

“Nuove tecnologie per l’analisi non intrusiva dei manufatti”

Programma di ricerca

Ingegnerizzazione di prototipi e strumentazione per la diagnostica su manufatti monumentali in materiale lapideo

Ispezioni di materiali dielettrici mediante campo elettrico e campo elettromagnetico

Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti

Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione “Alessandro Faedo”
Rapporto tecnico maggio 2007

2007-B4-

Sommario

Il lavoro riporta i risultati di una sperimentazione rivolta a stimare le prestazioni ottenibili con due tipi di sensori pilotati dal sistema per ispezioni non distruttive, realizzato presso l'Istituto.

I due sensori esaminati sono costituiti rispettivamente da un'antenna risonante planare e da un condensatore complanare, adatti all'ispezione di materiali dielettrici. Il campo elettromagnetico vicino prodotto dall'antenna ed il campo elettrico prodotto dal condensatore interagiscono col materiale esaminato, in modo che la risposta dei sensori, dipendente dalla permittività del materiale con cui essi sono posti a contatto, può fornire informazioni sulla struttura del materiale.

Grazie all'impiego di questi sensori, il sistema è in grado di esaminare materiali con permittività in un intervallo da 1 ad almeno 10; il sistema è in grado di rivelare differenze della struttura superficiale o prossimale di tali materiali.

Summary

The paper reports the experimental results obtained using two sensors, a planar resonating antenna and a co-planar capacitor, driven by the system for Non Destructive Test realized in the Institute.

The sensors are aimed to inspect dielectric materials, since the near electromagnetic field produced by the antenna and the electric field of the capacitor are influenced by the permittivity of the inspected materials, so that information about the material's structure can be obtained analyzing the sensor responses.

Using the described sensors, the system is able to examine materials whose permittivity ranges from 1 to at least 10; the system can reveal structural surface or proximal variations.

Indice

Introduzione.....	4
Descrizione del sistema	5
Controllo Sensore A1	6
Controllo Sensore C1	7
Modello di risposta dei sensori	7
Modello di risposta dell'antenna a patch.....	8
Modello di risposta del condensatore complanare	11
Risposta sperimentale dei sensori.....	15
Esame di campioni con differenti spessori	15
Risultati ottenuti col sensore A1.....	15
Risultati ottenuti col sensore C1.....	16
Esame di campioni con differenti valori di permittività	18
Risultati ottenuti col sensore A1.....	21
Risultati ottenuti col sensore C1.....	22
Analisi dei risultati.....	23
Ispezione locale dei campioni lapidei	25
Risultati ottenuti col sensore A1.....	26
Risultati ottenuti col sensore C1.....	27
Analisi dei risultati	29
Dati grezzi di A1.....	29
Dati grezzi di C1	32
Valori di permittività	33
Conclusioni.....	35
Riferimenti.....	36

Introduzione

Il sistema per ispezioni non distruttive realizzato nell'ambito del Progetto SP1a è in grado di pilotare sensori basati su differenti tecniche, mediante i quali si possono ottenere informazioni sulla struttura dei materiali esaminati [1]: il sistema viene impiegato per confrontare le misure ottenute su un campione con un insieme di misure prese come riferimento, al fine di individuare anomalie che possono essere provocate da difetti o deterioramenti del campione.

Le tecniche d'ispezione consistono in un'interazione col materiale mediante onde acustiche, campi elettromagnetici e campi elettrici.

Nel primo caso si fa uso di una coppia di sonde ad ultrasuoni allineate e poste alle estremità opposte dell'oggetto in esame: una sonda genera un treno d'impulsi e l'altra rivela il segnale trasmesso attraverso il pezzo. Dall'analisi di questo segnale, che è influenzato dall'impedenza acustica del materiale lungo il percorso di propagazione dell'onda, si possono ottenere informazioni sulla struttura interna dell'oggetto in esame [2].

