personale tecnico.

1.1.4 Metodo Radiografico

Tale tecnica si basa sulle alterazioni che le radiazioni elettromagnetiche subiscono quando incontrano un difetto nel loro percorso all'interno del materiale. Quando un fascio di onde elettromagnetiche di elevatissima energia fotonica (elevata frequenza) e fortemente ionizzanti (raggi X o raggi gamma), passa attraverso l'oggetto da esaminare, viene assorbito con legge esponenziale in funzione dello spessore e della densità della materia attraversata. I raggi X o "gamma" passanti e variamente attenuati impressionano una lastra fotografica posta dietro l'oggetto da esaminare. Lo sviluppo della pellicola produce un'immagine bidimensionale dell'oggetto radiografato. In questa immagine le variazioni di spessore, densità, composizione, del pezzo vengono visualizzate come variazioni di densità dell'immagine (in pratica variazioni in una scala di grigio). La valutazione viene eseguita per confronto della densità radiografica con le caratteristiche conosciute dell'oggetto stesso o con standard radiografici prodotti dallo stesso oggetto di qualità accettabile.

Gli elementi essenziali del controllo radiografico sono tre: la sorgente di radiazione, il pezzo da controllare e la lastra radiografica.

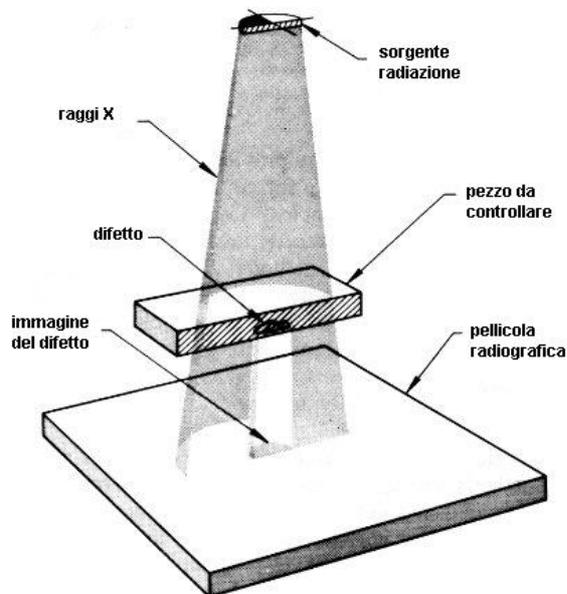


figura 1.11 rappresentazione del controllo radiografico

Il campo applicativo della tecnica radiografica include il controllo di saldature, getti, prodotti stampati, fucinati, materiali compositi, materie plastiche, ecc..

Il progresso tecnologico ha portato grandi innovazioni nelle tecniche d'esame col metodo radiografico. Tra cui si evidenziano:

- L'utilizzo degli intensificatori di brillantezza che hanno reso possibile il trasferimento dell'immagine radiografica dallo schermo fluorescente al monitor, con un notevole miglioramento della sensibilità;
- La digitalizzazione dell'immagine radiografica, per il trasferimento della radiografia su calcolatore, che permette un'elaborazione dell'immagine, con conseguente miglioramento del contrasto e della definizione. È possibile inoltre la memorizzazione di una gran quantità di lastre in grado di facilitare l'archiviazione e la consultazione;
- La tecnica Microfocus la quale, utilizzando apparecchiature delle dimensioni del fuoco radiografico, può eseguire ingrandimenti dell'oggetto radiografato;
- La tomografia computerizzata in grado di rappresentare la sezione radiografica del pezzo.

I vantaggi del metodo radiografico sono:

- Facilità di esecuzione;
- Con la tecnica Microfocus, è possibile ingrandire la zona interessata dal difetto (effetto zoom).

I limiti del metodo radiografico sono:

- Il massimo spessore di acciaio esaminabile con radiografia è dell'ordine di 400-500 mm;

- I difetti bidimensionali come le cricche possono non essere rilevati se il loro orientamento rispetto all'asse del cono radiante è inclinato;
- L'utilizzazione delle sorgenti di radiazioni ionizzanti richiede il rispetto delle normative vigenti in materia di radioprotezione, con conseguente aumento dei costi di controllo.

1.1.5 Esame Visivo

Nel controllo non distruttivo con metodo visivo l'interpretazione e la valutazione dei risultati viene effettuata oggettivamente dall'operatore in base a specifici parametri di accettabilità della particolare difettologia del componente in esame.

Naturalmente la competenza tecnica e la grande esperienza del personale addetto ai controlli sono essenziali per assicurare sensibilità e l'affidabilità del risultato.

I controlli visivi vengono generalmente utilizzati per rilevare specifiche caratteristiche superficiali e/o dimensionali quali allineamenti, forme e dimensioni di componenti di macchine, di impianti e di manufatti, stato delle superfici, ecc.

Essi vengono generalmente suddivisi in:

- **Esami visivi Diretti:** possono essere utilizzati quando sia possibile accedere con gli occhi ad una distanza della superficie in esame non maggiore di circa 60 cm con una angolazione non inferiore a 30°. Per migliorare ingrandimenti e visuale possono essere utilizzati lenti e specchi. L'illuminazione, effettuata con opportune lampade, deve essere compresa tra i 150 ed i 600 lux.
- **Esami visivi Remotizzati:** vengono generalmente utilizzati quando non è possibile accedere direttamente all'oggetto od alla superficie da esaminare. Allo scopo vengono utilizzate apparecchiature più o meno sofisticate, quali ad es. specchi, telescopi, endoscopi, fibre ottiche, telecamere, ecc. In ogni caso, qualunque sia il mezzo utilizzato, gli strumenti devono avere una risoluzione almeno equivalente a quella dell'occhio umano.

Per quanto concerne gli "Esami Visivi Remotizzati", le attrezzature maggiormente utilizzate sono i boroscopi, gli endoscopi, e le microtelecamere che vengono scelti di volta in volta a seconda delle caratteristiche geometriche, dimensionali e strutturali della superficie in esame.

I vantaggi del metodo visivo sono:

- Nell'applicazione Remotizzata, permette un controllo visivo a distanza senza smontare particolari da controllare.

I limiti del metodo visivo sono:

- Impossibilità di utilizzo senza un accesso diretto alla zona d'esame (è necessario avere un foro d'accesso);
- Il metodo richiede una lunga esperienza da parte del personale tecnico.

I prodotti controllabili sono: motori, condotte di fluidi, serbatoi, vani nascosti, carrelli di atterraggio di aerei, ecc..

1.1.6 Metodo delle correnti indotte

Il metodo delle correnti indotte, si basa sul principio per cui una bobina, percorsa da corrente sinusoidale, genera un campo magnetico primario, variabile nel tempo, che induce delle correnti indotte (dette anche parassite o di Foucault) nel materiale conduttore da esaminare, posto in prossimità di essa. Le correnti indotte generano, a loro volta, un campo magnetico secondario che, interagendo con quello primario, dà luogo ad una variazione d'impedenza della bobina induttrice (figura 1.12).

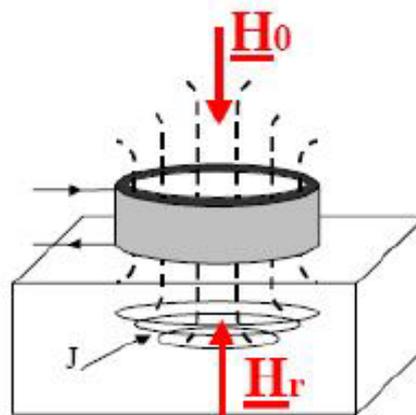


figura 1.12 Disegno schematico di una bobina posta sopra un materiale conduttore: H_0 indica il campo magnetico generato dalla bobina e H_r quello generato dalle correnti indotte J .

Determinando il valore di tale impedenza, si valutano intensità e fase delle correnti parassite, le quali dipendono dalla conducibilità elettrica, dalla permeabilità magnetica del materiale in esame e dal percorso delle correnti indotte. I valori rilevati possono essere correlati, mediante taratura con campioni di riferimento, all'entità dei difetti. La profondità di penetrazione delle correnti parassite è inversamente proporzionale alla radice quadrata della frequenza della corrente eccitatrice e può giungere, ad esempio, sino a circa 10 mm nei materiali ferromagnetici, impiegando basse frequenze (circa 1 kHz). Per rilevare difetti superficiali e subsuperficiali su

materiali sia ferrosi che non ferrosi, vengono utilizzate correnti parassite ad alta frequenza (da 10 kHz a 1 MHz circa). Con le correnti parassite è inoltre possibile misurare lo spessore di rivestimenti su materiali conduttori. Eventuali discontinuità del materiale in esame possono essere rilevate con due diverse tecniche: misurando le variazioni di corrente nel circuito, associate al diverso valore d'impedenza che di volta in volta assume la bobina, oppure osservando le variazioni di ampiezza e dell'angolo di fase del vettore dell'impedenza. Nel primo caso è utilizzato un semplice microamperometro; nel secondo caso invece è necessario un oscilloscopio capace di visualizzare il piano d'impedenza della bobina.

Ovviamente anche tale metodo presenta i suoi vantaggi e i suoi limiti, vediamoli brevemente.

Vantaggi del metodo delle correnti indotte:

- Elevata sensibilità di esame;
- Grande affidabilità;
- Rapidità di esecuzione;
- Basso costo di esercizio.

I limiti del metodo delle correnti indotte sono:

- Il metodo è applicabile soltanto su materiali conduttori, nei quali si possono localizzare discontinuità superficiali o sub-superficiali a profondità non molto elevate. A titolo di esempio mostriamo che per la piastra di alluminio analizzata in laboratorio, avente spessore di 2 mm è stata calcolata una frequenza di 2 kHz.
- L'interpretazione delle indicazioni, agli effetti del riconoscimento del tipo di difetto, è difficoltosa;

Capitolo 2

In questo capitolo richiameremo i concetti di base relativi alle equazioni che governano l'elettromagnetismo. Tali equazioni serviranno poi per formulare un modello per trattare il problema delle correnti indotte.

2.1 Equazioni di Maxwell e relazioni costitutive

Il modello del sistema oggetto dello studio è descritto dalle equazioni di Maxwell nella loro forma locale o differenziale:

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (2.1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.4)$$

Dove $J = J(x; t)$ rappresenta la densità di corrente, [A/m²]; mentre $\rho = \rho(x; t)$ la densità di carica elettrica. [C/m³].

Le relazioni costitutive, nel caso particolare del vuoto, sono:

$$D = \varepsilon_0 E \quad (2.5)$$

$$B = \mu_0 H \quad (2.6)$$

Dove $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, $\varepsilon_0 \approx 1/(36\pi) \cdot 10^{-9} \text{ F/m}$.

Quando i campi sono "sufficientemente deboli" e quando le loro variazioni spaziali e temporali sono "sufficientemente lente", le proprietà del mezzo sono rappresentate dai parametri σ conducibilità [S/m], ε permeabilità elettrica e μ permeabilità magnetica. Questi parametri legano tra loro E , D , B , H e la densità totale di corrente J tramite le seguenti relazioni:

$$J = \sigma E \quad (2.7)$$

$$D = \varepsilon E \quad (2.8)$$

$$B = \mu H \quad (2.9)$$

dove la (2.7) rappresenta la *legge di Ohm*.

2.2 Approssimazione in “bassa frequenza”

Introduciamo ora una semplificazione, spesso descritta come “approssimazione a bassa frequenza”, che consiste nel trascurare il termine della corrente di spostamento $\frac{\partial D}{\partial t}$ nell'equazione (2.1).

Consideriamo le equazioni di Maxwell, che nel dominio della frequenza diventano:

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (2.10)$$

$$\nabla \times H = J + j\omega D \quad (2.11)$$

Aggiungendo adesso le relazioni costitutive, supponendo di essere in presenza di mezzi lineari:

$$D = \varepsilon(x)E$$

$$B = \mu(x)H \quad (2.12)$$

$$J = \sigma(x)E$$

Introduciamo ora delle grandezze di riferimento diverse:

L – riferimento per la lunghezza

E – riferimento per il campo elettrico

D – riferimento per il campo spostamento elettrico

B – riferimento per il campo d'induzione magnetica

H – riferimento per il campo magnetico

J – riferimento per la densità di corrente

In tal modo i campi elettrici e le coordinate spaziali (x), possono essere espresse in funzione delle grandezze dimensionali

$$\begin{cases} x = L\xi \\ E(x) = Ee(\xi) \\ B(x) = Bb(\xi) \\ H(x) = Hh(\xi) \\ D(x) = Dd(\xi) \\ J(x) = Jj(\xi) \end{cases} \quad (2.13)$$

E delle nuove variabili adimensionali ξ, e, b, h, d, j .

Notiamo immediatamente che, a causa delle (2.12) le quantità D, J, H dipendono da E e da B , infatti:

$$D = \varepsilon(x)E \Rightarrow \begin{cases} d = \varepsilon_{norm}(\xi)e \\ D = \varepsilon_{ref}E \end{cases} \quad (2.14)$$

dove ε_{ref} è un valore di riferimento (costante) per la permittività elettrica tale che il valore normalizzato $\varepsilon_{norm} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ref}}$ è di ordine 1. Una possibile scelta potrebbe essere $\varepsilon_{ref} = \varepsilon_0$ (permittività del vuoto), cosicché $\varepsilon_{norm} = \varepsilon_r$ (permittività relativa), se ε_r di ordine 1. Si noti il fatto che non è necessario che la relazione costitutiva sia lineare; ciò che è richiesto è che sia possibile definire ε_{ref} che mette in relazione D ed E , in modo tale che \mathcal{d} sia di ordine 1 quando e è di ordine 1.

In modo simile abbiamo:

$$B = \mu(x)H \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{b} = \mu_{norm}(\xi) \mathbf{h} \\ B = \mu_{ref} H \end{cases} \quad (2.15)$$

$$J = \sigma(x)E \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{j} = \sigma_{norm}(\xi) \mathbf{e} \\ J = \sigma_{ref} E \end{cases} \quad (2.16)$$

Riscrivendo la (2.10) tenendo conto delle (2.13) avremo:

$$\nabla_{\xi} \times \mathbf{e} = -j\omega \frac{B}{E} L \mathbf{b} \quad (2.17)$$

Definiamo:

$$\begin{cases} \tau_{em} = \frac{L}{c} \\ \alpha = c \frac{B}{E} \\ c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{ref} \mu_{ref}}} \end{cases} \quad (2.18)$$

Cioè, c è la velocità delle onde elettromagnetiche nel mezzo di riferimento, τ_{em} è il tempo richiesto alle onde elettromagnetiche per percorrere la lunghezza caratteristica L , α è un parametro che lega in un rapporto sia l'energia magnetica sia quella elettrica.

Con queste definizioni la (2.17) diventa:

$$\nabla_{\xi} \times \mathbf{e} = -j\omega \tau_{em} \alpha \mathbf{b} \quad (2.19)$$

Allo stesso modo, l'equazione (2.11) diventa:

$$\nabla_{\xi} \times \mathbf{h} = \frac{JL}{H} \mathbf{j} + j\omega \frac{D}{H} L \mathcal{d} \quad (2.20)$$

che diventa, utilizzando le (2.14) – (2.16):

$$\nabla_{\xi} \times \mathbf{h} = L \mu_{ref} \sigma_{ref} \frac{E}{B} \mathbf{j} + j\omega L \mu_{ref} \varepsilon_{ref} \frac{E}{B} \mathcal{d} \quad (2.21)$$

Introduciamo ora due tempi caratteristici elettromagnetici:

$$\begin{cases} \tau_m = \mu_{ref} \sigma_{ref} L^2 \\ \tau_e = \frac{\epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}} \end{cases} \quad (2.22)$$

dove τ_e rappresenta il tempo di diffusione della carica elettrica, cioè il tempo caratteristico con il quale si neutralizza la carica elettrica all'interno di un conduttore. Il tempo τ_m è il tempo di diffusione della densità di corrente elettrica, cioè il tempo caratteristico con il quale la densità di corrente (e quindi il campo magnetico) penetra in un conduttore.

E' facile verificare che risulta:

$$\tau_{em}^2 = \tau_m \tau_e \quad (2.23)$$

e che:

$$L \mu_{ref} \sigma_{ref} c = \frac{\tau_m}{\tau_{em}} = \frac{\tau_{em}}{\tau_m} \quad (2.24)$$

così che la (2.21) diventa:

$$\nabla_{\xi} \times \mathbf{h} = \frac{\tau_m}{\tau_{em}} \frac{1}{\alpha} \mathbf{j} + j\omega \tau_{em} \frac{1}{\alpha} \mathbf{d} \quad (2.25a)$$

oppure

$$\nabla_{\xi} \times \mathbf{h} = \frac{\tau_{em}}{\tau_e} \frac{1}{\alpha} \mathbf{j} + j\omega \tau_{em} \frac{1}{\alpha} \mathbf{d} \quad (2.25b)$$

In conclusione, le equazioni da considerare sono la (2.19) e la (2.25) (a o b).

Vediamo, ora, qual è la forma che assumono le equazioni di *Maxwell* nel limite di “bassa frequenza”, dove per bassa frequenza si intende:

$$\omega \tau_{em} \ll 1 \quad (2.26)$$

La identificazione delle equazioni da risolvere nel limite di bassa frequenza non è banale, perchè il termine $\omega \tau_{em}$ appare con altri termini come il parametro α ed alcuni tempi caratteristici elettromagnetici. Inoltre, il termine α in generale varia con la frequenza e può dipendere dalla particolare geometria in esame. Per cui nei casi di interesse si potrà avere:

$$1. \quad \alpha \approx \frac{1}{\omega \tau_{em}} \quad (2.27a)$$

$$2. \quad \alpha \approx \frac{\tau_m}{\tau_{em}} = \frac{\tau_{em}}{\tau_e} \quad (2.27b)$$

Dove il simbolo “ \approx ” sta per “dell'ordine di”. Per verificare la occorrenza di uno di tali casi, è sufficiente esaminare α nel limite $\omega \tau_{em} \rightarrow 0$.

- Nel caso 1, abbiamo che l'energia relative al campo elettrico va a zero, il che significa che la corrente fluisce in conduttori perfetti.
- Nel caso 2 non vi sono materiali perfetti ed è pertanto la situazione evidentemente più realistica. In quest'ultimo caso l'ordine di grandezza di α non scala con la frequenza.

Analizziamo brevemente i due casi separatamente.

Nel primo caso, le equazioni di *Maxwell* in forma dimensionale diventano:

$$\nabla_{\xi} \times e = -j b \quad (2.28)$$

$$\nabla_{\xi} \times h = \omega \tau_m j + j (\omega \tau_{em})^2 d \quad (2.29)$$

dove, nel limite $\omega \tau_{em} \rightarrow 0$, possiamo pensare di trascurare il termine in $(\omega \tau_{em})^2$ in quanto tale termine risulta piccolissimo. Quindi, in forma non adimensionale si ottiene:

$$\nabla \times E = -j \omega B \quad (2.30)$$

$$\nabla \times H = J \quad (2.31)$$

Nel secondo caso, invece, le equazioni di *Maxwell* in forma dimensionale diventano:

$$\nabla_{\xi} \times e = -j \omega \tau_{em} b \quad (2.32)$$

$$\nabla_{\xi} \times h = \frac{\tau_{em}}{\tau_e} j + j \omega \tau_{em} d \quad (2.33)$$

in questo caso non è presente il termine quadratico $(\omega \tau_{em})^2$, ma se:

$$\frac{1}{\tau_m} \ll \frac{1}{\tau_{em}} \ll \frac{1}{\tau_e} \Rightarrow \frac{1}{\tau_m} < k \frac{1}{\tau_{em}}, \quad \frac{1}{\tau_{em}} < k \frac{1}{\tau_e} \quad (2.34)$$

allora, dalla (2.27 b) risulta che $\alpha \gg 1$; questo significa che l'energia del campo magnetico è dominante rispetto a quella del campo elettrico. Inoltre, abbiamo:

$$\omega \tau_e < k \omega \tau_{em} < k^2 \quad (2.35)$$

E quindi, trascurando i termini di ordine k^2 , la (2.25 b) diventa:

$$\nabla_{\xi} \times h \cong \frac{\tau_{em}}{\tau_e} \frac{1}{\alpha} j \quad (2.36)$$

In altre parole, la densità di corrente di spostamento è trascurabile.

Per cui, se ci mettiamo in un range di "Frequenze relativamente elevate", cioè $\omega \approx \frac{1}{\tau_m}$, allora, in

questo caso, il secondo termine a destra dell'equazione (2.25 b) è di ordine 1, per cui le equazioni da risolvere diventano:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -j \omega B \\ \nabla \times H = J \end{cases} \quad (2.37)$$

che sono le equazioni del modello *Quasi Stazionario Magnetico*.

2.3 Metodo delle correnti indotte (Eddy Current)

Il metodo delle correnti indotte implica l'impiego di un campo magnetico variabile, prodotto da una bobina, che induce, all'interno del campione conduttore, delle correnti di piccola intensità. Questo fenomeno si può spiegare grazie alla legge di Faraday, la quale stabilisce che ogni volta che un campo magnetico variabile si concatena con un conduttore, in quest'ultimo 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. Il flusso delle correnti indotte genera a sua volta un proprio campo magnetico variabile, il quale è sempre in opposizione a quello della bobina (figura 2.1).

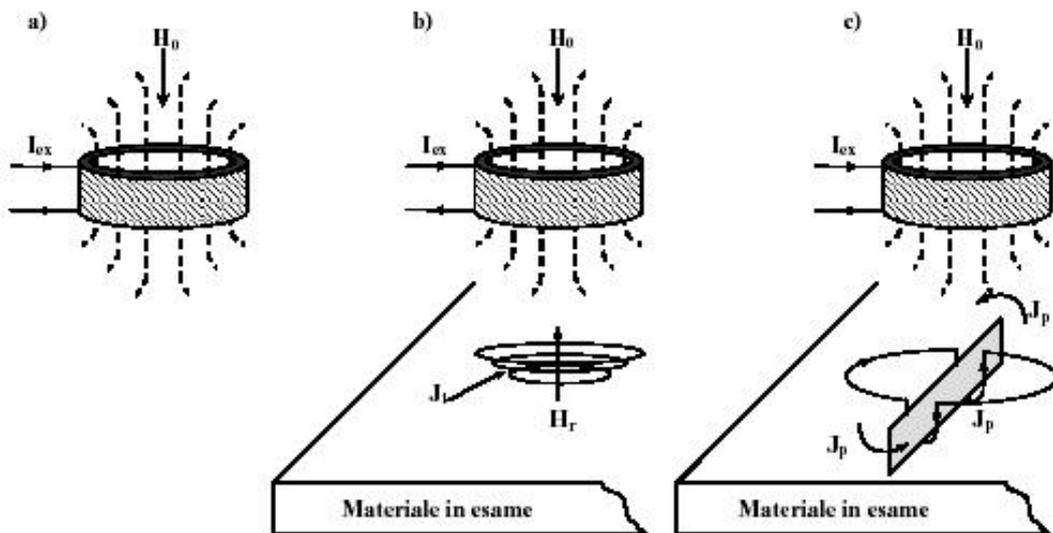


figura 2.1 Bobina in aria a) bobina a contatto con il materiale in assenza b) ed in presenza c) di difetto.

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, che oltre ad essere funzione dei suoi parametri geometrici è strettamente collegata alle proprietà elettriche e magnetiche del materiale.

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.

Generalmente i valori dell'impedenza sono stabiliti a priori su un esempio di un materiale conosciuto, quindi i valori ottenuti nel materiale sotto test sono confrontati con questi.

2.3.1 Piano delle impedenze

Consideriamo un circuito in regime sinusoidale, in questo caso, le relazioni tra tensione e corrente nel nostro sistema (identificativo della sonda utilizzata per il testing con correnti indotte), sono descritte dall'impedenza. Essa è composta da una componente resistiva R e da una reattanza induttiva X_L . Quindi si possono identificare una tensione per la induttanza reattiva ed una per la resistenza:

$$\bar{V}_1 = \bar{I} \cdot X_L \quad (2.38)$$

$$\bar{V}_2 = \bar{I} \cdot R \quad (2.39)$$

Le due tensioni sono tra loro sfasate di 90° 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 stessa. 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. Quando sono modificati i valori di X_L ed R varia la caduta di potenziale nel circuito e se consideriamo che la caduta di potenziale è strettamente legata a tali parametri, la caduta di potenziale nel piano delle impedenze viene, volta per volta, associata ad un fasore Z diverso.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (2.40)$$

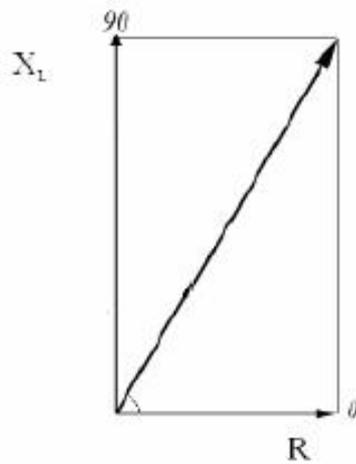


figura 2.2 rappresentazione del fasore Z nel piano di impedenze

In generale la bobina è caratterizzata da una reattanza induttiva e da una resistenza propria, risulta ovvio quindi che in assenza di materiale da testare la bobina avrà una impedenza caratteristica rappresentata da un punto sul piano di impedenze di coordinate X_{L0} ed R_0 . 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 ha esattamente lo stesso effetto che si sarebbe ottenuto se le caratteristiche della bobina per il test venissero cambiate. Infatti l'influenza che l'oggetto sotto test ha sulla bobina può essere descritta efficacemente da una variazione nelle caratteristiche della bobina.

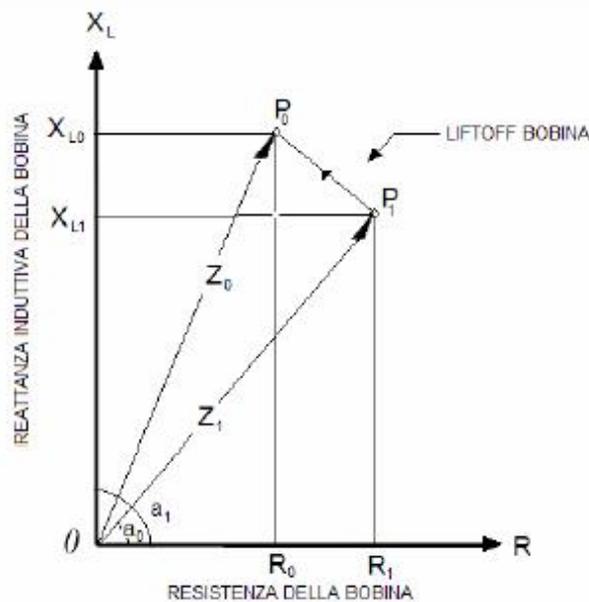


figura 2.3 Rappresentazione delle caratteristiche della bobina nel piano delle impedenze.

Quindi l'impedenza apparente P_0 della bobina 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 (figura 2.3). 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.

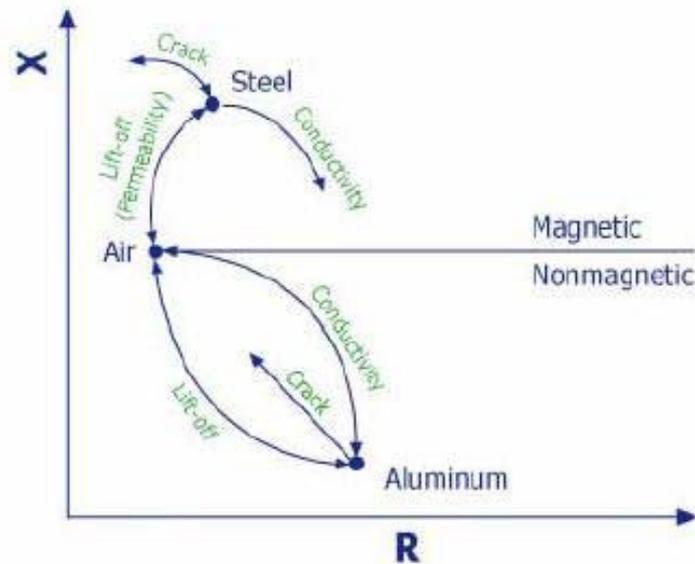


figura 2.4 Variazioni di Z nel piano delle impedenze, al variare del materiale.

Ad esempio si consideri il grafico in figura 2.4. Sono considerati gli effetti che si verificano sulla impedenza di una bobina durante misura con ECT, effettuata su due materiali con caratteristiche diverse tra loro. Si consideri prima il caso dell'alluminio. Quando la sonda (bilanciata in aria) viene posta sul materiale, la R , a causa del flusso delle correnti indotte nel materiale, aumenta, con conseguente diminuzione della X_L . 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, la permeabilità magnetica del materiale concentra i campi magnetici della bobina e ciò accresce la forza del campo magnetico che copre quello prodotto dalle correnti indotte che fluiscono nel materiale, di conseguenza si ha un forte aumento della X_L . L'ampiezza e la direzione di tali spostamenti nel diagramma, come detto, sono funzioni delle proprietà del materiale sottoposto a test, in particolare, conducibilità, dimensioni, e permeabilità magnetica. Sfruttando tali variazioni si determina la presenza o meno di lesioni in un materiale.

Esistono numerosi fattori che influenzano la variazione delle componenti dell'impedenza della bobina, in seguito al campo di reazione generato dal flusso delle correnti indotte all'interno del campione conduttore. Quelli più importanti possiamo classificarli nel seguente modo:

- La conducibilità del materiale;
- La geometria del campione e della bobina;
- La permeabilità magnetica del materiale.

2.3.1.1 La conducibilità del materiale

La conducibilità elettrica è una grandezza fisica che esprime la tendenza di un materiale a farsi attraversare dalla corrente elettrica. Indicata con la lettera greca σ , è definita come l'inverso della resistività ed è pari al rapporto tra densità di corrente e campo elettrico che l'ha generata. Per un conduttore filiforme di lunghezza l e sezione S , la conducibilità elettrica è data dall'inverso della resistenza R , per il rapporto S/l :

$$\sigma = \frac{S}{lR} \quad (2.41)$$

La conducibilità elettrica si misura quindi in $\text{ohm}^{-1} \text{m}^{-1}$.

Mentre la conducibilità propria del materiale è sempre la stessa, ci sono dei fattori interni che possono causare una sua variazione.

Questi sono:

- *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.
- *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.
- *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.

2.3.1.2 La geometria del campione e della bobina

I fattori dimensionali che riguardano le variazioni dell'impedenza della bobina sono:

- *Spessore del materiale*: Le correnti indotte non penetrano completamente 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 di penetrazione:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (2.42)$$

che rappresenta la distanza dalla superficie del campione al punto dove la densità di corrente è approssimativamente il 37% di quella alla superficie. Come si può osservare dall'equazione (2.42), 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. Naturalmente, l'azione della permeabilità è assente nei materiali non ferromagnetici. L'unico parametro di 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 a 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. Comunque, 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 δ , prima che questo cessi di condizionare significativamente l'impedenza della bobina eccitatrice.

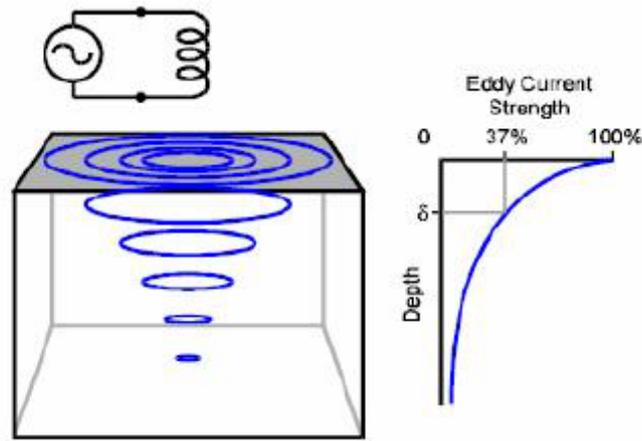


figura 2.5 Disegno schematico dell'andamento della profondità di penetrazione.

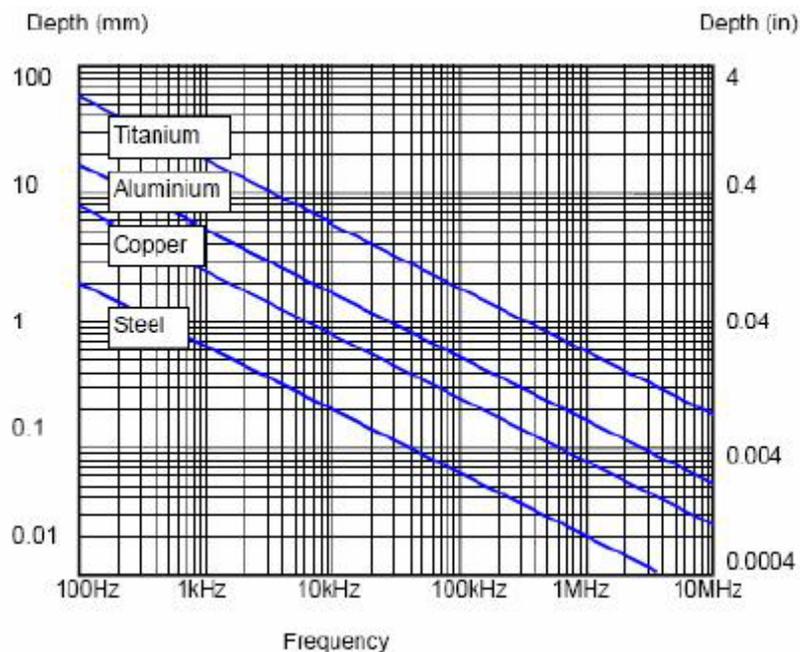


figura 2.6 Carta per il calcolo della profondità di penetrazione in funzione della frequenza.

- *Discontinuità*: Il flusso della corrente indotta all'interno del materiale è influenzato dalla presenza di discontinuità come le cricche, la porosità, o le inclusioni. Le discontinuità causano una riduzione apparente delle correnti indotte nel materiale, con aumento della lunghezza del percorso lungo il quale la corrente deve scorrere. Questo comporta una riduzione del flusso di corrente e quindi una variazione nell'impedenza della bobina.
- *Effetto di Bordo*: Le correnti indotte sono distorte quando l'estremità o bordo del campione è avvicinato alla bobina, in quanto non hanno dove scorrere. La distorsione comporta una non corretta indicazione, che è nota come "effetto di bordo". Infatti, il bordo del campione si comporta qualitativamente come una cricca molto grande e quindi si manifesta una reazione molto forte, che maschera le variazioni dovute ad altri fattori.

Per superare il problema dell'effetto di bordo, bisogna assicurare una opportuna distanza limite tra bobina e bordo, la quale è misurata attraverso dei tentativi di avvicinamento della bobina al bordo, osservando che la lettura in uscita non venga influenzata dalla discontinuità. Quando si effettua la ricerca del difetto, che generalmente si trova proprio sui bordi o nelle vicinanze dei bulloni, si utilizza una particolare custodia che mantiene costante la distanza bobina-bordo, in questo modo, la risposta dello strumento, verso il bordo del materiale, non cambia mentre la bobina ruota attorno al bordo a meno che non ci sia una discontinuità. Questa causa una variazione sul punto di bilanciamento dell'effetto di bordo

- *Lift-off*: Si può osservare che quando la bobina viene alimentata e tenuta in aria lontano dal conduttore, la sua impedenza ha un certo valore. Se la bobina viene avvicinata al conduttore, questo valore cambia sensibilmente. L'effetto lift-off, quindi, fa corrispondere a piccole variazioni nella spaziatura tra bobina e campione, una forte variazione d'impedenza, che può mascherare molte indicazioni inerenti alla rilevazione di un difetto.

2.3.1.3 La permeabilità magnetica del materiale

La permeabilità magnetica (μ) è una grandezza fisica che esprime l'attitudine di una sostanza a lasciarsi magnetizzare. Essa può essere espressa dal rapporto:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.43)$$

dove B indica l'induzione magnetica, mentre H indica il campo magnetico.

Per cui, quando una bobina eccitatrice viene posizionata su un campione di materiale ferromagnetico non magnetizzato, il campo viene notevolmente 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 (punto P di figura 2.7), utilizzando una bobina separata che viene alimentata da una corrente continua.

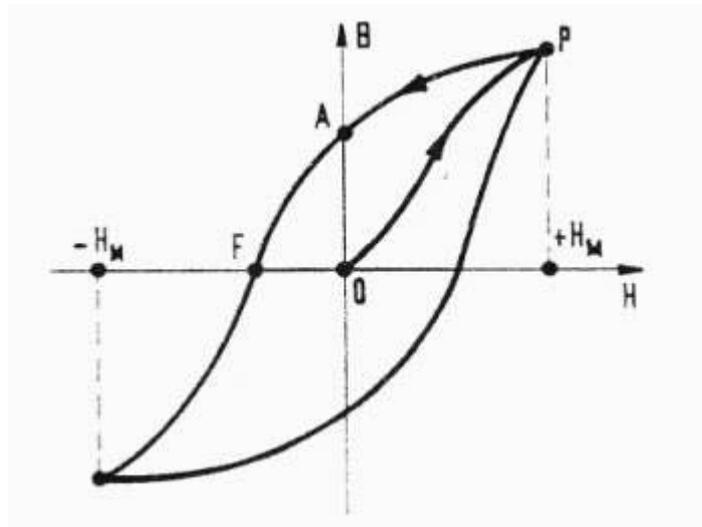


figura 2.7 ciclo di isteresi

La saturazione magnetica elimina in modo efficace le variazioni nel campo magnetico dovuto alle variabili magnetiche (in quanto $\mu = 1$), e in questo modo permette alle altre variabili di essere misurate. Dopo che il controllo è completato, il pezzo deve essere demagnetizzato.

2.4 Descrizione del sistema Sonda – Campione

Dato che il metodo delle correnti indotte, si basa sul principio per cui una bobina, percorsa da corrente sinusoidale, genera un campo magnetico primario che induce delle correnti indotte nel materiale conduttore da esaminare, posto in prossimità di essa e che queste correnti indotte generano, a loro volta, un campo magnetico secondario che, interagendo con quello primario, dà luogo ad una variazione d'impedenza della bobina induttrice, possiamo assimilare il sistema sonda-campione da analizzare al circuito mostrato in figura 2.7. Scegliendo di alimentare tale circuito in tensione, per il principio sopra enunciato, potremo scrivere:

$$\bar{V}_1 = j\omega L_1 \bar{I}_1 + j\omega M_{12} \bar{I}_2 \quad (2.44)$$

$$-R_2 \bar{I}_2 = j\omega M_{21} \bar{I}_1 + j\omega L_2 \bar{I}_2 \quad (2.45)$$

dove $M_{12} = M_{21} = M$ per cui è facile ricavare che:

$$-j\omega M \bar{I}_1 = (R_2 + j\omega L_2) \bar{I}_2 \quad (2.46)$$

dove R_2 è una resistenza variabile.

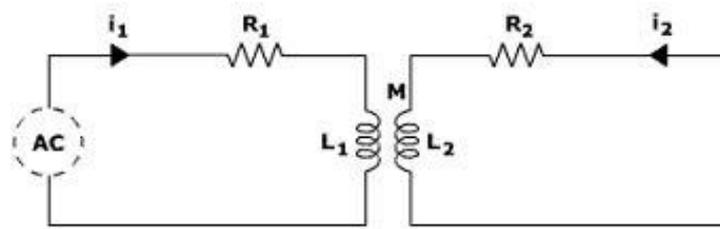


figura 2.8 Circuito rappresentativo del sistema sonda – campione
(la parte sinistra, detta circuito 1 è la parte rappresentativa della sonda,
mentre la parte destra, detta circuito 2, è rappresentativa del campione)

E' possibile vedere che le correnti indotte, vengono generate nel materiale sotto test attraverso una mutua induzione. In generale, la sonda è assimilabile ad un induttanza nelle cui spire si fa fluire una corrente sinusoidale (figura 2.8).

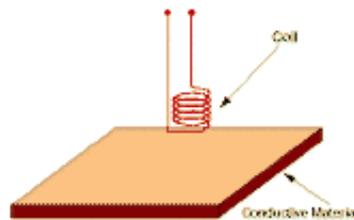


figura 2.9 generalizzazione di una sonda

Quando la sonda è connessa ad uno strumento per la rilevazione delle correnti indotte, può essere assimilata alla parte sinistra del circuito in figura 2.8, mentre la parte destra di tale circuito rappresenta qualsiasi componente di materiale conduttivo.

Quando una corrente sinusoidale fluisce attraverso la bobina, viene generato un campo magnetico in uscita dalla bobina stessa (figura 2.10).

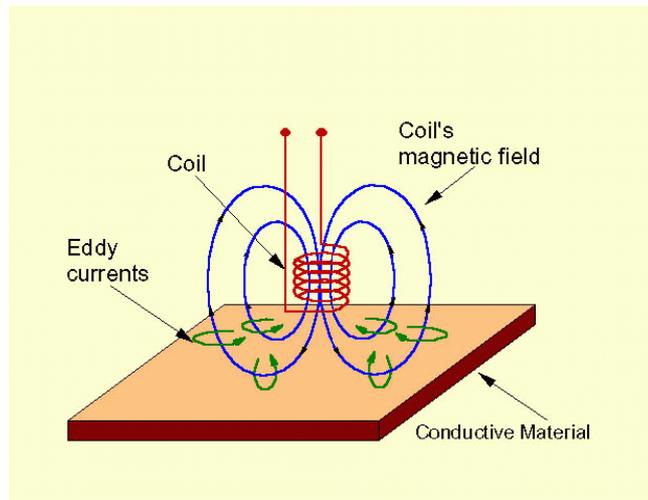


figura 2.10 generazione del campo magnetico

Quando la sonda viene posta in prossimità di un materiale conduttivo, come l'alluminio, il mutamento del campo magnetico generato dalla sonda, genera a sua volta nel materiale una distribuzione circolare di corrente indotta, fluisce in cicli chiusi in un piano perpendicolare al flusso magnetico (figura 2.11).

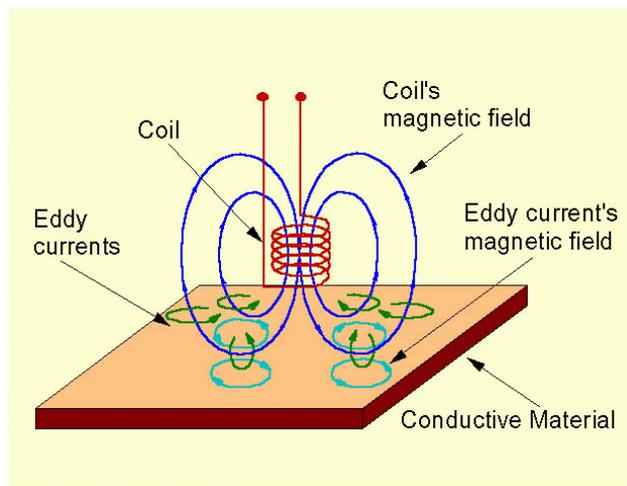


figura 2.11 moto delle eddy current

Le correnti indotte, producono a loro volta un campo magnetico che interagisce col campo magnetico primario prodotto dalla bobina, andandolo a modificare. Questo genera una variazione dei valori di resistenza e di reattanza induttiva della bobina (ovvero dell'impedenza). Dalla misura della variazione di questi parametri, si ricavano le informazioni sull'oggetto sotto test. Per cui se nell'equazione (2.46) la R_2 è una resistenza variabile, avremo che al variare di quest'ultima, varia la corrente \bar{I}_2 che circola nel circuito di destra di figura 2.8. Ricordando, poi,

che la corrente \bar{I}_1 che circola nel circuito di sinistra è una corrente nota, possiamo pensare di esprimere \bar{I}_2 in funzione di \bar{I}_1 nel seguente modo:

$$\bar{I}_2 = -\frac{j\omega M}{(R_2 + j\omega L_2)} \bar{I}_1 \quad (2.47)$$

Sostituendo tale valore di corrente nell'equazione (2.44) otterremo:

$$\bar{V}_1 = j\omega L_1 \bar{I}_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2} \bar{I}_1 \quad (2.48)$$

dividendo, adesso, per \bar{I}_1 otterremo il valore di impedenza Z_1 al variare di R_2

$$Z_1 = \frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_1} = j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2} \quad (2.49)$$

2.5 Modelli di difetti

Quando un difetto o qualsiasi altra specie di discontinuità si verifica in un oggetto metallico in cui sono state indotte correnti, le traiettorie della corrente, quindi le linee di flusso, sono deviate in un modo caratteristico della natura della discontinuità e si verificano variazioni dell'impedenza della bobina.

La figura 2.12 indica come le traiettorie della corrente parassita sono deviate dalla presenza di una fessura superficiale.

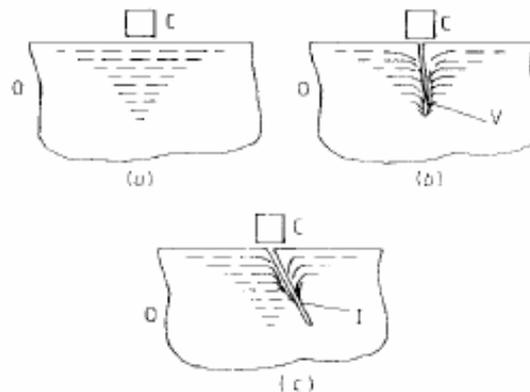


figura 2.12 Sezione trasversale verticale del modello del flusso di correnti parassite (linee tratteggiate) in un conduttore (O) al di sotto di una bobina a scansione superficiale (C) per (a) nessun difetto, (b) una fessura verticale (V) e (c) una fessura inclinata (I).

Osservando adesso la figura 2.13 è possibile notare che le fessure superficiali sia perpendicolari che inclinate possono essere descritte mediante alcuni parametri: lo spessore t , la profondità d o il suo valore normalizzato $d_0 = \frac{d}{b}$ (dove b rappresenta il raggio nel caso di un'asta, il raggio esterno nel caso di un tubo ed è sostituito da r_0 nel caso di bobine a scansione superficiale), la larghezza w che descrive la distanza lungo la fessura nella direzione verso il basso, e l'angolo di inclinazione ϑ rispetto alla normale alla superficie. Notiamo che quando una fessura è inclinata di un angolo ϑ rispetto alla normale alla superficie allora $d = w \cos \vartheta$, pertanto quando la fessura è perpendicolare alla superficie $d = w$.

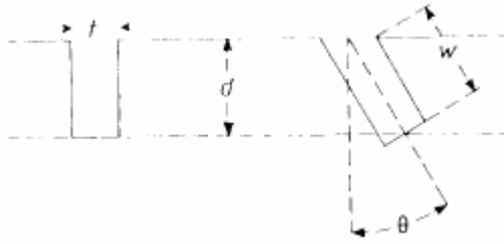


figura 2.13 Dimensioni utilizzate per descrivere fessure superficiali perpendicolari ed inclinate: d = profondità, t = spessore, w = larghezza, θ = angolo di inclinazione.

La dimensione di una fessura superficiale, per esempio, può essere valutata muovendo una bobina che funge da sonda da una posizione sull'oggetto da testare dove non c'è nessun difetto ad una posizione dove è presente una fessura, misurando le variazioni risultanti delle componenti dell'impedenza della bobina. Queste variazioni dipendono dallo spessore t ed in particolare dalla profondità d . La figura 2.12b indica chiaramente ciò perché qualsiasi aumento del valore di t incrementa solo l'area su cui le correnti parassite sono disturbate, quindi l'area su cui è osservata la variazione d'impedenza. Per una data combinazione bobina-campione, il valore di questa variazione d'impedenza dipende anche dai valori normalizzati della frequenza e del lift-off, dal raggio della bobina (per quelle a scansione superficiale) e dal rapporto tra il diametro interno e quello esterno (per il testing di tubi con bobine ad accerchiamento o assiale interna).