Nel secondo caso si fa uso di un'antenna piana risonante posta a contatto con l'oggetto in esame: l'antenna è pilotata con una spazzata in frequenza e viene rivelato il segnale riflesso alle varie frequenze. Dall'analisi di questo segnale, che è influenzato dalla permittività del materiale in un volume determinato dalle dimensioni dell'antenna e dall'estensione del campo vicino, si possono ottenere informazioni sulla struttura degli strati prossimali dell'oggetto in esame [3].

Nel terzo caso si fa uso di un condensatore complanare posto a contatto con l'oggetto in esame e si misura la capacità. Dall'analisi di questo valore, che è influenzato dalla permittività del materiale in un volume determinato dalle dimensioni del condensatore e dall'estensione del campo tra le armature, si possono ottenere informazioni sulla struttura dello strato superficiale dell'oggetto in esame [4].

In questo lavoro si riportano i risultati di due serie di misure eseguite col secondo ed il terzo tipo di sensore su differenti tipi di materiali dielettrici. Una serie di misure è stata eseguita per stimare la dinamica di misura dei due sensori, l'altra per stimare la loro sensibilità.

Descrizione del sistema

Il sistema NDT progettato e realizzato presso l'Istituto ha una struttura modulare, costituita da una piattaforma di elaborazione e da differenti unità di controllo, che pilotano trasduttori ad ultrasuoni, ad onde elettromagnetiche ed a campo elettrico. Nel lavoro si considera la struttura mostrata in figura 1.