Quando una sonda esplora una superficie che contiene una cricca, il valore massimo dell'impedenza raggiunto dalla bobina è determinato soltanto dalla profondità verticale della cricca sotto la superficie; è indipendente dalla larghezza della cricca (figura 2.13). In figura 2.14 viene mostrato la variazione di impedenza di una sonda a singola bobina durante una scansione sopra la superficie di un blocchetto di metallo che contiene delle cricche simulate che hanno le stesse profondità ma angoli di inclinazione differenti. Il grafico dell'impedenza contiene una linea curva per una cricca perpendicolare (figura 2.14 a) ma si apre in un ciclo quando la cricca è inclinata rispetto alla superficie; l'area del ciclo aumenta con l'aumentare dell'angolo di inclinazione (figura 2.14 b e c). La forma del ciclo è determinata dalla forma della cricca e la figura 2.14d mostra come un ciclo può prendere la forma di otto quando la cricca simulata è piegata.

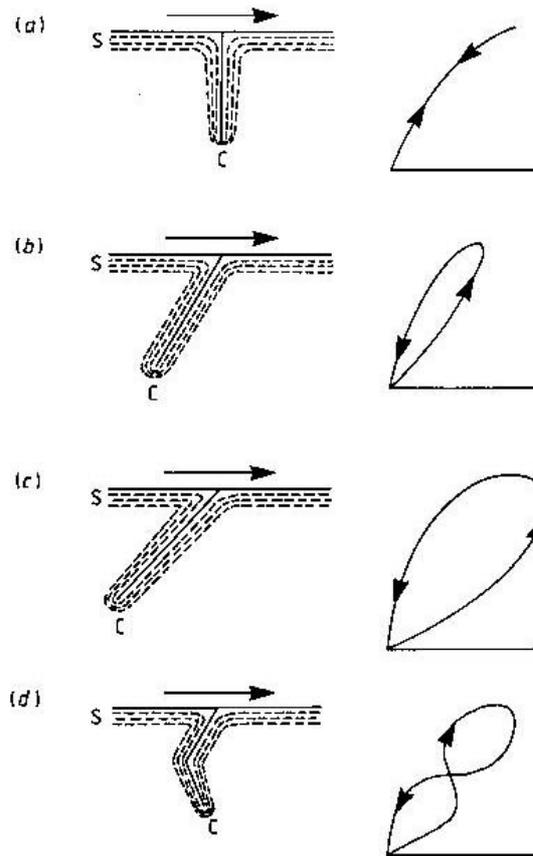


figura 2.14 Variazione della componente di impedenza di una sonda a singola bobina durante la scansione superficiale di un blocchetto metallico contenente cricche simulate tutte della stessa profondità ma con gradi di inclinazione diversi.

2.6 Modello matematico agli elementi finiti

Definito il problema dal punto di vista fisico, risulta indispensabile analizzare la questione anche dal punto di vista matematico - computazionale, in modo da comprendere, le tecniche e le problematiche che sono alla base dei moderni codici di calcolo ad elementi finiti.

2.6.1 Formulazione del problema lineare delle correnti indotte

Consideriamo un volume di interesse V e assumiamo il classico modello elettromagnetico, nel limite quasi stazionario magnetico, descritto dalle equazioni (2.30), (2.31).

Sia $V_c \subset V$ è la zona di conduzione ($\sigma \neq 0$), per cui possiamo scrivere:

$$\nabla \times H = J, \quad \text{in } V_C \quad (2.50)$$

$$\nabla \times E = -j\omega B, \quad \text{in } V_C \quad (2.51)$$

dove le relazioni costitutive sono:

$$B = B(H), \quad \text{in } V \quad (2.52)$$

$$J = \sigma E, \quad \text{in } V_C \quad (2.53)$$

All'esterno della zona di conduzione avremo:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{in } V - V_C \quad (2.54)$$

$$\nabla \times H = J_s \quad \text{in } V - V_C \quad (2.55)$$

$$B = \mu_0 H \quad \text{in } V - V_C \quad (2.56)$$

Sia A il potenziale vettore magnetico. Dalla (2.54) possiamo scrivere:

$$B = \nabla \times A \quad (2.57)$$

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (2.58)$$

Dalla legge di Biot – Savart si ha immediatamente che A la si può esprimere in funzione di J come segue:

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_C} \frac{J(r')}{|r - r'|} dV' + A_s(r) \quad (2.59)$$

dove A_s è un potenziale vettore dovuto alle sorgenti interne a V_C .

Dalla (2.57) e dalla (2.54) si ricava:

$$\nabla \times (E + j\omega A) = 0 \quad (2.60)$$

Per cui la somma del campo elettrico e della derivata temporale del potenziale vettore magnetico è irrotazionale. Come conseguenza di ciò, si ottiene che il campo elettrico si può esprimere come:

$$E = -j\omega A - \nabla \varphi \quad (2.61)$$

con questa posizione, la (2.51) è identicamente soddisfatta.

Utilizzando la (2.59), dalla (2.61) si ricava che il campo elettrico E risulta esprimibile come:

$$E(r) = j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_C} \frac{J(r')}{|r - r'|} dV' - j\omega A_s(r) - \nabla \varphi \quad (2.62)$$

In tal modo le equazioni (2.50) e (2.51) sono entrambi soddisfatte per ogni J , purché solenoidale.

Non è però ancora soddisfatta la relazione costitutiva (2.53). Imponendo, ora, la (2.53) si ottiene la seguente equazione integrale in termini di J .

$$\eta J + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_C} \frac{J(r)}{|r-r'|} dV + \nabla\varphi = -j\omega A_S(r) \quad (2.63)$$

dove J appartiene allo spazio delle funzioni solenoidali e $\eta = \frac{1}{\sigma}$ è la resistività elettrica.

Per risolvere numericamente la (2.63) utilizziamo il metodo dei residui pesati, imponendo che sia nullo l'errore associato alla (2.63) per ogni funzione peso P_K .

Se le funzioni peso P_K sono solenoidali, in modo che:

$$P_K \cdot \hat{n} = 0 \quad \text{su } \partial V_C \quad (2.64)$$

$$\nabla \cdot P_K = 0 \quad \text{in } V_C \quad (2.65)$$

allora si ha che:

$$\int_{V_C} \nabla\varphi \cdot P_K dV = 0 \quad (2.66)$$

quindi l'equazione (2.63) si riduce al sistema:

$$\int_{V_C} P_K \cdot \left(\eta J + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_C} \frac{J(r)}{|r-r'|} dV \right) dV = -j\omega \int_{V_C} A_S(r) \cdot P_K dV \quad \forall P_K \text{ solenoidale} \quad (2.67)$$

Supponiamo adesso di scegliere per J la seguente approssimazione:

$$J = \sum_K I_K W_K(r) \quad (2.68)$$

Imponendo che J sia appartenente all'insieme delle funzioni solenoidali, si ha:

$$W_K = \nabla \times N_K, \quad \text{in } V_C \quad (2.69)$$

$$W_K \cdot \hat{n} = 0, \quad \text{su } \partial V_C \quad (2.70)$$

essendo N_K una generica funzione di forma.

L'insieme delle funzioni N_K può essere convenientemente scelto utilizzando l'approccio descritto in [2].

Adottando il metodo di Galerkin, con W_K uguale alla funzione peso P_k , l'equazione (2.67) può essere scritta come:

$$(j\omega \underline{\underline{L}} + \underline{\underline{R}}) \underline{\underline{I}} = \underline{\underline{V}} \quad (2.71)$$

dove:

$$L_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_C} \int_{V_C} \frac{\nabla \times N_i(r) \cdot \nabla \times N_j(r')}{|r-r'|} dV dV' \quad (2.72)$$

$$R_{ij} = \int_{V_C} \nabla \times N_i(r) \cdot \eta \nabla \times N_j(r) dV \quad (2.73)$$

$$V_i = -j\omega \int_{V_C} \nabla \times N_i(r) \cdot A_s(r) dV \quad (2.74)$$

Supponiamo, ora, che la cricca abbia uno spessore trascurabile, essa può essere schematizzata come una superficie (non necessariamente planare) discretizzata attraverso un insieme finito di faccette ognuna delle quali identifica un pixel del difetto. Poiché il sistema è descritto da un insieme di equazioni lineari possiamo stabilire che la densità di corrente totale è pari alla somma della densità di corrente calcolata in assenza di difetto (soluzione imperturbata J_0) più un δJ di perturbazione dovuto alla presenza del difetto (figura 2.15).

$$J = J_0 + \delta J \quad (2.75)$$

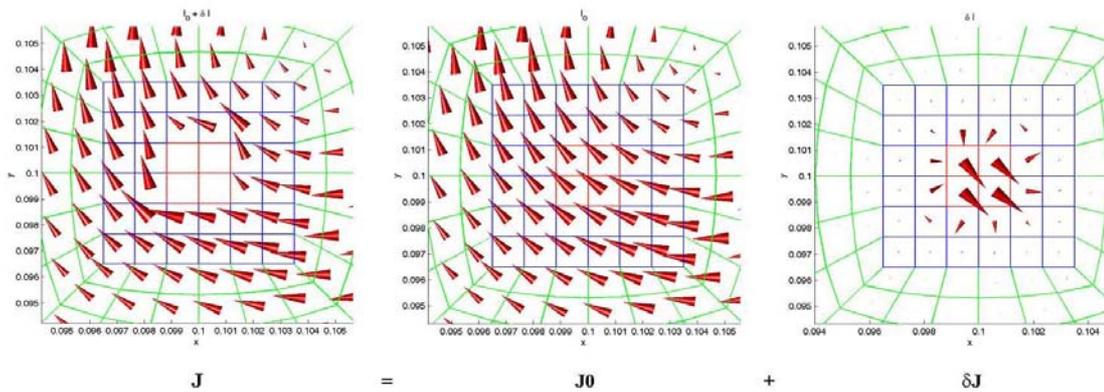


fig. 2.15 andamento della densità di corrente dove J_0 rappresenta la componente imperturbata mentre δJ è la componente dovuta alla perturbazione

In particolare sulla superficie della cricca, la componente normale della densità di corrente totale, deve essere zero. Imponendo questa condizione,

$$J \cdot n = 0 \Rightarrow \delta J \cdot n = -J_0 \cdot n \quad (2.76)$$

dove n è la componente normale alla cricca.

Il vantaggio di questa tecnica è che J_0 può essere calcolato analiticamente, o numericamente usando lo schema descritto da una mesh che non dipende dalla geometria della cricca. Per contro, quando risolviamo per δJ , useremo una mesh che rappresenta soltanto il volume in prossimità della cricca, in modo che il perfezionamento della mesh è richiesto soltanto nelle vicinanze della cricca, senza considerare la posizione della sorgente di eccitazione.

Conoscendo la densità di corrente totale J è possibile calcolare le variazioni delle impedenze delle bobine che compongono la sonda:

$$\delta Z = j\omega \int_{V_c} \frac{J \cdot A_s(r)}{i_0^2} dV \quad (2.77)$$

Dove i_0 è la corrente che circola nella bobina.

2.6.2 Formulazione del problema delle correnti indotte in presenza di materiale magnetico

Molte delle sonde che normalmente vengono utilizzate nei test con correnti indotte, contengono un nucleo di materiale ferromagnetico. Come conseguenza di ciò si ha una variazione della formulazione del problema rispetto a come è stato presentato nel paragrafo precedente.

In presenza di materiale magnetico, le equazioni costitutive (2.52) e (2.56) devono essere riscritte in modo tale da tener conto anche del vettore di magnetizzazione M . In questo modo, avremo che la (2.56) diviene:

$$B = \mu_0(H + M), \quad \text{in } V_f \quad (2.78)$$

Dove V_f è la regione ferromagnetica e il vettore di magnetizzazione M lineare è dato da:

$$M = \chi H \Rightarrow H = \frac{1}{\chi} M \quad (2.79)$$

dove χ è la suscettività magnetica.

Dalla (2.78), utilizzando la (2.79) si ricava che:

$$B = \mu_0 \left(\frac{1}{\chi} + 1 \right) M \Rightarrow B = \mu_0 \left(\frac{1 + \chi}{\chi} \right) M \quad (2.80)$$

per cui possiamo esprimere B in funzione di M come:

$$B = F(M), \quad \text{in } V_f \quad (2.81a)$$

ma essendo $M = 0$ all'esterno di V_f , mentre B è ancora definito, risulta preferibile esprimere M come funzione di B :

$$M = G(B), \quad \text{in } V_f \quad (2.81b)$$

Inoltre, in presenza del materiale magnetico l'espressione del potenziale vettore diventa:

$$A(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \frac{J(r)}{|r - r'|} dV + \int_{V_f} \frac{M(r) \times (r - r')}{|r - r'|} dV + A_s(r) \quad (2.82)$$

Allo stesso modo, diventa possibile esprimere B in termini di J e di M nel seguente modo:

$$\begin{aligned}
B(r) = & B_S(r) + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \frac{J(r) \times (r - r')}{|r - r'|^3} dV + \\
& + \mu_0 M - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_f} \nabla \cdot M(r) \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} dV + \\
& + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_{\hat{e}f}} M(r) \cdot \hat{n} \frac{(r - r')}{|r - r'|^3} dV
\end{aligned} \tag{2.83}$$

dove:

$$B_S(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\mathbb{R}^3 - V_c} \frac{J_S(r) \times (r - r')}{|r - r'|^3} dV \tag{2.84}$$

è la componente di B dovuta alle sorgenti di J_S .

L'equazione costitutiva (2.81b) può essere quindi imposta adottando il metodo dei residui pesati.

Si ottiene:

$$\int_{V_f} P_{MK} \cdot [M - G(B)] dV = 0, \quad \forall P_{MK} \tag{2.85}$$

Le incognite legate alla presenza del materiale magnetico finora sono state date dal vettore M . Esso può essere rappresentato utilizzando le funzioni di forma vettoriali W_{MK} costanti in ogni elemento e nulle altrove:

$$M = \sum_{K=1}^n W_{MK} M_K \tag{2.86}$$

Adottando il metodo di Galerkin, con W_{MK} uguale alla funzione peso P_{MK} , si ottiene una formulazione lineare del problema del tutto simile alla (2.71) con in aggiunta il termine dovuto alla componente di magnetizzazione:

$$(j\omega \underline{L} + \underline{R}) \underline{I} + j\omega \underline{F} \underline{M} = \underline{V} \tag{2.87}$$

dove \underline{I} e \underline{M} si ottengono dal sistema di equazioni non lineari date dalle (2.85) e (2.87) (dove B è dato dalla (2.83)), mentre L_{ij}, R_{ij} e V_i sono date dalle (2.72), (2.73) e (2.74). F_{ij} invece è pari a:

$$F_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c} \int_{V_f} \frac{\nabla \times N_i(r) \cdot (P_i \times (r - r'))}{|r - r'|^3} dV dV' \tag{2.88}$$

Con opportune considerazioni, come già detto nel paragrafo precedente, si può dimostrare che la variazione di impedenza della bobina dovuta alla presenza del materiale magnetico è data da:

$$\delta Z = j\omega \left[\int_{V_c} \frac{J \cdot A_S(r)}{i_0^2} dV + \int_{V_f} \frac{M \cdot B_S(r)}{i_0^2} dV \right] \tag{2.89}$$

2.6.3 Ricostruzione del difetto

Vediamo ora come è possibile ricostruire un profilo del difetto partendo dal segnale misurato ovvero dalla variazione di impedenza della sonda. Assumiamo come sconosciuto l'insieme delle faccette che appartengono alla regione di discretizzazione del difetto. Consideriamo, però, noti sia l'orientamento della cricca sia la regione della sua relativa posizione. La tecnica di ricostruzione del difetto consiste nell'individuare quali faccette, dell'insieme ipotizzato, minimizzano un errore funzionale relativo all'error quadratico medio della radice fra le misure sperimentali ed i segnali simulati di un previsto profilo del difetto stesso. L'errore funzionale normalizzato è:

$$\mathcal{E}_F = \frac{\sqrt{\sum_n (R_n^{guess} - R_n^{meas})^2}}{\sqrt{\sum_n (R_n^{meas})^2}} + \frac{\sqrt{\sum_n (X_n^{guess} - X_n^{meas})^2}}{\sqrt{\sum_n (X_n^{meas})^2}} \quad (2.90)$$

dove $R_n^{meas} + jX_n^{meas}$ è la variazione di impedenza misurata dovuta al difetto e $R_n^{guess} + jX_n^{guess}$ è invece la variazione di impedenza calcolata.

Laboratorio per la diagnostica elettromagnetica non distruttiva - Descrizione del laboratorio di elettrotecnica dell'Università Federico II di Napoli

Tra le principali attrezzature presenti nel laboratorio di Elettrotecnica dell'Università di Napoli, analizziamo quelle che seguono:

3.1 Analizzatore di impedenza HP 4192LF DIGITAL LCR METER

L'analizzatore di impedenza HP 4192LF LCR Meter (figura 3.1) è uno strumento di prove automatiche progettato per misurare i parametri di una impedenza con una elevata accuratezza e velocità.



figura 3.1 Analizzatore di impedenza HP 4192LF DIGITAL LCR METER

Esso in particolare misura la capacità, l'induttanza, la resistenza (resistenza serie equivalente) e il fattore di dissipazione o il fattore di qualità (che è pari al reciproco del fattore di dissipazione) su un ampio range alle frequenze di prova di 120 Hz, 1 kHz e 10 kHz impiegando una configurazione con 5 terminali per il collegamento tra il componente e lo strumento. Si hanno precisamente 4 terminali UNKNOWN: un terminale ad elevata corrente (HCUR), un terminale

ad alto potenziale (HPOT), un terminale a basso potenziale (LPOT) e un terminale a bassa corrente (LCUR); e un terminale GUARD, che consente la connessione a terra e può essere utilizzato per incrementare la precisione in alcune misure. I valori misurati sono visualizzati mediante i display A e B sul pannello frontale dello strumento, mentre un display dedicato visualizza la frequenza di funzionamento. Il range di misura per le capacità va da 0.01 pF a 19.99 mF, per le induttanze va da 0.01 μ H a 1999 H e per le resistenze va da 1 m Ω a 19.99 M Ω ; esse sono misurate con una precisione che va dallo 0.2 allo 0.3 % e alle velocità tipiche di misura da 220 a 260 millisecondi ad 1 kHz e 10 kHz e di circa 900 millisecondi a 120 Hz. HP 4192LF ha la capacità di fare le misure delle variazioni di capacità, induttanze e resistenze. Questa funzione è abilitata attraverso il pulsante Δ LCR, che consente di fare la differenza tra il valore del campione di prova e il valore di riferimento memorizzato ottenuto da una precedente misura premendo il tasto Δ LCR. Altre capacità e caratteristiche del 4192LF sono, per esempio, l'utilizzo di tensioni di bias continue interne (1.5 V, 2.2 V e 6 V) ed esterne (l'interruttore deve essere posizionato su EXT), l'aggiustamento a zero di L e C, cioè la compensazione per eliminare la capacità di dispersione e l'induttanza residua che sono presenti quando un impianto da testare è montato sui terminali UNKNOWN e che provocano errori nella misura (comandi ZERO ADJ LC); opzioni che forniscono uscita BCD, ecc..

3.2 Hocking Phasec2D

Il difettoscopio Phasec2D è un'unità versatile e leggera costruita per essere utilizzata in uno svariato range di operazioni. Tutti i comandi principali sono riportati sul pannello frontale dello strumento e sono personalizzabili a seconda delle esigenze, mentre tutte le altre funzioni o comandi secondari sono facilmente consultabili tramite l'apposito menù (figura 3.2.1).



figura 3.2 Difettoscopio Phasec2D

(FREQ 1)		(ALARM)		(PROBE)	
GAIN XY1	44.0/44.0	ACTIVE	None	MODE	NormalSingle
PHASE1	0.0	ACTION	Off	PROBE ID	Unknown
FREQ1 kHz	10.0	STRETCH	50 ms	LOAD uH	1.3
FILTER1	BP RATIO	SHAPE	Box	DRIVE dB	0
HP/LP1	DC/ 300	TOP/BTM	Off/Off	BAL/CLR MOD	Single
INPUT GAIN1	High	LFT/RIGHT	Off/Off	(GENERAL)	
PROBE1	Bridge	START/END	Off/Off	P/DOWN	Off
		IN/OUTER	Off/Off	KEY CLICK	Off
		(TRACE DISP)		CONTRAST	20
		DI SPLAY	Spot	SCREEN MODE	Normal
		GRATICULE	Grid 2	TRACE THICKEN	Off
		SPOT XY	88/0	RESET	Exec
		SPOT INFO	None	LANGUAGE	English
		PERSIST	0.1 s	BAUD	115200
		SWEEP	0.5 s	TIME	0:00
				DATE	01 Jan 00
		(MEMORY)		CODE	Exec
		SAVE	Setup		
		RECALL	Setup		
		TRACE RECORD	Exec		
(OUTPUT)					
ANALOG O/P 1	X1				
ANALOG O/P 2	X1				

figura 3.2.1 menù del phasec2D

Il Phasec2D è interfacciabile con un calcolatore, per essere comandato da remoto, tramite un cavo di collegamento RS-232 (allo scopo si è scelto di utilizzare il Matlab, per motivi che verranno chiariti in seguito), mentre l'interfaccia con l'oggetto da analizzare tramite l'utilizzo

delle eddy current, avviene attraverso delle apposite sonde. Ovviamente la scelta della sonda è alquanto delicata ed è preferibile discuterla nel seguente paragrafo ad esse dedicato.

3.3 Tipi di sonde utilizzate nel testing con correnti indotte

La caratteristica più importante del testing con correnti indotte è il modo in cui le correnti 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 [1]. 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 indotta 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 da:

$$L = Kn^2 \pi [(r_0^2 - r_c^2) - \mu_r r_c^2] \mu_0 / l \quad (3.1)$$

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, μ_r la permeabilità magnetica relativa del nucleo, μ_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.

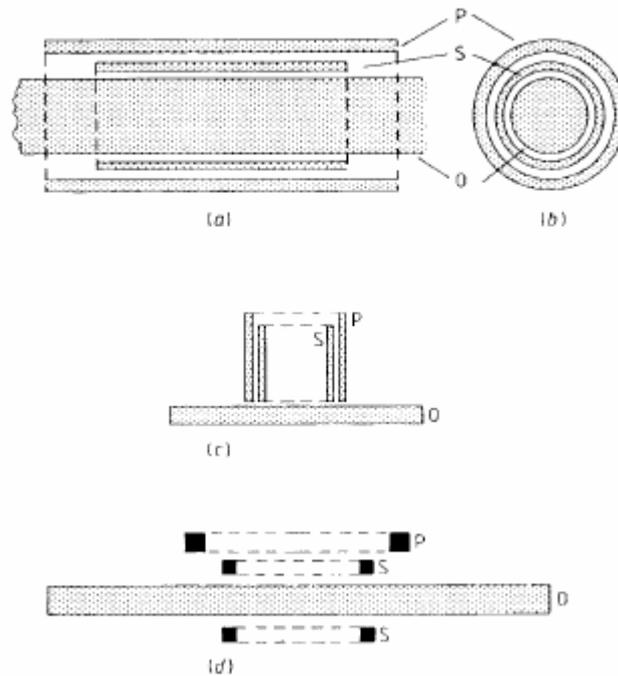


figura 3.3 Tipi di sonda a trasformatore: (a) ad accerchiamento (vista di lato), (b) ad accerchiamento (vista dall'estremità), (c) a scansione superficiale, (d) sonda a forchetta. P = primario, S = secondario, O = oggetto.

Facendo riferimento ai vari tipi di sonde, la più semplice è la *sonda a singola bobina*, che è molto diffusa. Alcune volte è consigliabile utilizzare una sonda che consiste in due bobine predisposte alla maniera di un trasformatore e perciò conosciuta come *sonda a trasformatore* (figura 3.3). In questo caso la bobina primaria induce correnti nell'oggetto da testare e la bobina secondaria funziona da rilevatore. L'utilizzo di questa sonda aumenta il rapporto segnale-rumore per la rilevazione, il che risulta vantaggioso quando sono richieste profonde penetrazioni, ad esempio per investigare i difetti interni. Quando è richiesta la totale penetrazione delle piastre e delle pareti dei tubi si può utilizzare una *sonda a forchetta*. Con una sonda a forchetta, le bobine sono mantenute in posizione mediante un calibro che le colloca separatamente ad una fissata distanza dai lati opposti della relativa sezione del campione da testare. La figura 3.3d illustra un modello della sonda a forchetta che consiste in una bobina trasmittente con due bobine riceventi separate dall'oggetto.

Per quanto riguarda le diverse posizioni della sonda, quelle base (figura 3.4) sono:

- *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.

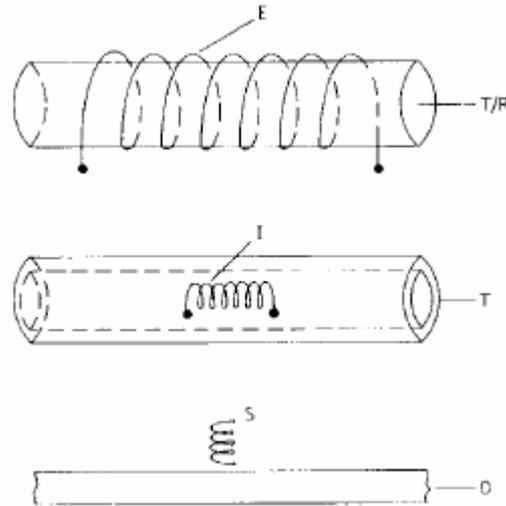


figura 3.4 Posizioni base di una bobina per testing con correnti indotte: E = bobina ad accerchiamento, I = bobina assiale interna, S = bobina a scansione superficiale, T/R = tubo o asta, T = tubo, O = oggetto analizzato in superficie.

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 3.1). 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 può essere migliorata con l'utilizzo di un dispositivo meccanico e, per i tubi e le aste, il campione da testare può essere ruotato mentre si muove in direzione assiale così da fornire una scansione elicoidale; la velocità della scansione inoltre può essere aumentata utilizzando un array di sonde che sono opportunamente spaziate per consentire una totale copertura della superficie.

Tra i vari tipi di sonde, ricordiamo la *sonda a saturazione* utilizzata per il testing con correnti parassite di tubi e sbarre cilindrici fatti di metallo ferromagnetico sotto condizioni di saturazione magnetica. Essa consiste in due bobine ad accerchiamento, quella esterna che porta corrente di saturazione continua e quella interna che si comporta come un rilevatore di corrente indotta. Un

metodo efficace per ottenere saturazione è applicare il campo necessario con un magnete permanente.

Un'ulteriore sonda da considerare è la *sonda differenziale* (figura 3.5), essa è composta da due bobine che possono essere sia ad accerchiamento (figura 3.5a) che assiale interna o a scansione superficiale (figura 3.5b), sono poste adiacenti l'una all'altra e sono così applicate a due parti vicine dello stesso oggetto.

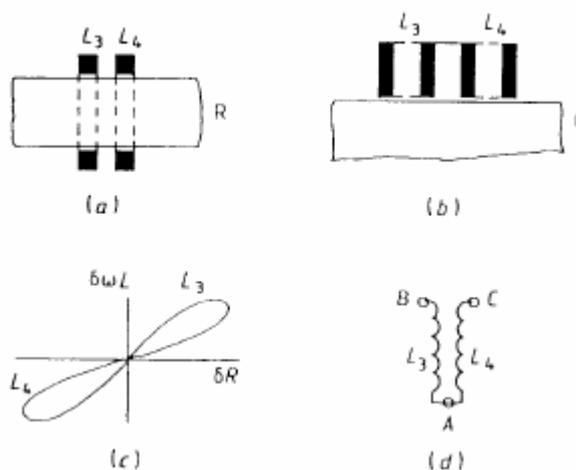


figura 3.5 Sonda differenziale: (a) ad accerchiamento, (b) a scansione superficiale, (c) disegno del vettore d'impedenza tipico in presenza di un difetto superficiale, (d) diagramma circuitale tipico. L_3 e L_4 sono bobine; A, B e C sono i terminali delle bobine; R è un oggetto cilindrico sotto test ed O è un oggetto sotto test con superficie piatta.

Le bobine L_3 e L_4 (figura 3.5d) sono connesse in serie, con un terminale comune (A) tra loro e sono avvolte in maniera opposta. Con il metodo del ponte d'induttanze, le bobine adiacenti sono poste, rispettivamente nei bracci 3 e 4 del ponte. Il bilanciamento del ponte è raggiunto quando le proprietà dell'oggetto da testare sono identiche nelle posizioni di entrambe le bobine. Una variazione di una di queste proprietà (ad esempio dovuta ad una fessura superficiale) altera ogni bobina alternativamente, e poiché gli avvolgimenti sono opposti, le indicazioni delle variazioni delle impedenze di L_3 e L_4 assumono alternativamente la forma mostrata in figura 3.5c, cioè l'altezza verticale del segnale osservato è doppia di quella ottenuta con una singola bobina attraversata dalla stessa corrente alla stessa frequenza. Ecco alcuni vantaggi di utilizzare una sonda differenziale:

- c'è un raddoppiamento della sensibilità rispetto a quella ottenuta con una sonda a singola bobina, considerata l'apparizione simultanea di segnali d'uscita aventi fase uguale ed opposta.

- il segnale d'uscita che nasce da una indesiderata graduale variazione del lift-off è eliminato, purché le bobine siano sufficientemente vicine l'una all'altra (ad esempio contenute in un sola custodia); la variazione d'impedenza è la stessa per entrambe le bobine, ma queste variazioni si annullano perché le bobine sono avvolte in maniera opposta l'una all'altra.
- le variazioni d'impedenza provocate dalle variazioni di temperatura sono eliminate perché entrambe le bobine nella sonda dovrebbero essere alla stessa temperatura.

La bobina differenziale è progettata per essere utilizzata per la rilevazione di brusche variazioni delle proprietà materiali ed è chiaramente non idonea per rilevare difetti estesi e paralleli alla superficie (ad esempio l'assottigliamento delle pareti dovuto a corrosione nei tubi di metallo).

Infine un dispositivo altamente sensibile è la *sonda a riflessione* utilizzata originariamente per misurare gli spessori degli strati di metallo [Dodd, 1977] e più recentemente per valutare i difetti sottosuperficiali nei metalli [Tilson and Blitz, 1985]. Essa è una sonda a trasformatore a scansione superficiale modificata, che contiene due bobine secondarie L_1 e L_2 , aventi le stesse induttanze (figura 4.6a e b), connesse in serie tra loro e con la messa a terra nel punto di connessione. Esse sono avvolte in maniera opposta e, quando sono distanti da qualsiasi metallo e correttamente bilanciate, la differenza di potenziale d'uscita risultante V_0 è zero. Mettendo la sonda sulla superficie dell'oggetto sotto test, si verificano delle differenze nelle induttanze L_1 e L_2 perché minore è la concatenazione del flusso magnetico attraverso L_2 , che è distante dall'oggetto, così V_0 ha un valore finito e complesso. Per bassi valori, le componenti delle variazioni dell'impedenza del circuito della sonda sono proporzionali a quelle di V_0 , cosa analoga ad un ponte d'induttanze.

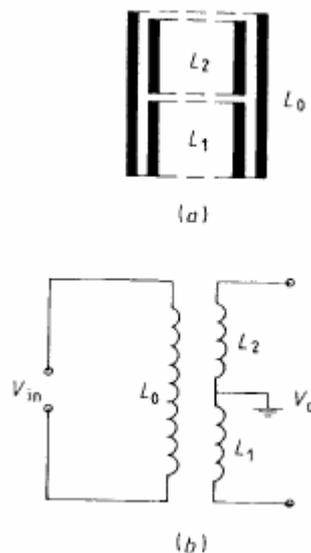


figura 3.6 Sonda a riflessione: (a) una sezione verticale e (b) il diagramma circuitale. V_{in} = differenza di potenziale in ingresso, V_0 = differenza di potenziale in uscita, L_0 = bobina primaria, L_1, L_2 = bobine secondarie.

La sonda a riflessione, a differenza della sonda con bobina differenziale, possiede un ulteriore vantaggio perché le variazioni della fase dell'impedenza della bobina restano virtualmente costanti con la variazione del lift-off.

La sonda utilizzata per l'esperienza in laboratorio (figura 3.7) è una sonda a riflessione, ed è adatta alle ispezioni dei punti di chiusura dei materiali utilizzati in ambito aeronautico (fastener inspection), in particolare è stata utilizzata per ispezioni nei pressi dei bulloni di fissaggio. Tali punti sono soggetti a stress particolari dovuti alle condizioni di utilizzo probanti cui sono sottoposti gli aeroplani, siano essi di tipo commerciale o non. Tale sonda rileva sia cricche che corrosione ed è adatta per rilevazioni su ali e fusoliera di aerei. Opera in un range di frequenze che va da 400hz a 50khz

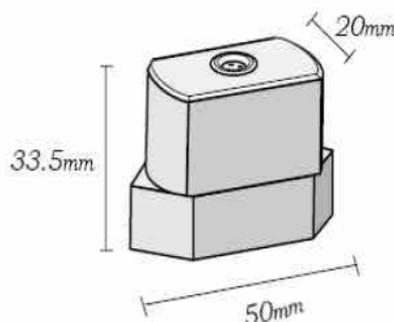


figura 3.7 Sonda per ispezioni *fastener*

3.4 Robot Melfa RV-1a

Per la movimentazione della sonda si è utilizzato un braccio robotizzato prodotto dalla Mitsubishi electric, denominato Melfa RV-1a. Tale robot dispone di sei giunti motorizzati che riproducono, partendo dal bacino e arrivando al polso, tutti i gradi di libertà legati al movimento umano di un braccio.

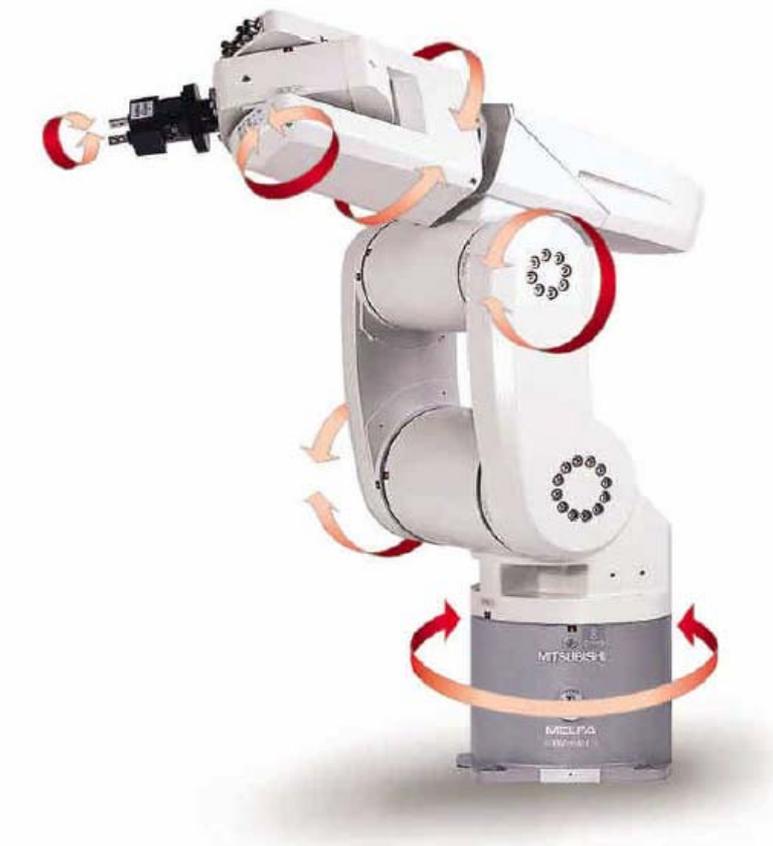


figura 3.8 Robot Melfa RV-1a

Inoltre può essere dotato di vari accessori, alcuni dei quali permettono l'aggancio di strumenti di utilizzo. Lo scopo principale di questo robot, per quanto riguarda questo lavoro di tesi, è quello di fungere da movimentatore per la sonda fastener. Allo scopo è stato realizzato un supporto in materiale plastico che è in grado di reggere la sonda ed allo stesso tempo la tiene lontana da fonti metalliche non oggetto di misura. Il robot può essere pilotato da teachbox o da remoto, collegandolo tramite porta seriale (RS-232) ad un calcolatore. Dal calcolatore si può comandare lo stesso sia tramite software *COSIROP* che permette di sviluppare comandi in linguaggio di programmazione *MELFA BASIC*, sia tramite linguaggi di programmazione non proprietari (in questo lavoro si è scelto di utilizzare il Matlab, per programmare il robot, per motivi che verranno chiariti in seguito). La Mitsubishi fornisce inoltre un'unità di controllo che serve ad interfacciarsi col calcolatore. Essa dispone di display propri su cui fornisce informazioni relative

alla movimentazione o legate ad eventuali errori verificatisi (un classico esempio di errore si verifica quando si cerca di far muovere il robot su di una distanza che va oltre la sua portata), utile nel caso di movimentazione da teachbox, modalità nella quale tali display sono l'unica fonte di riscontro per le operazioni effettuate.



figura 3.10 unità di controllo

Tale apparecchiatura permette di effettuare movimenti precisissimi in uno spazio a tre dimensioni, infatti per ogni asse di movimento ha una precisione di 0,02 mm, che in molti ambiti è una quantità trascurabile, e permette di spostarsi ad una velocità lineare di circa 1 m/s. Il robot può inoltre effettuare movimenti complessi come movimentazioni ad arco o circolari, e per compierli, necessita che gli vengano forniti pochi parametri in quanto sono funzioni preimpostate contemplate nel linguaggio *MELFA BASIC*. Con tali tipi di movimentazione risulta facile preimpostare il braccio meccanico ad effettuare rilevazioni (con sonde ECT) su superfici tondeggianti concave o convesse, quali possono essere un'ala o una fusoliera di un aeroplano.

Descrizione software

In questo capitolo verrà fatta una breve descrizione sia del software utilizzato per pilotare la strumentazione utilizzata, sia del software utilizzato per acquisire i dati derivati dalla scansione dei provini e sia del software utilizzato per la ricostruzione, per immagini, degli eventuali difetti riscontrati (per una descrizione dettagliata di tutti i moduli implementati per permettere il funzionamento dei dispositivi utilizzati per la sperimentazione, riferirsi all'appendice A).

Il tutto è stato sviluppato in ambiente Matlab, infatti, in questo modo, si è potuto creare un'unica interfaccia per gestire sia il difettoscopio che il braccio robotizzato.

Sempre in ambiente Matlab viene effettuata anche la gestione dei dati per la ricostruzione delle immagini rappresentative dei difetti.

4.1 Automazione delle misure

Lo schema di collegamento a cui faremo riferimento, è quello mostrato in figura 4.1, dove viene mostrato che il braccio robotico è collegato al PC tramite interfaccia seriale RS-232. Allo stesso modo viene collegato al PC, il difettoscopio Phasec2D, a cui viene collegata la sonda utilizzata per gli esperimenti (sonda fastener) tramite l'apposito cavo fornito a corredo. Tale sonda viene poi collegata al robot tramite un supporto in materiale plastico appositamente costruito.

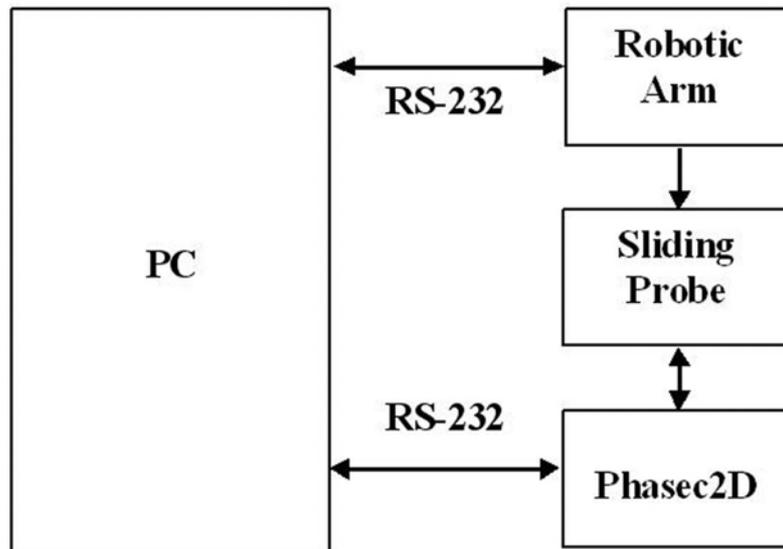


figura 4.1 schema di collegamento PC-Robot-Sonda-Phasec2D

Vediamo ora come è stato reso possibile l'automazione della misura e l'acquisizione dei dati da remoto.

Allo scopo è stato realizzato l'm-file: Main2D.m (figure 4.2 e 4.3).

Questo m-file, tramite l'utilizzo di funzioni, opportunamente realizzate, permette la scansione del componente da analizzare da parte del sottosistema pc-robot-sonda e l'acquisizione dei dati da parte del sottosistema pc-phasec2D-sonda.

Analizziamo più nel dettaglio l'intera procedura.

```

H:\ndt\control\phasec2d_Matlab\Main2D.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: Base
1 | % IMPORTANT: Initialize robot and Move to the start position
2 | % USING RVIA_init.M !!!
3 |
4 |
5 |
6 | menuch = menu('have you initialized robot?', 'yes', 'no');
7 | if (menuch == 0)|(menuch ==2), return, end
8 |
9 |
10 | %% INPUT DATA
11 | addpath('D:\ndt\control\robot_MatLab',0)
12 | input_data_robot
13 |
14 | %% Move to the start position
15 | out = MFB_mov_p(rob,Robot.start_from)
16 | pause(.1);
17 |
18 | %input_data_phasec2d
19 | percorso = 'D:\ndt\misura\sandwich\hole_id50_5mm_01kHz';
20 |
21 | %% Info
22 | info = 'Doppia piastra con cricca di 5 mm e id_50';
23 |
24 | %% SET phasec2d
25 | gain = '038 038'; %% (2 valori di gain es.: '038 038')
26 | phase = '0.0'; %% (format x.x)
27 | freq = '1.0 KHz'; %% (es.: '10.5 KHz')
28 | probe = 'reflection'; %% (es.: 'reflection')
29 | set_ph2d(gain,phase,freq,probe),
30 | pause(1);
31 |
32 | NumScans = 5;
script Ln 1 Col 1

```

figura 4.2 file di lancio Main2D parte prima

```

H:\ndt\control\phasec2d_Matlab\Main2D.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: Base
33 | NumScans = 5;
34 | for ind_scan = 1:NumScans,
35 |     %% SCAN 2D
36 |     X2D = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1, ...
37 |         ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
38 |     Y2D = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1, ...
39 |         ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
40 |     Z2D = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1, ...
41 |         ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
42 |     Z_RE = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1, ...
43 |         ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
44 |     Z_IM = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1, ...
45 |         ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
46 |
47 |     [X2D,Y2D,Z2D,Z_RE,Z_IM] = phasec_scan_2D(rob,Robot)
48 |
49 |     %% Plot
50 |     plot(Y2D(1,:),Z_RE(1,:),Y2D(1,:),Z_IM(1,:), grid, ...
51 |         xlabel('Linea di Scansione'), ylabel('Z'), ...
52 |         title('Scansione di una piastra con eventuale difetto'), ...
53 |         legend('Z.Re','Z.Im'))
54 |
55 |     %% SAVE RESULT
56 |     save([percorso 'meas_id50_5mm_01kHz_' num2str(ind_scan,'%02d')],...
57 |         'X2D','Y2D','Z2D','Z_RE','Z_IM','gain','phase','freq','probe','info');
58 | end
59 |
script Ln 59 Col 1

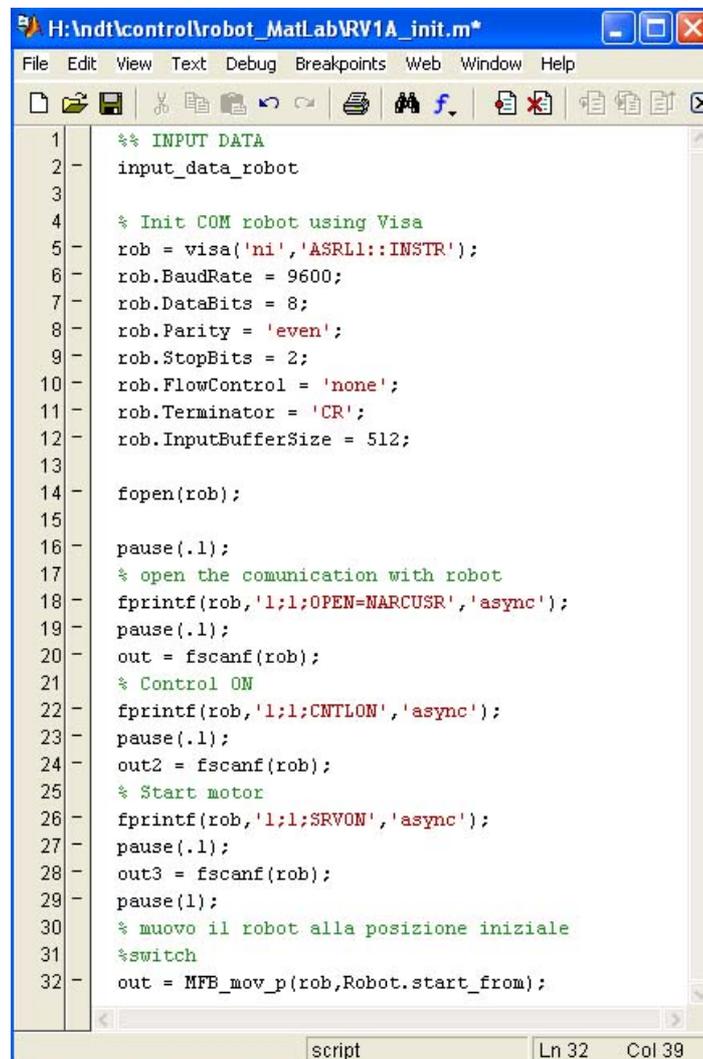
```

figura 4.3 file di lancio Main2D parte seconda

Non appena si lancia il Main2D, viene richiesto se il robot è stato inizializzato, ovvero se è stata eseguita la sequenza di operazioni mostrate in figura 4.4, producendo il menù di scelta mostrato in figura 4.5 (righe 6 e 7 di figura 5.2).

Durante la fase di inizializzazione del robot, vengono eseguite le seguenti operazioni tutte mostrate in figura 4.4:

- vengono caricati i dati di posizione del robot (riga 2);
- viene inizializzata la comunicazione tramite la porta seriale (righe 5 a 14);
- viene aperta la comunicazione (righe 18 a 20);
- viene abilitato il controllo da remoto (righe 22 a 24);
- vengono accesi i motori (righe 26 a 28);
- viene spostato il robot alla posizione di lavoro (riga 32).



```
1  %% INPUT DATA
2  input_data_robot
3
4  %% Init COM robot using Visa
5  rob = visa('ni','ASRL1:INSTR');
6  rob.BaudRate = 9600;
7  rob.DataBits = 8;
8  rob.Parity = 'even';
9  rob.StopBits = 2;
10 rob.FlowControl = 'none';
11 rob.Terminator = 'CR';
12 rob.InputBufferSize = 512;
13
14 fopen(rob);
15
16 pause(.1);
17 %% open the communication with robot
18 fprintf(rob,'!;1;OPEN=NARCUSR','async');
19 pause(.1);
20 out = fscanf(rob);
21 %% Control ON
22 fprintf(rob,'!;1;CNTLON','async');
23 pause(.1);
24 out2 = fscanf(rob);
25 %% Start motor
26 fprintf(rob,'!;1;SRVON','async');
27 pause(.1);
28 out3 = fscanf(rob);
29 pause(1);
30 %% muovo il robot alla posizione iniziale
31 %%switch
32 out = MFB_mov_p(rob,Robot.start_from);
```

figura 4.4 file di inizializzazione del robot: RV1A_init

Se il robot è pronto per eseguire una scansione è possibile rispondere “yes” alla domanda mostrata nel menù di scelta di figura 4.5.



figura 4.5 Menù init robot

Rispondendo “yes” alla domanda è possibile andare avanti nell’ esecuzione delle successive operazioni presenti in Main2D.