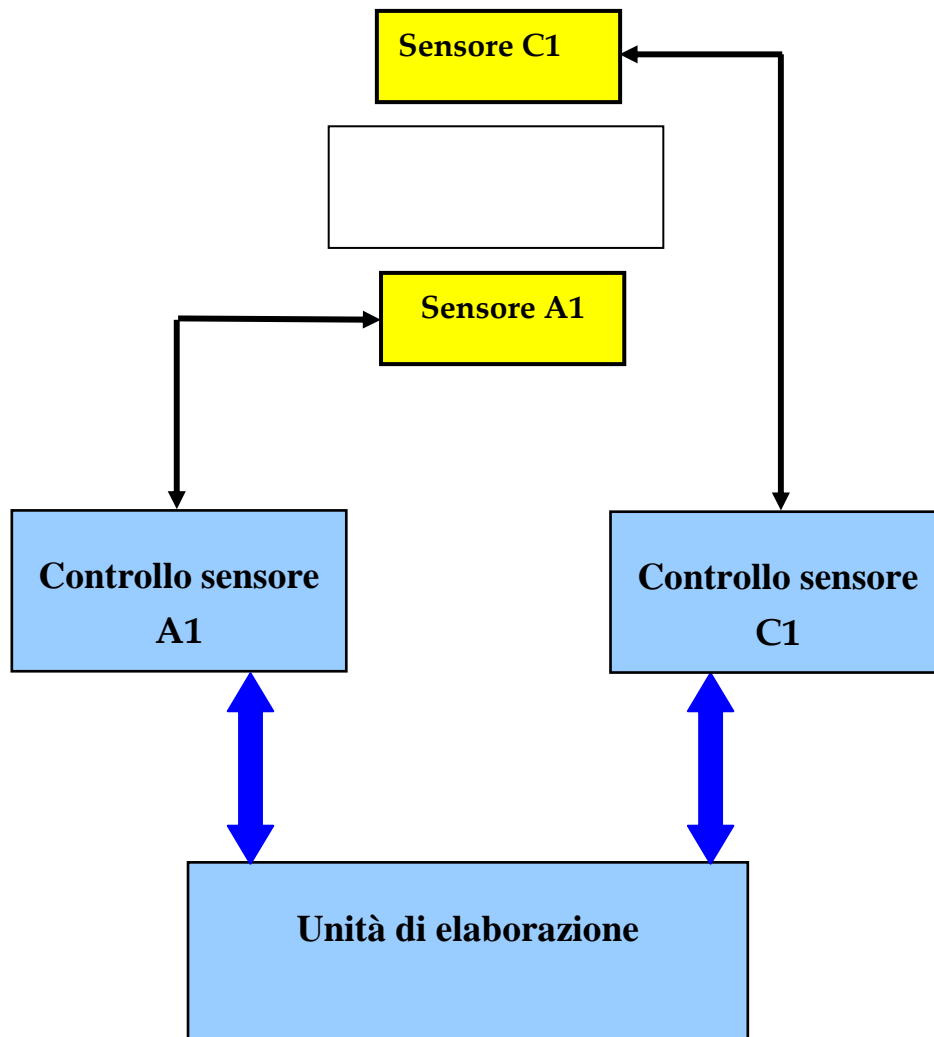


Figura 1. Diagramma a blocchi della struttura per l'ispezione non distruttiva di materiali dielettrici. In questo caso si hanno:

- l'unità di elaborazione, sulla quale risiedono il software per la gestione dei sensori e per l'analisi e l'archiviazione dei dati di misura
- il controllo sensore A1, che provvede alla gestione delle operazioni necessarie per la raccolta dei dati di misura prodotti dal sensore A1
- il controllo sensore C1, che provvede alla gestione delle operazioni necessarie per la raccolta dei dati di misura prodotti dal sensore C1.

Controllo Sensore A1

Il sensore A1 è costituito da un'antenna risonante nella gamma delle microonde ed il controllo A1 eccita l'antenna, posta a contatto del materiale da esaminare, ed a misurare il segnale riflesso a differenti frequenze.

L'antenna è pilotata da un oscillatore variabile (VCO) con un segnale sinusoidale $V(\omega)$ la cui frequenza dipende dalla tensione continua V_T che controlla l'oscillatore. La tensione di controllo è prodotta da un convertitore digitale/analogico: per ottenere una spazzata in frequenza s'incrementa con passi costanti il codice d'ingresso del convertitore, e si pilota quindi il VCO con una funzione a gradini. Due diodi rivelatori consentono di ottenere il valore di picco del segnale elettrico V_{REF} generato dal VCO e del segnale V_{MIS} riflesso dall'antenna (vedi figura 2).

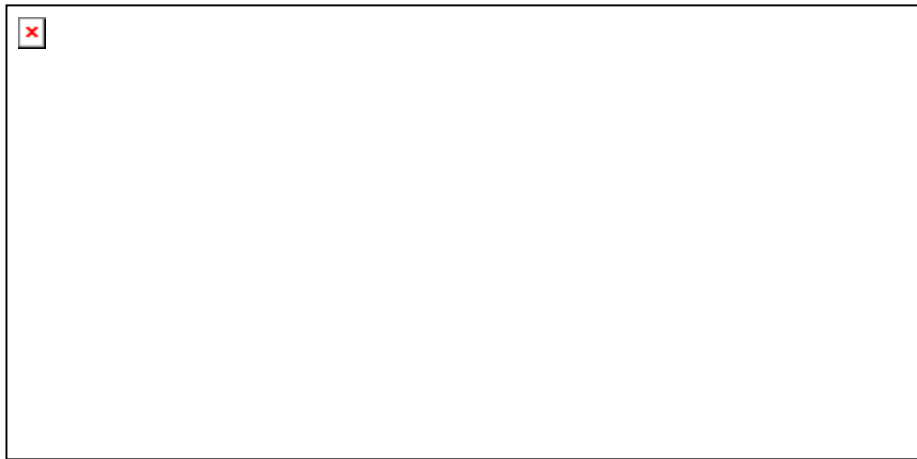


Figura 2. Pilotaggio del sensore A1.

Il controllo A1 è sostanzialmente un analizzatore scalare, con una risoluzione ed una precisione di misura che dipendono dalle riposte del convertitore e del VCO.

Nella versione attuale [5], la frequenza dell'oscillazione prodotta dal VCO applicando al convertitore D/A il codice n , con $0 \leq n \leq 3413$, è:

$$f = 1,937 + 0,0002 \times n \text{ [GHz]}$$

L'intervallo della spazzata in frequenza è $1,937 \text{ GHz} \div 2,639 \text{ GHz}$; la risoluzione in frequenza per incrementi unitari del codice di controllo è $\Delta f = 0.2 \text{ MHz}$.

Sull'unità di elaborazione è installato il software che consente di ricavare per ciascuna misura i seguenti parametri:

- F_r = frequenza di risonanza, in MHz
- BW = larghezza di banda a 3dB
- F_c = frequenza centrale di BW, in MHz
- A = ampiezza del picco di risonanza, in dB.

Per determinare **BW** il programma individua a sinistra e a destra del minimo le frequenze per cui l'ampiezza del segnale è superiore di 3dB al valore del minimo.

Da questi valori si possono ricavare le frequenze normalizzate:

- $f_r = f_r / f_r$ (aria)
- $f_c = f_c / f_c$ (aria).

Controllo Sensore C1

Il sensore C1 è costituito da un condensatore complanare ed il controllo C1 provvede a misurare il valore della capacità del condensatore, posto a contatto del materiale da esaminare, ad una determinata frequenza di misura.

Il controllo C1 è un capacimetro RCL23 della INSTRUMENT & SYSTEMS SRL che consente di effettuare misure di capacità a 100Hz, 1KHz e 10KHz.

Lo strumento è dotato di un tasto di calibratura, che fornisce la misura della sola capacità del condensatore, eliminando quella del cavo di collegamento.

Lo strumento è collegato all'unità di elaborazione tramite un'interfaccia USB.

Modello di risposta dei sensori

Per l'ispezione di materiali dielettrici, il sistema può fare uso di:

- un'antenna a patch, che ha una struttura costituita da un piano di massa ed un piano radiante, separati da un substrato dielettrico
- un condensatore complanare, che ha una struttura costituita da armature sottili poste su un substrato dielettrico.

I due elementi sono utilizzabili come sensori poiché la loro risposta dipende dalla permittività del materiale con cui essi sono a contatto: si ha infatti rispettivamente un'interazione del campo elettromagnetico o di un campo elettrico col materiale in esame.

Per quanto riguarda il primo sensore, la risposta è data dalla frequenza di risonanza dell'antenna, che dipende dalla geometria del patch e dalle permittività dei materiali a contatto con le armature:

$$f_r = f(L, W, h, t, \epsilon_{sub}, \epsilon_{mat}) \quad (1)$$

dove:

- L = lunghezza del patch
- W = larghezza del patch
- t = spessore delle metallizzazioni
- h = spessore del substrato

- ϵ_{sub} = permittività del substrato
- ϵ_{mat} = permittività del semispazio a contatto con il patch.

Per quanto riguarda il secondo sensore, la risposta è data dalla capacità, che dipende dalla geometria delle armature e dalle permittività relative dei materiali a contatto con le armature:

$$C = f(L, W, d, \epsilon_{sub}, \epsilon_{mat}) \quad (2)$$

dove:

- L = lunghezza delle armature
- W = larghezza delle armature
- d = distanza tra le armature
- ϵ_{sub} = permittività del substrato
- ϵ_{mat} = permittività del semispazio a contatto con le armature.

La risposta dell'antenna dipende dalla permittività degli strati prossimali del materiale in esame, quella del condensatore dalla permittività dello strato superficiale.

Modello di risposta dell'antenna a patch

Assimilando l'antenna a patch ad una linea a microstriscia e utilizzando un modello costituito da una linea di trasmissione equivalente a sezione trasversale omogenea, dove si propaga il modo TEM, si ottiene una relazione esplicita per l'equazione 1; quando l'antenna è posta a contatto con un materiale omogeneo e isotropo, con spessore infinito e permittività ϵ_{mat} , si ha:

$$f_{rmat} = \frac{c}{2(L + 2\Delta l)\sqrt{\epsilon_{eqmat}}} \quad (3)$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto, L è la lunghezza del patch e $\Delta l \cong h$ è un fattore di correzione ϵ_{eqmat} è la costante dielettrica equivalente, determinata dalle permittività ϵ_{sub} e ϵ_{mat} e della geometria dell'antenna.