Al passo successivo viene aggiunto il percorso in cui si trovano tutte le funzioni realizzate che permettono la completa movimentazione del robot (riga 11 di figura 4.2) e vengono caricati i dati di posizionamento del robot (riga 12 della stessa figura).

Successivamente viene spostato il robot in quella che è stata scelta come la posizione di inizio della scansione, tramite l’ utilizzo della funzione “MFB_mov_p” (riga 15 di figura 4.2). Questa funzione è particolarmente importante in quanto risulta essere quella maggiormente impiegata per la movimentazione del robot. Essa in pratica, assegna alla stringa “command” la posizione successiva che il robot deve raggiungere, dopodiché sposta il robot a tale posizione utilizzando il comando “MOV P”, espresso in linguaggio “*Melfa Basic*” tramite il contemporaneo utilizzo della funzione “RS_exec” (figura 4.6). Quest’ ultima funzione esegue il comando “command” ed effettua anche un controllo sugli eventuali errori che potrebbero essere prodotti in questa fase tramite l’ utilizzo della funzione “MFB_error”. Nel caso in cui si dovesse presentare un errore, viene disattivato il comando di allarme e vengono spenti i motori del robot (righe 13 e 14 di figura 4.6).

```

H:\ndt\control\robot_MatLab\MFB_mov_p.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 % Mov_P - move to position
2 % Robot - destination position, cluster of numbers
3
4 function out = MFB_mov_p(rob,Robot)
5
6
7 - Robot
8
9 - command = ['P=(' num2str(Robot.X,'%6.2f') ',' num2str(Robot.Y,'%6.2f') ','...
10 num2str(Robot.Z,'%6.2f') ',' num2str(Robot.A,'%6.2f') ','...
11 num2str(Robot.B,'%6.2f') ',' num2str(Robot.C,'%6.2f') ')(' ...
12 num2str(Robot.F1) ',' num2str(Robot.F2) ')'];
13
14 - out = RS_exec(rob,command);
15 - pause(1);
16
17 - out = RS_exec(rob,'MOV P');
18
19 - MFB_wait_until_ready(rob);
20
21 - return
MFB_mov_p Ln 1 Col 1

```

figura 4.5 funzione MFB_mov_p

```

H:\ndt\control\robot_MatLab\RS_exec.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 % Questa funzione opera una concatenazione
2 % per eseguire il comando
3
4 function out4 = RS_exec(rob,command),
5 - command = ['1;1;EXEC' command];
6 - fprintf(rob,command,'async');
7 - pause(.1);
8 - out4 = fscanf(rob);
9
10 - ERROR = MFB_error(rob);
11
12 - if ERROR.flag,
13 -     all_off = RS_rstalm(rob);
14 -     srv_off = RS_srwoff(rob);
15 - end
16
17 - return
RS_exec Ln 1 Col 1

```

figura 4.6 funzione RS_exec

Ritornando al Main2D, dopo questa fase viene aggiunto il percorso in cui si vorranno salvare i dati (riga 19) e vengono aggiunte delle informazioni sul tipo di scansione (riga 22).

Fatto ciò, si passa a settare il `phasec2D`, specificando alcuni dati necessari per una corretta misura, tra cui anche il tipo di sonda utilizzata (righe 25 a 29 di figura 4.2). Tali dati vengono inviati al dispositivo tramite l'utilizzo della funzione "`set_ph2d`" che ne modifica i parametri rendendolo pronto per la scansione.

Il passo successivo, prevede l'esecuzione della scansione vera e propria. Viene infatti specificato il numero di scansioni da eseguire, il modo in cui il robot si deve muovere lungo le tre dimensioni dello spazio ed i punti in cui bisogna prelevare i dati. Questi dati vengono poi forniti come ingresso della funzione "`phasec_scan_2D`" (figura 4.7) che permette l'esecuzione della scansione vera e propria e l'acquisizione dei dati derivati dalla scansione (righe 32 a 46 di figura 4.3).

Il risultato della scansione viene poi mostrato a video, producendo un grafico tramite l'utilizzo del comando "`plot`" (righe 50 a 53 di figura 4.3) e salvato in un mat-file (righe 56 e 57) utilizzando il percorso precedentemente specificato. Tale mat-file contiene quindi i dati sperimentali di misura necessari poi per il riconoscimento della posizione e delle dimensioni dell'eventuale difetto presente.

In questo modulo, il corpo principale (scansione e acquisizione dei dati) è quello riguardante la funzione "`phasec_scan_2D`" (figura 4.7) in cui viene richiamata la funzione "`phasec_scan_line`" (figura 4.8). Ma vediamo come procede la fase di scansione ed acquisizione dei dati.

Nella fase di scansione, denominando X l'indice di riga e Y l'indice di colonna, viene eseguita la scansione per righe successive, fino a ricoprire l'intera area di un piano (scansione 2D). Quindi, in pratica, la funzione `phasec_scan_2D`, blocca la riga di scansione, mentre la funzione `phasec_scan_line` esegue la scansione lungo la riga bloccata da `phasec_scan_2D` e la funzione `meas_ph2d` (figura 4.9) acquisisce i dati per ogni punto della scansione. Finita la scansione della riga, la sonda viene spostata alla riga successiva permettendo il ripetersi delle operazioni fino a ricoprire l'intera area desiderata.

```

H:\ndt\control\phasesc2d_Matlab\phasesc_scan_2D.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: Base
1  %% SCANNING 2D
2  % raws Y
3  % columns X
4
5  function [X2D,Y2D,Z2D,Z_RE,Z_IM] = phasesc_scan_2D(rob,Robot)
6
7  for ind_x = 1:(round((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1),
8      % get actual position
9      RobotPos = MFB_getpos(rob);
10     % check for the end of scan
11     scanflag = SSscanon(Robot,RobotPos);
12     % meas Z along the current line
13     [X,Y,Z,Z_re,Z_im] = phasesc_scan_line(rob,Robot);
14     X2D(ind_x,:) = X;
15     Y2D(ind_x,:) = Y;
16     Z2D(ind_x,:) = Z;
17     Z_RE(ind_x,:) = Z_re;
18     Z_IM(ind_x,:) = Z_im;
19     % move to the next line
20     Robot.Step1.dx = Robot.Step.dx * scanflag(1);
21     Robot.Step1.dy = 0;
22     Robot.Step1.dz = 0;
23     Robot.Step1.dA = 0;
24     Robot.Step1.dB = 0;
25     Robot.Step1.dC = 0;
26     outdp = MFB_mov_dp(rob,Robot.Step1);
27     pause(.1);
28     RobotPos.X = RobotPos.X + Robot.Step1.dx;
29     out = MFB_mov_p(rob,RobotPos);
30     pause(.1);
31
32 end
33 return
phasesc_scan_2D Ln 1 Col 1

```

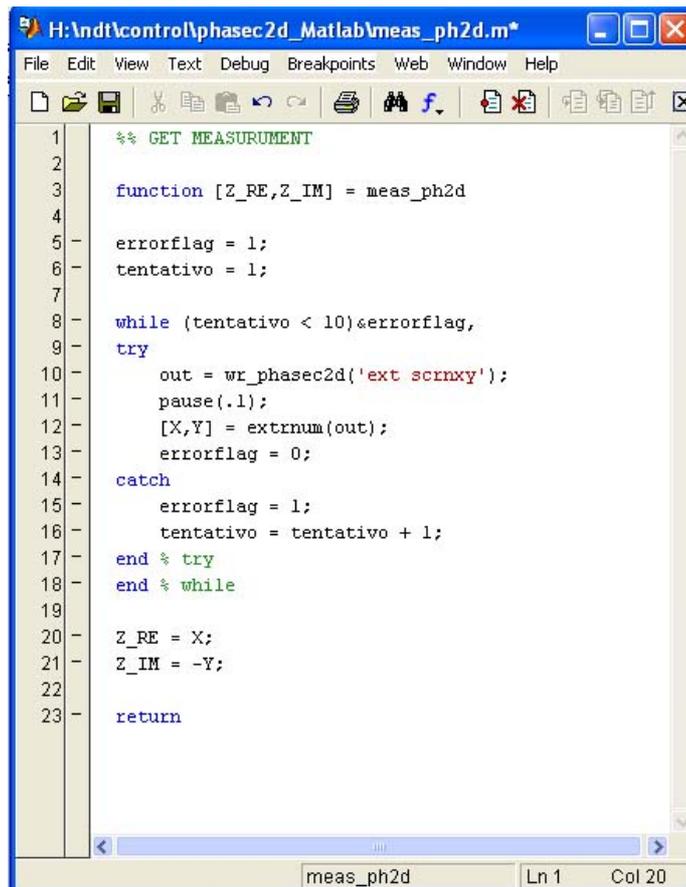
figura 4.7 funzione phasesc_scan_2D

```

H:\ndt\control\phasesc2d_Matlab\phasesc_scan_line.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: Base
1  %% SCANNING ALONG (Y) DIRECTION
2  |
3  function [X,Y,Z,Z_RE,Z_IM] = phasesc_scan_line(rob,Robot),
4
5  for ind_y = 1:(round((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1),
6      % get actual position
7      RobotPos = MFB_getpos(rob);
8      X(1,ind_y) = RobotPos.X;
9      Y(1,ind_y) = RobotPos.Y;
10     Z(1,ind_y) = RobotPos.Z;
11     % check for the end of scan
12     scanflag = SSscanon(Robot,RobotPos);
13     % meas Z at the current point
14     [Z_RE(1,ind_y),Z_IM(1,ind_y)] = meas_ph2d;
15     % move to the next point
16     Robot.Step2.dx = 0;
17     Robot.Step2.dy = Robot.Step.dy*scanflag(2);
18     Robot.Step2.dz = 0;
19     Robot.Step2.dA = 0;
20     Robot.Step2.dB = 0;
21     Robot.Step2.dC = 0;
22
23     outdp = MFB_mov_dp(rob,Robot.Step2);
24
25 end
26 return
phasesc_scan_line Ln 2 Col 1

```

figura 4.8 funzione phasesc_scan_line



```
H:\Indt\control\phasesc2d_Matlab\meas_ph2d.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 %% GET MEASUREMENT
2
3 function [Z_RE,Z_IM] = meas_ph2d
4
5 errorflag = 1;
6 tentativo = 1;
7
8 while (tentativo < 10)&errorflag,
9 try
10 out = wr_phasesc2d('ext scrnxy');
11 pause(.1);
12 [X,Y] = extrnum(out);
13 errorflag = 0;
14 catch
15 errorflag = 1;
16 tentativo = tentativo + 1;
17 end % try
18 end % while
19
20 Z_RE = X;
21 Z_IM = -Y;
22
23 return
meas_ph2d Ln 1 Col 20
```

figura 4.9 funzione meas_ph2d

4.2 Elaborazione dei dati

Dopo aver effettuato l'acquisizione dei dati durante la fase di scansione, si passa alla fase di elaborazione dei dati acquisiti.

Allo scopo è stato sviluppato un m-file "plotres.m" (figura 4.10 a 4.13) che funziona come segue:

- Vengono tracciati i grafici della parte reale, della parte immaginaria e del modulo dell'impedenza (dati risultanti dalla scansione) relativi all'intera scansione;
- Viene eseguito il filtraggio di questi dati andando ad evidenziare le sole zone di interesse (in cui si presentano i difetti);
- Vengono tracciati i grafici della parte reale, della parte immaginaria e Re-Imm dell'impedenza relativi alle zone filtrate;
- Vengono salvati (in un mat-file) i dati (filtrati) per essere poi elaborati numericamente.

```

H:\ultimate\ndt\WHP4192A\misure\single_layer\cricca_id100_3mm_01kHz\plotres.m*
File Edit Text Window Help
1 %Plotres
2 close all
3 clear
4 clc
5
6 caso = 'cricca_id100_3mm_01kHz_'
7
8 % SUPERIMPOSE THE MEAS FILES? ALL THE
9 flag_repeat = 0;
10
11 freq = le3;
12 phaseshift = 180;
13
14 % NUMBER OF MEAS FILES TO AVERAGE
15 numfiles = 10;
16
17 % FILTER CONSTANTS
18 flag_filter = 1;
19 a=1;
20 n=2;
21 b=ones(n,1)/n;
22
23 % DISPLACEMENT FROM CENTER
24 dx_meas = -.50; % mm
25
26 %marker = {'>','*','+','d','<','o','^','s','none'};
27 color = {[0 0 1],[1 0 1],[.9 .8 0],[0 .75 .75],[0.5 0.5 0.5],[.5 1 .5],...
28         [0 .9 0],[0 .9 .9],[1 .2 0],[0 0 .5],[.5 0 .5],[.5 .5 0],[0 .5 .5]};
29 R_mean = 0;
30 XL_mean = 0;
31
32 for ind = 1:numfiles,
33     filename = [caso num2str(ind,'%02.F') '.mat'];
34     load(filename);

```

figura 4.10 file plotres parte prima

```

H:\ultimate\ndt\WHP4192A\misure\single_layer\cricca_id100_3mm_01kHz\plotres.m*
File Edit Text Window Help
35 x_meas = YZD + dx_meas;
36 R = Z_RE; % Ohm
37 XL = Z_IM; % H
38 R_mean = R_mean + R;
39 XL_mean = XL_mean + XL;
40
41 if flag_repeat,
42     figure(1); hold on;
43     plot(x_meas, R, 'b-', 'LineWidth',1.5,'Color',color(ind)), grid on,
44     grid on,
45     set(gca,'FontSize',12)
46     xlabel('linea di scansione (mm)','FontSize',16), ylabel('\Re(dZ) (\Omega)','FontSize',16), hold off
47     title('Real','FontSize',16)
48
49     figure(2); hold on;
50     plot(x_meas, XL, 'b-', 'LineWidth',1.5,'Color',color(ind)), grid on,
51     grid on,
52     set(gca,'FontSize',12)
53     xlabel('linea di scansione (mm)','FontSize',16), ylabel('L (mH)','FontSize',16), hold off
54     title('Immaginary','FontSize',16)
55
56 %% ABS
57     figure(3); hold on;
58     plot(x_meas, sqrt(R.^2 + XL.^2), 'ko-', 'LineWidth',1.5),
59     grid on,
60     set(gca,'FontSize',12)
61     xlabel('linea di scansione (mm)','FontSize',16), ylabel('abs(dZ)','FontSize',16), hold off
62     title('ABS','FontSize',16)
63
64 end
65
66 end
67
68 R_mean = R_mean/numfiles;

```

figura 4.11 file plotres parte seconda

```

H:\ultimate\ndt\HP4192A\msisure\single_layer\cricca_id100_3mm_01kHz\plotres.m*
File Edit Text Window Help
69 XL_mean = XL_mean/numfiles;
70
71 %FILTERRING
72 if flag_filter,
73 R_mean = filter(b,a,R_mean);
74 XL_mean = filter(b,a,XL_mean);
75 end
76
77 % DISPLACEMENT
78 xmeas = (-25:1:25)';
79 R_mean = interp1(x_meas,R_mean,xmeas,'cubic');
80 XL_mean = interp1(x_meas,XL_mean,xmeas,'cubic');
81 x_meas = xmeas;
82
83 dZ = (R_mean + XL_mean*j)*exp(phaseshift*pi/180*j);
84
85 dZ_mut = dZ;
86
87 % SUBTRACT Z IN AIR!
88 Z_air_mut0 = load('air_singleplot_01kHz.dat')
89 Z_air_mut = (Z_air_mut0(1) + Z_air_mut0(2)*j)*exp(j*phaseshift*pi/180);
90
91 % MUTUA
92 figure(10); hold on;
93 plot(x_meas, real(dZ_mut), 'ko-', 'LineWidth',1.5),
94 grid on,
95 set(gca,'FontSize',12)
96 xlabel('linea di scansione (mm)','FontSize',16), ylabel('\Re(dZ) (\Omega)','FontSize',16), hold off
97 title('MUTUA','FontSize',16)
98
99 figure(11); hold on;
100 plot(x_meas, imag(dZ_mut), 'ko-', 'LineWidth',1.5),
101 grid on,
102 set(gca,'FontSize',12)

```

figura 4.12 file plotres parte terza

```

H:\ultimate\ndt\HP4192A\msisure\single_layer\cricca_id100_3mm_01kHz\plotres.m*
File Edit Text Window Help
102 set(gca,'FontSize',12)
103 xlabel('linea di scansione (mm)','FontSize',16), ylabel('\Im(dZ) (\Omega)','FontSize',16), hold off
104 title('MUTUA','FontSize',16)
105
106 figure(12); hold on;
107 plot(real(dZ_mut), imag(dZ_mut), 'ko-', 'LineWidth',1.5),
108 grid on,
109 set(gca,'FontSize',12)
110 xlabel('\Re(dZ) (\Omega)','FontSize',16), ylabel('\Im(dZ) (\Omega)','FontSize',16), hold off
111 axis equal
112 title('MUTUA','FontSize',16)
113
114 %return
115 dz_hole_crack_meas = dZ_mut;
116 save(['D:\ndt\Simulazioni\scan070504\meas\HP\sand_cricca_id100_3mm_01kHz_meas'],...
117 'dz_hole_crack_meas','xmeas')
118 save('sand_cricca_id100_3mm_01kHz_meas','dz_hole_crack_meas','xmeas')
119
120 % SAVE TXT FILE
121 DZ = [xmeas,real(dz_hole_crack_meas),imag(dz_hole_crack_meas)];
122 fid = fopen(['sand_' caso '.dat'],'w');
123 fprintf(fid,'%s%12s%12s\n','x(mm)','Re(dZ)','Im(dZ)');
124 fprintf(fid,'%6.2f%12.2d%12.2d\n',DZ);
125 fclose(fid);
126
127 if 1
128 print('-djpeg','R', '-f1')
129 print('-djpeg','XL', '-f2')
130 print('-djpeg','Z_abs', '-f3')
131 print('-djpeg','R_mut', '-f10')
132 print('-djpeg','XL_mut', '-f11')
133 print('-djpeg','XY_mut', '-f12')
134
135 end

```

figura 4.13 file plotres parte quarta

Il mat-file prodotto in uscita da questa procedura contiene i dati di impedenza relativi alla zona in prossimità della cricca. Questi dati verranno poi utilizzati come dati di ingresso per il software che si occupa della ricostruzione dell'immagine della cricca.

4.3 Software di ricostruzione del difetto

La caratteristica fondamentale del metodo di ricostruzione della cricca sta nella sua capacità di essere indipendente dalla particolare configurazione geometrica del difetto e di conseguenza esso può essere applicato anche in quei casi dove non è possibile conoscere a priori la forma e le dimensioni del difetto stesso.

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 per interfacciarsi con l'operatore.

La procedura di simulazione per test con correnti indotte prevede come primo passo l'impostazione dei parametri che influenzano il sistema nel file "set_data_cs". I parametri principali sono:

- Frequenza utilizzata nella fase di scansione del componente da esaminare;
- Conducibilità elettrica del materiale che costituisce il campione da analizzare;
- Permeabilità magnetica della sonda;
- Alcuni parametri geometrici della sonda;
- Dimensione prevista del difetto (finestra dimensionale in cui si va a ricercare il difetto).

In seguito si procede alla realizzazione delle mesh che discretizzano il difetto previsto e della mesh che discretizza il core magnetico della sonda utilizzata nella scansione. Per fare ciò, si realizzano tre mesh:

- mesh perturbata: tale mesh è relativa alla zona contenente il difetto e per questo motivo dovrà essere realizzata in maniera tale da discretizzare al meglio il difetto di interesse. Proprio per questo motivo, questa mesh, sarà molto più fitta della imperturbata nella zona in cui si prevede di trovare il difetto.
- mesh imperturbata: tale mesh è relativa alla zona in cui il difetto non è presente, per cui nella sua realizzazione, per non appesantire troppo la fase di calcolo, si prevede un fattore di discretizzazione, nella zona in cui si ricerca il difetto, pari alla metà della mesh perturbata.
- mesh del core: tale mesh è quella rappresentativa del nucleo magnetico (core) della particolare sonda utilizzata nella fase di scansione.

Il codice provvede, poi, alla fusione delle mesh (perturbata ed imperturbata) simulando una scansione effettuata utilizzando la mesh del nucleo magnetico e rispettando i parametri impostati precedentemente in “set_data_cs”.

Alla fine di questa fase, viene lanciata la fase di ricostruzione del difetto vera e propria. Eseguendo il programma viene visualizzato un menù di scelta rapida in cui è possibile selezionare il tipo di difetto previsto (figura 4.14).

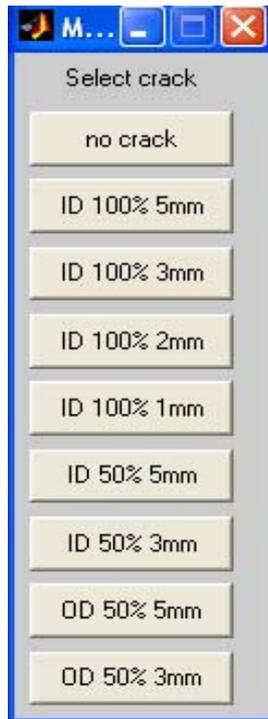


figura 4.14 Menù di selezione del difetto (i nomi indicati in questa immagine rappresentano alcuni dei difetti analizzati in laboratorio. Essi possono cambiare al variare dei dati sperimentali che si desidera caricare)

Selezionando una delle possibilità di scelta, vengono eseguite le seguenti operazioni:

- si vanno a caricare i dati sperimentali di misura relativi al tipo di difetto selezionato;
- il codice, carica la finestra dimensionale in cui è previsto il difetto, ottenendo l'immagine in fig 4.15 ;

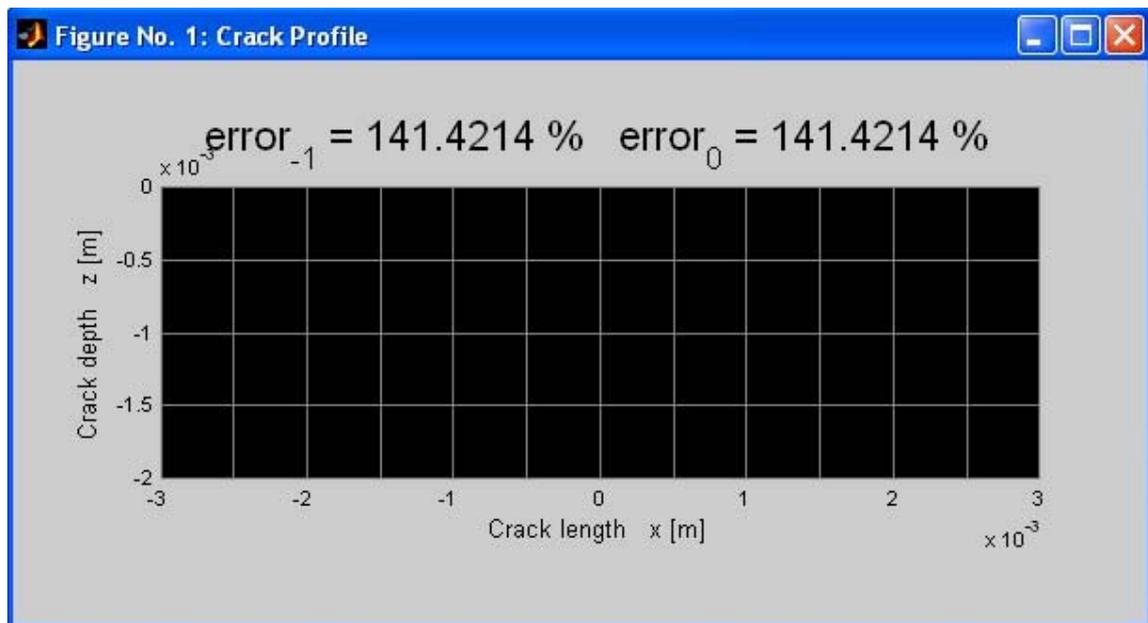


figura 4.15 Battaglia navale (finestra in cui si ricerca la presenza della cricca)

- per ogni casella della figura 4.15 che viene accesa, il codice esegue le seguenti operazioni:
 - calcola la variazione di impedenza mostrando gli andamenti della parte reale e della parte immaginaria di quest'ultima (vedi test su piastre da laboratorio capitolo 5 figure 5.3 e 5.4).
 - Mostra la variazione dell'errore tra i valori calcolati e i valori misurati (come mostrato in figura 4.15)

Per cui, verranno accese tutte quelle caselle della figura 4.15 che renderanno minimo l'errore commesso nel considerare i valori calcolati al posto dei valori misurati. Le caselle "accese" genereranno così quella che rappresenta la forma del difetto.

Capitolo 5

In questo capitolo verranno mostrate le procedure con cui sono stati eseguiti i test e i risultati ottenuti sia per le piastre di alluminio su cui è presente un difetto artificiale, sia su di un componente di interesse aeronautico, sul quale sono presenti difetti reali formatisi durante la fase di produzione dello stesso. Il test, nella fase di scansione, può prevedere l'utilizzo sia del Phasec2D che dell'analizzatore di impedenze HP4192LF. Tutti i test sono stati eseguiti con entrambi gli strumenti e tutti hanno mostrato una netta somiglianza delle curve che rappresentano la parte reale ed immaginaria della variazione di impedenza della sonda. L'unica differenza che si evidenzia nei dati in uscita dai due strumenti, sta nel fatto che il Phasec2D, in uscita, emette dei valori di variazione di impedenza normalizzati e tali valori non possono essere utilizzati per essere elaborati dal codice di calcolo che invece utilizza la scala degli ohm. Di conseguenza, nell'esecuzione dei seguenti test, mostreremo i diagrammi relativi ai dati sperimentali estrapolati mediante l'analizzatore di impedenza. Solo nell'esperimento sul componente di interesse aeronautico mostreremo anche i diagrammi relativi ai dati sperimentali rilevati mediante l'utilizzo del Phasec2D per mostrare le reali somiglianze tra le curve dei diagrammi di interesse.

5.1 Prove di laboratorio su piastra di alluminio con cricca EDM da 3 mm

La piastra di alluminio utilizzata nel test in laboratorio presenta un difetto nella zona centrale, realizzato artificialmente mediante tecnica EDM (Electrical Discharge Machined), in modo da simulare una cricca. Si è scelto di analizzare una piastra contenente un difetto della lunghezza di 3 mm e su tale esempio verrà mostrato l'esecuzione dell'intero test che va dalla fase di scansione della piastra, alla fase di ricostruzione dell'immagine della cricca mediante calcolo numerico.

Bisogna innanzitutto fare una premessa. Per poter permettere di realizzare un raffronto tra questo caso ed il seguente (relativo all'analisi di un componente di interesse aeronautico) in modo da poter mostrare la bontà del calcolo numerico utilizzato, si è scelto di strutturare il modello numerico prevedendo che:

- La frequenza utilizzata nella fase di scansione sia di 2 kHz, in modo da uniformarci alla frequenza che verrà scelta per l'esperimento successivo;
- La resistività utilizzata sia pari a $5.57 \cdot 10^{-8}$ [$\Omega \cdot m$] che è il valore della resistività della piastra di alluminio.

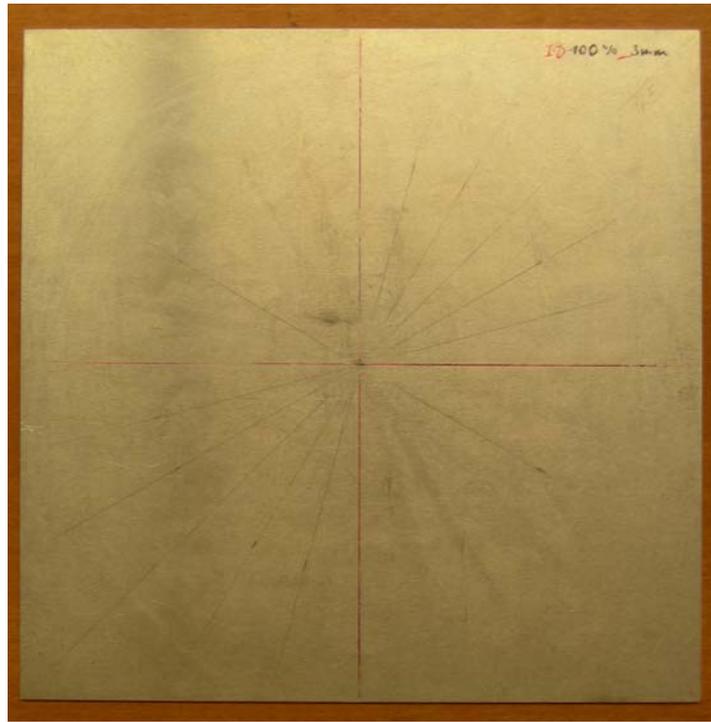


figura 5.1 piastra da laboratorio utilizzata nel test

La procedura di scansione prevede l'utilizzo di vari apparati:

- un braccio robotico, tipo Melfa RV-1A della Mitsubishi
- sonda a riflessione
- difettoscopio tipo Phasec2D della Hocking
- analizzatore di impedenza HP4192LF.



figura 5.2 scansione della piastra da laboratorio

Per quanto già detto all'inizio del capitolo, mostreremo adesso i soli risultati prodotti mediante l'utilizzo dell'analizzatore di impedenza HP4192LF.

I risultati prodotti dalla fase di scansione sono dati dai seguenti diagrammi:

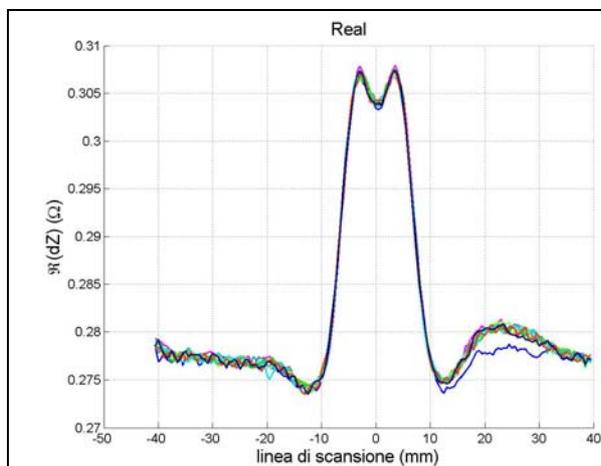


figura 5.3 parte reale (HP4192LF)

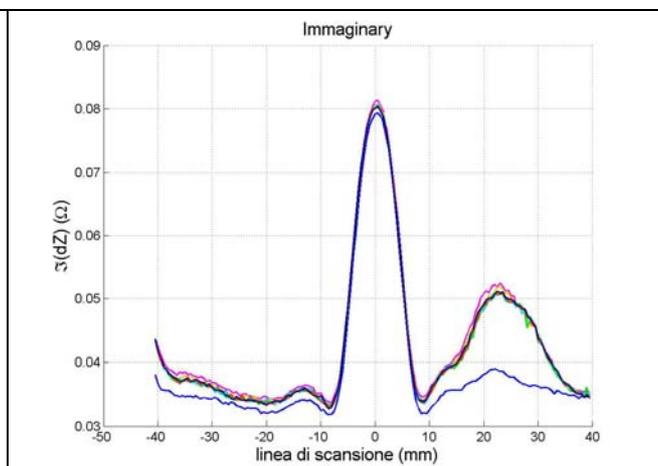


figura 5.4 parte immaginaria (HP4192LF)

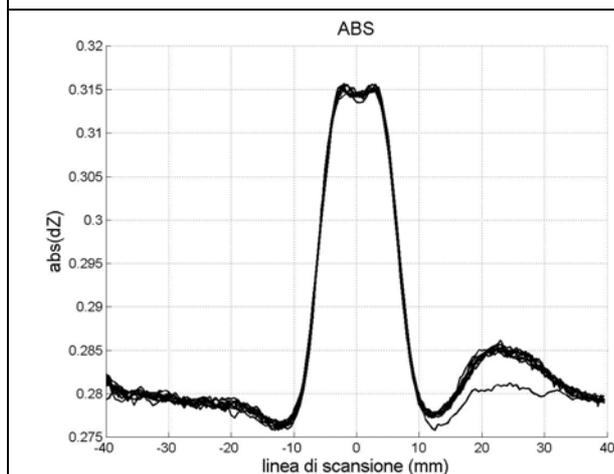


figura 5.5 diagramma di ampiezza (HP4192LF)

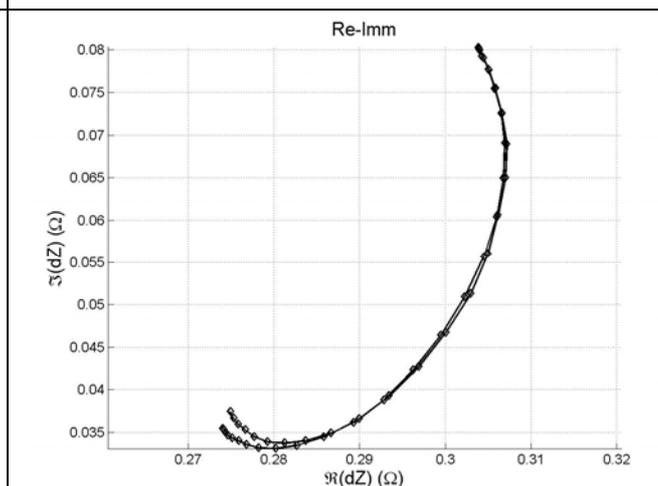


figura 5.6 piano XY (HP4192LF)

Analizzando i diagrammi (figura 5.3 – 5.5) si riesce facilmente a distinguere il punto in cui si evidenzia la presenza del difetto. Infatti nel punto in cui la linea di scansione segna lo zero, si evidenzia la massima variazione sia della parte reale che della parte immaginaria dell'impedenza. In tutte e tre le figure la parte compresa tra i 10 e i 40 mm presenta una zona non lineare dovuta ad una lieve curvatura della piastra in tale zona.

La figura 5.6 mostra l'andamento che il fasore dZ ha avuto durante tutta la scansione, è facile notare il fatto che in un dato istante (rilevata la presenza della cricca) il valore di $\Im(dZ)$ sia aumentato per poi decrescere e tornare al valore di partenza.

Passiamo, ora, alla fase di elaborazione numerica per la ricostruzione dell'immagine dei difetti. In un primo momento bisogna realizzare le mesh che caratterizzano la piastra (perturbata (figura 5.7) ed imperturbata (figura 5.8)) e il nucleo magnetico della sonda utilizzata.

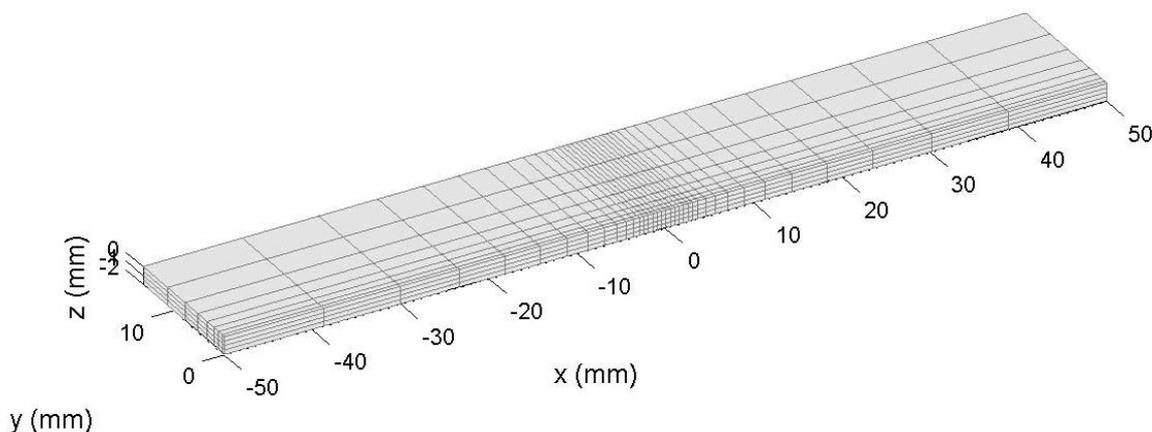


figura 5.7 mesh perturbata di una piastra con cricca da 3 mm realizzata sfruttando la simmetria

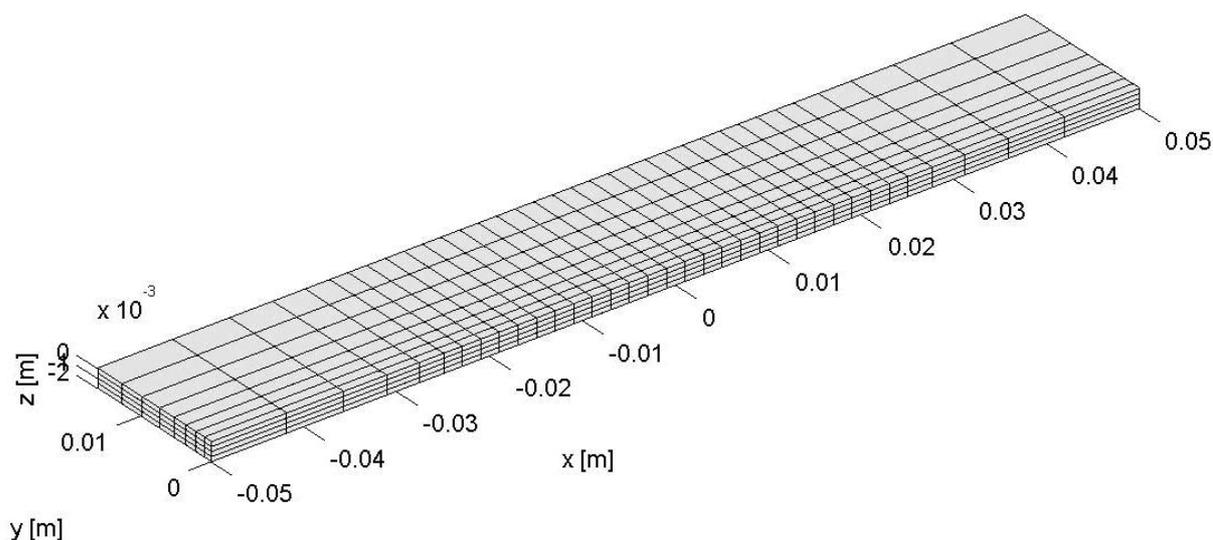


figura 5.8 mesh imperturbata di una piastra con cricca da 3 mm realizzata sfruttando la simmetria

La mesh perturbata (figura 5.7) è quella mesh che deve tener conto della presenza del difetto. Di conseguenza, tale mesh viene realizzata aumentando la discretizzazione delle faccette che compongono la mesh in presenza del difetto e diminuendo tale discretizzazione via via che ci si allontana dalla zona destinata a contenere la cricca.

La mesh imperturbata (figura 5.8) invece non dovendo tener conto della presenza del difetto, viene realizzata mantenendo una discretizzazione delle faccette che compongono la mesh, meno fitta nella zona di cricca, ma più uniforme nell'intorno di tale zona.

Oltre alle due mesh appena descritte, bisogna generare anche la mesh del nucleo magnetico della sonda (tale mesh non verrà mostrata per motivi di riservatezza imposta dall'azienda produttrice).

La mesh del nucleo magnetico è stata realizzata in modo da poter riprodurre una simulazione di scansione, il più fedele possibile al caso reale.

Tutte le mesh sono state realizzate a metà in modo da sfruttare la simmetria della scansione. Infatti analizzando il difetto effettuando una scansione longitudinale alla direzione del difetto stesso, risulta evidente che per alleggerire la fase di calcolo è possibile realizzare una simulazione della scansione utilizzando la sola metà delle mesh ottenute tagliando le mesh lungo la linea di scansione stessa.

L'effetto completo della scansione si ottiene sfruttando le proprietà di simmetria.

Una volta realizzate le mesh (della parte conduttrice e del nucleo magnetico) e impostati i parametri di interesse nel "set_data_cs", viene avviata la fase di simulazione per poter poi ricostruire la forma del difetto di partenza. Eseguendo il programma, andiamo a ricostruire la forma del difetto

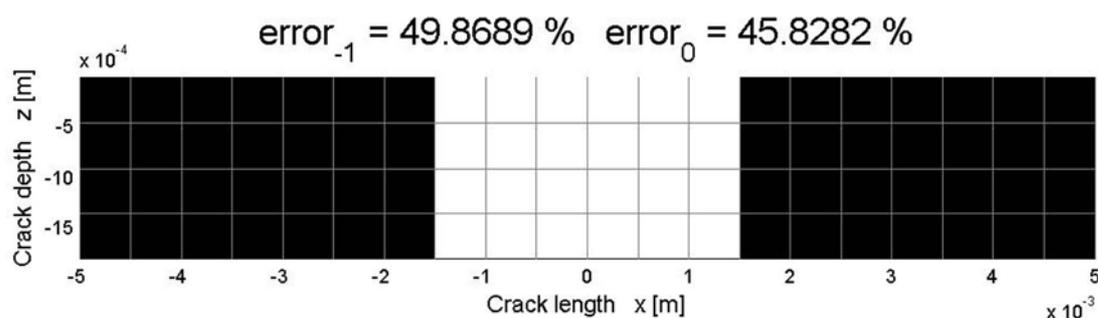


figura 5.9 immagine della cricca da 3 mm

Vengono così generati i diagrammi che mostrano la parte reale e quella immaginaria della variazione di impedenza della sonda, mostrando sia i valori sperimentali che i valori generati dal calcolo.

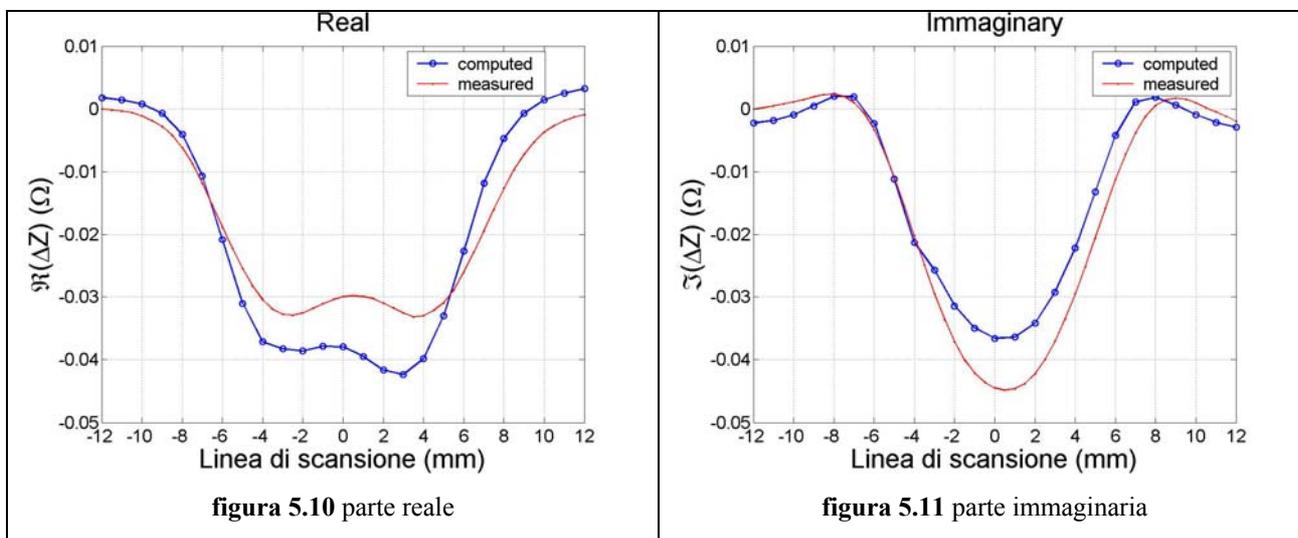


figura 5.10 parte reale

figura 5.11 parte immaginaria

È possibile inoltre mostrare come le correnti indotte deviano nella zona di cricca, in quanto il difetto si presenta come un ostacolo che le correnti tentano di aggirare.

L'effetto dovuto alla bobina trasmittente che compone la sonda è mostrato nelle figure 5.12 e 5.13.

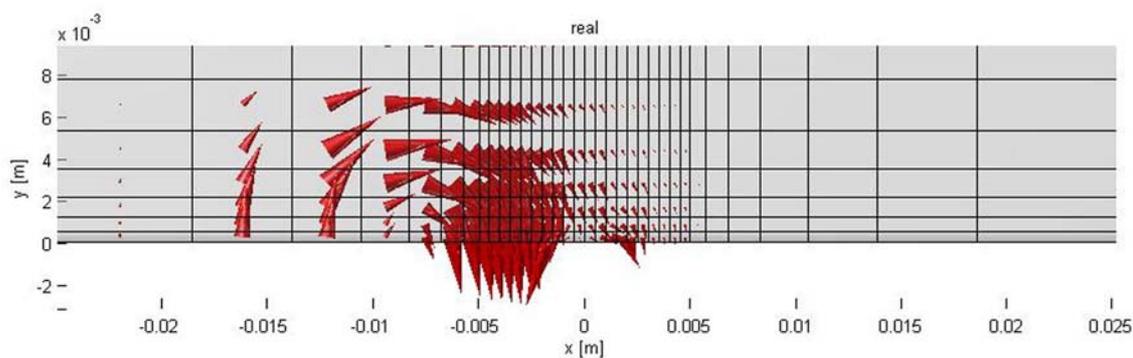


figura 5.12 parte reale della densità di corrente totale dovuta alla bobina trasmittente

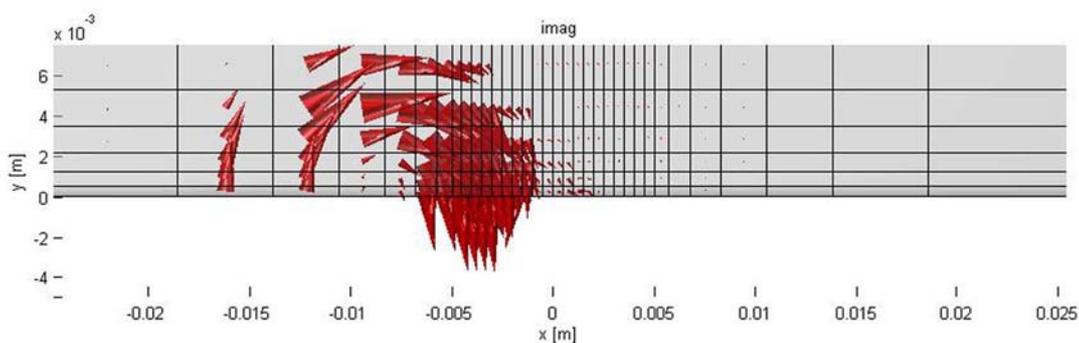


figura 5.13 parte immaginaria della densità di corrente totale dovuta alla bobina trasmittente

inclinando le mesh, si evidenzia ancora meglio la deviazione delle correnti nella zona di cricca, come mostrato nelle figure 5.14 e 5.15.