Se $W \geq h$, la costante dielettrica equivalente è:

$$\epsilon_{eqmat} = \frac{\epsilon_{sub} + \epsilon_{mat}}{2} + \frac{\epsilon_{sub} - \epsilon_{mat}}{2} F(W/h) \quad (4)$$

con

$$F(W/h) = (1 + 12h/W)^{-1/2} \quad (5)$$

Quando l'antenna è in aria, la frequenza di risonanza a vuoto è data da:

$$f_{r0} = \frac{c}{2(L + 2\Delta l)\sqrt{\epsilon_{eq0}}} \quad (6)$$

dove ϵ_{eq0} è la costante dielettrica equivalente dell'aria:

$$\epsilon_{eq0} = \frac{\epsilon_{sub} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{sub} - 1}{2} F(W/h) \quad (7)$$

Eseguendo il rapporto tra le equazioni 3 e 6 si ottiene:

$$\frac{f_{mat}}{f_{r0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{eq0}}{\epsilon_{eqmat}}} \quad (8)$$

E' quindi possibile utilizzare un'antenna a patch come sensore e determinare il valore della costante dielettrica del materiale esaminato in base alle misure della frequenza di risonanza a vuoto e sotto carico.

Il sensore impiegato (vedi figura 3) ha un patch in rame inciso su substrato dielettrico di tipo plastico, con costante dielettrica $\epsilon_{sub} \cong 2.35$ e spessore $h \cong 1.6mm$; le dimensioni del patch sono $L = W = 38 mm$, quelle del piano di massa sono $L = W = 80 mm$.

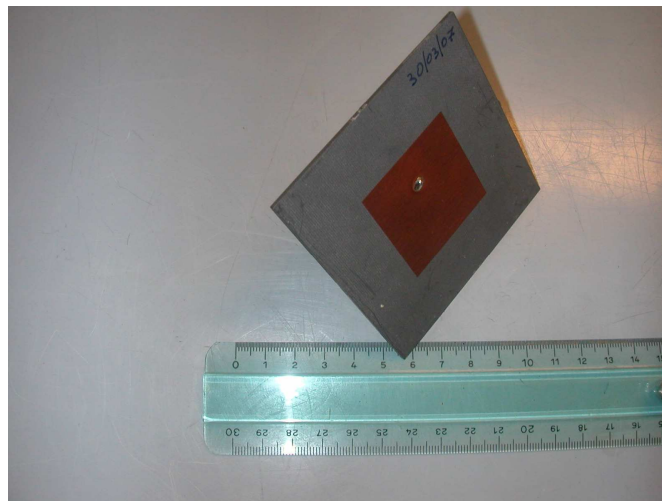


Figura 3. Sensore C1.

Le costanti dielettriche equivalenti sono:

$$\epsilon_{eqmat} = 2.13 + 0.10 \times \epsilon_{mat} \quad (9)$$

$$\epsilon_{eq0} = 2.22 \quad (10)$$

La risposta teorica è quindi:

$$\frac{f_{rmat}}{f_{r0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{eq0}}{\epsilon_{eqmat}}} = \frac{1}{\sqrt{0.96 + 0.04 \times \epsilon_{mat}}} \quad (11)$$

Assunto che il modello sia valido, dall'equazione 11 si ottiene il valore di permittività ϵ stimato in base alla frequenza di risonanza f_r misurata; si ha:

$$\epsilon = \frac{1}{0.04} \left[\left(\frac{1}{f_r} \right)^2 - 0.96 \right] \quad (12)$$

dove f_r è la frequenza di misura normalizzata rispetto al valore ottenuto a vuoto. La figura 4 mostra il grafico relativo all'equazione 12.

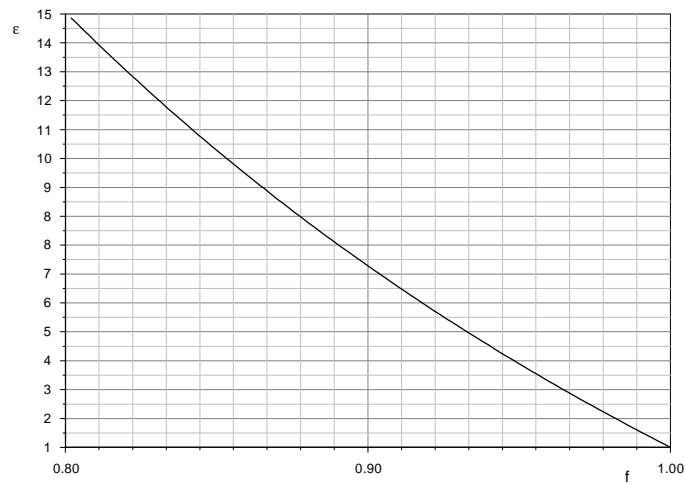


Figura 4. Valore teorico della permittività del materiale a contatto col patch, ricavata dalla frequenza di risonanza del sensore.

Modello di risposta del condensatore complanare

In base ad una trasformazione conforme [8] si può determinare un condensatore piano equivalente al condensatore complanare.

Si assume che il condensatore complanare sia costituito da una lamina rettangolare di larghezza w , posta a distanza d da un'altra lamina (piano di massa) e che le lamine siano tra due semispazi riempiti rispettivamente da un materiale con costante dielettrica relativa ϵ_1 e da un materiale con costante dielettrica relativa ϵ_2 .

La capacità per unità di lunghezza determinata dal primo materiale è data da:

$$C^* = \frac{a}{b} \epsilon_0 \epsilon_1$$

dove $\frac{a}{b} = \frac{K(k)}{K(k')}$.

Le funzioni K sono integrali ellittici completi della prima specie, definiti da:

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}}$$

I parametri k e k' (moduli) sono ricavati dalle dimensioni del condensatore mediante le relazioni:

$$k = \frac{w}{w+2d}$$

$$k' = (1-k^2)^{\frac{1}{2}}$$

Il rapporto $\frac{K(k)}{K(k')} \equiv \frac{K}{K'}$ può essere approssimato mediante le relazioni:

$$\frac{K}{K'} \approx \frac{1}{\pi} \ln \left[2 \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}} \right] \quad \text{per } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 \quad (13)$$

$$\frac{K}{K'} \approx \pi \frac{1}{\ln \left[2 \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}} \right]} \quad \text{per } 0 \leq k < \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

Considerando tutta la lamina si ottiene la capacità:

$$C_1 = C^* L = \frac{K}{K'} \varepsilon_0 \varepsilon_1 L$$

La capacità per unità di lunghezza determinata dal secondo materiale è data da:

$$C_2 = \frac{K}{K'} \varepsilon_0 \varepsilon_2 L$$

Si ha dunque la capacità complessiva:

$$C = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times L \times \varepsilon_0 \times \frac{K}{K'} = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \times B \quad (15)$$

con $B = L \times \varepsilon_0 \times \frac{K}{K'}$.

Se la permittività ε_2 è nota, la permittività ε_1 è ricavata dalla misura della capacità complessiva mediante la relazione:

$$\varepsilon_1 = \frac{C}{B} - \varepsilon_2 \quad (16)$$

Il valore della permittività ε_2 è ricavabile mediante la misura della capacità in aria C_0 ; in questo caso, posto $\varepsilon_1 = 1$, si ha:

$$C_0 = (1 + \varepsilon_2) \times B$$

e quindi:

$$\varepsilon_2 = \frac{C_0}{B} - 1$$

Il sensore impiegato (vedi figura 5) è un condensatore complanare con struttura a pettine su supporto rigido. Esso è costituito da 6 moduli, ognuno dei quali è composto di una pista centrale e da due laterali, tutte parallele: le piste laterali sono collegate tra loro e costituiscono un piano di massa, le piste centrali, anch'esse collegate tra loro, costituiscono l'altra armatura del condensatore. In prima approssimazione, per ciascun semispazio la struttura può essere considerata come il parallelo di 6 condensatori, le cui armature hanno dimensioni uguali alla metà delle

dimensioni della pista centrale; la capacità complessiva è la somma delle capacità calcolate per ciascun semispazio.

Il substrato in plexiglass ha uno spessore tale da contenere tutte le linee di campo che lo attraversano. Si può quindi approssimare il substrato come un semispazio infinito.