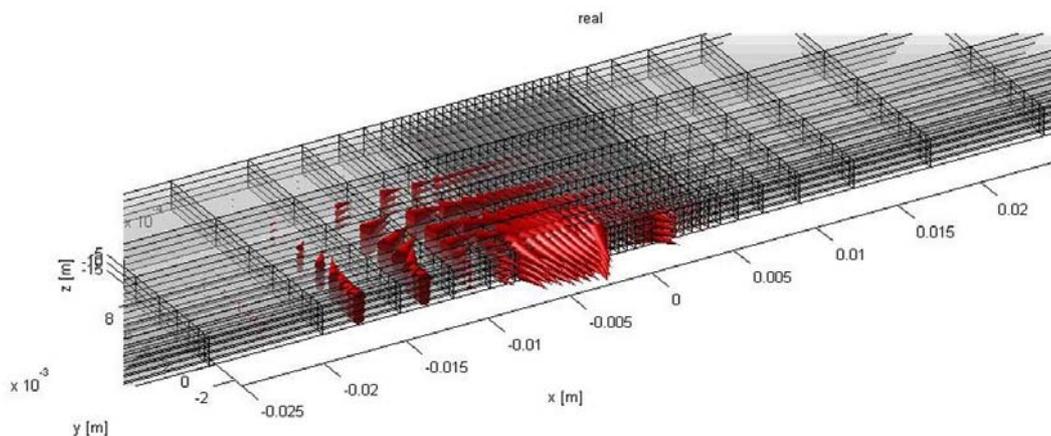


figura 5.14 parte reale della densità di corrente totale dovuta alla bobina trasmittente

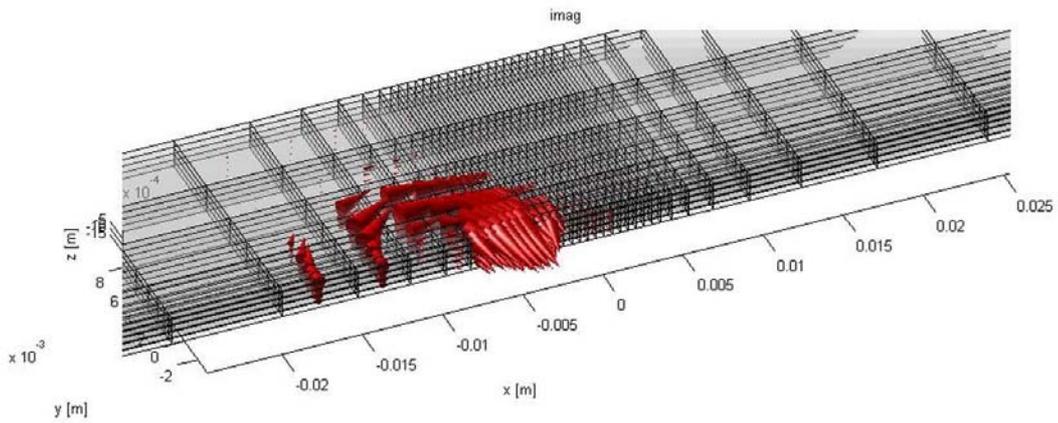


figura 5.15 parte immaginaria della densità di corrente totale dovuta alla bobina trasmittente

È possibile mostrare anche l'effetto delle correnti di perturbazione, in quanto vale la (2.75) espressa nel capitolo 2 paragrafo 5.

L'effetto dovuto alla bobina trasmittente che compone la sonda è visibile nelle figure 5.16 e 5.17.

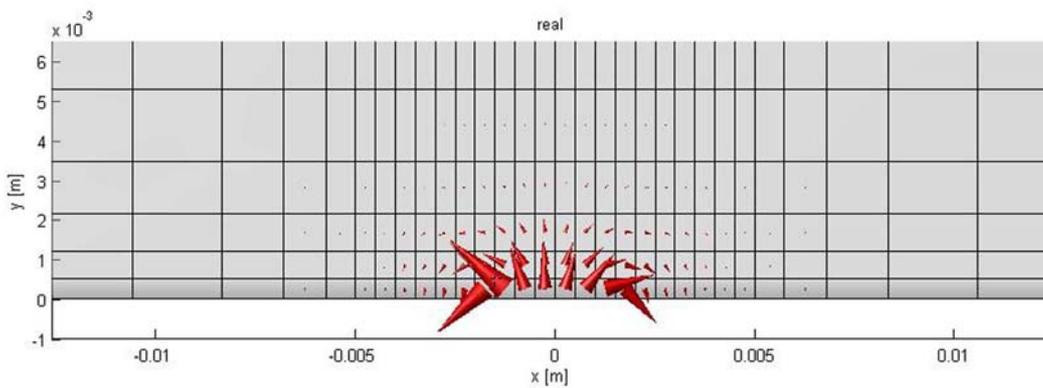


figura 5.16 parte reale della densità di corrente di perturbazione dovuta alla bobina trasmittente

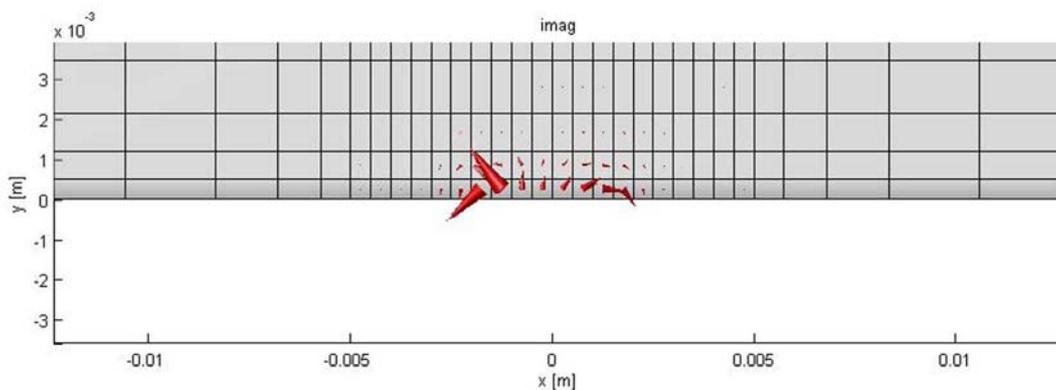


figura 5.17 parte immaginaria della densità di corrente di perturbazione dovuta alla bobina trasmittente

inclinando le mesh, si evidenzia ancora meglio l'effetto delle correnti di perturbazione nella zona di cricca, come mostrato nelle figure 5.18 e 5.19.

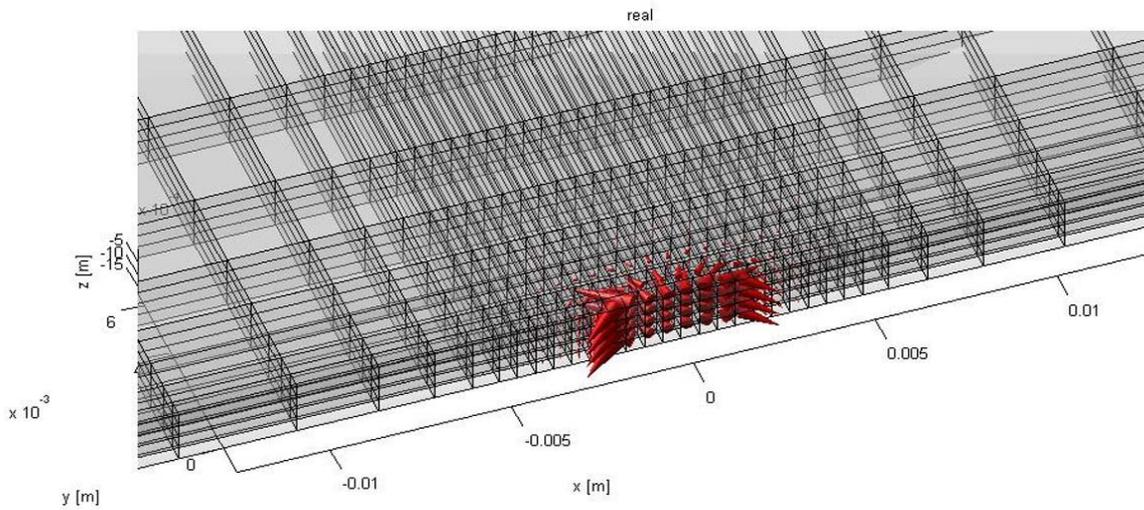


figura 5.18 parte reale della densità di corrente di perturbazione dovuta alla bobina trasmittente

andando ad effettuare un ingrandimento della figura 5.18 nella zona di cricca, si ha:

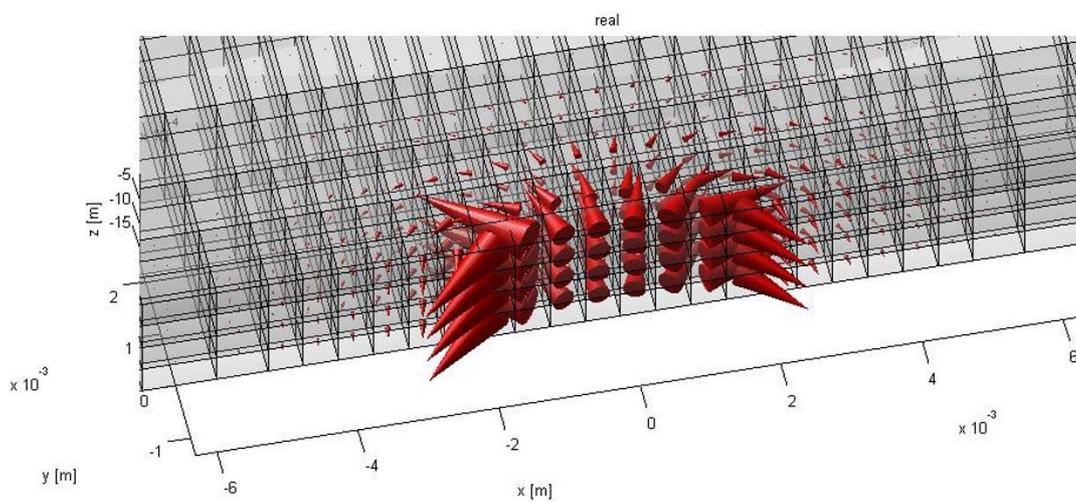


figura 5.18 b ingrandimento della parte reale della densità di corrente di perturbazione dovuta alla bobina trasmittente nella zona di cricca

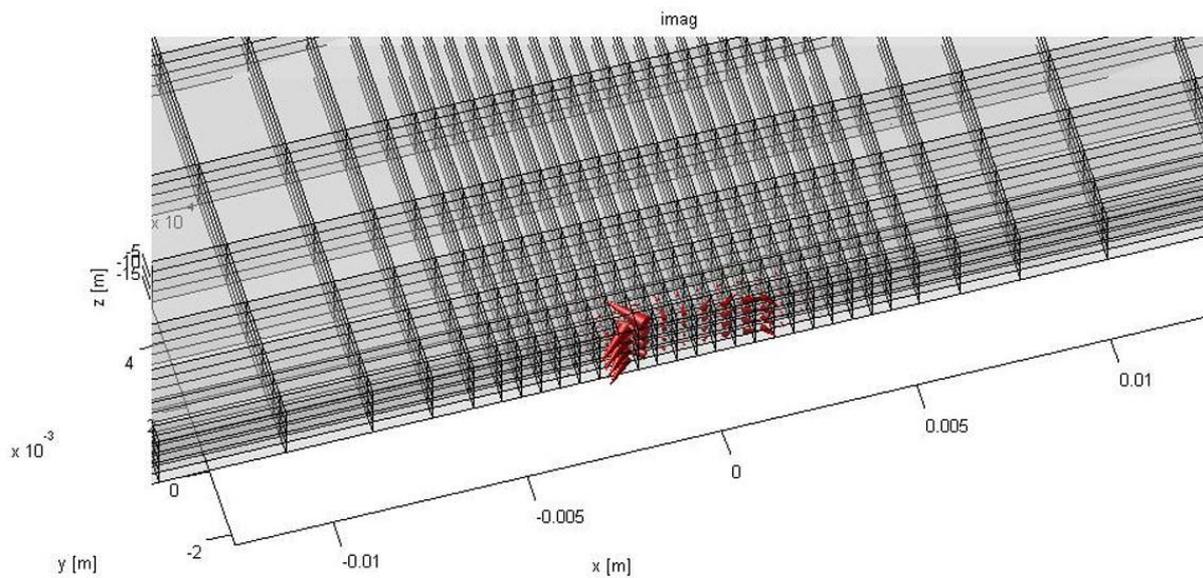


figura 5.19 parte immaginaria della densità di corrente di perturbazione dovuta alla bobina trasmittente

andando ad effettuare un ingrandimento della figura 5.19 nella zona di cricca, si ha:

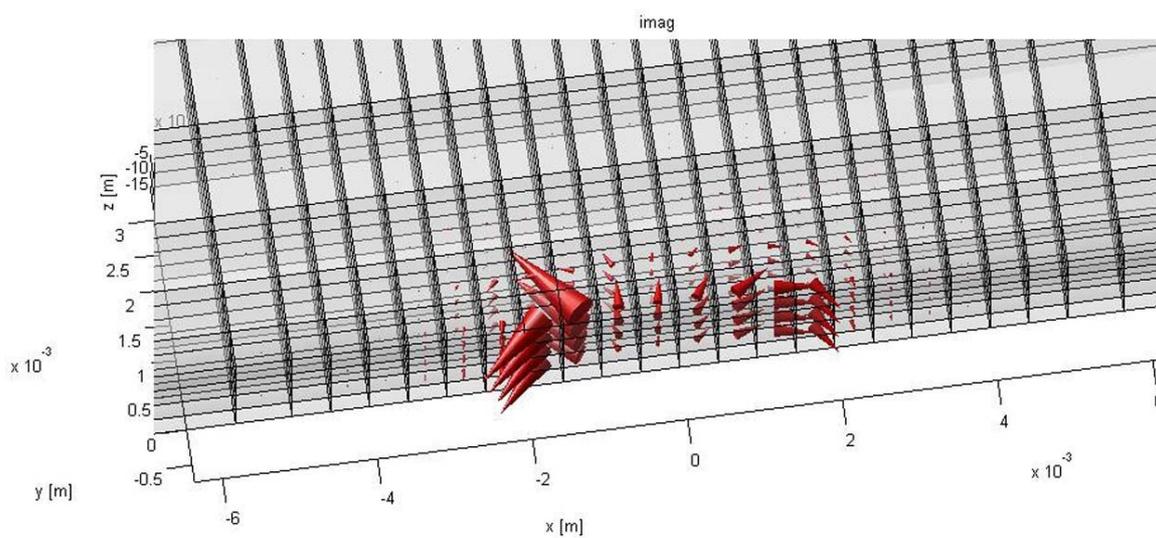


figura 5.19 b ingrandimento della parte reale della densità di corrente di perturbazione dovuta alla bobina trasmittente nella zona di cricca

Per poter identificare il piano di cricca (l'intersezione tra il piano che contiene la piastra di alluminio e questo piano genera la direzione lungo la quale si sviluppa la cricca) dobbiamo effettuare le scansioni prevedendo vari angoli di incidenza sulla cricca. La scansione che massimizza il segnale (parte reale ed immaginaria della variazione di impedenza) identifica il piano di cricca. Nei casi in cui non si riesce ad identificare il piano di cricca si procede all'identificazione del difetto ipotizzando la sua posizione all'interno di un volume. Il modello che si userà in questo caso, sarà quello descritto in [5].

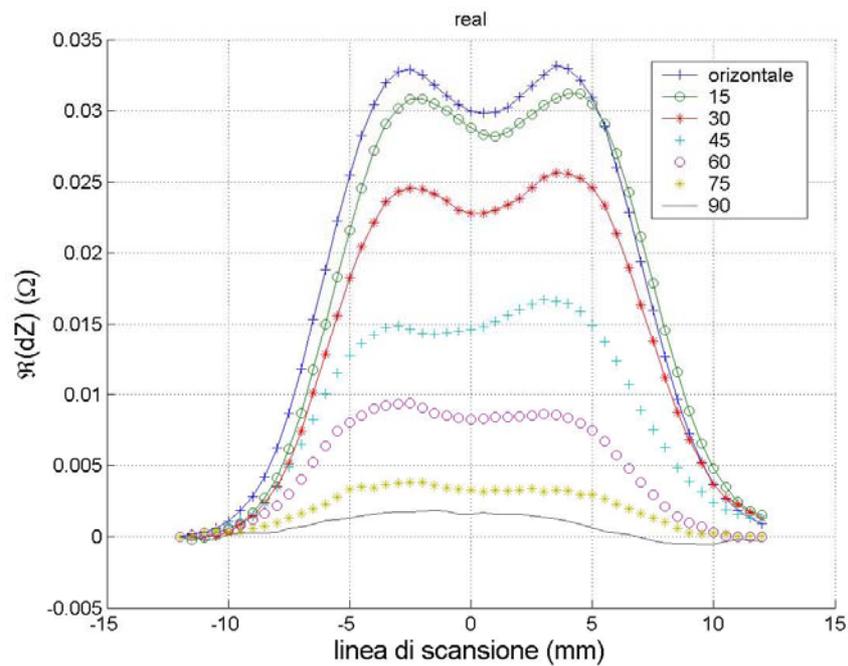


figura 5.20 parte reale

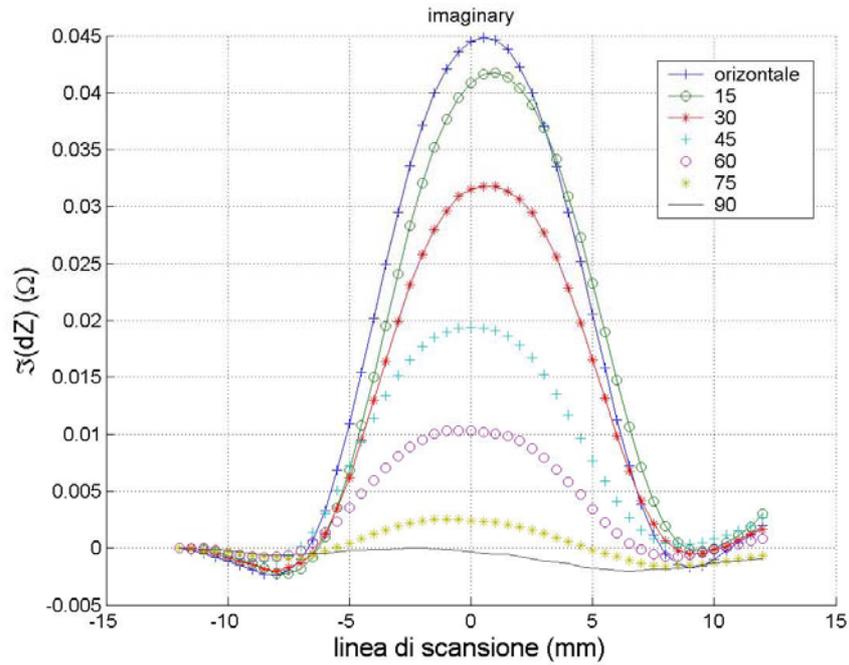


figura 5.21 parte immaginaria

Come si può facilmente notare, all'aumentare dell'angolo di scansione, le curve rappresentative della parte reale ed immaginaria dell'impedenza, presentano dei picchi che si vanno via via attenuando, fino a giungere alla scansione ortogonale alla direzione di cricca (scansione a 90 gradi) in cui quasi non si riesce a riconoscere la presenza del difetto.

5.2 Test eseguito su di un componente di interesse aeronautico

Passiamo adesso all'esecuzione del test su di un componente di interesse aeronautico e mostriamo come sia possibile rilevare e poi ricostruire quelle tipologie di difetti (non artificiali) che normalmente vi si possono presentare.

L'oggetto sotto esame (figura 5.21), presenta una geometria non planare, quindi per rendere più agevole la scansione e la relativa localizzazione dei difetti, si è provveduto a suddividere l'oggetto in tre settori di interesse. La frequenza scelta per la scansione è di 2 kHz. Tale valore è stato calcolato, tenendo conto sia dello spessore di circa 2 mm del materiale (Alluminio) di cui è composto l'oggetto, sia del valore di resistività misurato che è pari a $4.56 \cdot 10^{-8} \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$.

Il valore di resistività utilizzato è stato calcolato dal valore della conducibilità misurata sul componente di interesse aeronautico presso l'azienda O.M.P.M.s.r.l. di Angri (SA) dove lo strumento utilizzato per la misura è il FOERSTER SIGMATEST EC 2.068.

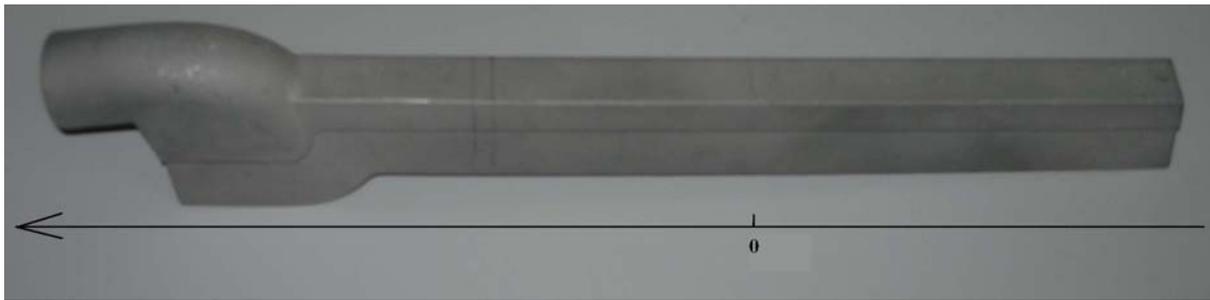


figura 5.21 oggetto sotto esame



figura 5.22 settore 1 dell'oggetto



figura 5.23 settore 2 dell'oggetto



figura 5.24 settore 3 dell'oggetto

Anche in questo caso, la procedura di scansione prevede l'utilizzo di vari apparati:

- un braccio robotico, tipo Melfa RV-1A della Mitsubishi
- sonda a riflessione

- difettoscopio tipo Phasec2D della Hocking
- analizzatore di impedenza HP4192LF.



figura 5.25 scansione del componente di interesse aeronautico

Un'analisi preventiva, realizzata ispezionando i settori in cui è stato suddiviso l'oggetto un'unica volta, mediante l'utilizzo del sistema Robot-sonda-Phasec2D, ed allo stesso modo utilizzando il sistema Robot-sonda-HP4192LF, ha mostrato una probabile presenza di difetti in due soli settori, il settore due (figura 5.23) ed il settore tre (figura 5.24), ed è in questi settori che andremo a concentrare la nostra attenzione.

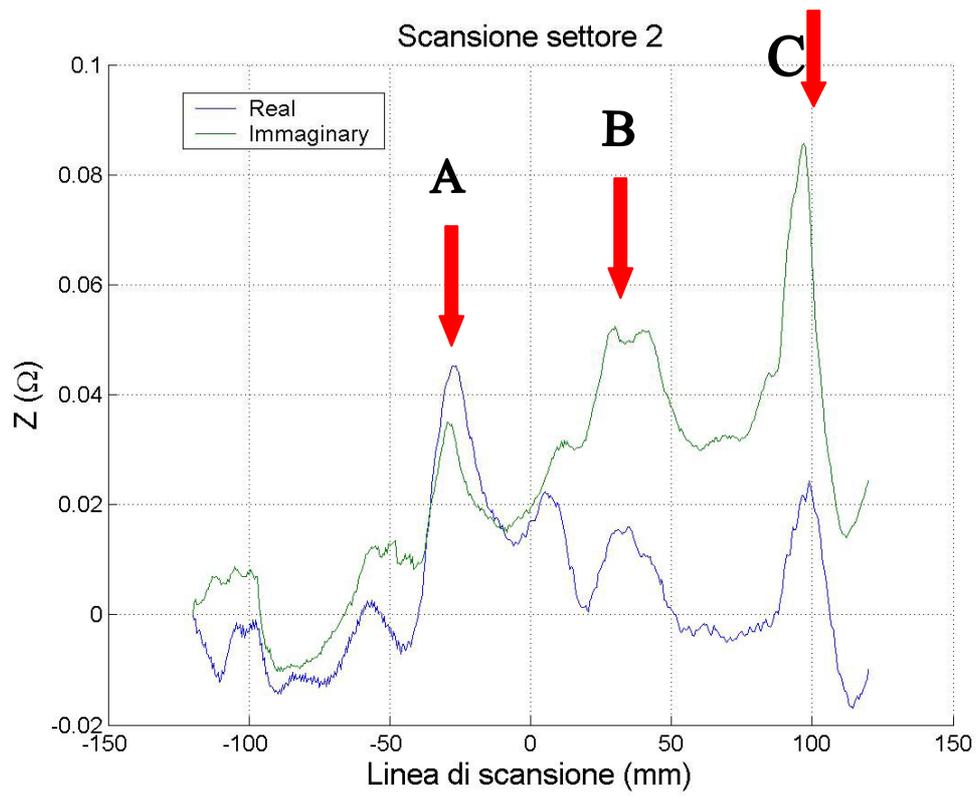


figura 5.26 scansione del settore 2 mediante l'utilizzo dell'analizzatore di impedenza HP4192LF

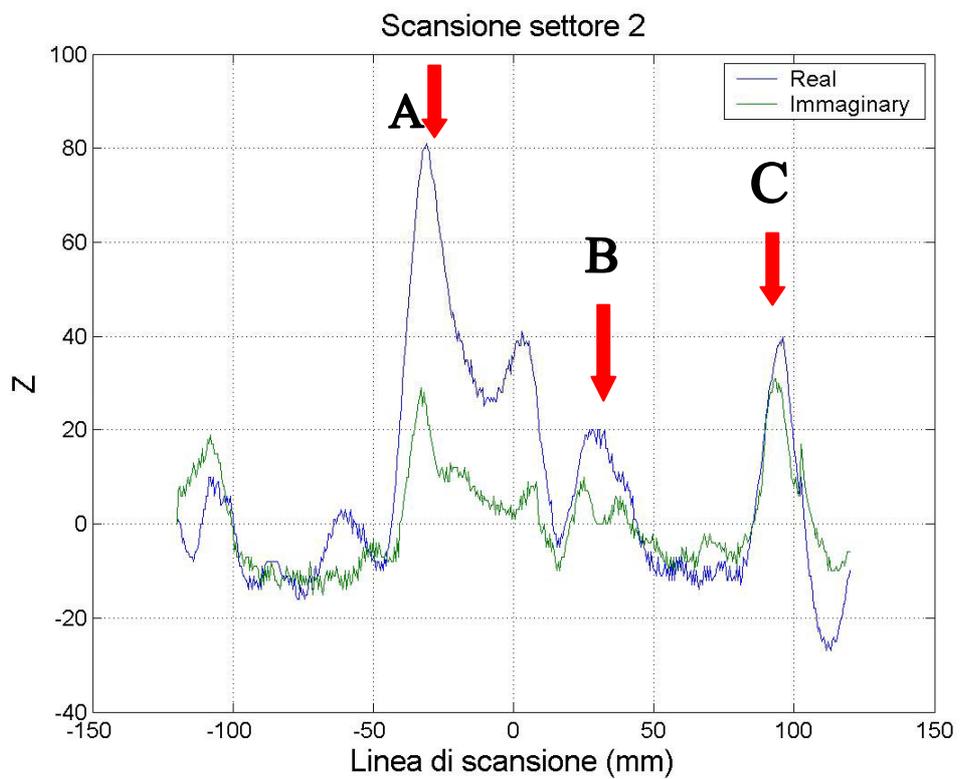


figura 5.26.1 scansione del settore 2 mediante l'utilizzo del Phasec2D

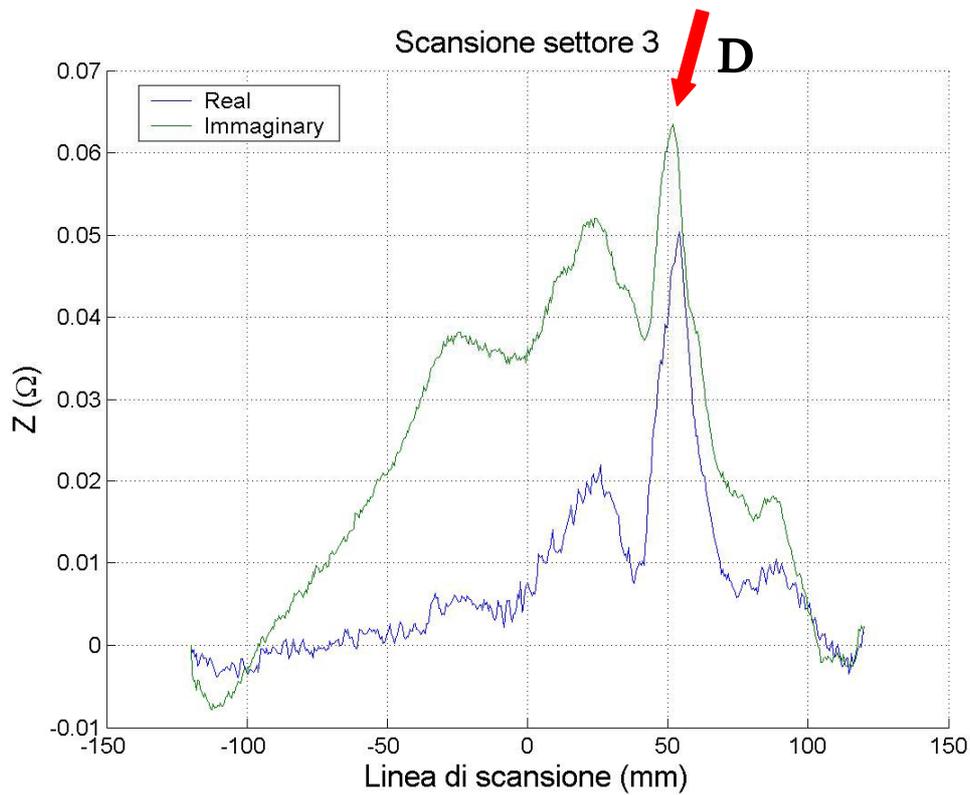


figura 5.27 scansione del settore 3 mediante l'utilizzo dell'analizzatore di impedenza HP4192LF

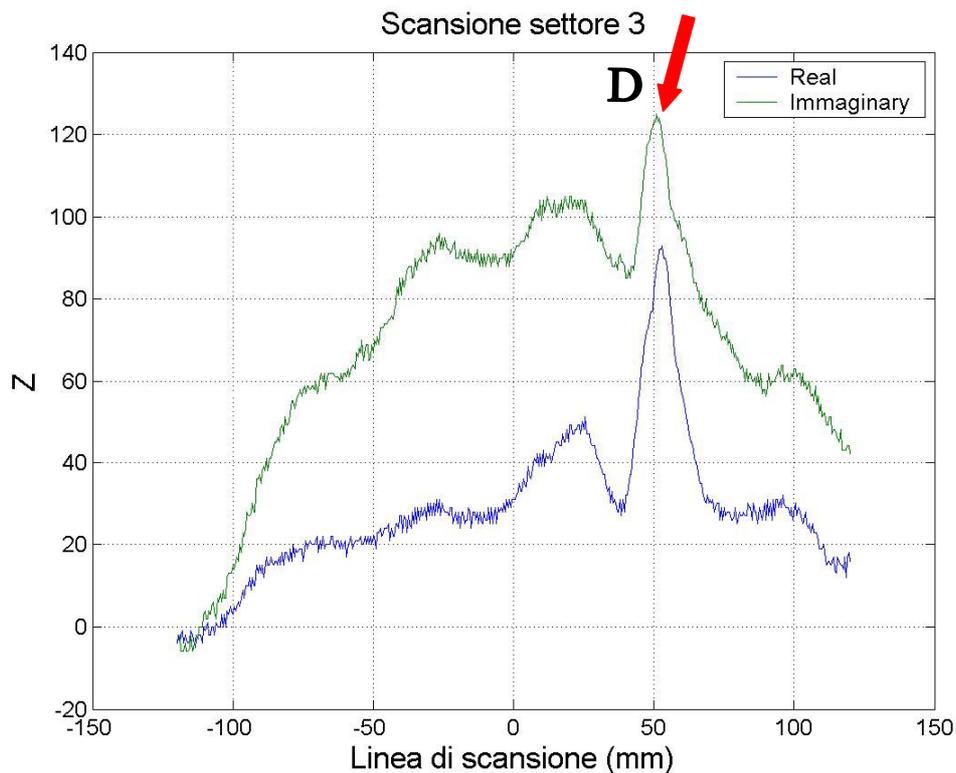


figura 5.27.1 scansione del settore 3 mediante l'utilizzo del Phasec2D

Come è possibile osservare, nel settore due (figura 5.23, figura 5.26 e figura 5.26.1) sono presenti tre picchi (dovuti alla variazione di impedenza) ben visibili, uno a circa -30 mm dal punto preso come riferimento, un altro a $+40$ mm dal riferimento e l'altro ancora a circa $+97$ mm

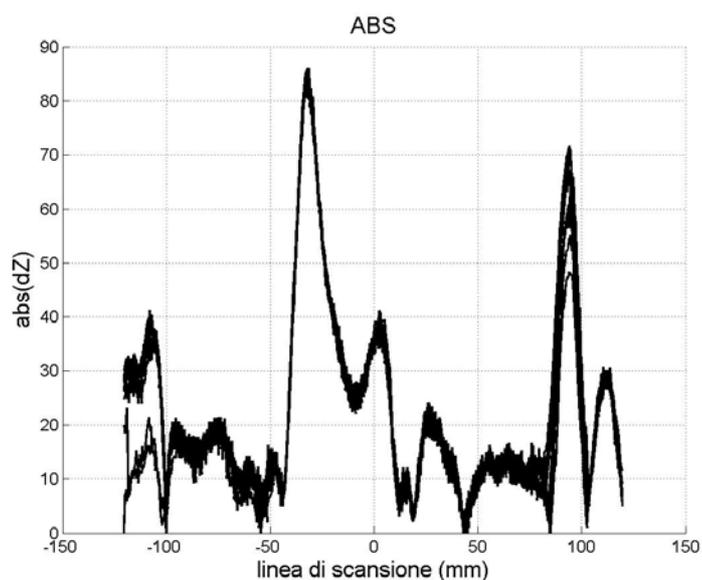
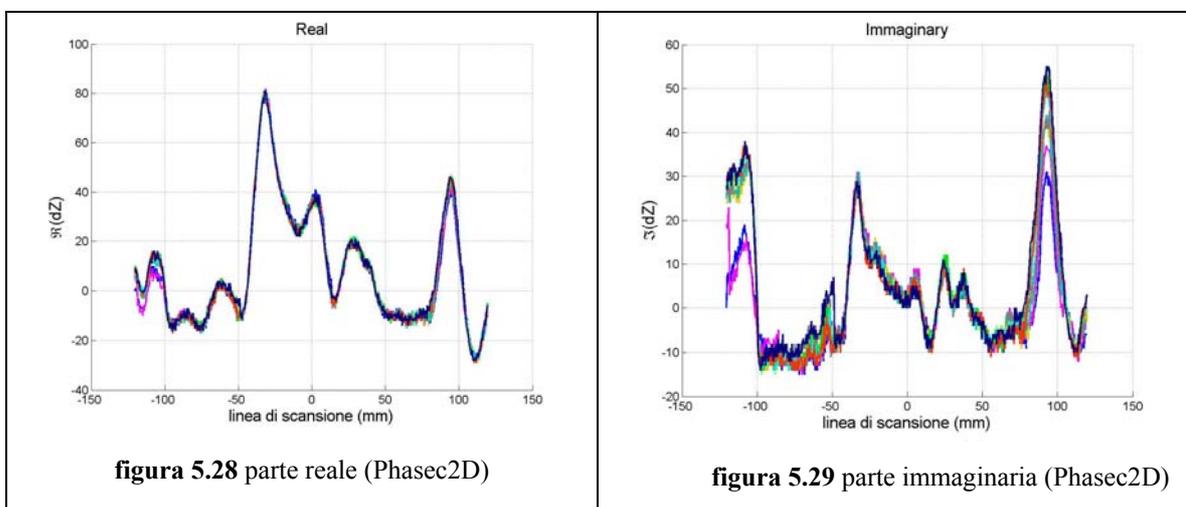
sempre da tale punto; mentre nel settore tre (figura 5.24, figura 5.27 e figura 5.27.1) ci si aspetta un unico difetto a circa +50 mm dal punto preso come riferimento. Ognuno di questi picchi identifica un difetto, quindi chiameremo:

- difetto A: il difetto nel settore 2 che si trova a - 30 mm dal riferimento.
- difetto B: il difetto nel settore 2 che si trova a + 40 mm dal riferimento.
- difetto C: il difetto nel settore 2 che si trova a + 97 mm dal riferimento.
- difetto D: il difetto nel settore 3 che si trova a + 50 mm dal riferimento.

Passiamo ora ad un'analisi più accurata.

L'analisi prevede dieci scansioni di ogni settore, per determinare con maggiore accuratezza la presenza e la posizione dei difetti.

Analizziamo prima il settore due, utilizzando per l'analisi il phasec2D.



È da notare che nelle figure 5.28 e 5.29, la parte $\Re(dZ)$ e $\Im(dZ)$ sono espresse in valori normalizzati. Inoltre, dall'analisi anche del diagramma delle ampiezze (figura 5.30), è possibile verificare che i difetti sono effettivamente tre e distano rispettivamente -30 mm, +40 mm e +97 mm circa dal punto scelto come riferimento.

E' da notare, nella figura 5.29 e nella figura 5.30, la presenza di un picco nella zona che va da -120 mm a -100 mm. Tale picco è dovuto alla presenza di rumore ambientale e di vibrazioni causate da lavori in corso d'opera nelle immediate vicinanze della struttura.

E' possibile valutare la presenza dei difetti, anche visionando la figura 5.31. In tale immagine, la presenza dei cappi indicano, una forte variazione dell'impedenza nei punti in cui i difetti generano una deviazione delle correnti indotte.

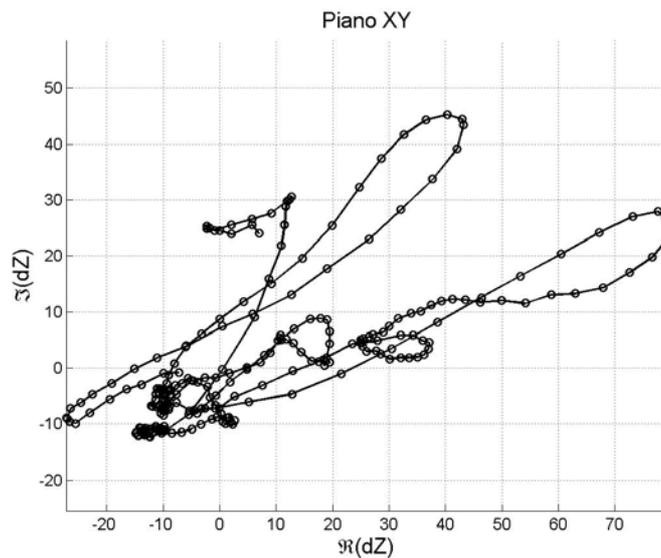


figura 5.31 piano XY con Phasec2D

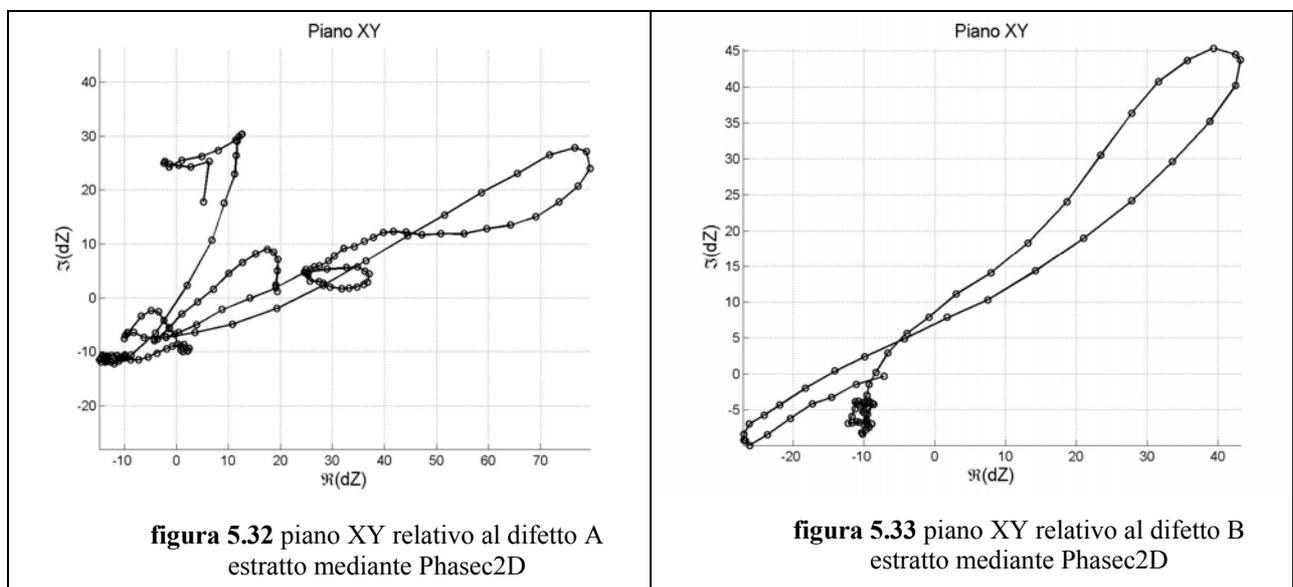


figura 5.32 piano XY relativo al difetto A estratto mediante Phasec2D

figura 5.33 piano XY relativo al difetto B estratto mediante Phasec2D

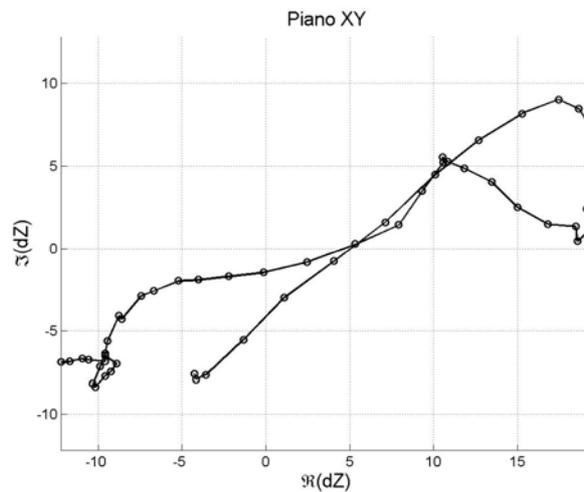
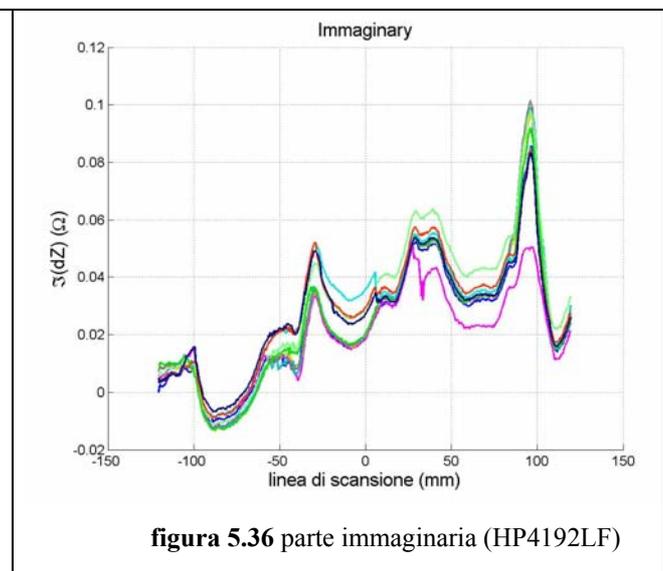
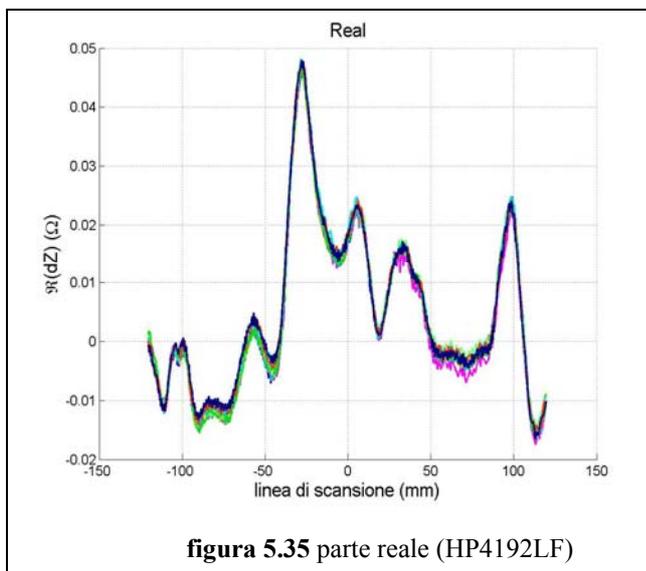


figura 5.34 piano XY relativo al difetto C estratto mediante Phasec2D

Nelle immagini di figura 5.32, figura 5.33 e figura 5.34, è possibile visionare i cappi relativi ai difetti A, B e C rispettivamente.

Verifichiamo la presenza dei difetti in questo settore utilizzando ora l'analizzatore di impedenze HP4192LF, al posto del phasec2D (questo serve come ulteriore verifica della bontà dell'analisi):



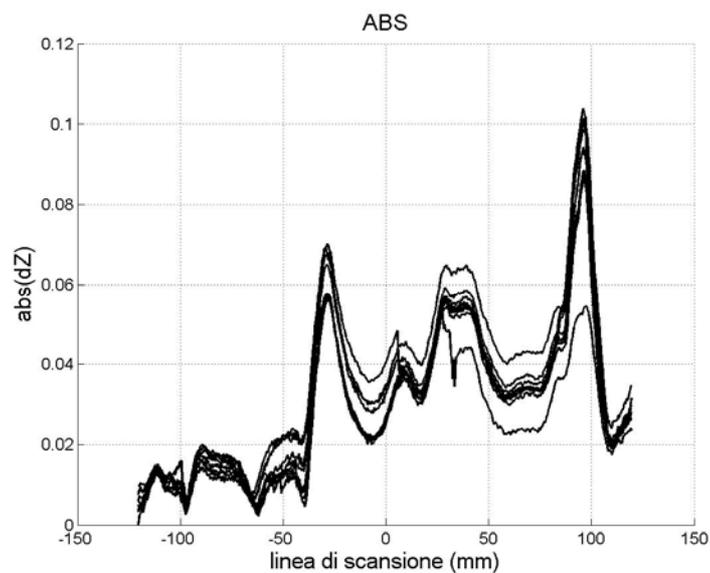


figura 5.37 diagramma di ampiezza (HP4192LF)

Come è possibile notare, l'analizzatore di impedenze, allo stesso modo del Phasec2D, ha verificato la presenza dei tre difetti nel secondo settore (figura 5.27).

Passiamo ora ad analizzare il settore tre (figura 5.24, 5.27 e 5.27.1), utilizzando il phasec2D.

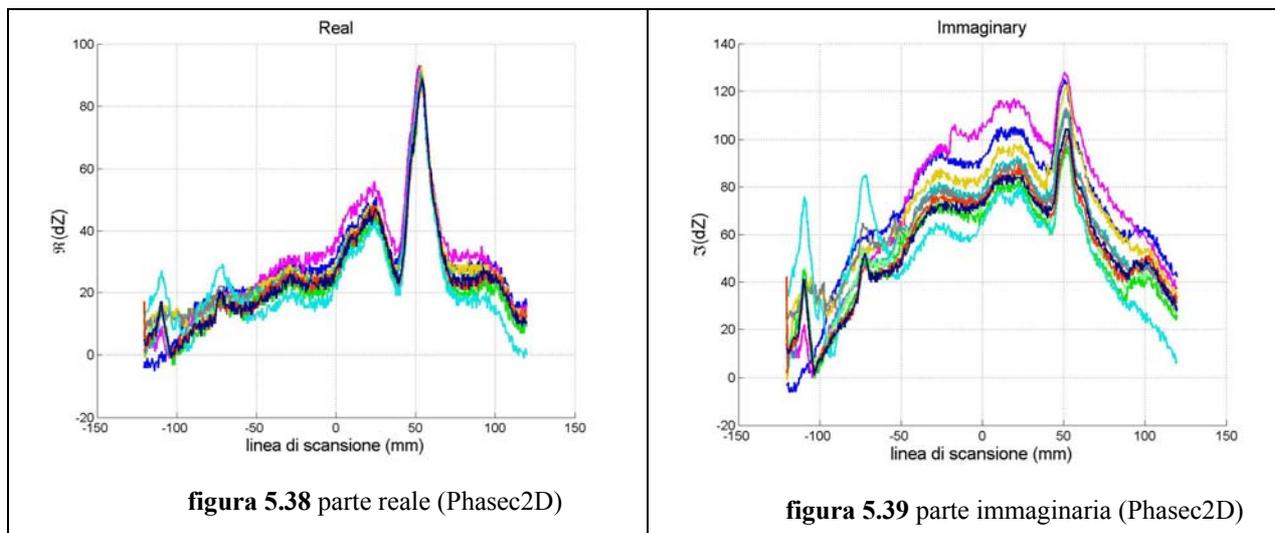


figura 5.38 parte reale (Phasec2D)

figura 5.39 parte immaginaria (Phasec2D)

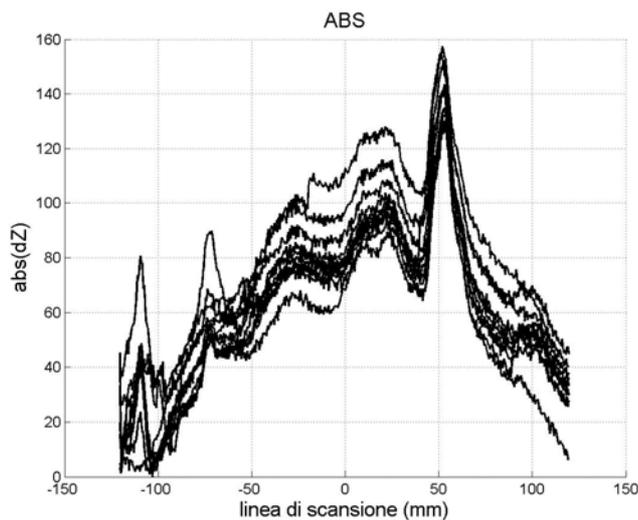


figura 5.40 diagramma di ampiezza (Phasec2D)

Anche in questo caso, nelle figure 5.38 e 5.39, la parte $\Re(dZ)$ e $\Im(dZ)$ sono espresse in valori normalizzati. Dall'analisi, invece, del diagramma delle ampiezze (figura 5.40), è possibile verificare che nel settore tre esiste effettivamente un unico difetto e questo dista 50 mm circa dal punto scelto come riferimento.

E' da notare, nella figura 5.38 nella figura 5.39 e nella figura 5.40, la presenza di due picchi nella zona che va da -120 mm a -50 mm. Anche tale picchi sono dovuti alla presenza di rumore ambientale e a vibrazioni causate da lavori in corso d'opera nelle immediate vicinanze della struttura.

E' possibile valutare la presenza dei difetti, anche visionando la figura 5.41

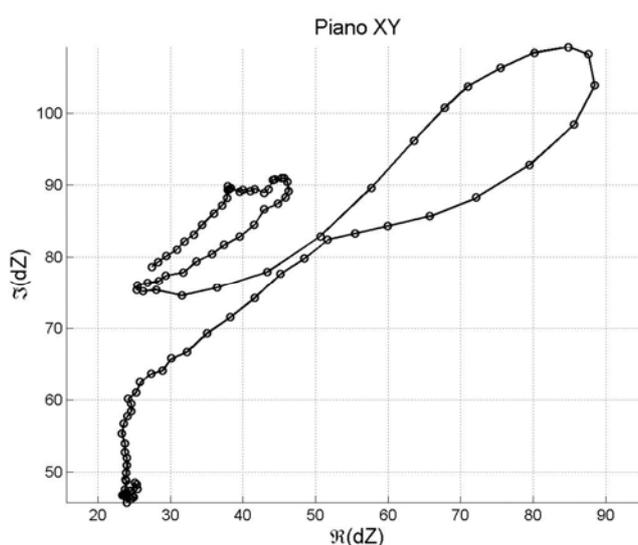
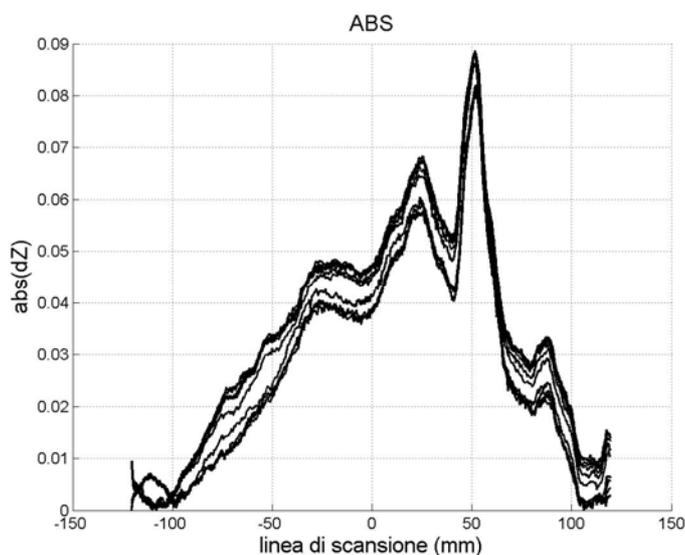
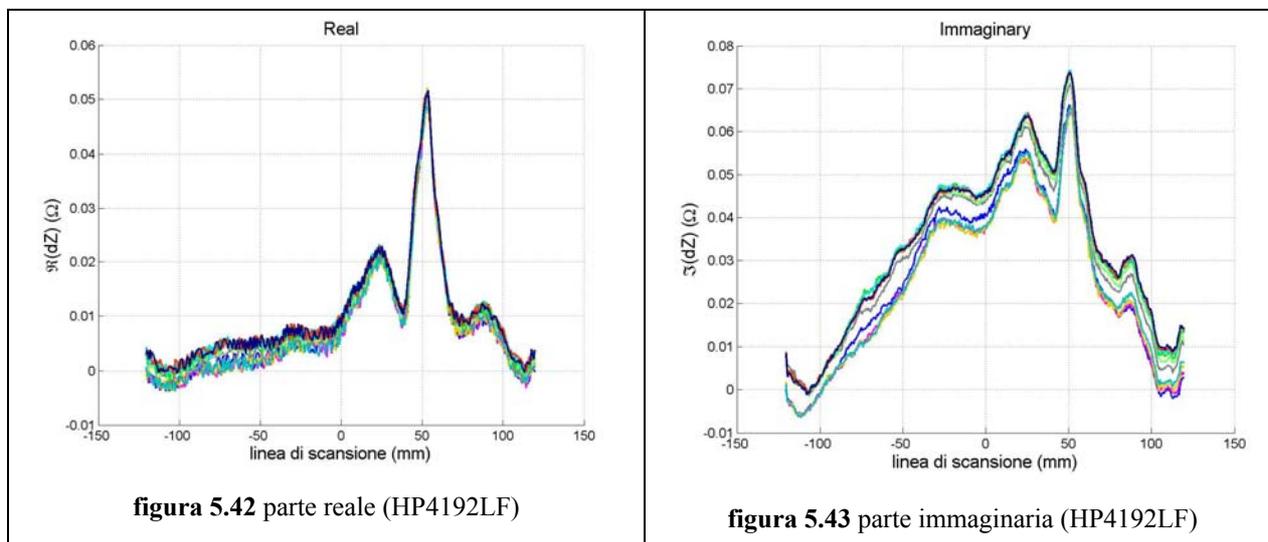


figura 5.41 piano XY con Phasec2D

In tale immagine, la presenza del ampio cappio indica una forte variazione dell'impedenza nel punto in cui il difetto genera una deviazione delle correnti indotte.

Verifichiamo la presenza del difetto in questo settore utilizzando ora un analizzatore di impedenze, al posto del phasec2D (questo serve come ulteriore verifica della bontà dell'analisi):



Anche in questo caso, l'analizzatore di impedenze, allo stesso modo del Phasec2D, ha verificato la presenza del difetto nel terzo settore (figura 5.27).

Passiamo, ora, alla fase di elaborazione numerica per la ricostruzione dell'immagine dei difetti. In un primo momento bisogna realizzare le mesh che caratterizzano il componente. Dato che sul componente sono state eseguite scansioni lineari, ciò vuol dire che esso può essere assimilato, a livello locale ad una piastra. Quindi, allo stesso modo delle piastre da laboratorio, anche per questo componente andremo a realizzare le mesh perturbata ed imperturbata. Utilizzeremo, invece la stessa mesh del nucleo magnetico utilizzata nell'esperimento precedente, in quanto la sonda utilizzata per la scansione non è cambiata.

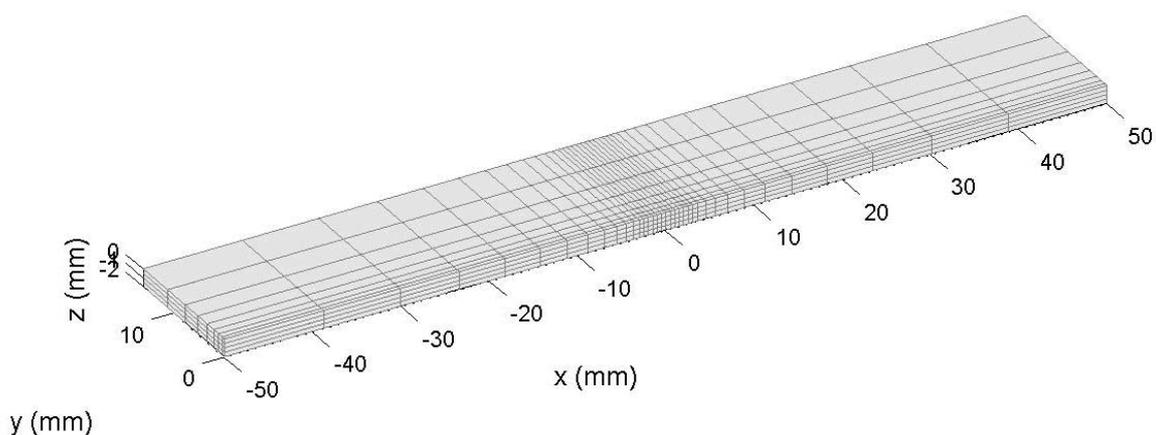


figura 5.45 mesh perturbata di un componente di interesse aeronautico realizzata sfruttando la simmetria

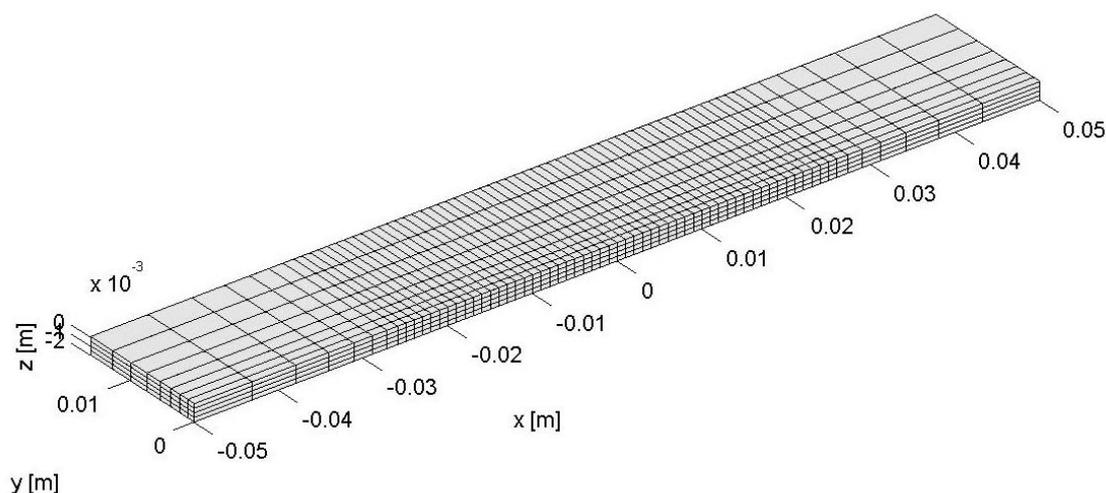


figura 5.46 mesh imperturbata di un componente di interesse aeronautico realizzata sfruttando la simmetria

La mesh perturbata (figura 5.45) è quella mesh che deve tener conto della presenza del difetto. Dato che non si conoscono ne le dimensioni ne la forma del difetto, tale mesh è stata realizzata prevedendo una zona di ispezione della presenza del difetto di dimensione complessiva pari a 10 mm. In tale zona, la mesh è stata realizzata con una discretizzazione molto fitta in modo da riuscire a fornire una ricostruzione del difetto il più fedele possibile a quello reale.

La mesh imperturbata (figura 5.46) invece non dovendo tener conto della presenza del difetto, viene realizzata mantenendo una discretizzazione delle faccette che compongono la mesh, meno fitta nella zona di cricca, ma più uniforme nell'intorno di tale zona.

Tutte le mesh sono state realizzate a metà in modo da sfruttare la simmetria della scansione. Infatti analizzando il difetto effettuando una scansione longitudinale alla direzione del difetto stesso, risulta evidente che per alleggerire la fase di calcolo è possibile realizzare una simulazione della scansione utilizzando la sola metà delle mesh ottenute tagliando le mesh lungo la linea di scansione stessa.

L'effetto completo della scansione si ottiene sfruttando le proprietà di simmetria.

Le dimensioni complessive delle mesh sono determinate dalla presenza del nucleo magnetico della sonda che deforma il pattern delle correnti di perturbazione. Quindi anche la mesh perturbata, deve essere sufficientemente grande, da non permettere di alterare la distribuzione di queste correnti.

Una volta realizzate le mesh (della parte conduttrice e del nucleo magnetico) e impostati i parametri di interesse nel "set_data_cs", viene avviata la fase di simulazione per poter poi ricostruire la forma del difetto di partenza.

Eseguendo il programma, andiamo a ricostruire la forma dei difetti singolarmente.

È da premettere che in nessun modo si poteva conoscere le dimensioni reali interne dei difetti, per cui nella fase di ricostruzione degli stessi si è pensato di utilizzare una finestra di visualizzazione di 10 mm. Solo successivamente si è compreso che alcuni difetti avevano o dimensioni maggiori o erano collegati ad altri difetti che si trovavano nelle immediate vicinanze, rendendo difficoltosa la loro valutazione.

Passiamo ora all'analisi vera e propria.

Nel settore due (figura 5.23 e 5.26) sono stati rilevati tre difetti: A, B e C. Valutiamo separatamente tali difetti.

Analizziamo il difetto A.

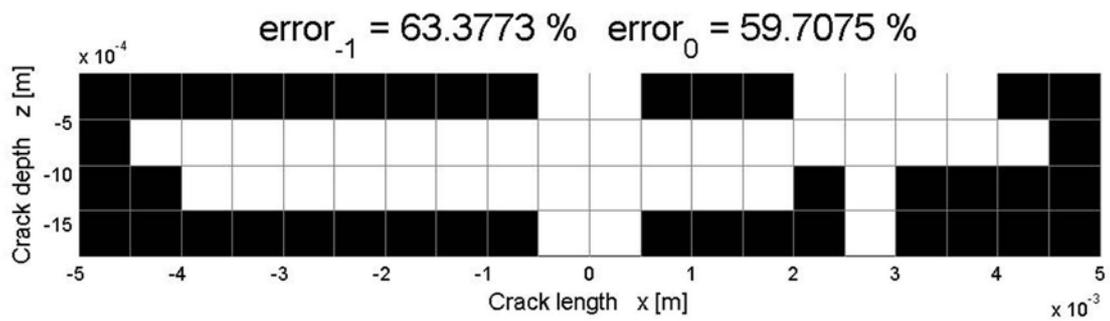


figura 5.47 dimensioni del difetto A nel settore 2.

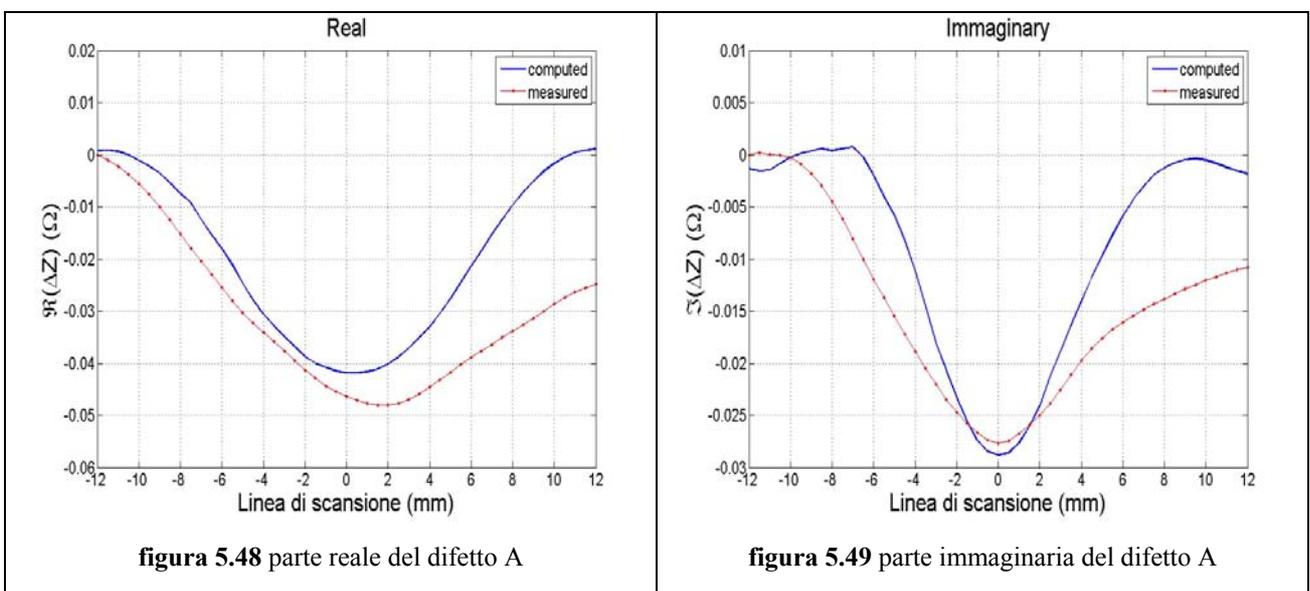


figura 5.48 parte reale del difetto A

figura 5.49 parte immaginaria del difetto A

Come si può notare le dimensioni del difetto A (figura 5.47) risulterebbero alquanto rilevanti. Bisogna notare che le dimensioni di ogni singola celletta equivalgono a 0.5 mm reali; quindi le informazioni che possiamo ricavare vanno soppesate in riferimento a tale parametro che rappresenta la risoluzione minima valutabile.

Possiamo quindi dire che il difetto principale avrà una lunghezza di circa 6 mm (lungo la linea di scansione) e una profondità media di circa 1 mm.

Il difetto risulta, inoltre, affiorante sia a $x = 0$ che a $x = 3$ mm.

- $x = 0$; Le dimensioni esterne del difetto risultano essere al massimo di 1 mm (come confermato da una analisi preventiva realizzata mediante liquidi penetranti).
- $x = 3$; La superficie affiorante risulterebbe maggiore, ma ricordando che la dimensione del pixel che descrive il difetto è di 0.5 mm, questo implica che uno spessore di alluminio di qualche decimo di millimetro verrebbe visto come difetto. Dato che non vi è in questo

caso un riscontro oggettivo fornito dall'analisi mediante liquidi penetranti, possiamo affermare che il difetto in questa zona risulta essere sub-superficiale.

Analizziamo ora il difetto B.

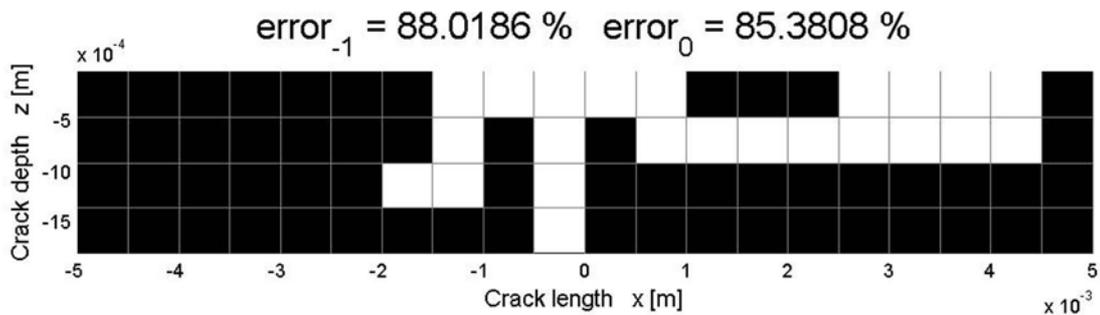


figura 5.50 dimensioni del difetto B nel settore 2.

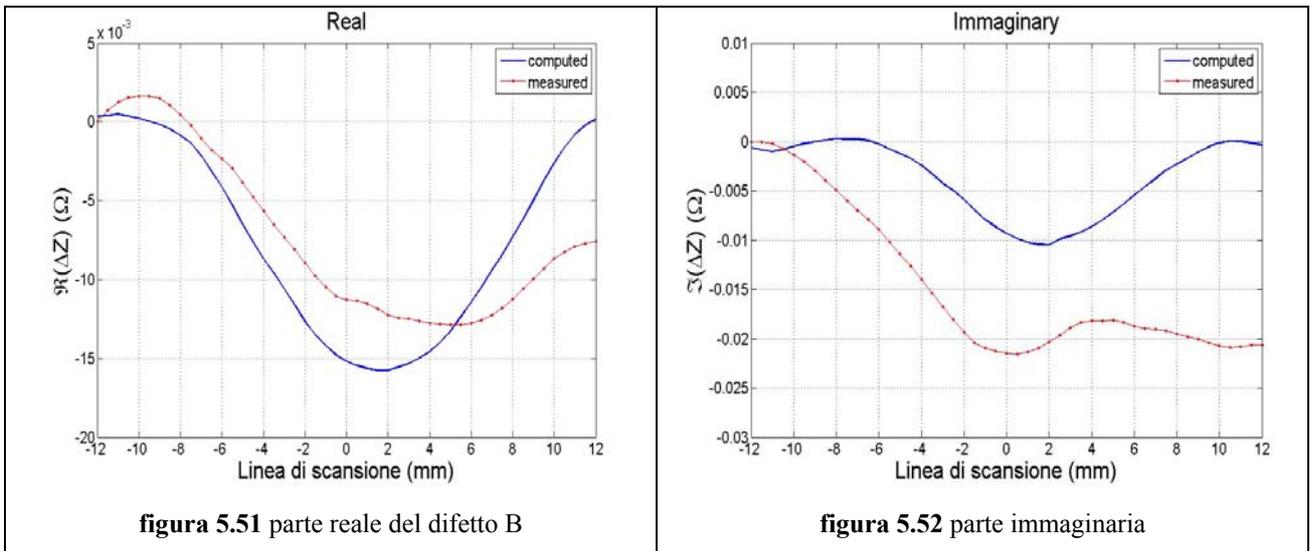


figura 5.51 parte reale del difetto B

figura 5.52 parte immaginaria

In questo caso, il difetto (figura 5.50) ha una dimensione ridotta rispetto al difetto precedente. Il corpo principale del difetto è rappresentato da un forellino passante (lungo z) avente spessore al più di 0.5 mm lungo x. La parte affiorante in superficie risulterebbe avere dimensioni maggiori, ma per i motivi espressi in precedenza e dopo una analisi effettuata utilizzando i liquidi penetranti, si è potuto verificare che la parte affiorante ha le dimensioni di circa 0.5 mm. L'altra zona di interesse compresa tra 2.5 mm e 4.5 mm (lungo x) ha uno spessore massimo di 1 mm e risulterebbe essere affiorante, ma anche in questo caso, come avveniva per il difetto A, l'analisi mediante liquidi penetranti non ha rilevato questa porzione di difetto, quindi considerando anche le dimensioni del pixel, possiamo affermare che tale zona risulta essere sub-superficiale.

Analizziamo ora il difetto C.

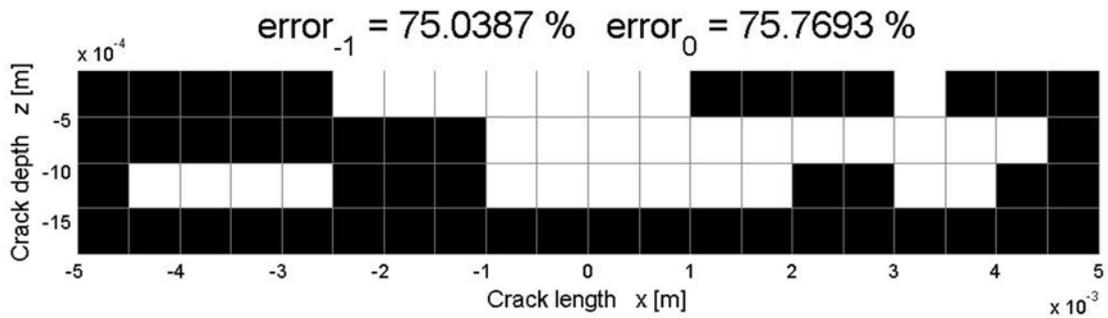


figura 5.53 dimensioni del difetto C nel settore 2.

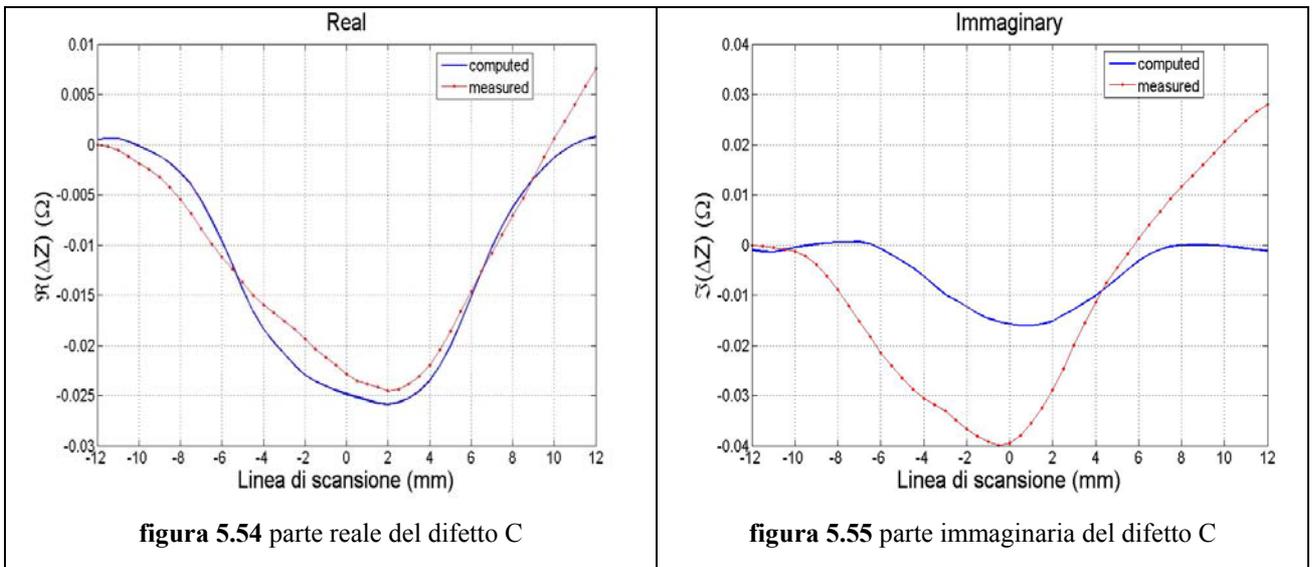


figura 5.54 parte reale del difetto C

figura 5.55 parte immaginaria del difetto C

Come per il primo difetto, anche in questo caso, le dimensioni del difetto (figura 5.53) sono alquanto rilevanti, ma anche in questo caso bisogna tener conto delle stesse considerazioni fatte per il primo difetto.

Possiamo quindi dire che il difetto ha un corpo principale con lunghezza di circa 3 mm (lungo la linea di scansione x). La zona di maggiore interesse è quella che va da - 1 mm a 2 mm, zona in cui si ha una profondità di circa 1 mm.

Tale difetto risulterebbe affiorante nella zona compresa tra - 2.5 e 1 mm e nel punto che si trova a circa 3 mm dall’riferimento, ma, l’analisi mediante liquidi penetranti non ha mostrato punti di affioramento per questo difetto, quindi considerando anche le dimensioni del pixel, possiamo affermare che tale difetto risulta essere sub-superficiale.

Analizziamo ora il settore 3 (figura 5.24, 5.27 e 5.27.1). In tale settore è stato evidenziata la presenza di un solo difetto denominato D. Analizziamo tale difetto.

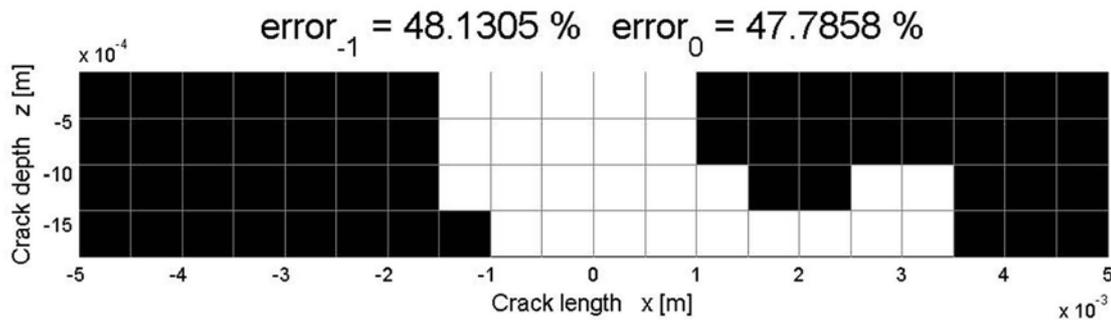


figura 5.56 dimensioni del difetto D nel settore 3.

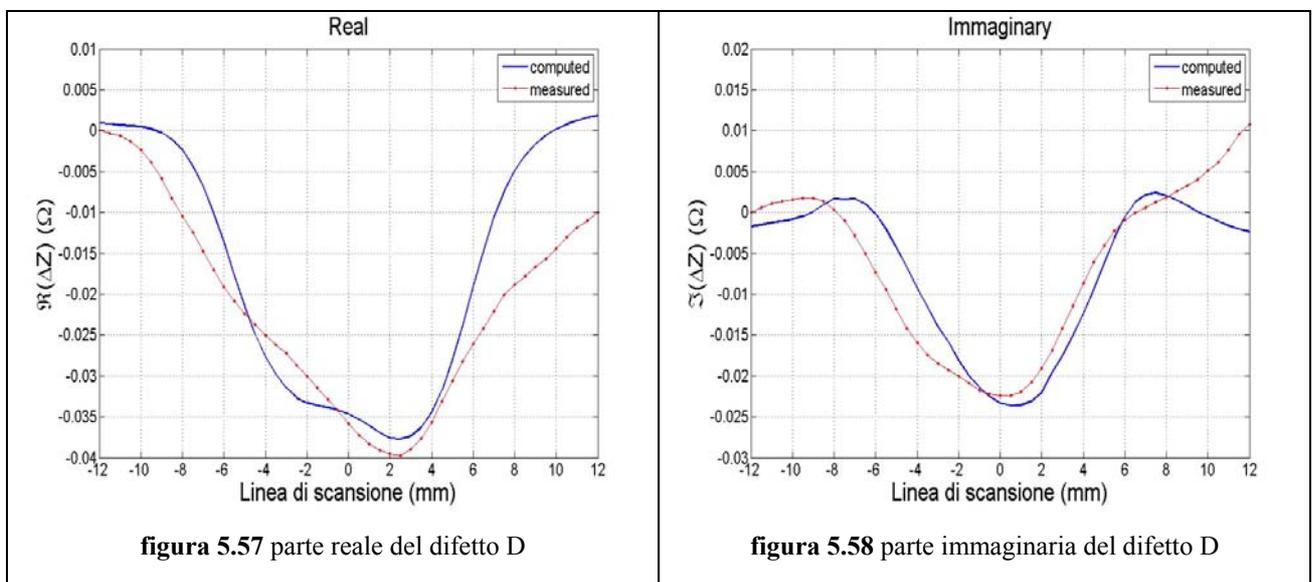


figura 5.57 parte reale del difetto D

figura 5.58 parte immaginaria del difetto D

In questo caso abbiamo un difetto che presenta un corpo centrale di lunghezza di circa 2.5 mm ed una profondità di circa 2 mm, ed una parte secondaria (zona che va da 2.5 a 3.5 mm) con profondità di circa 1 mm. Tale difetto risulta affiorante sulla superficie inferiore (superficie interna dell'oggetto sotto esame) come è stato possibile evidenziare attraverso l'utilizzo dei liquidi penetranti. Questo difetto risulterebbe, in realtà, affiorante anche sulla superficie superiore (superficie esterna dell'oggetto), ma su tale superficie i liquidi penetranti non hanno rilevato il difetto, per cui considerando anche le dimensioni del pixel possiamo affermare che il difetto non traspare sulla superficie superiore (esterna dell'oggetto).

Questo difetto presenta le sue dimensioni ed una struttura molto simili a quelle della cricca di 3 mm sulla piastra da laboratorio analizzata in precedenza, per cui, un raffronto anche visivo tra le curve rappresentative della parte reale e quella immaginaria dell'impedenza garantiscono la bontà del codice di calcolo utilizzato.

Con la tecnica di analisi mediante correnti indotte è stato riscontrato su questo componente un difetto (difetto C nel settore 2 (figura 5.53)) che non era emerso mediante l'utilizzo, in azienda, di altre tecniche di rilevamento come i liquidi penetranti in quanto esso si presenta in maniera sub-superficiale. Vista, quindi, l'importanza del caso, si è resa necessaria la verifica della presenza e delle dimensioni di tale difetto.

La verifica è stata realizzata mediante l'utilizzo della tecnica della "metallizzazione" la quale si compone di varie fasi:

- Il componente è stato tagliato in due punti di interesse, in un intorno del centro del difetto scelto.
- Con le parti tagliate, sono stati realizzati due provini (figura 5.59) contenenti i settori in cui si vogliono ricercare i difetti.
- I provini hanno subito, poi, varie fasi di levigatura in modo da far emergere una superficie liscia e non affetta dalle rugosità e dalle increspature generate dai tagli.
- I provini così generati sono stati, poi, analizzati mediante l'utilizzo di un microscopio elettronico.

Riferendoci quindi alla figura 5.53 dove l'asse delle "x" indica la direzione della scansione, si è scelto di valicare la presenza del difetto nei punti in cui:

- $x = - 3.5$; in tale punto il difetto si dovrà presentare nella parte inferiore del profilo e dovrà avere uno spessore di circa 0.5 mm.
- $x = 3.5$; In tale punto il difetto si dovrà presentare nella parte superiore del profilo e dovrà avere uno spessore di circa 1 mm.



figura 5.59 Immagine dei due provini su cui è stata eseguita l'analisi
Mediante microscopio elettronico.

Da una attenta analisi mediante l'utilizzo del microscopio elettronico, è emerso, dal provino numero 1 ricavato dal taglio effettuato ad $x = -3.5$ mm, la seguente immagine del difetto in esso contenuto

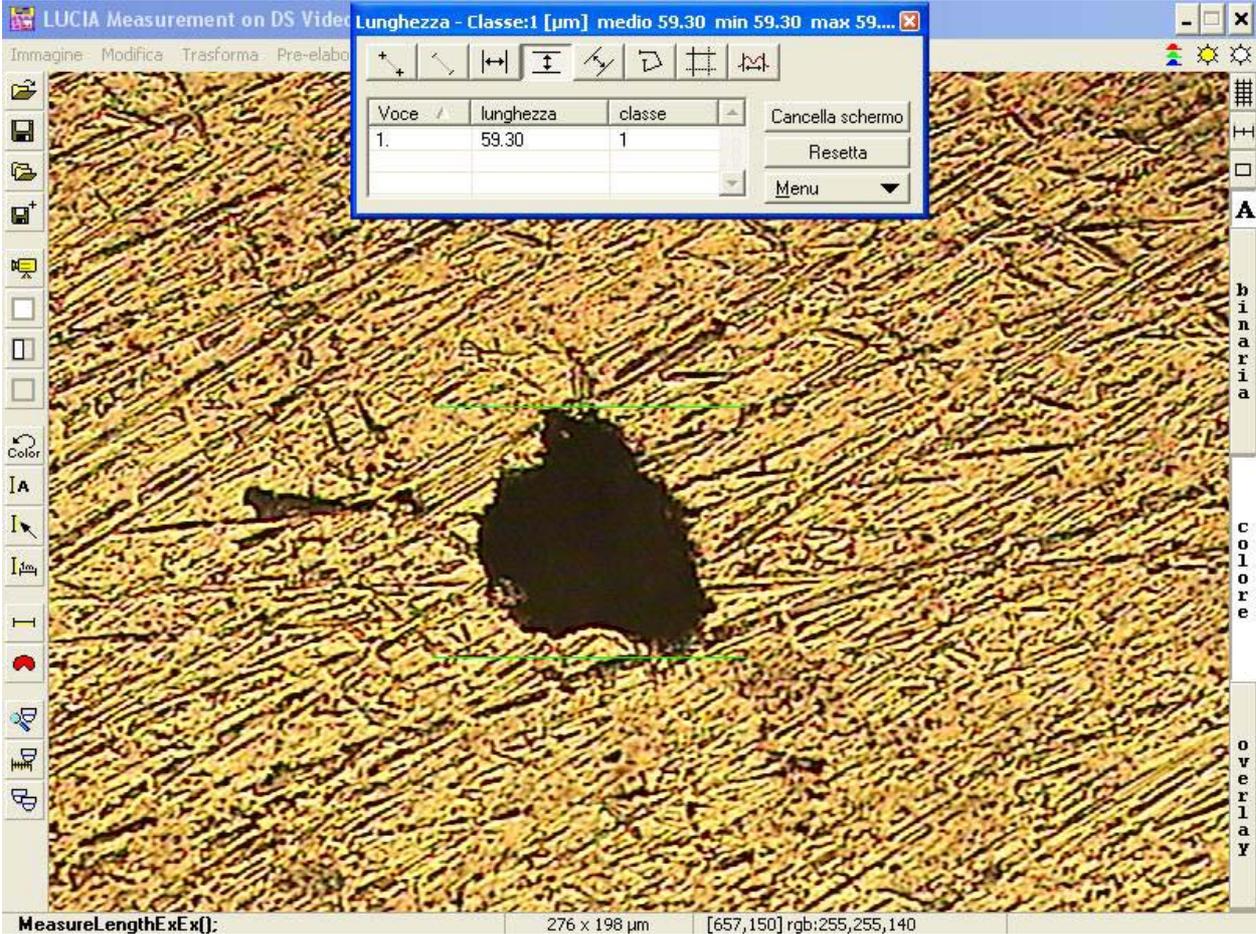


figura 5.60 immagine del difetto ottenuto a $x = -3.5$ mm il cui spessore è di 0.059 mm

in cui si evidenzia un difetto di circa 0.059 mm.

Mentre, dal provino numero 2 ricavato dal taglio effettuato ad $x = + 3.5$ mm, è emersa la seguente immagine del difetto in esso contenuto



figura 5.61 immagine del difetto ottenuto a $x = +3.5$ mm il cui spessore è di 0.092 mm

in cui si evidenzia un difetto di circa 0.092 mm.

Anche in questo caso bisogna fare un commento.

La fase di taglio del componente è stata eseguita in un momento in cui non si è riusciti a centrare il difetto in maniera precisa, per cui volendo cercare il difetto in una zona ai margini della zona centrale dello stesso, si è giunti a trovare il difetto nei punti in cui esso termina.

Inoltre, la fase di taglio del componente è stata eseguita utilizzando una sega di tipo circolare. Lo spessore della lama della sega era di circa 1 mm, quindi anche questo fattore può aver influito nello spostare la zona di indagine ancora più verso le estremità del difetto.

Le immagini prodotte successivamente dal microscopio mostrano, infatti, le parti terminali del difetto e non quelle previste nei punti di ispezione. Nella figura 5.61 si riesce a percepire il riflesso della luce sulla parte interna del difetto evidenziando quindi che in quel punto il difetto è evidentemente terminato.

5.3 Conclusioni e prospettive future

Con il metodo delle correnti indotte, siamo riusciti a realizzare una procedura automatica che permette identificare correttamente la posizione dei difetti. Siamo poi riusciti a dare un'immagine qualitativa dei difetti permettendone di valutare la lunghezza e la profondità.

Attualmente, però, si è riusciti a dare un'immagine solo bidimensionale del difetto, ma data la molteplicità dei casi di interesse industriale e la diversità delle tipologie di difetti riscontrabili, nel futuro si potrebbe pensare di arrivare a realizzare una ricostruzione tridimensionale del difetto stesso, mediante l'utilizzo di un codice a caratterizzazione volumetrica [5].

Un ulteriore sviluppo, potrebbe riguardare la fase di ricostruzione dell'immagine della cricca, rendendo automatica l'accensione dei vari pixel che compongono il difetto con una procedura basata su algoritmi di ottimizzazione quali quello genetico [2], riducendo così l'errore che potrebbe essere commesso da un operatore esterno.

Grazie, inoltre, alla realizzazione, negli ultimi anni, di apparati robotici di piccole dimensioni, si è reso possibile, di fatto la trasportabilità della struttura necessaria per effettuare la misura di scansione, per cui in futuro, si potrebbe pensare di realizzare un apparato, di piccole dimensioni, rendendo di fatto portabile tutto ciò che è necessario ad avere la ricostruzione dell'immagine del difetto.

Appendice A

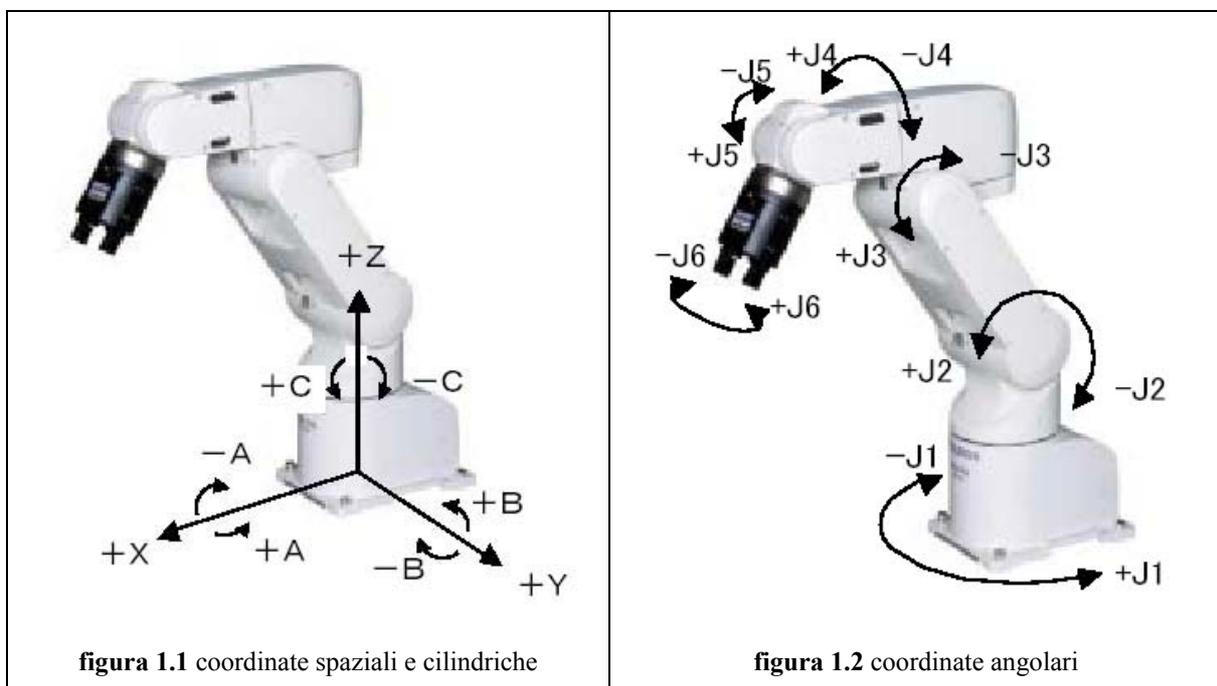
Diamo ora una breve spiegazione di tutti i moduli, implementati in ambiente Matlab, che servono per un corretto uso del robot, del diftoscopio phasec2D e dell'analizzatore di impedenza HP 4912A da remoto.

A.1 Moduli utilizzati per la movimentazione del robot

In questo paragrafo mostreremo i moduli necessari alla movimentazione del robot. Nel fare ciò utilizzeremo un approccio di tipo sequenziale, ovvero mostreremo i moduli via via che essi si presenteranno.

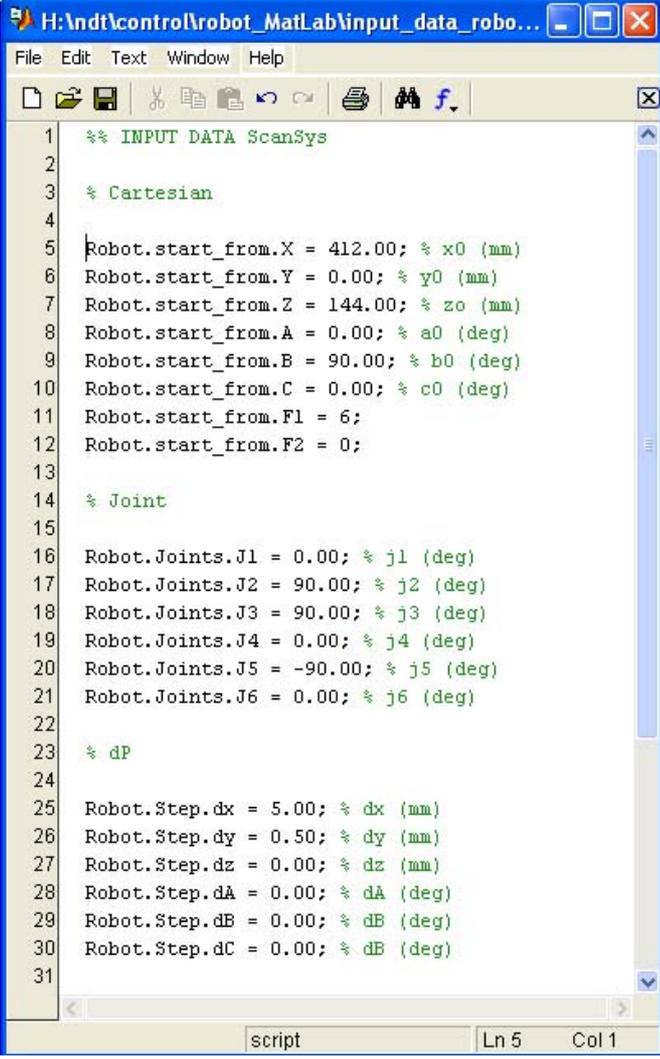
Iniziamo pure col dire che il robot per muoversi ha bisogno di conoscere la posizione da raggiungere ed è possibile determinare in maniera univoca la posizione di tale punto, tramite l'utilizzo di uno dei due set di coordinate disponibili per la movimentazione del robot:

- Coordinate spaziali X,Y,Z (figura 1.1).
- Coordinate angolari riferite ai singoli giunti del robot (figura 1.2).



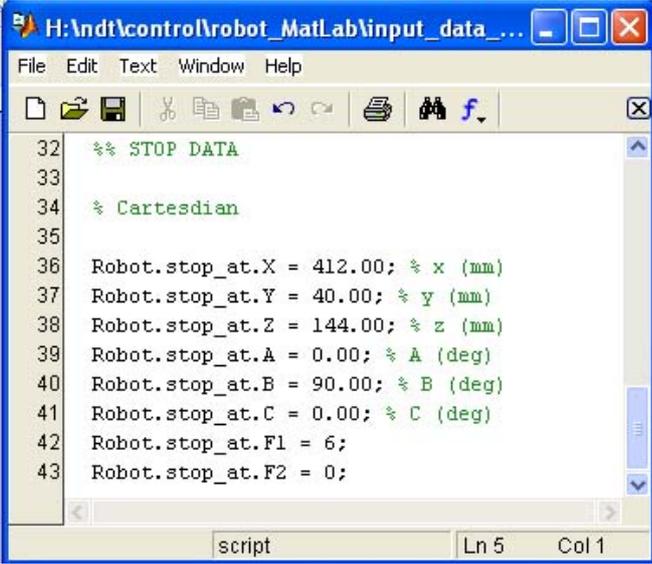
Riferendoci al set di coordinate spaziali (figura 1.1), notiamo la presenza delle coordinate cilindriche A, B e C le quali permettono di ruotare il robot intorno agli assi X, Y e Z rispettivamente, senza cambiare l'attuale postura del robot.

Modulo: "input_data_robot"



```
H:\ndt\control\robot_MatLab\input_data_rob...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 %% INPUT DATA ScanSys
2
3 % Cartesian
4
5 Robot.start_from.X = 412.00; % x0 (mm)
6 Robot.start_from.Y = 0.00; % y0 (mm)
7 Robot.start_from.Z = 144.00; % zo (mm)
8 Robot.start_from.A = 0.00; % a0 (deg)
9 Robot.start_from.B = 90.00; % b0 (deg)
10 Robot.start_from.C = 0.00; % c0 (deg)
11 Robot.start_from.F1 = 6;
12 Robot.start_from.F2 = 0;
13
14 % Joint
15
16 Robot.Joints.J1 = 0.00; % j1 (deg)
17 Robot.Joints.J2 = 90.00; % j2 (deg)
18 Robot.Joints.J3 = 90.00; % j3 (deg)
19 Robot.Joints.J4 = 0.00; % j4 (deg)
20 Robot.Joints.J5 = -90.00; % j5 (deg)
21 Robot.Joints.J6 = 0.00; % j6 (deg)
22
23 % dP
24
25 Robot.Step.dx = 5.00; % dx (mm)
26 Robot.Step.dy = 0.50; % dy (mm)
27 Robot.Step.dz = 0.00; % dz (mm)
28 Robot.Step.dA = 0.00; % dA (deg)
29 Robot.Step.dB = 0.00; % dB (deg)
30 Robot.Step.dC = 0.00; % dB (deg)
31
script Ln 5 Col 1
```

figura 2.1 Input data robot – parte prima



```
H:\ndt\control\robot_MatLab\input_data_...
File Edit Text Window Help
[Icons]
32 %% STOP DATA
33
34 % Cartesian
35
36 Robot.stop_at.X = 412.00; % x (mm)
37 Robot.stop_at.Y = 40.00; % y (mm)
38 Robot.stop_at.Z = 144.00; % z (mm)
39 Robot.stop_at.A = 0.00; % A (deg)
40 Robot.stop_at.B = 90.00; % B (deg)
41 Robot.stop_at.C = 0.00; % C (deg)
42 Robot.stop_at.F1 = 6;
43 Robot.stop_at.F2 = 0;
script Ln 5 Col 1
```

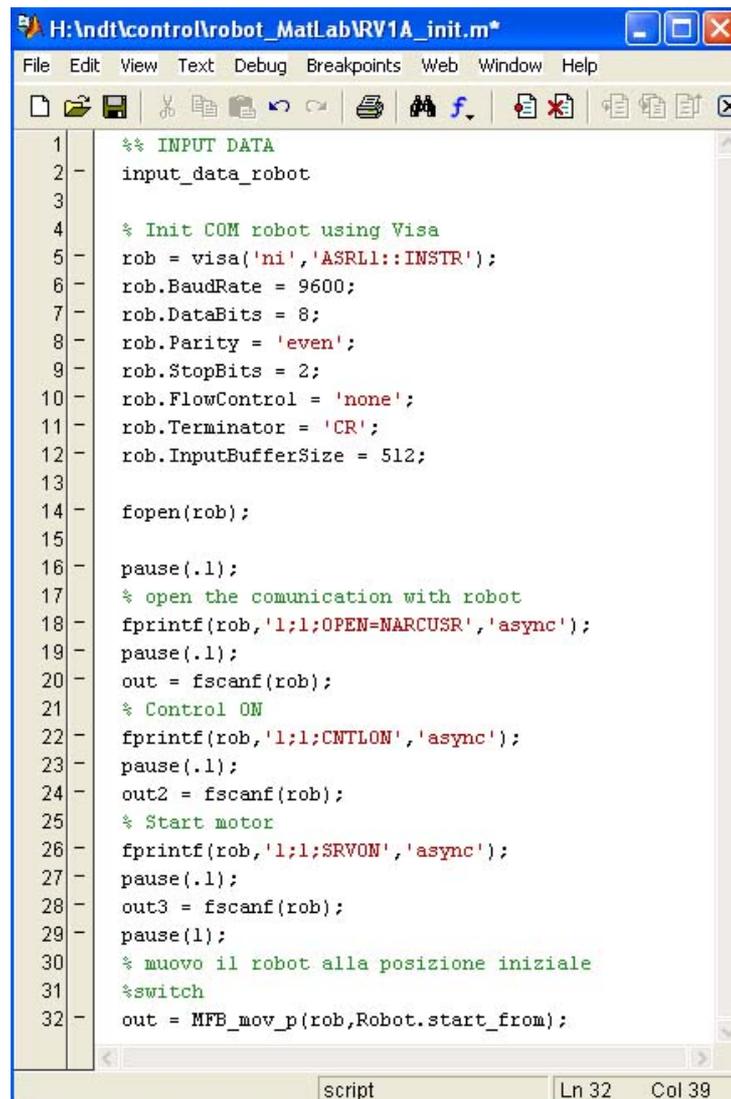
figura 2.2 Input data robot – parte seconda

Descrizione: In tale modulo vengono inserite le coordinate necessarie al movimento del braccio robotico. Infatti, pilotando il robot da remoto, bisogna fornirgli sia le coordinate di partenza (Robot.start_from di figura 2.1) che le coordinate di arrivo (Robot.stop_at di figura 2.2). Tra queste, oltre alle tre coordinate spaziali (X, Y, Z), compaiono anche le coordinate (A, B, C) ed i flag (F1 ed F2). Mentre le coordinate X, Y e Z definiscono i punti dello spazio in cui il robot si trova in ogni momento, le coordinate A, B e C permettono la rotazione del robot intorno agli assi X, Y e Z. I flag F1 ed F2, invece servono a esprimere la postura che il robot deve assumere. Come conseguenza di tutto questo, si avrà che detta “P” la posizione del robot in un punto qualsiasi dello spazio, questa la si esprimerà nella forma:

“P = (X,Y,Z,A,B,C)(F1,F2)”.

Inoltre, notiamo che è possibile far muovere il robot anche in maniera diversa, ovvero senza fornirgli le coordinate spaziali, ma utilizzando gli angoli di rotazione dei giunti (Robot.Joints di figura 2.1). Ovviamente è possibile utilizzare, indifferentemente, l’una o l’altra notazione, a seconda dei casi di interesse. Per esprimere i parametri di posizione del robot, quindi, è stata realizzata la struct “Robot” che permette di configurare le coordinate cartesiane di partenza (Robot.start_from), di arrivo (Robot.stop_at) ed il passo di scansione (Robot.Step), oppure di configurare le variazioni angolari dei vari giunti (Robot.Joints).

Modulo: “RV1A_init”



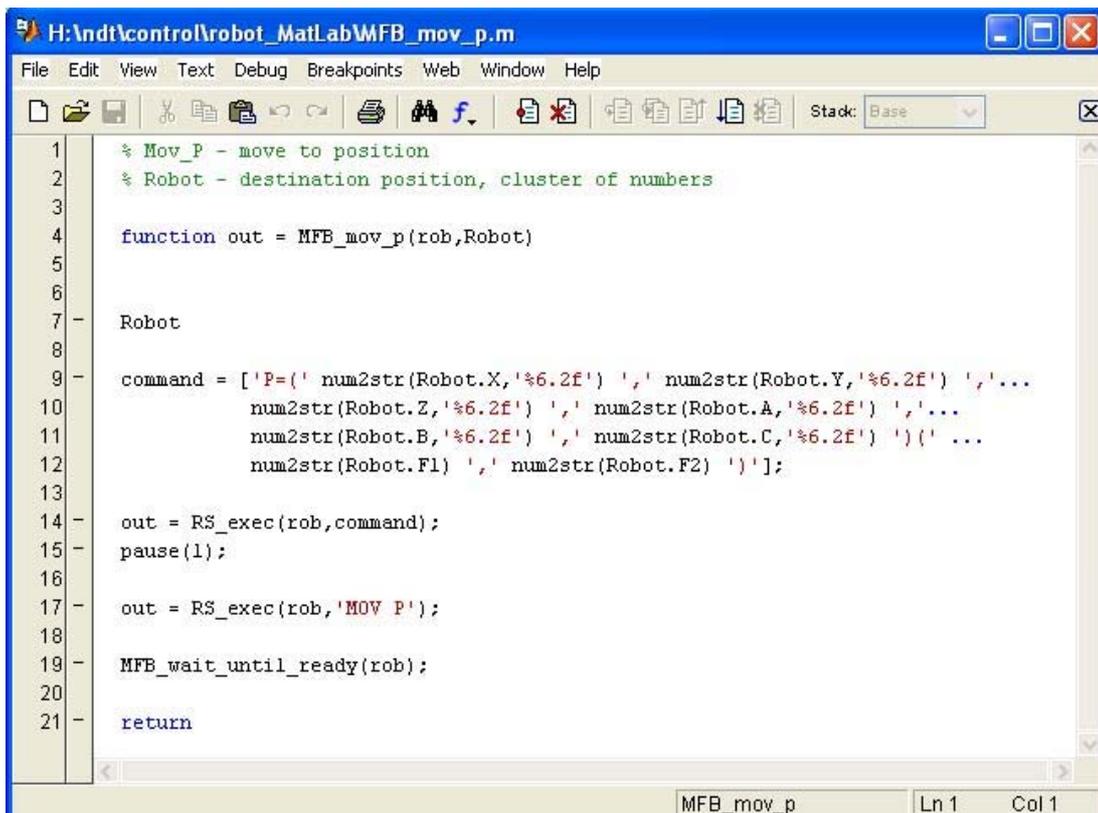
```
H:\ndt\control\robot_MatLab\RV1A_init.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
1 %% INPUT DATA
2 - input_data_robot
3
4 % Init COM robot using Visa
5 - rob = visa('ni','ASRL1:INSTR');
6 - rob.BaudRate = 9600;
7 - rob.DataBits = 8;
8 - rob.Parity = 'even';
9 - rob.StopBits = 2;
10 - rob.FlowControl = 'none';
11 - rob.Terminator = 'CR';
12 - rob.InputBufferSize = 512;
13
14 - fopen(rob);
15
16 - pause(.1);
17 % open the communication with robot
18 - fprintf(rob,'!;1;OPEN=NARCUSR','async');
19 - pause(.1);
20 - out = fscanf(rob);
21 % Control ON
22 - fprintf(rob,'!;1;CNTLON','async');
23 - pause(.1);
24 - out2 = fscanf(rob);
25 % Start motor
26 - fprintf(rob,'!;1;SRVON','async');
27 - pause(.1);
28 - out3 = fscanf(rob);
29 - pause(1);
30 % muovo il robot alla posizione iniziale
31 %switch
32 - out = MFE_mov_p(rob,Robot.start_from);
script Ln 32 Col 39
```

figura 3 RV1A_init

Descrizione: Questo modulo consente di eseguire la fase di inizializzazione del robot. Tale fase è necessaria perché senza di essa risulterebbe impossibile far eseguire qualsiasi comando al robot stesso. Come si evince dalla figura 3, per prima cosa, vengono caricate le coordinate che servono al posizionamento del robot. Dopodiché, dato che si è scelto di interfacciare il robot tramite la porta seriale, bisogna abilitare quest’ultima ad inviare e ricevere dati. Quindi si crea l’oggetto “rob” (che identifica la porta COM1 a cui è stato collegato il robot) con tutti i parametri necessari per un corretto funzionamento del robot, e si abilita la comunicazione col comando “fopen(rob)”. Una volta abilitata la porta seriale, bisogna aprire la comunicazione col robot, per fare ciò si utilizza il comando *Melfa Basic* “OPEN=NARCUSR”. Dopodiché bisogna abilitare il controllo da remoto, e questo lo si fa tramite il

comando “CNTLON”, e avviare i motori tramite il comando “SRVON”. Quindi finalmente muovo il robot alla posizione di lavoro, utilizzando la funzione “MFB_mov_p” che punta, come è visibile in figura 3, alla posizione espressa da Robot.start_from (tale posizione deve essere, quindi, preventivamente assegnata).

Funzione: “MFB_mov_p”



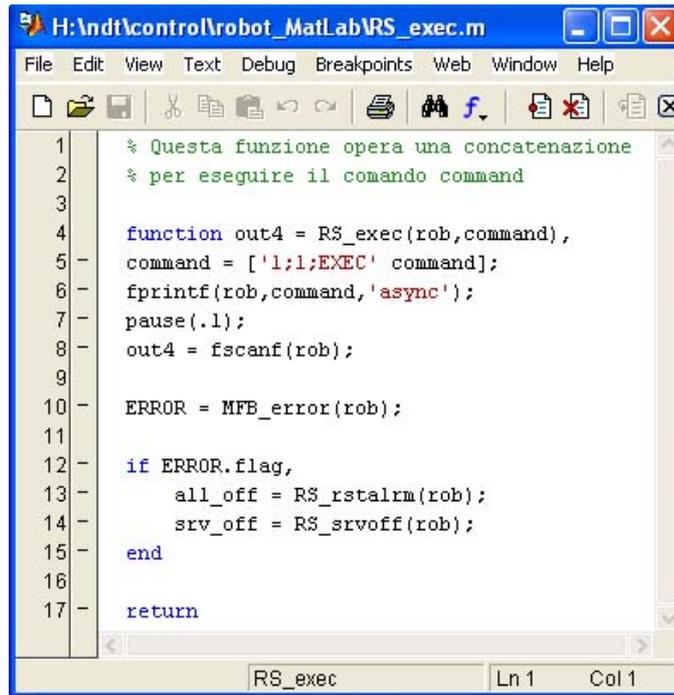
```
H:\ndt\controlrobot_MatLab\MFB_mov_p.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: Base
1 % Mov_P - move to position
2 % Robot - destination position, cluster of numbers
3
4 function out = MFB_mov_p(rob,Robot)
5
6
7 - Robot
8
9 - command = ['P=' num2str(Robot.X,'%6.2f') ',' num2str(Robot.Y,'%6.2f') ','...
10 num2str(Robot.Z,'%6.2f') ',' num2str(Robot.A,'%6.2f') ','...
11 num2str(Robot.B,'%6.2f') ',' num2str(Robot.C,'%6.2f') ']'...
12 num2str(Robot.F1) ',' num2str(Robot.F2) ''];
13
14 - out = RS_exec(rob,command);
15 - pause(1);
16
17 - out = RS_exec(rob,'MOV P');
18
19 - MFB_wait_until_ready(rob);
20
21 - return
MFB_mov_p Lh 1 Col 1
```

figura 4 MFB_mov_p

Descrizione: Questa funzione consente al robot di muoversi verso un punto prestabilito (punto “P”) senza identificare la traiettoria da seguire. Questo punto viene espresso tramite una stringa alfanumerica, assegnata a command, in cui viene dichiarato il nome del punto (“P”) e le coordinate dello stesso. Dopodiché viene eseguito il comando “MOV P”, tramite la funzione “RS_exec” e viene inibita richiesta di esecuzione di qualsiasi altra operazione, tramite l’utilizzo della funzione “MFB_wait_until_ready”.

Input: Robot – coordinate della posizione di destinazione del robot (punto P).

Funzione: “RS_exec”.



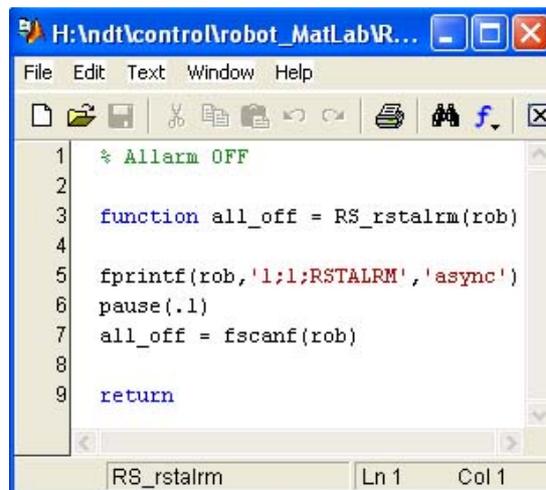
```
H:\ndt\control\robot_MatLab\RS_exec.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 % Questa funzione opera una concatenazione
2 % per eseguire il comando command
3
4 function out4 = RS_exec(rob,command),
5 - command = ['1;1;EXEC' command];
6 - fprintf(rob,command,'async');
7 - pause(.1);
8 - out4 = fscanf(rob);
9
10 - ERROR = MFB_error(rob);
11
12 - if ERROR.flag,
13 -     all_off = RS_rstalm(rob);
14 -     srv_off = RS_srvoft(rob);
15 - end
16
17 - return
RS_exec Ln 1 Col 1
```

figura 5 RS_exec

Descrizione: Questa funzione opera una concatenazione tra il comando Melfa Basic che permette l’esecuzione “1;1;EXEC” e la stringa espressa da “command”. Fatto ciò, invia al robot la nuova stringa “command” che contiene il comando di esecuzione, legge la stringa di risposta e determina se si è verificato un errore tramite l’utilizzo della funzione “MFB_error”. In caso di errore, il sistema genera un segnale acustico di allarme e sospende l’esecuzione di qualsiasi operazione. Per poter intervenire, si è scelto di disattivare il segnale acustico di allarme, tramite la funzione “RS_rstalm” e di spegnere i motori del robot, tramite la funzione “RS_srvoft”.

Input: command – stringa contenente il comando da eseguire.

Funzione: “RS_rstalm”.

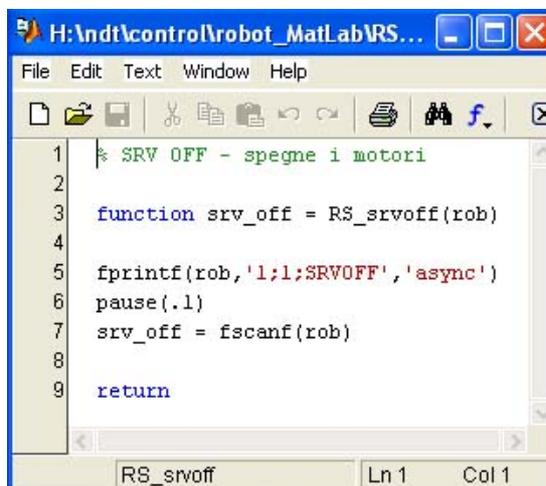


```
H:\ndt\control\robot_MatLab\RS...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % Allarm OFF
2
3  function all_off = RS_rstalm(rob)
4
5  fprintf(rob,'1;1;RSTALRM','async')
6  pause(.1)
7  all_off = fscanf(rob)
8
9  return
RS_rstalm Ln 1 Col 1
```

figura 6 RS_rstalm

Descrizione: Questa funzione opera molto semplicemente, inviando il comando Melfa Basic “1;1;RSTALRM” al robot per consentirgli di spegnere il segnale acustico.

Funzione: “RS_srvoff”.

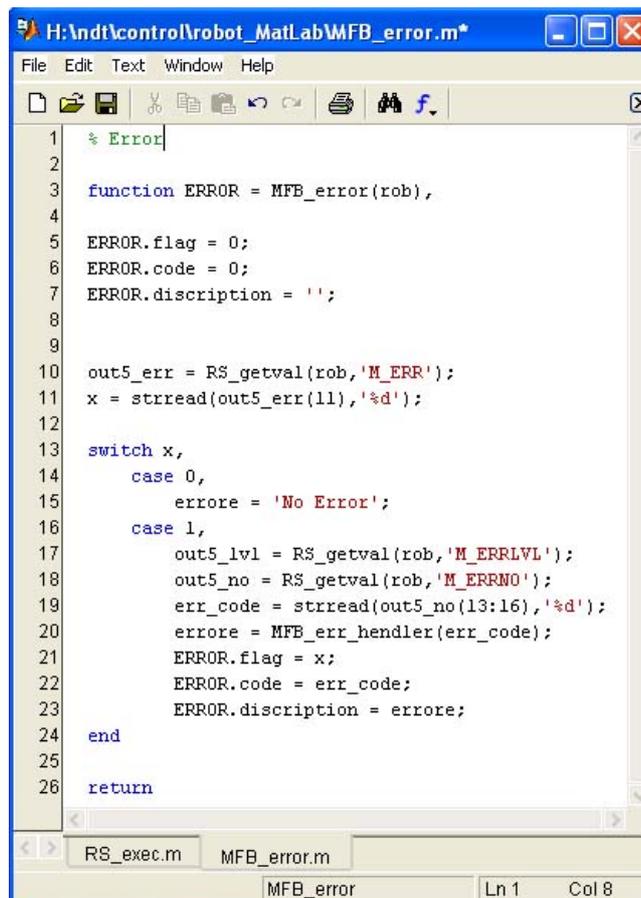


```
H:\ndt\control\robot_MatLab\RS...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % SRV OFF - spegne i motori
2
3  function srv_off = RS_srvoff(rob)
4
5  fprintf(rob,'1;1;SRVOFF','async')
6  pause(.1)
7  srv_off = fscanf(rob)
8
9  return
RS_srvoff Ln 1 Col 1
```

figura 7 RS_srvoff

Descrizione: Questa funzione permette di spegnere i motori del robot tramite l’invio del comando “1;1;SRVOFF”.

Funzione: “MFB_error”.



```
H:\ndf\control\robot_MatLab\MFB_error.m*
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 % Error
2
3 function ERROR = MFB_error(rob),
4
5 ERROR.flag = 0;
6 ERROR.code = 0;
7 ERROR.discription = '';
8
9
10 out5_err = RS_getval(rob,'M_ERR');
11 x = strread(out5_err(11),'%d');
12
13 switch x,
14     case 0,
15         errore = 'No Error';
16     case 1,
17         out5_lvl = RS_getval(rob,'M_ERRLVL');
18         out5_no = RS_getval(rob,'M_ERRNO');
19         err_code = strread(out5_no(13:16),'%d');
20         errore = MFB_err_handler(err_code);
21         ERROR.flag = x;
22         ERROR.code = err_code;
23         ERROR.discription = errore;
24     end
25
26 return
[Icons]
RS_exec.m MFB_error.m
MFB_error Ln 1 Col 8
```

figura 8 MFB_error

Descrizione: Questa funzione esegue un controllo sull'errore, valutando l'eventuale modifica del flag e del codice di errore. Partendo, infatti dalla situazione iniziale in cui non vi è errore (ERROR.flag=0 e ERROR.code=0), si valuta la modifica del flag di errore. Utilizzando infatti la funzione “RS_getval” si estrae la stringa contenente il valore del flag di errore tramite il comando “M_ERR”. Detto “x” il valore del flag, vengono valutati i vari casi. Se “x=0”, allora il flag non è cambiato e, di conseguenza, non si è verificato alcun errore. Se “x=1”, allora siamo in presenza di un errore e vengono eseguite le seguenti operazioni:

- Utilizzando la funzione “RS_getval”, viene estratto il livello dell'errore, tramite l'uso del comando “M_ERRLVL”.
- Utilizzando la funzione “RS_getval”, viene estratto il numero corrispondente all'errore verificatosi, tramite l'uso del comando “M_ERRNO”. Tale numero viene poi identificato come “err_code”

- Utilizzando la funzione “MFB_err_hendler” combinata col codice di errore assegnato ad “err_code” viene fornita una descrizione dell’errore riscontrato.

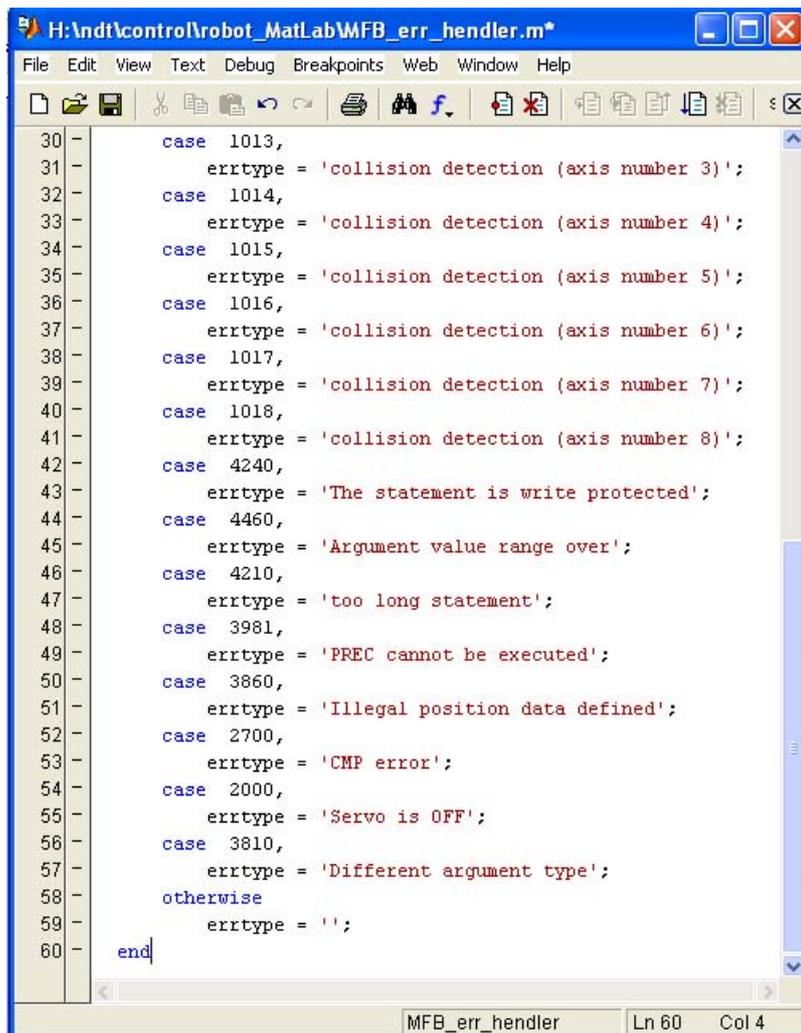
Funzione: “RS_getval”.

```

1  % rob - object handler
2  % param - robot parameter name (str)
3  % out5 - string
4
5  function out5 = RS_getval(rob,param),
6
7  errorflag = 1;
8  tentativo = 1;
9
10 while (tentativo < 10)&errorflag,
11     try
12         query = ['1;1;VAL' param];
13         fprintf(rob,query,'async');
14         pause(.1);
15         out5=fscanf(rob);
16         errorflag = 0;
17     catch
18         errorflag = 1;
19         tentativo = tentativo + 1;
20     end % try
21 end % while
22 return
  
```

figura 9 RS_getval

Descrizione: Questa funzione esegue una concatenazione tra il comando “1;1;VAL” che serve per imporre al robot di rilasciare la stringa contenente il valore richiesto ed il comando assegnato a “param” che identifica la stringa di riferimento. Successivamente, tramite il comando Matlab “strreed”, è possibile estrarre il valore richiesto dalla stringa. Tale funzione è stata implementata, prevedendo un controllo su di una eventuale risposta errata da parte del robot. Infatti partendo dalla situazione iniziale (errorflag=1 e tentativo=1), se il robot risponde emettendo in uscita la stringa giusta, allora viene eseguito il blocco contenuto in “try”, modificando errorflag e rendendolo pari a “0” terminando così l’esecuzione della funzione. Se invece, il robot, per qualsivoglia motivo, dovesse rispondere



```
H:\ndt\controlrobot_MatLab\MFB_err_hendler.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons]
30 - case 1013,
31 -     errtype = 'collision detection (axis number 3)';
32 - case 1014,
33 -     errtype = 'collision detection (axis number 4)';
34 - case 1015,
35 -     errtype = 'collision detection (axis number 5)';
36 - case 1016,
37 -     errtype = 'collision detection (axis number 6)';
38 - case 1017,
39 -     errtype = 'collision detection (axis number 7)';
40 - case 1018,
41 -     errtype = 'collision detection (axis number 8)';
42 - case 4240,
43 -     errtype = 'The statement is write protected';
44 - case 4460,
45 -     errtype = 'Argument value range over';
46 - case 4210,
47 -     errtype = 'too long statement';
48 - case 3981,
49 -     errtype = 'PREC cannot be executed';
50 - case 3860,
51 -     errtype = 'Illegal position data defined';
52 - case 2700,
53 -     errtype = 'CMP error';
54 - case 2000,
55 -     errtype = 'Servo is OFF';
56 - case 3810,
57 -     errtype = 'Different argument type';
58 - otherwise
59 -     errtype = '';
60 - end
MFB_err_hendler Ln 60 Col 4
```

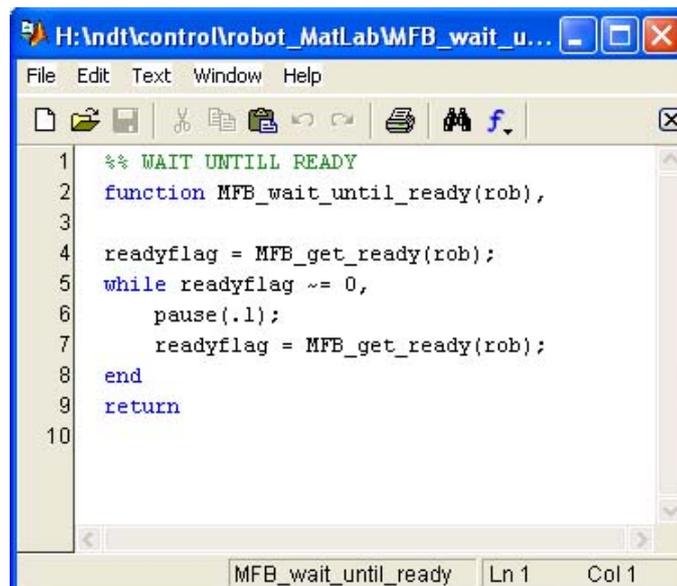
figura 11 MFB_err_hendler – parte 2

Descrizione: Questa funzione, opera in un modo molto semplice, infatti, in base al codice che riceve in ingresso, identifica uno degli errori catalogati nella struttura “switch”, fornendo in uscita il tipo di errore.

Input: err_code – codice di errore.

Output: errtype – tipo di errore.

Funzione “MFB_wait_until_ready”.



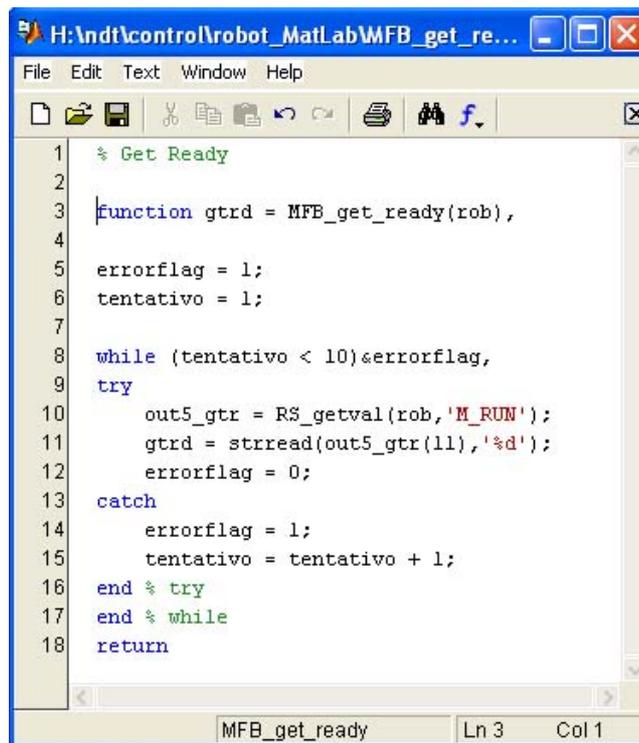
```
H:\Indt\control\robot_MatLab\MFB_wait_u...
File Edit Text Window Help
MFB_wait_until_ready Ln 1 Col 1
1 %% WAIT UNTILL READY
2 function MFB_wait_until_ready(rob),
3
4 readyflag = MFB_get_ready(rob);
5 while readyflag ~= 0,
6     pause(.1);
7     readyflag = MFB_get_ready(rob);
8 end
9 return
10
```

figura 12 MFB_wait_until_ready

Descrizione: Questa funzione non permette al robot di eseguire nessun'altra operazione di movimento finché l'operazione precedente non è stata portata a termine. Il controllo avviene tramite l'utilizzo della funzione “MFB_get_ready” che assegna un valore a “readyflag”.

- “readyflag=1”, non viene restituito il controllo all'utente per far eseguire un nuovo movimento al robot.
- “readyflag=0” allora, il robot, potrà, a richiesta, eseguire un'altra operazione di movimento.

Funzione “MFB_get_ready”.



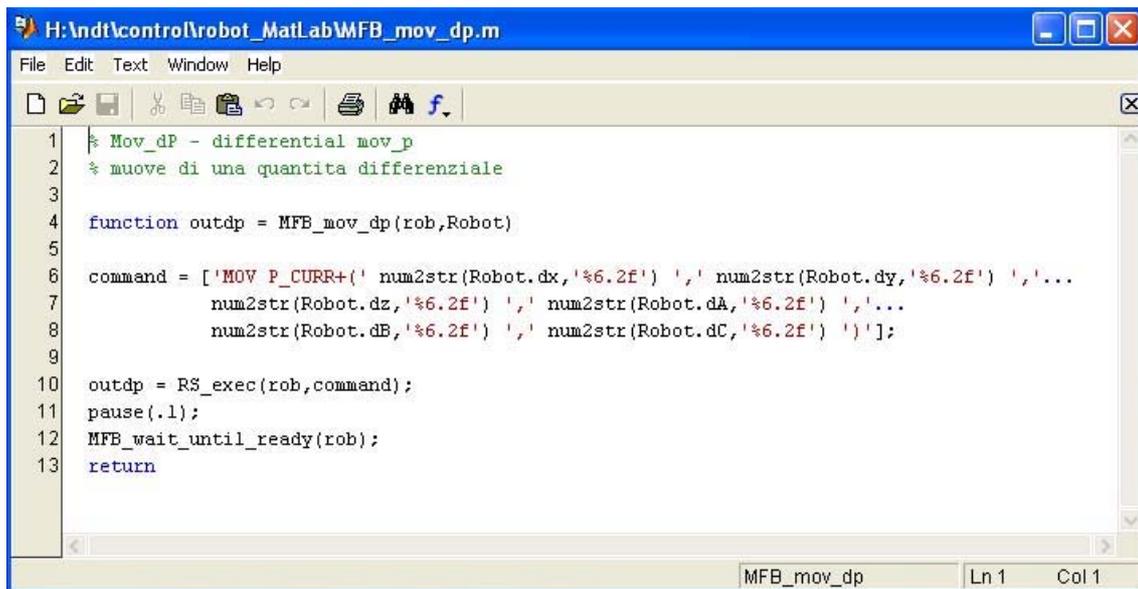
```
1  % Get Ready
2
3  function gtrd = MFB_get_ready(rob),
4
5  errorflag = 1;
6  tentativo = 1;
7
8  while (tentativo < 10) & errorflag,
9  try
10     out5_gtr = RS_getval(rob, 'M_RUN');
11     gtrd = strread(out5_gtr(11), '%d');
12     errorflag = 0;
13 catch
14     errorflag = 1;
15     tentativo = tentativo + 1;
16 end % try
17 end % while
18 return
```

figura 13 MFB_get_ready

Descrizione: Questa funzione utilizza la funzione “RS_getval”, per estrarre il valore corrispondente allo stato del robot, tramite, anche, l’uso del comando “M_RUN”. Tale valore viene poi assegnato alla variabile di uscita “gtrd”.

Tale funzione è stata implementata, prevedendo un controllo su di una eventuale risposta errata da parte del robot. Infatti, essa opera in momenti in cui il robot sta eseguendo un movimento, per cui si capisce come questi istanti possono essere critici e il comando richiesto dalla funzione possa essere erroneamente interpretato dal robot. Per cui, partendo dalla situazione iniziale (errorflag=1 e tentativo=1), se il robot risponde emettendo in uscita la stringa giusta, allora viene eseguito il blocco contenuto in “try”, modificando errorflag e rendendolo pari a “0” terminando così l’esecuzione della funzione. Se invece, il robot, dovesse rispondere emettendo in uscita una stringa errata, viene eseguito il blocco contenuto in “catch” incrementando il numero di tentativi e rieseguendo la funzione.

Funzione: “MFB_mov_dp”.

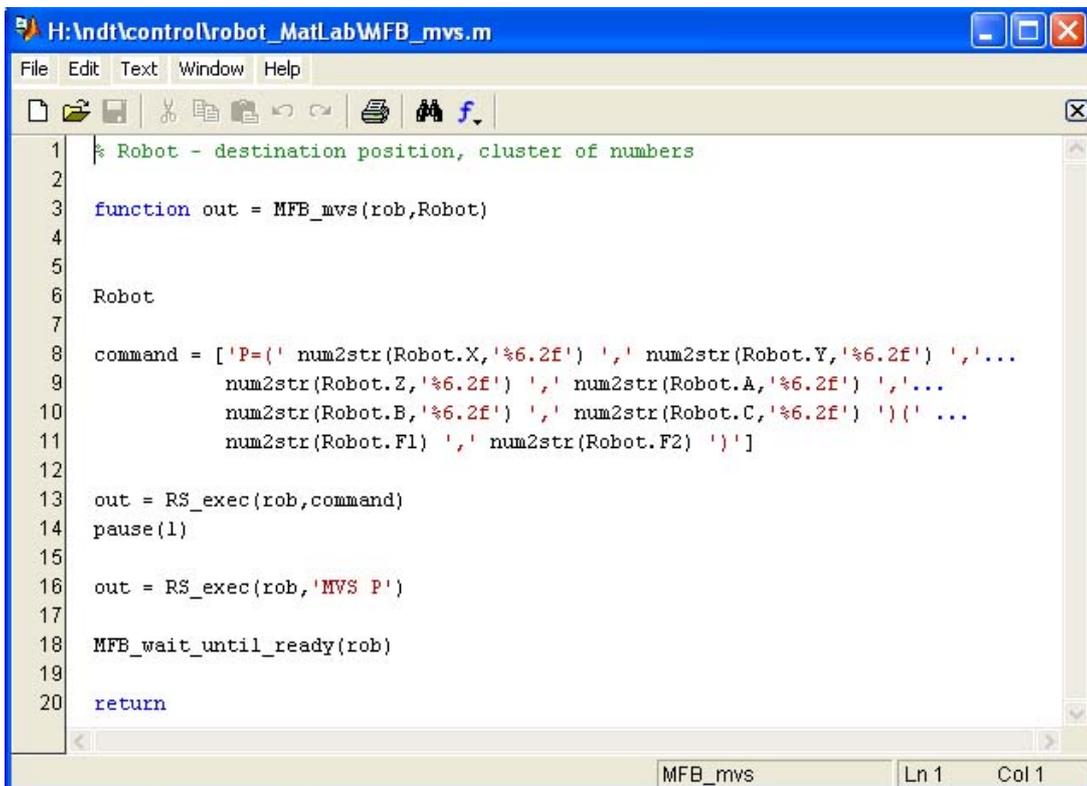


```
H:\ndf\control\robot_MatLab\MFB_mov_dp.m
File Edit Text Window Help
1 % Mov_dp - differential mov_p
2 % muove di una quantita differenziale
3
4 function outdp = MFB_mov_dp(rob,Robot)
5
6 command = ['MOV_P_CURR+( ' num2str(Robot.dx,'%6.2f') ' ,' num2str(Robot.dy,'%6.2f') ' ,'\...
7           num2str(Robot.dz,'%6.2f') ' ,' num2str(Robot.dA,'%6.2f') ' ,'\...
8           num2str(Robot.dB,'%6.2f') ' ,' num2str(Robot.dC,'%6.2f') ' )'];
9
10 outdp = RS_exec(rob,command);
11 pause(.1);
12 MFB_wait_until_ready(rob);
13 return
```

figura 14 MFB_mov_dp

Descrizione: E' del tutto simile alla funzione “MFB_mov_p”, l'unica differenza sta nel fatto che i movimenti avvengono per spostamenti differenziali (infatti le coordinate di riferimento sono quelle differenziali).

Funzione: “MFB_mvs”.

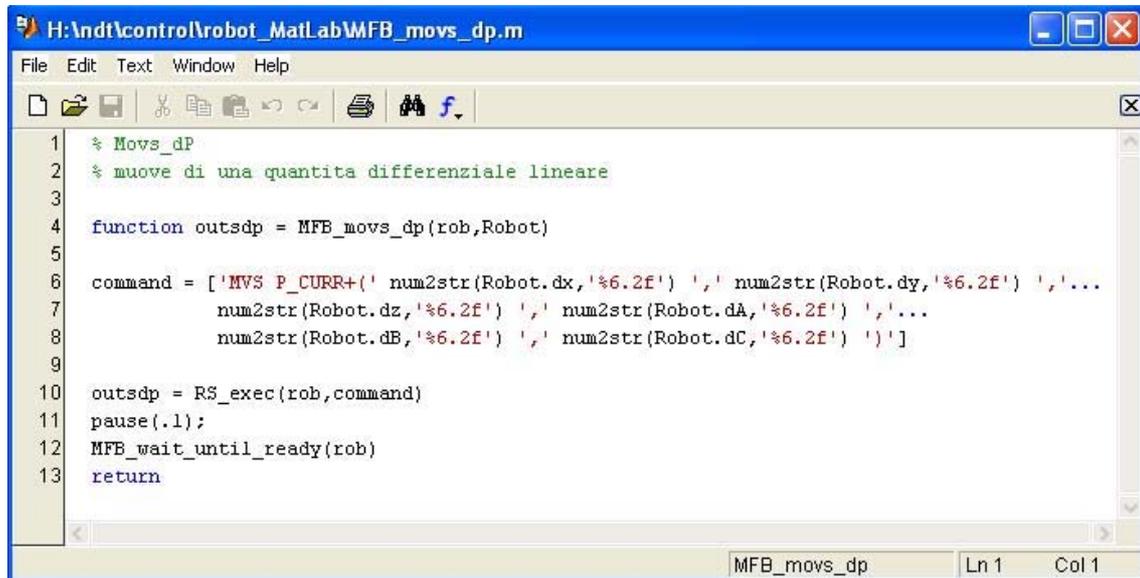


```
H:\ndt\control\robot_MatLabWFB_mvs.m
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 % Robot - destination position, cluster of numbers
2
3 function out = MFB_mvs(rob,Robot)
4
5
6 Robot
7
8 command = ['P=(' num2str(Robot.X,'%6.2f') ',' num2str(Robot.Y,'%6.2f') ','...
9           num2str(Robot.Z,'%6.2f') ',' num2str(Robot.A,'%6.2f') ','...
10          num2str(Robot.B,'%6.2f') ',' num2str(Robot.C,'%6.2f') ')(' ...
11          num2str(Robot.F1) ',' num2str(Robot.F2) ')']
12
13 out = RS_exec(rob,command)
14 pause(1)
15
16 out = RS_exec(rob,'MVS P')
17
18 MFB_wait_until_ready(rob)
19
20 return
MFB_mvs Ln 1 Col 1
```

figura 15 MFB_mvs

Descrizione: Questa funzione, alla pari della “MFB_mov_p” permette al robot di muoversi verso un punto prestabilito (punto “P”). L’unica differenza è che questa volta il movimento avviene in maniera lineare.

Funzione: “MFB_movs_dp”.

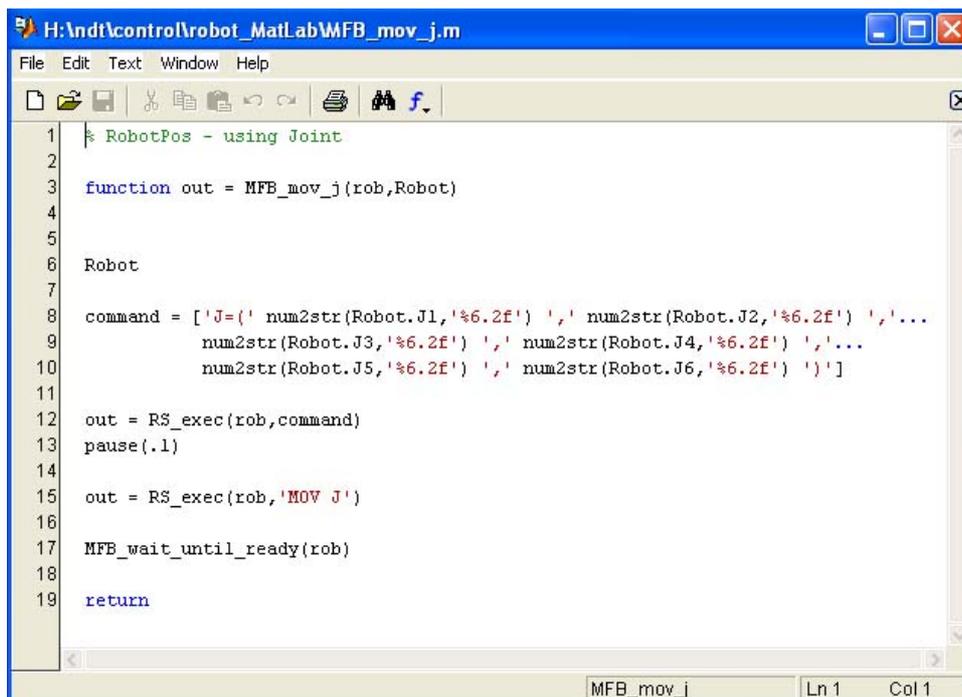


```
H:\ndt\control\robot_MatLab\MFB_movs_dp.m
File Edit Text Window Help
1  % Mavs_dp
2  % muove di una quantita differenziale lineare
3
4  function outsdp = MFB_movs_dp(rob,Robot)
5
6  command = ['MVS P_CURR+( ' num2str(Robot.dx,'%6.2f') ' ',' num2str(Robot.dy,'%6.2f') ' ','...
7             num2str(Robot.dz,'%6.2f') ' ',' num2str(Robot.dA,'%6.2f') ' ','...
8             num2str(Robot.dB,'%6.2f') ' ',' num2str(Robot.dC,'%6.2f') ' ']'
9
10 outsdp = RS_exec(rob,command)
11 pause(.1);
12 MFB_wait_until_ready(rob)
13 return
```

figura 16 MFB_movs_dp

Descrizione: Questa funzione permette al robot di eseguire un movimento in maniera lineare mediante spostamenti di tipo differenziale.

Funzione: “MFB_mov_j”.



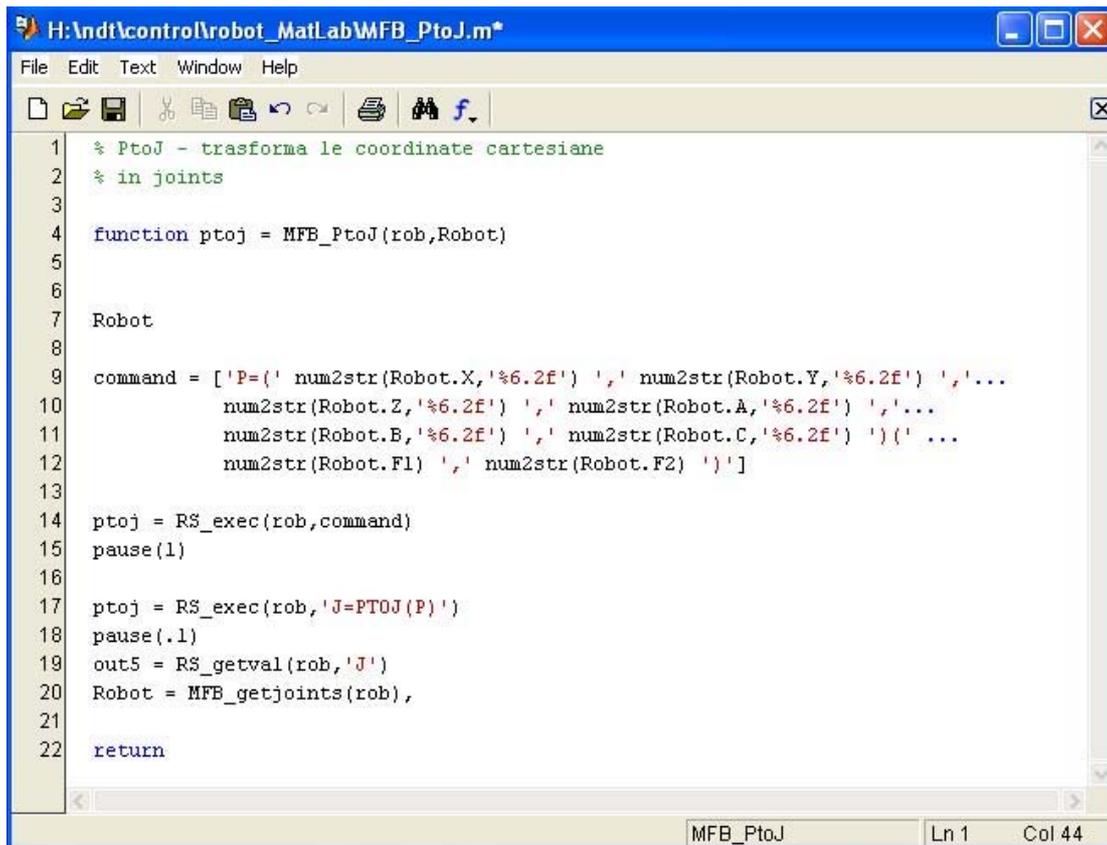
```
H:\ndt\control\robot_MatLab\MFB_mov_j.m
File Edit Text Window Help
1  % RobotPos - using Joint
2
3  function out = MFB_mov_j(rob,Robot)
4
5
6  Robot
7
8  command = ['J=( ' num2str(Robot.J1,'%6.2f') ' ',' num2str(Robot.J2,'%6.2f') ' ','...
9             num2str(Robot.J3,'%6.2f') ' ',' num2str(Robot.J4,'%6.2f') ' ','...
10            num2str(Robot.J5,'%6.2f') ' ',' num2str(Robot.J6,'%6.2f') ' ']'
11
12 out = RS_exec(rob,command)
13 pause(.1)
14
15 out = RS_exec(rob,'MOV J')
16
17 MFB_wait_until_ready(rob)
18
19 return
```

figura 17 MFB_mov_j

Descrizione: Questa funzione è del tutto simile a “MFB_mov_p”, l’unica differenza sta nel tipo di coordinate utilizzate. Infatti, in questo caso, vengono utilizzate le coordinate angolari.

Input: Robot – coordinate angolari di posizionamento.

Funzione: “**MFB_PtoJ**”.



```
H:\indt\control\robot_MatLab\WFB_PtoJ.m
File Edit Text Window Help
1  % PtoJ - trasforma le coordinate cartesiane
2  % in joints
3
4  function ptoj = MFB_PtoJ(rob,Robot)
5
6
7  Robot
8
9  command = ['P=(' num2str(Robot.X,'%6.2f') ',' num2str(Robot.Y,'%6.2f') ','...
10            num2str(Robot.Z,'%6.2f') ',' num2str(Robot.A,'%6.2f') ','...
11            num2str(Robot.B,'%6.2f') ',' num2str(Robot.C,'%6.2f') ')(' ...
12            num2str(Robot.F1) ',' num2str(Robot.F2) ')']
13
14  ptoj = RS_exec(rob,command)
15  pause(1)
16
17  ptoj = RS_exec(rob,'J=PTOJ(P)')
18  pause(.1)
19  out5 = RS_getval(rob,'J')
20  Robot = MFB_getjoints(rob),
21
22  return
MFB_PtoJ Ln 1 Col 44
```

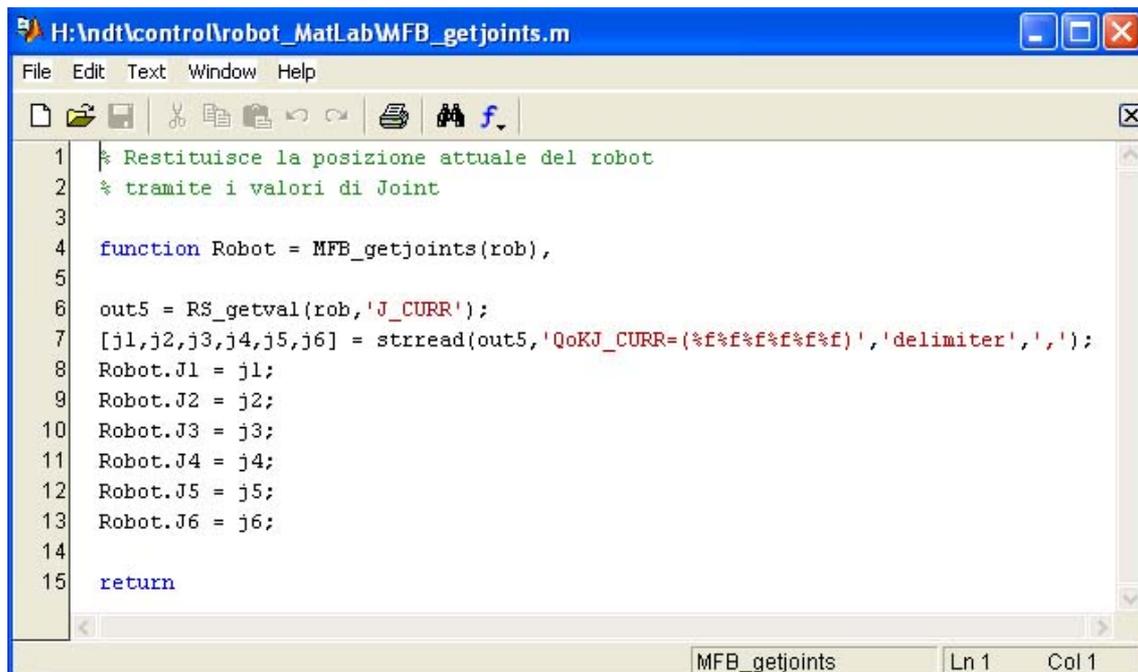
figura 18 MFB_PtoJ

Descrizione: Questa funzione permette di convertire le coordinate spaziali in coordinate angolari. Infatti una volta definito il punto di posizionamento spaziale “P”, ed eseguita la stringa di comando che definisce tale punto, tramite la funzione “RS_exec”, si esegue il comando “J=PTOJ(P)” per convertire le coordinate spaziali in quelle angolari. Fatto ciò, si acquisiscono i valori delle coordinate angolari, tramite la funzione “RS_getval” ed infine si esegue la funzione “MFB_getjoints” che restituisce la posizione del robot in coordinate angolari.

Input: Robot – coordinate di posizionamento spaziali.

Output: ptoj – coordinate di posizionamento angolari riferite ai singoli giunti

Funzione: “MFB_getjoints”.



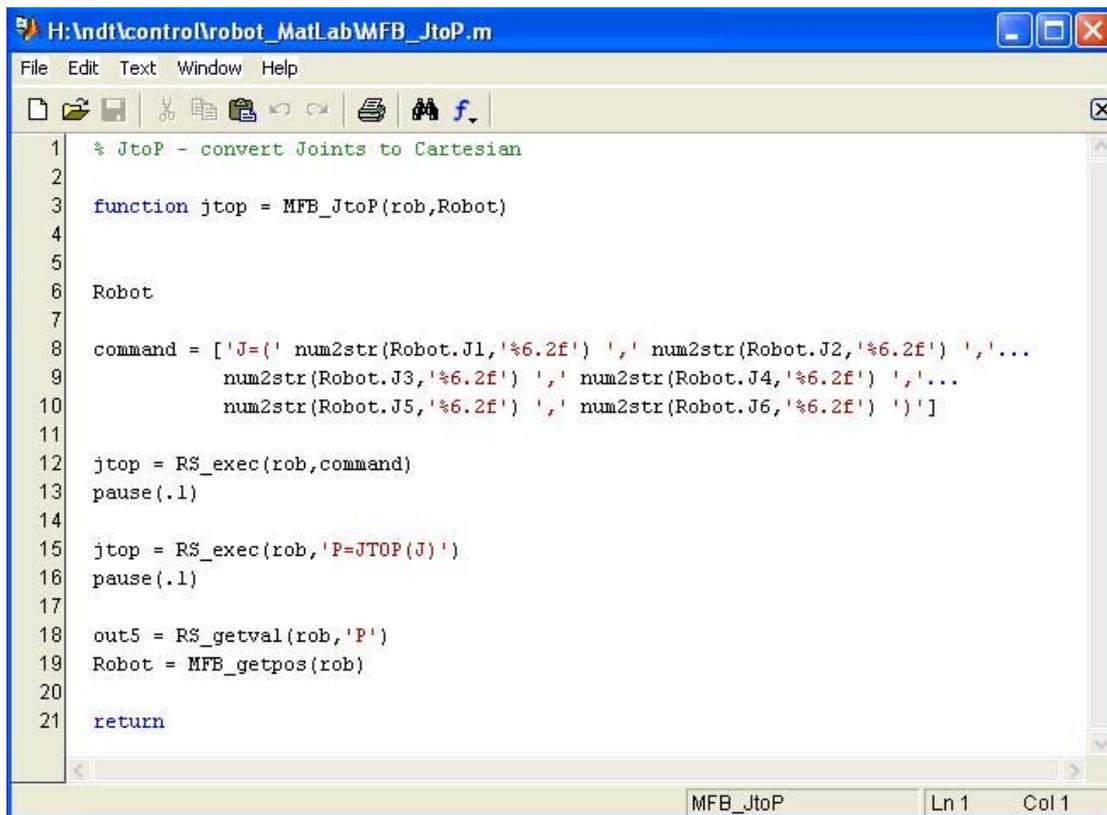
```
H:\ndt\control\robot_MatLab\MFB_getjoints.m
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % Restituisce la posizione attuale del robot
2  % tramite i valori di Joint
3
4  function Robot = MFB_getjoints(rob),
5
6  out5 = RS_getval(rob,'J_CURR');
7  [j1,j2,j3,j4,j5,j6] = strread(out5,'QoKJ_CURR=(%f%f%f%f%f)', 'delimiter',' ');
8  Robot.J1 = j1;
9  Robot.J2 = j2;
10 Robot.J3 = j3;
11 Robot.J4 = j4;
12 Robot.J5 = j5;
13 Robot.J6 = j6;
14
15 return
MFB_getjoints Ln 1 Col 1
```

figura 19 MFB_getjoints

Descrizione: Tale funzione utilizza la funzione “RS_getval” per estrarre la posizione del robot, tramite l’uso del comando “J_CURR”. In questo modo, il robot restituisce la stringa contenente la sua posizione in coordinate angolari, queste vengono poi estratte e assegnate alle posizioni dei vari giunti.

Output: Robot – coordinate di posizionamento angolari riferite ai singoli giunti.

Funzione: “MFB_JtoP”.



```
H:\ndt\control\robot_MatLab\MFB_JtoP.m
File Edit Text Window Help
1 % JtoP - convert Joints to Cartesian
2
3 function jtop = MFB_JtoP(rob,Robot)
4
5
6 Robot
7
8 command = ['J=(' num2str(Robot.J1,'%6.2f') ',' num2str(Robot.J2,'%6.2f') ','...
9           num2str(Robot.J3,'%6.2f') ',' num2str(Robot.J4,'%6.2f') ','...
10          num2str(Robot.J5,'%6.2f') ',' num2str(Robot.J6,'%6.2f') ')']
11
12 jtop = RS_exec(rob,command)
13 pause(.1)
14
15 jtop = RS_exec(rob,'P=JTOP(J)')
16 pause(.1)
17
18 out5 = RS_getval(rob,'P')
19 Robot = MFB_getpos(rob)
20
21 return
MFB_JtoP Ln 1 Col 1
```

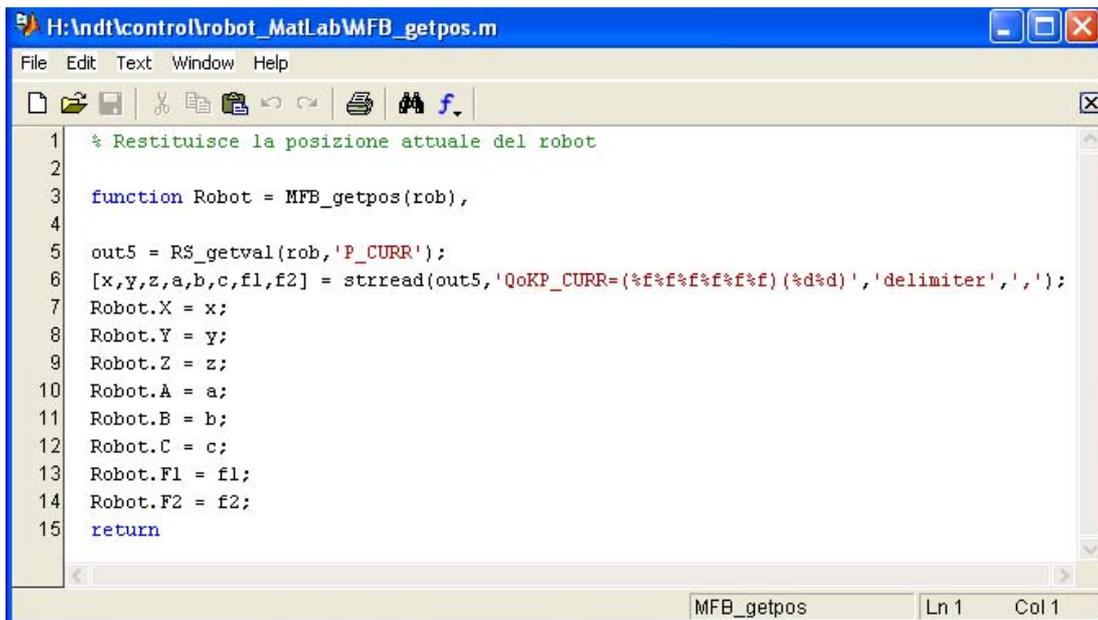
figura 20 MFB_JtoP

Descrizione: Per questa funzione, viene definito il set di coordinate angolari che identificano il punto “J”. Viene poi eseguita la stringa di comando che definisce tale punto, tramite la funzione “RS_exec”, dopodiché si esegue il comando “P=JTOP(J)” per convertire le coordinate angolari in quelle spaziali. Fatto ciò si acquisiscono i valori delle coordinate spaziali, tramite la funzione “RS_getval” ed infine si esegue la funzione “MFB_getpos” che restituisce la posizione del robot in coordinate spaziali.

Input: Robot – coordinate di posizionamento angolari riferite ai singoli giunti.

Output: jtop – coordinate di posizionamento spaziali.

Funzione: “MFB_getpos”.



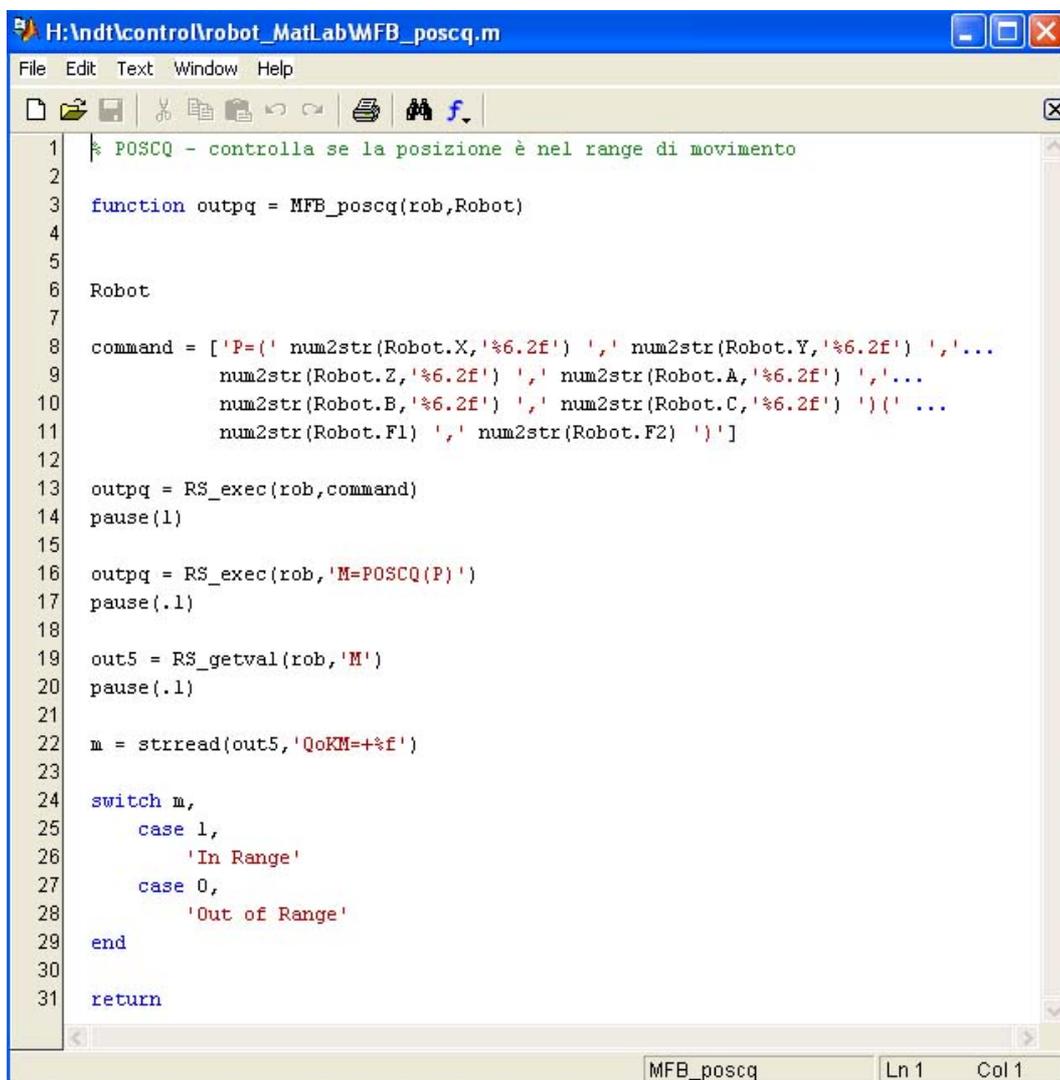
```
H:\indt\control\robot_MatLab\MFB_getpos.m
File Edit Text Window Help
1  % Restituisce la posizione attuale del robot
2
3  function Robot = MFB_getpos(rob),
4
5  out5 = RS_getval(rob, 'P_CURR');
6  [x,y,z,a,b,c,f1,f2] = strread(out5, 'QoKP_CURR=(%f%f%f%f%f) (%d%d)', 'delimiter', ',');
7  Robot.X = x;
8  Robot.Y = y;
9  Robot.Z = z;
10 Robot.A = a;
11 Robot.B = b;
12 Robot.C = c;
13 Robot.F1 = f1;
14 Robot.F2 = f2;
15 return
MFB_getpos Ln 1 Col 1
```

figura 21 MFB_getpos

Descrizione: Tale funzione utilizza la funzione “RS_getval” per estrarre la posizione del robot, tramite l’uso del comando “P_CURR”. In questo modo, il robot restituisce la stringa contenente la sua posizione in coordinate spaziali, queste vengono poi estratte e assegnate ai dati di posizione.

Output: Robot – coordinate di posizionamento spaziali

Funzione: “MFB_posq”.



```
H:\ndt\control\robot_MatLab\MFB_poscq.m
File Edit Text Window Help
1  % POSCQ - controlla se la posizione è nel range di movimento
2
3  function outpq = MFB_poscq(rob,Robot)
4
5
6  Robot
7
8  command = ['P={ ' num2str(Robot.X,'%6.2f') ' ',' ' num2str(Robot.Y,'%6.2f') ' ','...'
9             num2str(Robot.Z,'%6.2f') ' ',' ' num2str(Robot.A,'%6.2f') ' ','...'
10            num2str(Robot.B,'%6.2f') ' ',' ' num2str(Robot.C,'%6.2f') ' '){ '...'
11            num2str(Robot.F1) ' ',' ' num2str(Robot.F2) ' '}]
12
13  outpq = RS_exec(rob,command)
14  pause(1)
15
16  outpq = RS_exec(rob,'M=POSCQ(P)')
17  pause(.1)
18
19  out5 = RS_getval(rob,'M')
20  pause(.1)
21
22  m = stread(out5,'QoKM=+%f')
23
24  switch m,
25      case 1,
26          'In Range'
27      case 0,
28          'Out of Range'
29  end
30
31  return
MFB_poscq Ln 1 Col 1
```

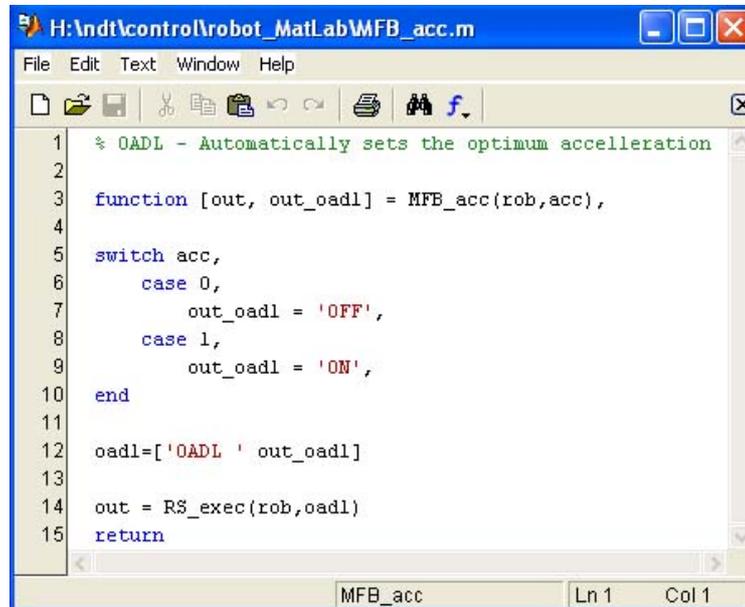
figura 22 MFB_posq

Descrizione: Questa funzione verifica se le coordinate del punto “P” rientrano in quelle del range di funzionamento del robot. In questa funzione viene espressa la posizione del robot, tramite una stringa alfanumerica, assegnata a command, in cui viene dichiarato il nome del punto (“P”) e le coordinate dello stesso. Fatto ciò, viene eseguito il comando “M=POSQ(P)”, tramite la funzione “RS_exec” e viene prelevata la stringa contenente il valore di risposta tramite la funzione “RS_getval”. Utilizzando la “stread”, tale valore viene associato ad “m”. Per cui risulta che:

- Per “m=1”, i valori di posizionamento contenuti in “P” risultano “In Range”.

- Per “m=0”, i valori di posizionamento contenuti in “P” risultano “Out of Range”.

Funzione: “**MFB_acc**”.



```

H:\ndt\control\robot_MatLab\MFB_acc.m
File Edit Text Window Help
1  % OADL - Automatically sets the optimum acceleration
2
3  function [out, out_oadl] = MFB_acc(rob,acc),
4
5  switch acc,
6      case 0,
7          out_oadl = 'OFF',
8      case 1,
9          out_oadl = 'ON',
10 end
11
12 oadl=['OADL ' out_oadl]
13
14 out = RS_exec(rob,oadl)
15 return
MFB_acc Ln 1 Col 1

```

figura 23 MFB_acc

Descrizione: Questa funzione permette di settare in maniera automatica l’accelerazione ottima del braccio robotica.

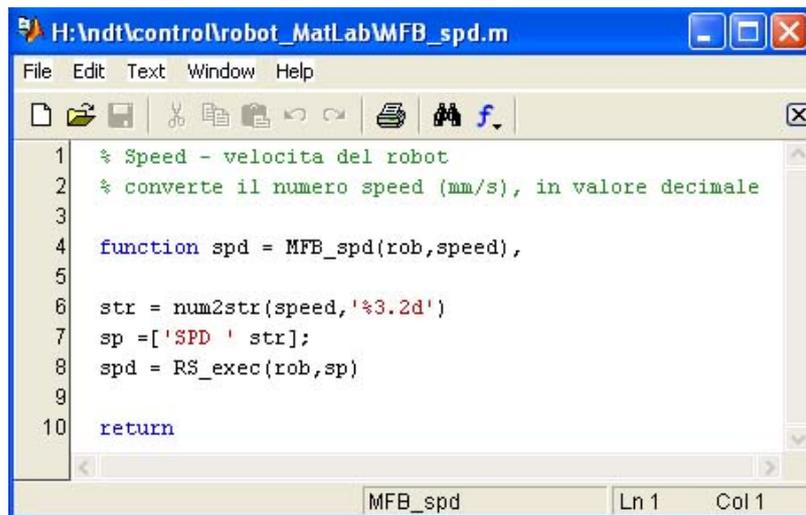
Input: acc – valore di richiesta di settaggio automatico dell’accelerazione.

- Per “acc = 0”, il settaggio automatico dell’accelerazione viene disabilitato.
- Per “acc = 1”, il settaggio automatico dell’accelerazione viene abilitato.

Output: out_oadl – abilitazione\disabilitazione del settaggio automatico.

- Per “out_oadl = OFF”, il settaggio è disabilitato.
- Per “out_oadl = ON”, il settaggio è abilitato.

Funzione: “MFB_speed”.



```
H:\ndt\control\robot_MatLab\WFB_spd.m
File Edit Text Window Help
1  % Speed - velocita del robot
2  % converte il numero speed (mm/s), in valore decimale
3
4  function spd = MFB_spd(rob,speed),
5
6  str = num2str(speed,'%3.2d')
7  sp =['SPD ' str];
8  spd = RS_exec(rob,sp)
9
10 return
MFB_spd Ln 1 Col 1
```

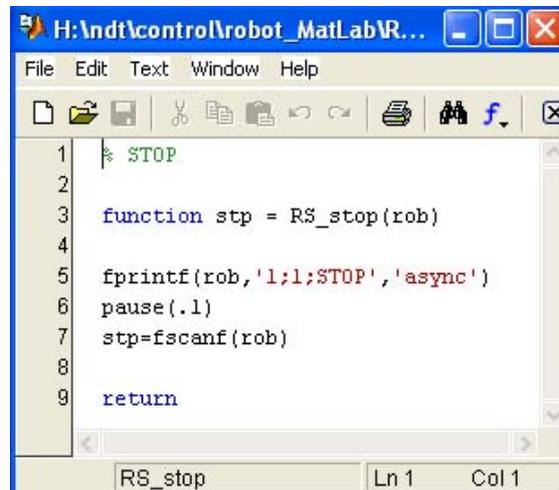
figura 24 MFB_speed

Descrizione: Questa funzione permette di determinare la velocità di esecuzione dei movimenti del robot. Infatti questa converte il valore di velocità espresso in $\left(\frac{mm}{s}\right)$ contenuta in “speed”, in un numero decimale, tramite l’utilizzo del comando “SPD” e setta questo valore come nuovo valore di velocità per l’esecuzione dei movimenti del robot.

Input: speed – valore della velocità espressa in $\left(\frac{mm}{s}\right)$.

Output; spd – valore di velocità di esecuzione dei movimenti, espressa in numero decimale, con cui si è settato il robot.

Funzione “RS_stop”.

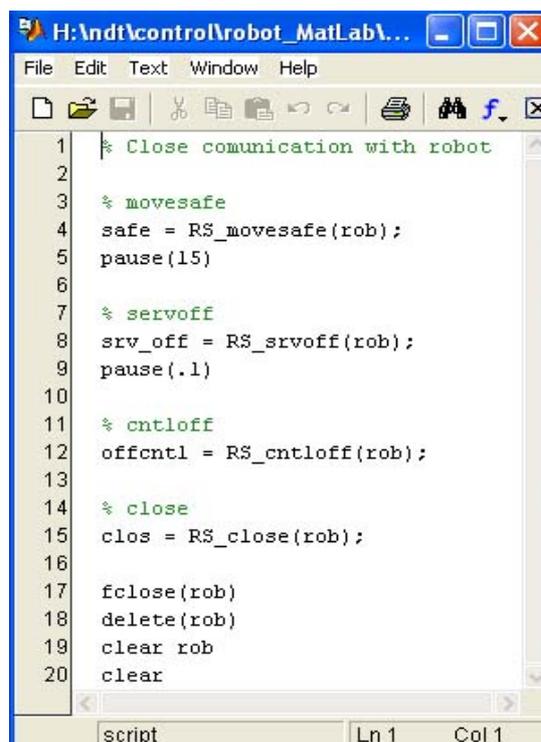


```
H:\ndt\control\robot_MatLabR...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % STOP
2
3  function stp = RS_stop(rob)
4
5  fprintf(rob,'1;1;STOP','async')
6  pause(.1)
7  stp=fscanf(rob)
8
9  return
RS_stop Ln 1 Col 1
```

figura 25 RS_stop

Descrizione: Questa funzione blocca l’esecuzione di qualsivoglia movimento del robot, tramite l’utilizzo del comando “1;1;STOP”.

Blocco: “close_communication”.



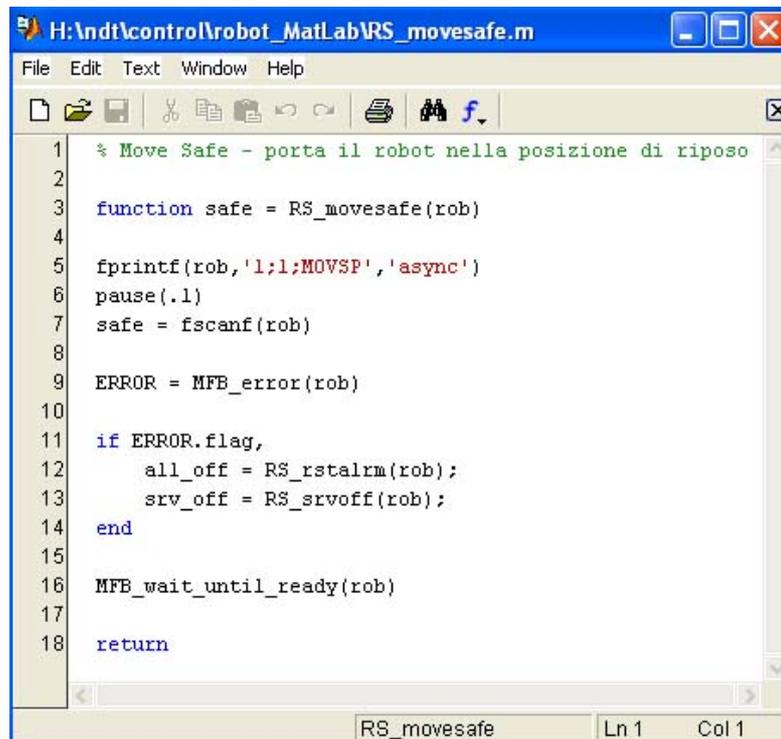
```
H:\ndt\control\robot_MatLab...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % Close communication with robot
2
3  % movesafe
4  safe = RS_movesafe(rob);
5  pause(15)
6
7  % servoff
8  srv_off = RS_srwoff(rob);
9  pause(.1)
10
11 % cntloff
12 offcntl = RS_cntloff(rob);
13
14 % close
15 clos = RS_close(rob);
16
17 fclose(rob)
18 delete(rob)
19 clear rob
20 clear
script Ln 1 Col 1
```

figura 26 Close communication

Descrizione: Questo blocco di funzioni permette di chiudere in maniera corretta la comunicazione col robot nel seguente modo:

- La funzione “RS_movesafe” serve a posizionare il robot nella posizione di riposo (non esercizio).
- La funzione “RS_srvoff” (figura 7) permette di spegnere i motori.
- La funzione “RS_cntloff” disabilita il controllo da remoto.
- La funzione “RS_close” chiude la comunicazione col robot.
- In ultimo viene disabilitata la porta seriale e cancellato l’oggetto che la identifica.

Funzione: “RS_movesafe”.



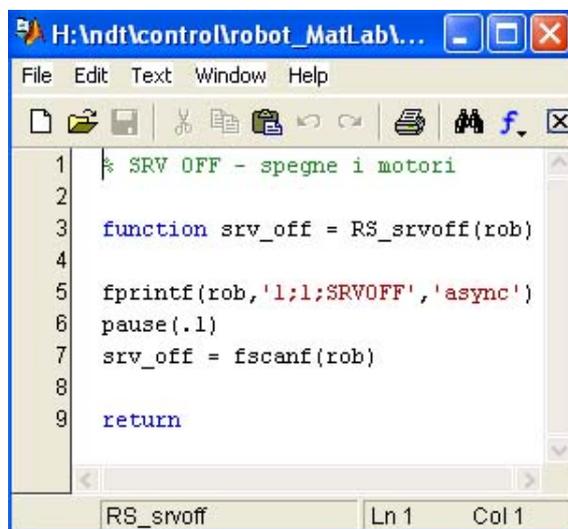
```
H:\indt\control\robot_MatLab\RS_movesafe.m
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % Move Safe - porta il robot nella posizione di riposo
2
3  function safe = RS_movesafe(rob)
4
5  fprintf(rob,'1;1;MOVSP','async')
6  pause(.1)
7  safe = fscanf(rob)
8
9  ERROR = MFB_error(rob)
10
11  if ERROR.flag,
12      all_off = RS_rstalm(rob);
13      srv_off = RS_srvoff(rob);
14  end
15
16  MFB_wait_until_ready(rob)
17
18  return
RS_movesafe Ln 1 Col 1
```

figura 27 RS_movesafe

Descrizione: Questa funzione porta il robot nella posizione di riposo, tramite l’invio allo stesso del comando “1;1;MOVSP”. Fatto ciò, viene letta la stringa di risposta e viene determinato se si è verificato un errore tramite l’utilizzo della funzione “MFB_error” (figura 8). In caso di errore, il sistema genera un segnale acustico di allarme e sospende l’esecuzione di qualsiasi operazione. Per poter intervenire, si è scelto di

disattivare il segnale acustico di allarme, tramite la funzione “RS_rstalm” (figura 6) e di spegnere i motori del robot, tramite la funzione “RS_srwoff” (figura 7).

Funzione: “RS_srwoff”.

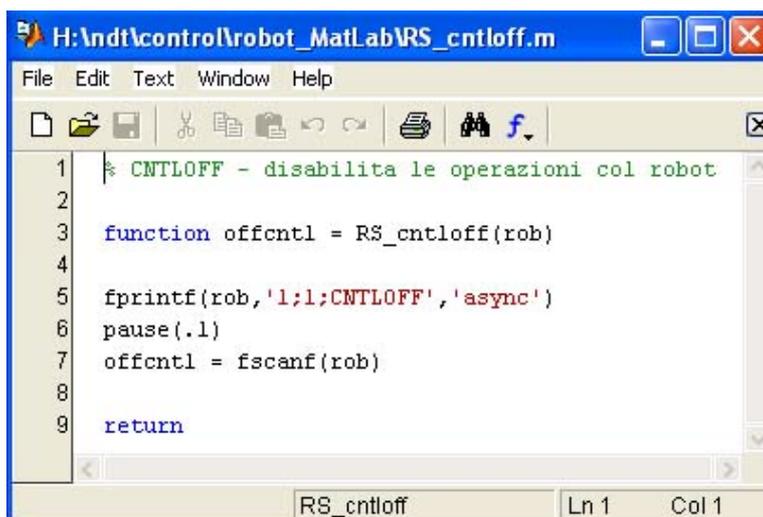


```
H:\ndt\control\robot_MatLab\...
File Edit Text Window Help
1  % SRV OFF - spegne i motori
2
3  function srv_off = RS_srwoff(rob)
4
5  fprintf(rob,'1;1;SRVOFF','async')
6  pause(.1)
7  srv_off = fscanf(rob)
8
9  return
RS_srwoff Ln 1 Col 1
```

figura 28 RS_srwoff

Descrizione: Questa funzione permette di spegnere i motori, mediante l’invio della stringa di comando “1;1;SRVOFF”.

Funzione: “RS_cntloff”.

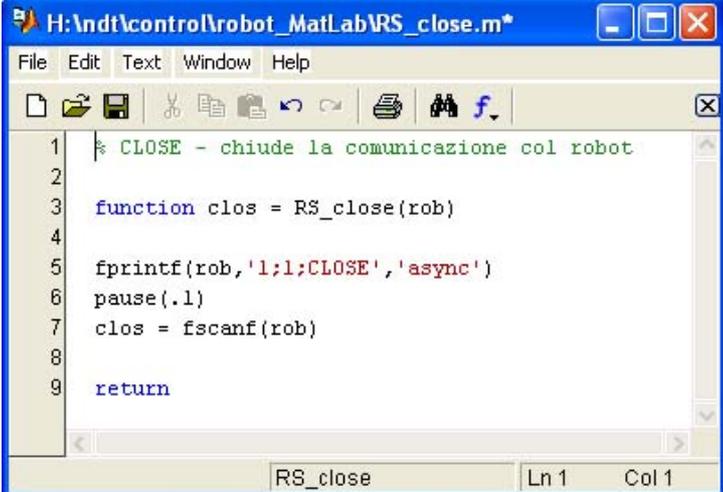


```
H:\ndt\control\robot_MatLab\RS_cntloff.m
File Edit Text Window Help
1  % CNTLOFF - disabilita le operazioni col robot
2
3  function offcntl = RS_cntloff(rob)
4
5  fprintf(rob,'1;1;CNTLOFF','async')
6  pause(.1)
7  offcntl = fscanf(rob)
8
9  return
RS_cntloff Ln 1 Col 1
```

figura 29 RS_cntloff

Descrizione: Questa funzione disabilita il controllo da remoto tramite l’utilizzo della stringa di comando “1;1;CNTLOFF”.

Funzione: “RS_close”.



```
H:\ndt\control\robot_MatLab\RS_close.m*
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 % CLOSE - chiude la comunicazione col robot
2
3 function clos = RS_close(rob)
4
5 fprintf(rob,'1;1;CLOSE','async')
6 pause(.1)
7 clos = fscanf(rob)
8
9 return
RS_close Ln 1 Col 1
```

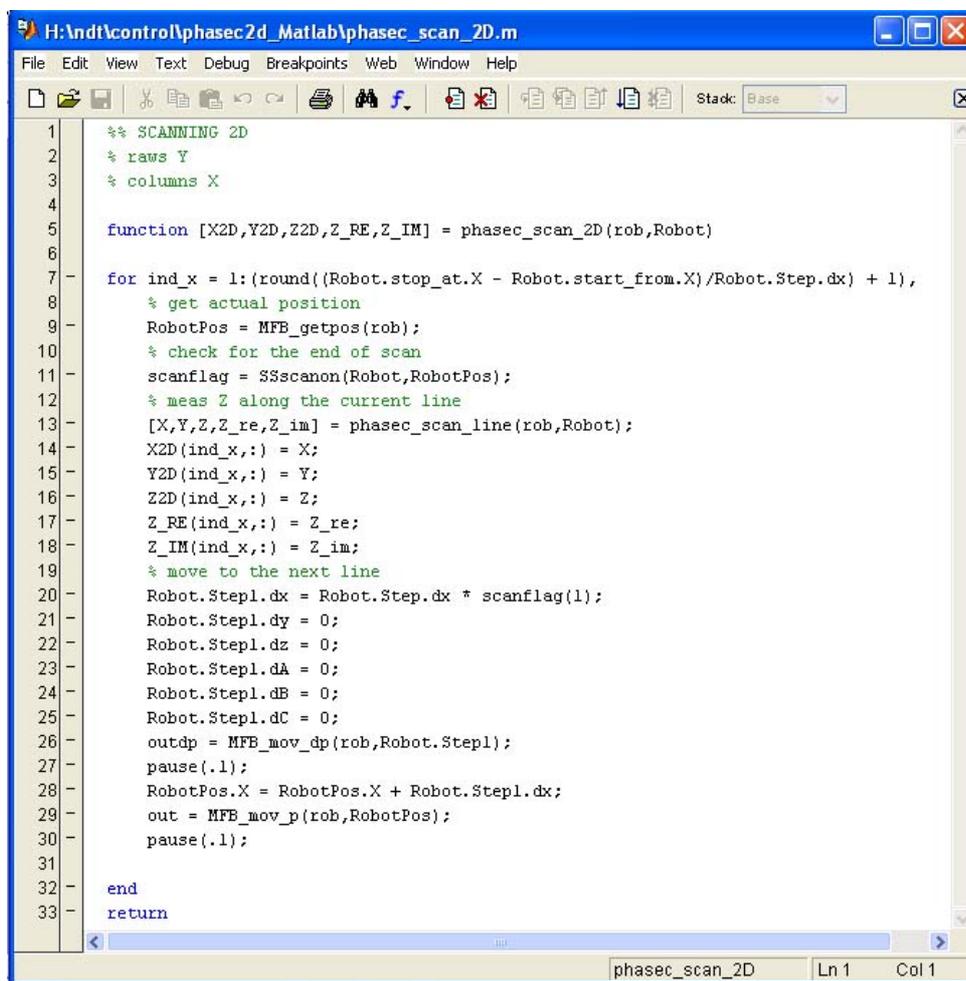
figura 30 RS_close

Descrizione: Questa funzione chiude la comunicazione col robot, tramite l'utilizzo della stringa di comando “1;1;CLOSE”.

A2 Moduli utilizzati per l'acquisizione dei dati tramite il diftoscopio Phasec2D

Per permettere l'automazione della fase di misura, è stato realizzato, l'm-file Main2D, già descritto nel capitolo 5. Non analizzeremo quindi, ora, la procedura di scansione e di acquisizione dei dati, ma faremo una breve descrizione delle funzioni necessarie per la sua realizzazione.

Funzione: “**phasec_scan_2D**”.



```
H:\ndt\control\phasec2d_Matlab\phasec_scan_2D.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
Stack: Base
1  %% SCANNING 2D
2  % rows Y
3  % columns X
4
5  function [X2D,Y2D,Z2D,Z_RE,Z_IM] = phasec_scan_2D(rob,Robot)
6
7  for ind_x = 1:(round((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1),
8      % get actual position
9      RobotPos = MFB_getpos(rob);
10     % check for the end of scan
11     scanflag = SSscanon(Robot,RobotPos);
12     % meas Z along the current line
13     [X,Y,Z,Z_re,Z_im] = phasec_scan_line(rob,Robot);
14     X2D(ind_x,:) = X;
15     Y2D(ind_x,:) = Y;
16     Z2D(ind_x,:) = Z;
17     Z_RE(ind_x,:) = Z_re;
18     Z_IM(ind_x,:) = Z_im;
19     % move to the next line
20     Robot.Stepl.dx = Robot.Step.dx * scanflag(1);
21     Robot.Stepl.dy = 0;
22     Robot.Stepl.dz = 0;
23     Robot.Stepl.dA = 0;
24     Robot.Stepl.dB = 0;
25     Robot.Stepl.dC = 0;
26     outdp = MFB_mov_dp(rob,Robot.Stepl);
27     pause(.1);
28     RobotPos.X = RobotPos.X + Robot.Stepl.dx;
29     out = MFB_mov_p(rob,RobotPos);
30     pause(.1);
31
32 end
33 return
phasec_scan_2D Ln 1 Col 1
```

figura 31 phasec_scan_2D

Descrizione: Questa funzione, permette la scansione bidimensionale di un oggetto, restituendo in uscita la posizione (punto per punto) dell'oggetto e la parte reale ed immaginaria dell'impedenza (per ogni punto di scansione). Come già accennato nel capitolo 5, detto X l'indice di riga e Y l'indice di colonna, questa funzione permette di eseguire la scansione per righe successive, infatti il “ciclo for” presente alla riga 7 di figura

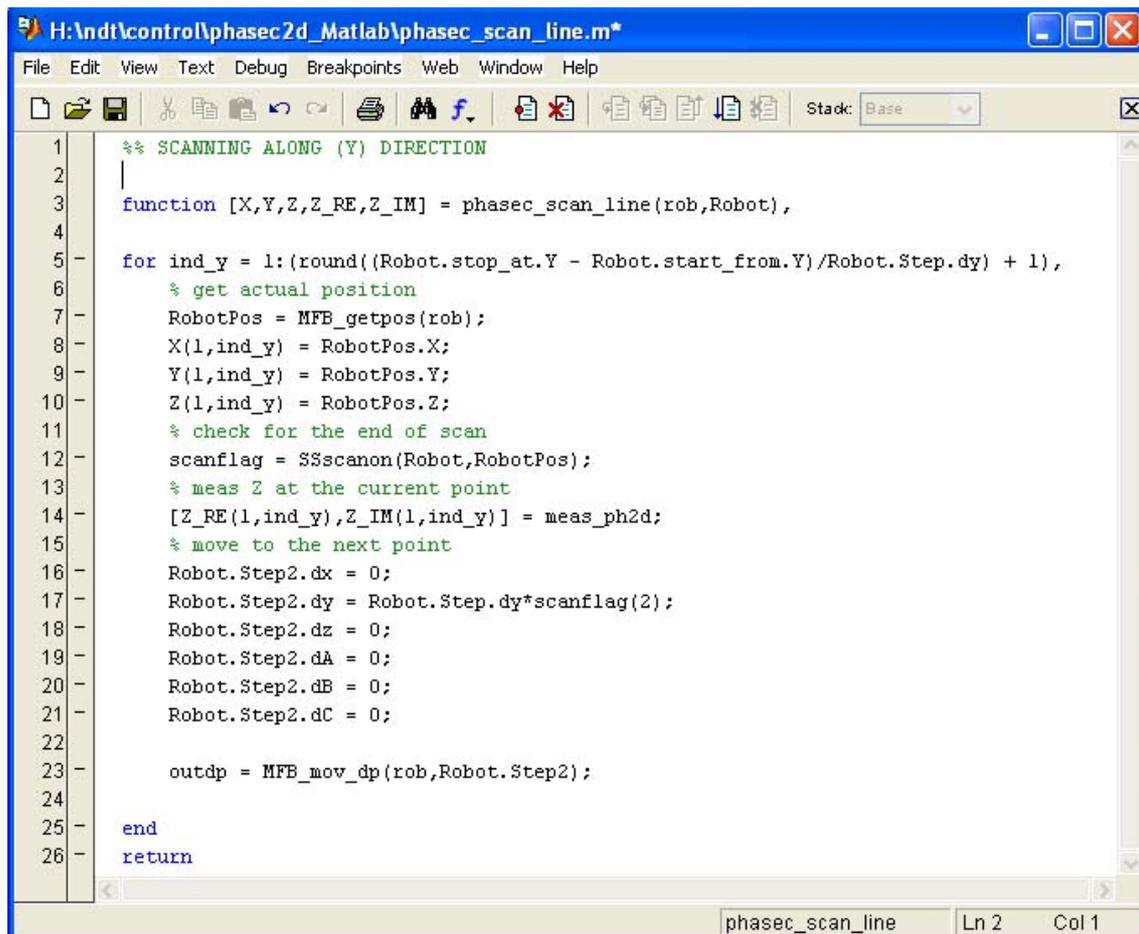
31, blocca di volta in volta la riga di scansione di interesse. La funzione “MFB_getpos”, restituisce la posizione attuale del robot, posizione che viene valutata dalla funzione “SSscanon” che verifica se si è raggiunta l’ultima posizione della colonna di interesse, ovvero, se si sta iniziando la scansione dell’ultima riga. Dopodiché viene avviata la funzione “phasec_scan_line” che permette di eseguire la scansione della singola linea, fornendo in uscita i valori di posizione (punto per punto) e i valori di impedenza (parte reale ed immaginaria) per ogni punto di scansione di quella linea. Vengono poi costruite le matrici contenenti i valori di posizione spaziale e le matrici contenenti i valori di impedenza (parte reale ed immaginaria) per tutti i punti di scansione del piano. Viene poi spostata la sonda sulla linea successiva utilizzando la funzione “MFB_mov_dp”, viene incrementato il valore di posizione del robot su tale linea e viene riportata la sonda all’inizio della linea, tramite l’utilizzo della funzione “MFB_mov_p”, per ricominciare con una nuova scansione.

Input: Robot – coordinate di posizione del robot

Output: X2D; Y2D; Z2D – coordinate di posizionamento della sonda per ogni punto della scansione

Z_RE; Z_IM – Parte reale ed immaginaria dei valori di impedenza misurati

Funzione: “**phasec_scan_line**”.



```
1 %% SCANNING ALONG (Y) DIRECTION
2 |
3 function [X,Y,Z,Z_RE,Z_IM] = phasec_scan_line(rob,Robot),
4
5 for ind_y = 1:(round((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1),
6     % get actual position
7     RobotPos = MFB_getpos(rob);
8     X(1,ind_y) = RobotPos.X;
9     Y(1,ind_y) = RobotPos.Y;
10    Z(1,ind_y) = RobotPos.Z;
11    % check for the end of scan
12    scanflag = SSscanon(Robot,RobotPos);
13    % meas Z at the current point
14    [Z_RE(1,ind_y),Z_IM(1,ind_y)] = meas_ph2d;
15    % move to the next point
16    Robot.Step2.dx = 0;
17    Robot.Step2.dy = Robot.Step.dy*scanflag(2);
18    Robot.Step2.dz = 0;
19    Robot.Step2.dA = 0;
20    Robot.Step2.dB = 0;
21    Robot.Step2.dC = 0;
22
23    outdp = MFB_mov_dp(rob,Robot.Step2);
24
25 end
26 return
```

figura 32 phasec_scan_line

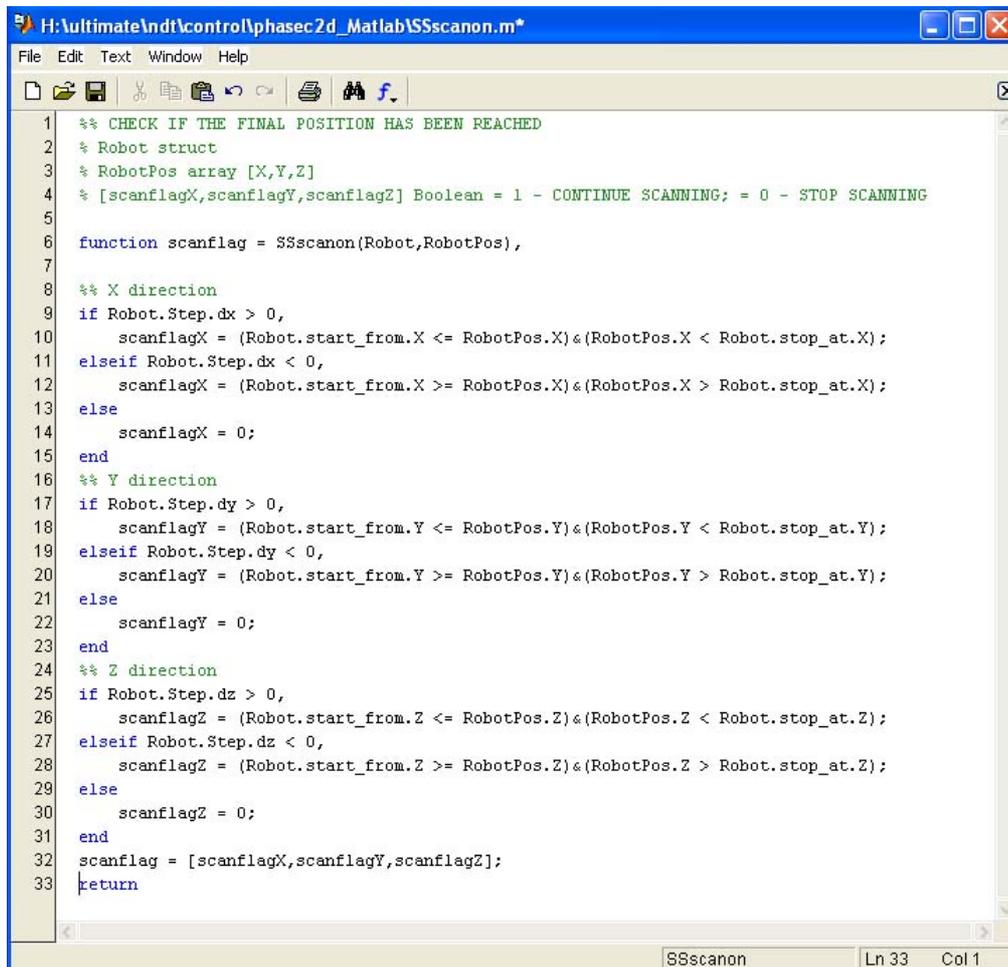
Descrizione: Questa funzione permette di eseguire la scansione di una singola linea. Infatti, una volta bloccato l'indice di riga X tramite la funzione “phasec_scan_2D”, questa funzione, tramite un “ciclo for” fa scorrere l'indice di colonna Y, posizione per posizione, lungo tutta la riga permettendone la scansione. La funzione “MFB_getpos” restituisce il valore di posizione del robot, questo valore viene poi valutato dalla funzione “SSscanon” che verifica che non si sia raggiunto l'ultima posizione della riga di interesse. Fatto ciò, vengono acquisiti i valori di impedenza nel singolo punto tramite la funzione “meas_ph2d”, dopodiché il robot si muove nella posizione successiva.

Input: Robot – coordinate di posizione del robot, per ogni punto della linea di scansione.

Output: X; Y; Z – coordinate di posizionamento della sonda per ogni punto della linea di scansione.

Z_RE; Z_IM – Parte reale ed immaginaria dei valori di impedenza misurati punto per punto.

Funzione: “SSscanon”.



```
1  %% CHECK IF THE FINAL POSITION HAS BEEN REACHED
2  % Robot struct
3  % RobotPos array [X,Y,Z]
4  % [scanflagX,scanflagY,scanflagZ] Boolean = 1 - CONTINUE SCANNING; = 0 - STOP SCANNING
5
6  function scanflag = SSscanon(Robot,RobotPos),
7
8  %% X direction
9  if Robot.Step.dx > 0,
10     scanflagX = (Robot.start_from.X <= RobotPos.X) & (RobotPos.X < Robot.stop_at.X);
11 elseif Robot.Step.dx < 0,
12     scanflagX = (Robot.start_from.X >= RobotPos.X) & (RobotPos.X > Robot.stop_at.X);
13 else
14     scanflagX = 0;
15 end
16 %% Y direction
17 if Robot.Step.dy > 0,
18     scanflagY = (Robot.start_from.Y <= RobotPos.Y) & (RobotPos.Y < Robot.stop_at.Y);
19 elseif Robot.Step.dy < 0,
20     scanflagY = (Robot.start_from.Y >= RobotPos.Y) & (RobotPos.Y > Robot.stop_at.Y);
21 else
22     scanflagY = 0;
23 end
24 %% Z direction
25 if Robot.Step.dz > 0,
26     scanflagZ = (Robot.start_from.Z <= RobotPos.Z) & (RobotPos.Z < Robot.stop_at.Z);
27 elseif Robot.Step.dz < 0,
28     scanflagZ = (Robot.start_from.Z >= RobotPos.Z) & (RobotPos.Z > Robot.stop_at.Z);
29 else
30     scanflagZ = 0;
31 end
32 scanflag = [scanflagX,scanflagY,scanflagZ];
33 return
```

figura 33 SSscanon

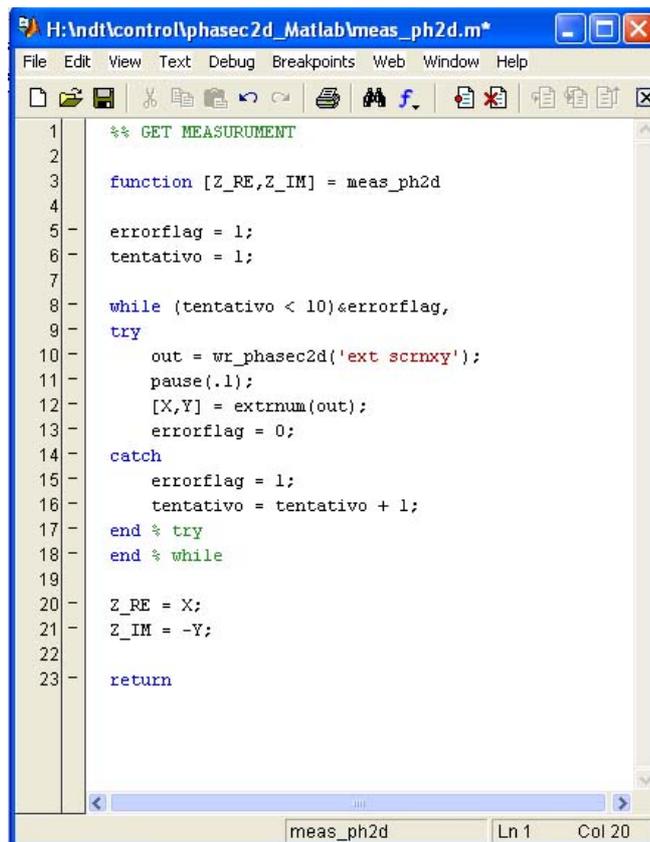
Descrizione: Questa funzione verifica se è stata raggiunta l’ultima posizione della scansione, impostando così il valore di scanflag, necessario per spostare il robot alla posizione successiva.

Input: RobotPos – coordinate di posizione del robot per ogni passo di scansione.

Output: scanflag – flag di scansione.

- “scanflag = 1”, la scansione prosegue.
- “scanflag = 0”, la scansione si ferma.

Funzione: “meas_ph2d”.



```
H:\ndt\control\phasec2d_Matlab\meas_ph2d.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
1 %% GET MEASUREMENT
2
3 function [Z_RE,Z_IM] = meas_ph2d
4
5 errorflag = 1;
6 tentativo = 1;
7
8 while (tentativo < 10) & errorflag,
9 try
10     out = wr_phasec2d('ext scrnxy');
11     pause(.1);
12     [X,Y] = extrnum(out);
13     errorflag = 0;
14 catch
15     errorflag = 1;
16     tentativo = tentativo + 1;
17 end % try
18 end % while
19
20 Z_RE = X;
21 Z_IM = -Y;
22
23 return
```

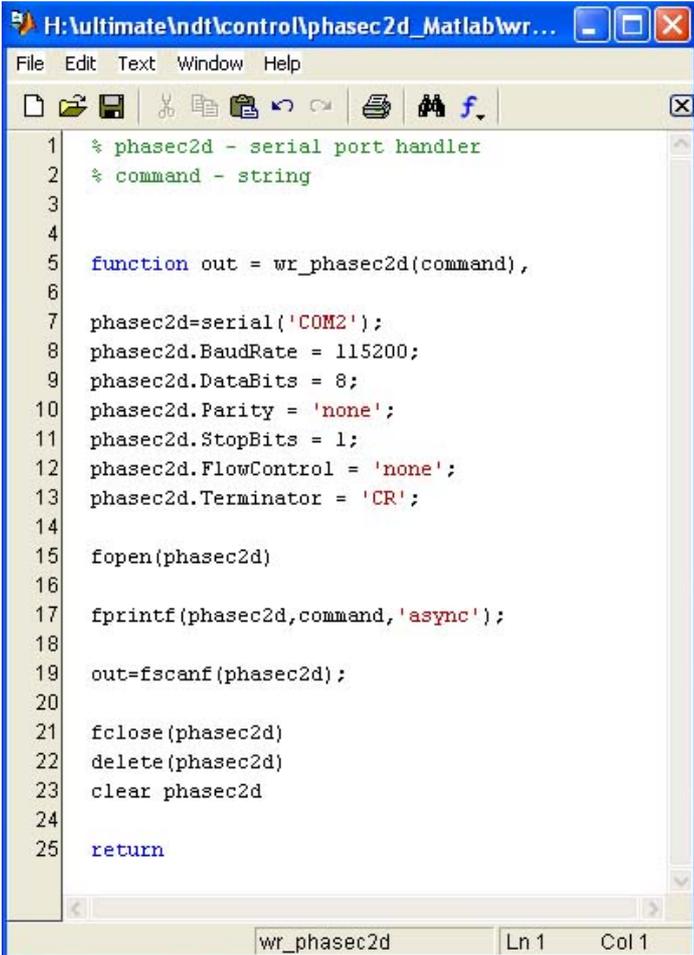
figura 34 meas_ph2d

Descrizione: Questa funzione utilizza la funzione “wr_phasec2d”, per inviare il comando “ext scrnxy” al diftoscopio phasec2D. Il phasec2D, ricevendo questa stringa di comando, risponde con una ulteriore stringa, la quale contiene i dati di interesse. Tali dati vengono poi estratti tramite l’utilizzo della funzione “extrnum”.

Tale funzione è stata implementata, prevedendo un controllo su di una eventuale risposta errata da parte del diftoscopio. Per cui, partendo dalla situazione iniziale (errorflag=1 e tentativo=1), se il phasec2D risponde emettendo in uscita la stringa giusta, allora viene eseguito il blocco contenuto in “try”, modificando errorflag e rendendolo pari a “0” terminando così l’esecuzione della funzione. Se invece, il phasec2D, dovesse rispondere emettendo in uscita una stringa errata, viene eseguito il blocco contenuto in “catch” incrementando il numero di tentativi e rieseguendo la funzione.

Output: Z_RE; Z_IM - Parte reale ed immaginaria dei valori di impedenza misurati.

Funzione: “wr_phasec2d”.



```
H:\ultimate\ndt\control\phasec2d_Matlab\wr...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % phasec2d - serial port handler
2  % command - string
3
4
5  function out = wr_phasec2d(command),
6
7  phasec2d=serial('COM2');
8  phasec2d.BaudRate = 115200;
9  phasec2d.DataBits = 8;
10 phasec2d.Parity = 'none';
11 phasec2d.StopBits = 1;
12 phasec2d.FlowControl = 'none';
13 phasec2d.Terminator = 'CR';
14
15 fopen(phasec2d)
16
17 fprintf(phasec2d,command,'async');
18
19 out=fscanf(phasec2d);
20
21 fclose(phasec2d)
22 delete(phasec2d)
23 clear phasec2d
24
25 return
wr_phasec2d Ln 1 Col 1
```

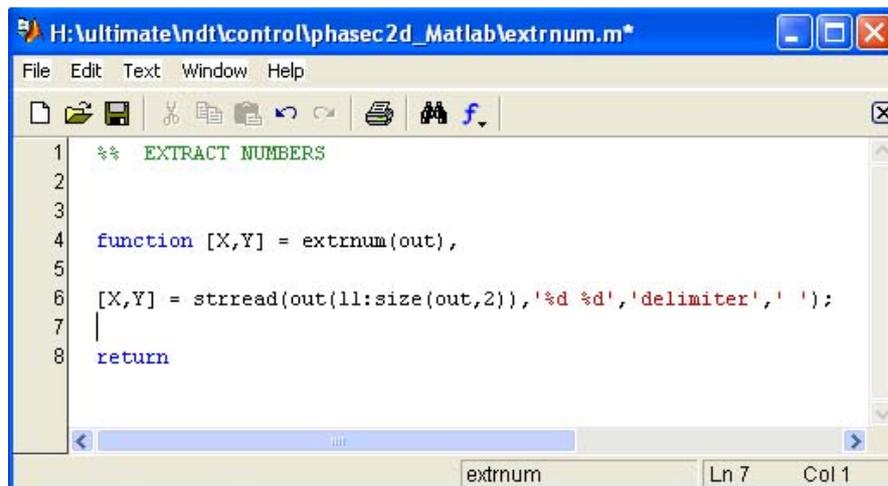
figura 35 wr_phasec2d

Descrizione: Questa funzione permette di inviare delle stringhe di comando al difettoscopio phasec2D per poterne così, ottenere una risposta.

La funzione è stata implementata permettendo, di volta in volta, l’abilitazione e la disabilitazione della porta seriale “COM 2”, favorendo, in questo modo, l’acquisizione dei dati nei soli punti di interesse e nei momenti in cui il robot è di fatto fermo, eliminando in questo modo molti degli effetti, dovuti a disturbi esterni (come lo strofinio della stessa sonda sull’oggetto da esaminare), che potrebbero falsare la misura.

Input: command – stringa di comando.

Funzione: “extrnum”.



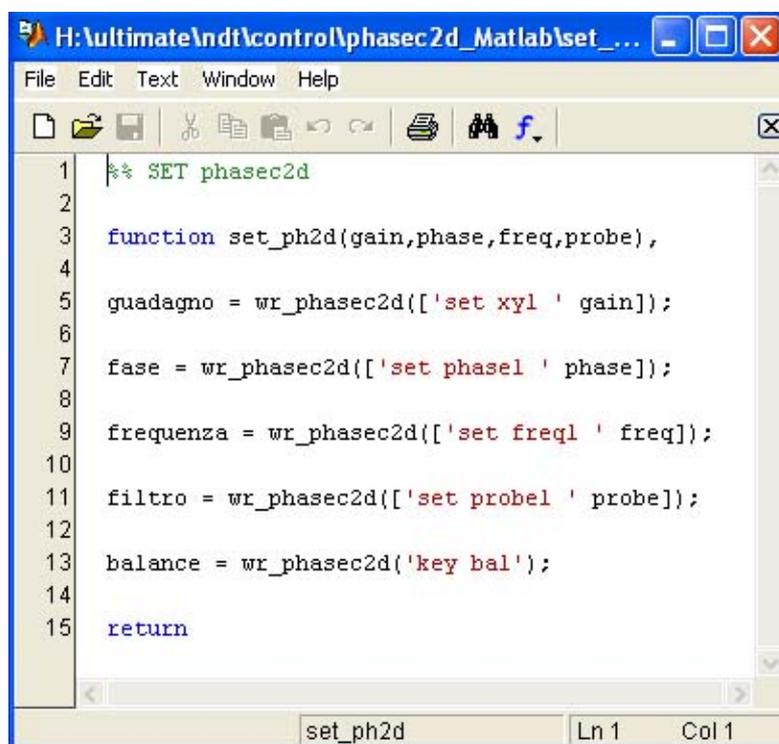
```
H:\ultimate\ndt\control\phasec2d_Matlab\extrnum.m
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 %% EXTRACT NUMBERS
2
3
4 function [X,Y] = extrnum(out),
5
6 [X,Y] = strread(out(11:size(out,2)),'%d %d','delimiter',' ');
7
8 return
Ln 7 Col 1
```

figura 36 extrnum

Descrizione: Questa funzione permette l'estrazione dei valori di misura dalla stringa emessa in uscita dal phasec2D.

Output: X; Y – valori numerici estratti dalla stringa.

Blocco: “set_ph2d”.



```
H:\ultimate\ndt\control\phasec2d_Matlab\set_...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 %% SET phasec2d
2
3 function set_ph2d(gain,phase,freq,probe),
4
5 guadagno = wr_phasec2d(['set xyl ' gain]);
6
7 fase = wr_phasec2d(['set phasel ' phase]);
8
9 frequenza = wr_phasec2d(['set freql ' freq]);
10
11 filtro = wr_phasec2d(['set probel ' probe]);
12
13 balance = wr_phasec2d('key bal');
14
15 return
Ln 1 Col 1
```

figura 37 set_ph2d

Descrizione: Questo blocco di funzioni permette di settare i principali parametri del Phasec2D in funzione del tipo di misura da effettuare

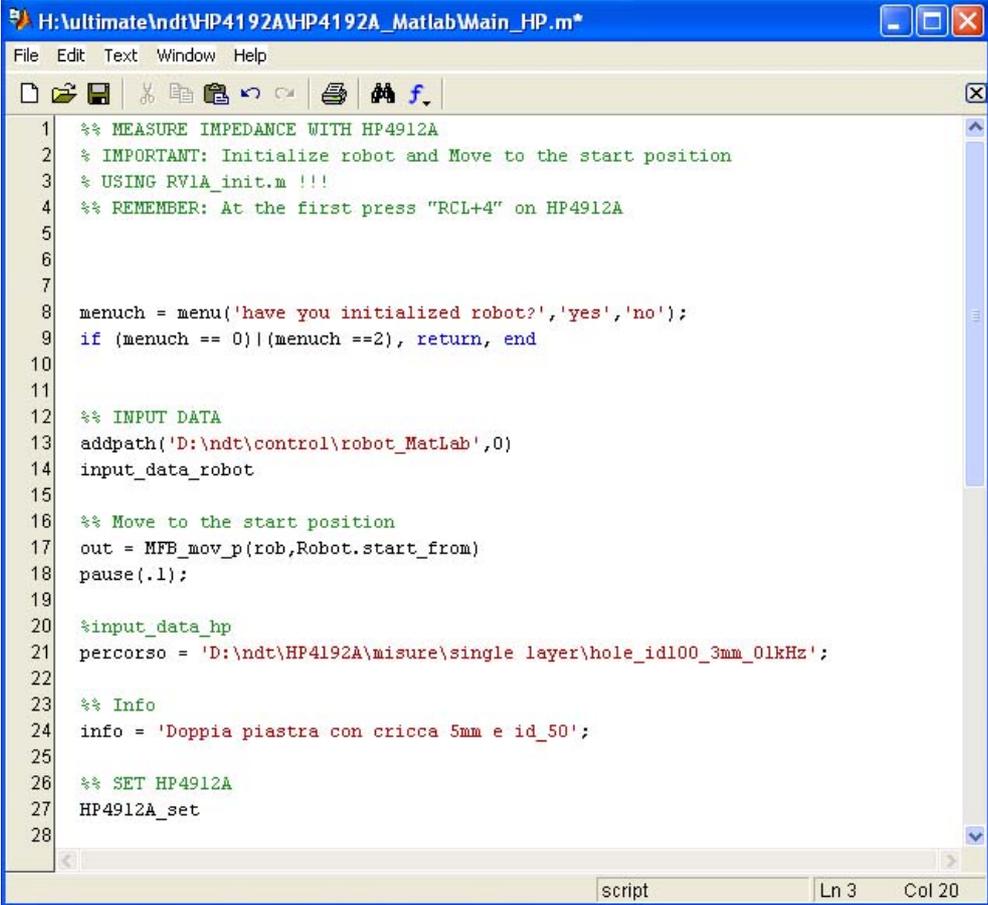
Input:

- gain – Valore del guadagno che si desidera impostare sullo strumento.
- phase – valore della fase che si desidera impostare sullo strumento.
- freq – valore della frequenza che si desidera impostare sullo strumento.
- probe – tipo di sonda che si desidera impostare sullo strumento.

A3 Moduli utilizzati per l'acquisizione dei dati tramite analizzatore di impedenza HP4192A DIGITAL LCR METER

Come per il phase2D, sono stati realizzati, all'incirca, gli stessi moduli per permettere di effettuare l'operazione di scansione utilizzando l'analizzatore di impedenza HP 4192 LF.

Blocco: "Main_hp".



```
H:\ultimate\ndt\HP4192A\HP4192A_Matlab\Main_HP.m*
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  %% MEASURE IMPEDANCE WITH HP4912A
2  % IMPORTANT: Initialize robot and Move to the start position
3  % USING RV1A_init.m !!!
4  %% REMEMBER: At the first press "RCL+4" on HP4912A
5
6
7
8  menuch = menu('have you initialized robot?','yes','no');
9  if (menuch == 0)|(menuch ==2), return, end
10
11
12  %% INPUT DATA
13  addpath('D:\ndt\control\robot_MatLab',0)
14  input_data_robot
15
16  %% Move to the start position
17  out = MFB_mov_p(rob,Robot.start_from)
18  pause(.1);
19
20  %input_data_hp
21  percorso = 'D:\ndt\HP4192A\misura\single layer\hole_id100_3mm_01kHz';
22
23  %% Info
24  info = 'Doppia piastra con cricca 5mm e id_50';
25
26  %% SET HP4912A
27  HP4912A_set
28
script Ln 3 Col 20
```

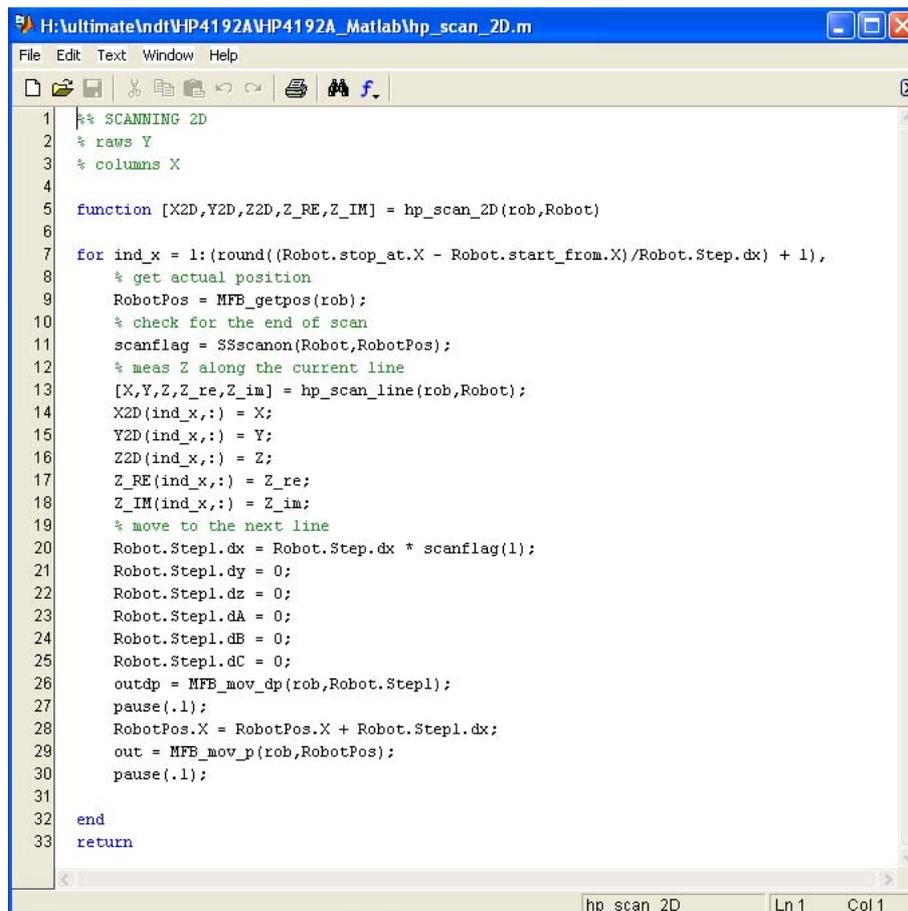
figura 38 Main_hp parte prima

```
H:\ultimate\ndt\HP4192A\HP4192A_Matlab\Main_HP.m*
File Edit Text Window Help
[Icons]
28
29 NumScans = 5;
30 for ind_scan = 1:NumScans,
31 %% SCAN 2D
32 X2D = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1 , ...
33             ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
34 Y2D = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1 , ...
35             ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
36 Z2D = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1 , ...
37             ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
38 Z_RE = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1 , ...
39             ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
40 Z_IM = zeros(((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1 , ...
41             ((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1);
42
43 [X2D,Y2D,Z2D,Z_RE,Z_IM] = hp_scan_2D(rob,Robot)
44
45 %% Plot
46 plot(Y2D(1,:),Z_RE(1,:),Y2D(1,:),Z_IM(1:)), grid, ...
47       xlabel('Linea di Scansione'), ylabel('Z'), ...
48       title('Scansione di una piastra con eventuale difetto'), ...
49       legend('Z.Re','Z.Im')
50
51 %% SAVE RESULT
52 save([percorso '\meas_id50_5mm_01kHz_' num2str(ind_scan,'%02d')],...
53      'X2D','Y2D','Z2D','Z_RE','Z_IM','info');
54 end
55 return
script Ln 3 Col 20
```

figura 39 Main_hp parte seconda

Descrizione: Questo blocco è stato realizzato per rendere automatica la procedure di scansione ed acquisizione dati. Esso funziona in maniera del tutto simile al “Main2D” realizzato per il difettoscopio Phasec2D già discusso nel capitolo 5, per cui si rimanda a tale capitolo per la sua comprensione.

Funzione: “hp_scan_2D”.



```
H:\ultimate\ndt\HP4192A\HP4192A_Matlab\hp_scan_2D.m
File Edit Text Window Help
[Icons]
1  % SCANNING 2D
2  % rows Y
3  % columns X
4
5  function [X2D,Y2D,Z2D,Z_RE,Z_IM] = hp_scan_2D(rob,Robot)
6
7  for ind_x = 1:(round((Robot.stop_at.X - Robot.start_from.X)/Robot.Step.dx) + 1),
8      % get actual position
9      RobotPos = MFB_getpos(rob);
10     % check for the end of scan
11     scanflag = SScanon(Robot,RobotPos);
12     % meas Z along the current line
13     [X,Y,Z,Z_re,Z_im] = hp_scan_line(rob,Robot);
14     X2D(ind_x,:) = X;
15     Y2D(ind_x,:) = Y;
16     Z2D(ind_x,:) = Z;
17     Z_RE(ind_x,:) = Z_re;
18     Z_IM(ind_x,:) = Z_im;
19     % move to the next line
20     Robot.Step1.dx = Robot.Step.dx * scanflag(1);
21     Robot.Step1.dy = 0;
22     Robot.Step1.dz = 0;
23     Robot.Step1.dA = 0;
24     Robot.Step1.dB = 0;
25     Robot.Step1.dC = 0;
26     outdp = MFB_mov_dp(rob,Robot.Step1);
27     pause(.1);
28     RobotPos.X = RobotPos.X + Robot.Step1.dx;
29     out = MFB_mov_p(rob,RobotPos);
30     pause(.1);
31
32 end
33 return
hp_scan_2D Ln 1 Col 1
```

figura 40 hp_scan_2D

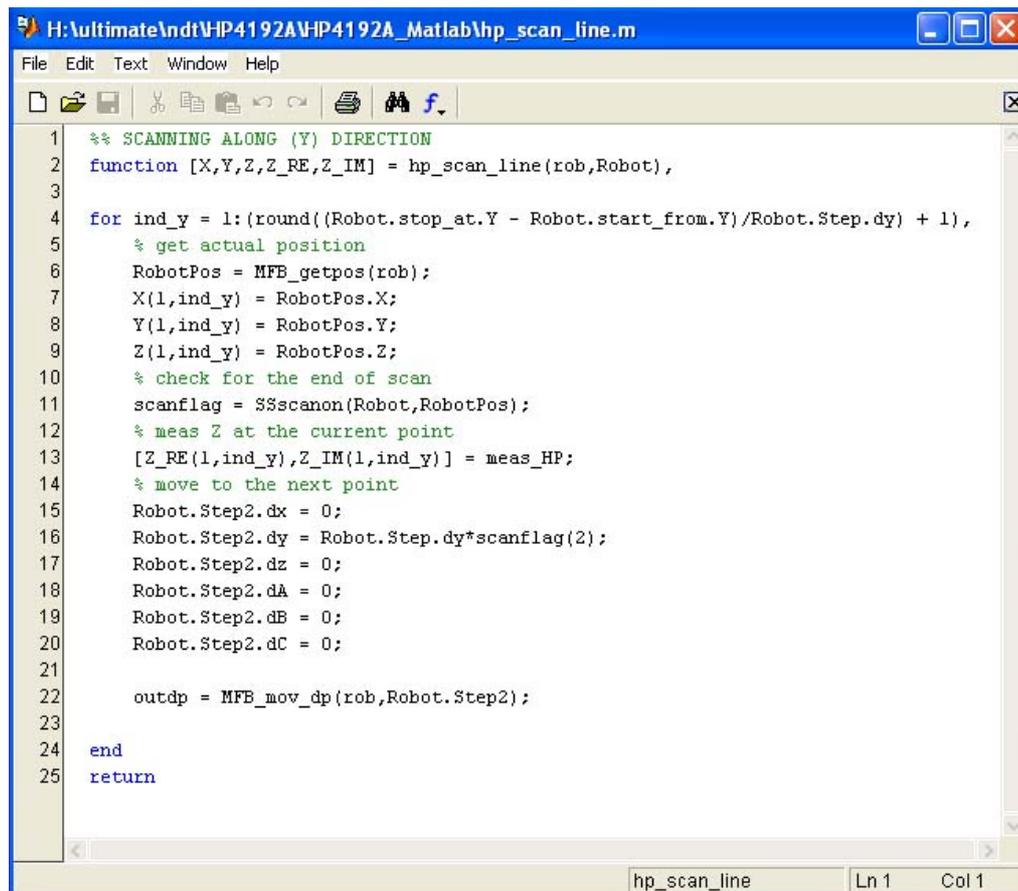
Descrizione: Questa funzione è del tutto analoga a quella già implementata per il phasec2D, l'unica differenza sta nel fatto che questa richiama la funzione denominata “hp_scan_line” per la scansione lungo una singola linea.

Input: Robot – coordinate di posizione del robot

Output: X2D; Y2D; Z2D – coordinate di posizionamento della sonda per ogni punto della scansione

Z_RE; Z_IM – Parte reale ed immaginaria dei valori di impedenza misurati

Funzione: “hp_scan_line”.



```
H:\Ultimate\ndt\HP4192A\HP4192A_Matlab\hp_scan_line.m
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 %% SCANNING ALONG (Y) DIRECTION
2 function [X,Y,Z,Z_RE,Z_IM] = hp_scan_line(rob,Robot),
3
4 for ind_y = 1:(round((Robot.stop_at.Y - Robot.start_from.Y)/Robot.Step.dy) + 1),
5     % get actual position
6     RobotPos = MFB_getpos(rob);
7     X(1,ind_y) = RobotPos.X;
8     Y(1,ind_y) = RobotPos.Y;
9     Z(1,ind_y) = RobotPos.Z;
10    % check for the end of scan
11    scanflag = SSScanon(Robot,RobotPos);
12    % meas Z at the current point
13    [Z_RE(1,ind_y),Z_IM(1,ind_y)] = meas_HP;
14    % move to the next point
15    Robot.Step2.dx = 0;
16    Robot.Step2.dy = Robot.Step.dy*scanflag(2);
17    Robot.Step2.dz = 0;
18    Robot.Step2.dA = 0;
19    Robot.Step2.dB = 0;
20    Robot.Step2.dC = 0;
21
22    outdp = MFB_mov_dp(rob,Robot.Step2);
23
24 end
25 return
hp_scan_line Ln 1 Col 1
```

figura 41 hp_scan_line

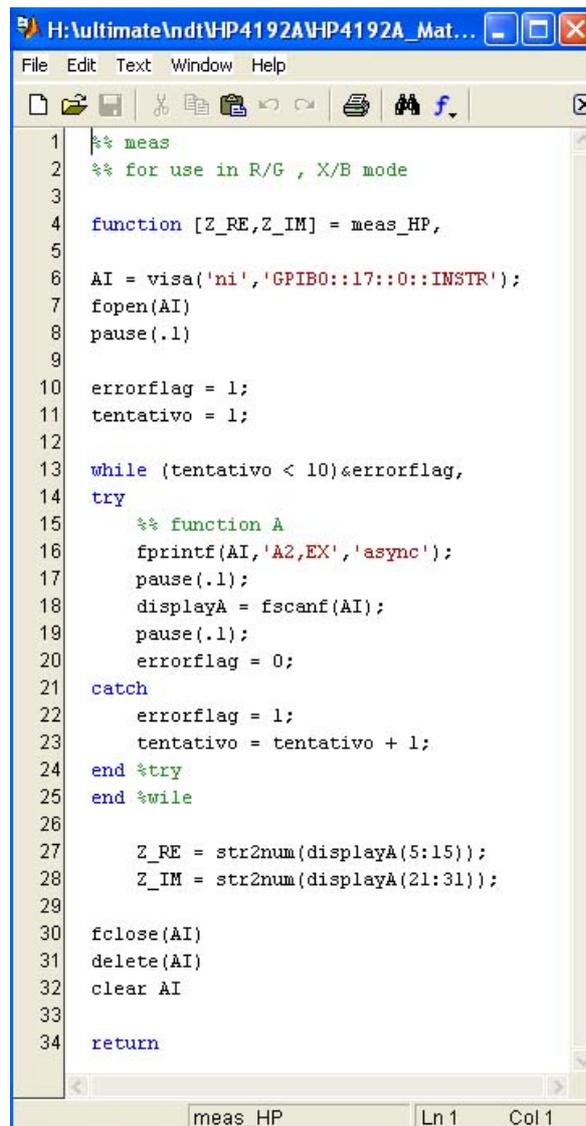
Descrizione: Questa funzione è del tutto analoga a quella già implementata per il phasec2D, l’unica differenza sta nel fatto che questa richiama la funzione denominata “meas_HP” per l’acquisizione dei dati di scansione.

Input: Robot – coordinate di posizione del robot, per ogni punto della linea di scansione.

Output: X; Y; Z – coordinate di posizionamento della sonda per ogni punto della linea di scansione.

Z_RE; Z_IM – Parte reale ed immaginaria dei valori di impedenza misurati punto per punto.

Funzione: “meas_HP”.



```
1  %% meas
2  %% for use in R/G , X/B mode
3
4  function [Z_RE,Z_IM] = meas_HP,
5
6  AI = visa('ni','GPIB0::17::0::INSTR');
7  fopen(AI)
8  pause(.1)
9
10 errorflag = 1;
11 tentativo = 1;
12
13 while (tentativo < 10) & errorflag,
14 try
15     %% function A
16     fprintf(AI,'A2,EX','async');
17     pause(.1);
18     displayA = fscanf(AI);
19     pause(.1);
20     errorflag = 0;
21 catch
22     errorflag = 1;
23     tentativo = tentativo + 1;
24 end %try
25 end %while
26
27     Z_RE = str2num(displayA(5:15));
28     Z_IM = str2num(displayA(21:31));
29
30 fclose(AI)
31 delete(AI)
32 clear AI
33
34 return
```

figura 42 meas_HP

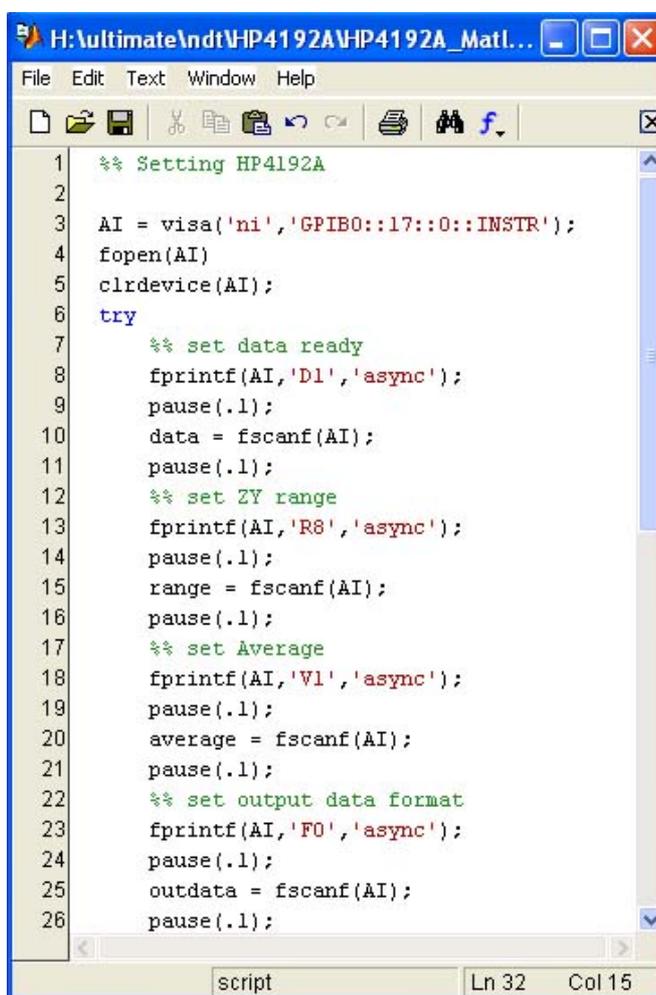
Descrizione: Questa funzione invia il comando “A2,EX” all’analizzatore di impedenze per ricevere in uscita una stringa contenente i valori visualizzati sul display A.

Tale funzione è stata implementata, prevedendo un controllo su di una eventuale risposta errata da parte dell’analizzatore di impedenza. Per cui, partendo dalla situazione iniziale (errorflag=1 e tentativo=1), se lo strumento risponde emettendo in uscita la stringa giusta, allora viene eseguito il blocco contenuto in “try”, modificando errorflag e rendendolo pari a “0” terminando così l’esecuzione della funzione. Se invece, lo strumento, dovesse rispondere emettendo in uscita una stringa errata, viene eseguito il blocco contenuto in “catch” incrementando il numero di tentativi e rieseguendo la funzione.

La funzione è stata implementata permettendo, di volta in volta, l'abilitazione e la disabilitazione della porta "GPIB", favorendo, in questo modo, l'acquisizione dei dati nei soli punti di interesse e nei momenti in cui il robot è di fatto fermo, eliminando in questo modo molti degli effetti, dovuti a disturbi esterni (come lo strofinio della stessa sonda sull'oggetto da esaminare), che potrebbero falsare la misura.

Output: Z_RE; Z_IM - Parte reale ed immaginaria dei valori di impedenza misurati.

Funzione: "HP4192A_set".



```
H:\ultimate\ndt\HP4192A\HP4192A_Matl...
File Edit Text Window Help
[Icons]
1 %% Setting HP4192A
2
3 AI = visa('ni','GPIB0::17::0::INSTR');
4 fopen(AI)
5 clrdevice(AI);
6 try
7     %% set data ready
8     fprintf(AI,'D1','async');
9     pause(.1);
10    data = fscanf(AI);
11    pause(.1);
12    %% set ZY range
13    fprintf(AI,'R8','async');
14    pause(.1);
15    range = fscanf(AI);
16    pause(.1);
17    %% set Average
18    fprintf(AI,'V1','async');
19    pause(.1);
20    average = fscanf(AI);
21    pause(.1);
22    %% set output data format
23    fprintf(AI,'F0','async');
24    pause(.1);
25    outdata = fscanf(AI);
26    pause(.1);
script Ln 32 Col 15
```

figura 43 HP4192A_set parte prima

```

27
28     %% function A
29     fprintf(AI, 'A2', 'async');
30     pause(.1);
31     displayA = fscanf(AI);
32     pause(.1);
33     fprintf(AI, 'FR1.0000EN', 'async');
34     pause(.1);
35     freq = fscanf(AI);
36     pause(.1);
37     fprintf(AI, 'D0', 'async');
38     pause(.1);
39     data = fscanf(AI);
40     pause(.1);
41     fprintf(AI, 'EX', 'async');
42     pause(.1);
43     exec = fscanf(AI);
44     pause(.1);
45 catch
46     clrdevice(AI);
47 end
48
49 fclose(AI)
50 delete(AI)
51 clear AI

```

figura 44 HP4192A_set parte seconda

Descrizione: Questa funzione permette di settare i vari parametri dell'analizzatore di impedenza HP4192A in funzione del tipo di misura da effettuare.

- Viene dapprima settato il Data Ready in ON tramite il comando “D1”, in questo modo si abilita la modifica dei parametri.
- Viene settato poi il range di misura in AUTO, mediante l’invio del comando “R8”.
- Viene abilitata l’esecuzione della media della misura, per eliminare le oscillazioni della stessa, mediante il comando “V1”.
- Viene settato il formato di uscita dei dati in modo da essere visualizzati sui display A e B, mediante il comando “F0”.
- Viene inviato il comando “A2”, in modo da settare sul display A la visualizzazione della sola parte reale dell’impedenza (automaticamente sul display B verra settata la visualizzazione della parte immaginaria).
- Viene settata la frequenza di misura mediante il comando “FR1.0000EN” ad 1kHz.

- Viene dapprima settato il Data Ready in OFF tramite il comando “D0”, in questo modo si disabilita la modifica dei parametri.
- Viene infine dato il comando di esecuzione delle modifiche “EX”.

Bibliografia

- [1]: Blitz J (1997) “*Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing*”, second edition, 1997, published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK
- [2]: R. Albanese, G. Rubinacci and F. Villone, “*An Integral Computational Model for Crack Simulation and Detection via Eddy Currents*”, J. of Comp. Phys., Vol. 152 (1999), pp.736-755
- [3]: R. Albanese and G. Rubinacci, “*Finite Element Methods for the Solution of 3D Eddy Current Problems*”, in “*Advances in Imaging and Electron Physics*”, (Academic Press, San Diego, 1998)
- [4]: M. Morozov, G. Rubinacci, A. Tamburino and S. Ventre, “*Evaluation of Subsurface Cracks in Riveted Aluminium Joints Using Industrial Eddy Current Instrumentation*”, (CREATE Consortium, Naples, Italy).
- [5]: M. Morozov, G. Rubinacci, A. Tamburino and S. Ventre, “*Numerical Models of Volumetric Insulating Cracks in Eddy – Currents Testing with Experimental Validation*”, IEEE Trans. On Magnetics vol. 42, May 2006.
- [6]: Classroom Training Handbook, “*Non Destructive Testing – Eddy Current*”, second edition, 1979, published by General Dinamics, Convair Division
- [7]: Metals Handbook, Ninth Edition, v. 17, ASM International (1989) USA
- [8]: User manual (Phasec2D Hocking)
- [9]: User manual (Mitsubishi Melfa rv-1a)
- [10]: Operation Manual (HP4192A)