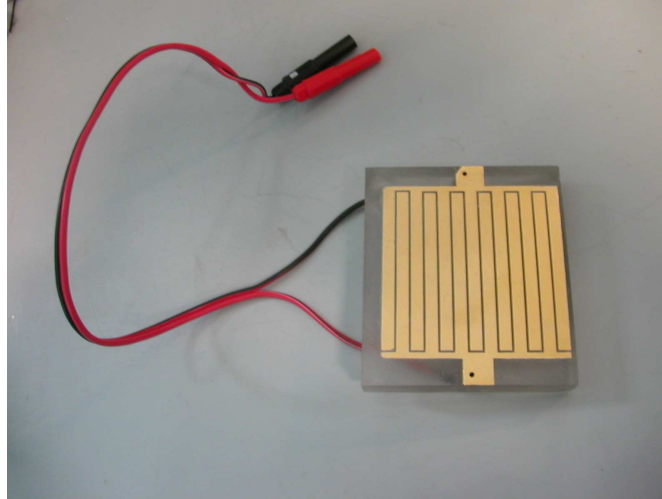


Figura 5. Sensore C1.

Il substrato ha dimensioni 80×90 mm con uno spessore di 15 mm, mentre le piste centrali hanno lunghezza $L = 65.5$ mm, larghezza $w = 4.5$ mm e distanza dalle piste laterali $d = 0.9$ mm.

Dall'equazione 15, la capacità nominale del condensatore è quindi:

$$C = 6 \times \left[2 \times (\epsilon_r + \epsilon_s) \times 65.5 \times 10^{-3} \times 8.86 \times \frac{K}{K'} \right] pF \quad (17)$$

dove ϵ_r è la permittività del semispazio sovrastante le piste e ϵ_s è la permittività del semispazio sottostante le piste.

I moduli k e k' valgono:

$$k = \frac{w}{w + 2d} = \frac{4.5}{4.5 + 1.8} = 0.714$$

Dalla 14 si ha

$$\frac{K}{K'} = 1.009$$

Sostituendo nella 17 si ottiene

$$C = (\epsilon_r + \epsilon_s) \times 7.03 pF \quad (18)$$

Per determinare ε_s si fa una misura in aria. Ponendo $\varepsilon_r = 1$, l'equazione 18 diventa:

$$C_{aria} = (1 + \varepsilon_s) \times 7.03 pF$$

Il valore della permittività del campione è ricavabile dalle misura di capacità a vuoto (C_{aria}) e col materiale (C_m) mediante la relazione:

$$\varepsilon = \frac{C_m - C_{aria}}{7.03} + 1 \quad (19)$$

Risposta sperimentale dei sensori

Per valutare le risposte effettive dei sensori sono stati eseguiti due tipi di misure, impiegando:

- campioni con differenti spessori
- campioni con differenti permittività.

Esame di campioni con differenti spessori

I modelli di risposta riportati in precedenza prevedono che il sensore (antenna o condensatore) sia a contatto con un materiale omogeneo con spessore infinito, mentre i materiali utilizzati per le misurazioni hanno spessori finiti: è quindi necessario verificare se tali spessori sono sufficienti per l'applicazione del modello.

Per ottenere una stima sulla profondità di penetrazione dei sensori all'interno del materiale si sono eseguite delle misure su spessori variabili ottenuti mediante carte da gioco, con spessore unitario di circa 0.35 mm; i sensori sono stati premuti sulle carte in modo da ridurre le intercapedini d'aria tra una carta e l'altra.

Risultati ottenuti col sensore A1

La tabella 1 riporta le misure della frequenza di risonanza ed i valori di permittività calcolati mediante l'equazione 13.

La figura 6 riporta i valori di permittività in funzione dello spessore.

La risposta di A1 si stabilizza per spessori maggiori di ≈ 15 mm: il modello di risposta è dunque effettivamente applicabile per campioni con spessori superiori al suddetto valore.

Questo tipo di sensore fornisce informazioni sullo strato prossimale del materiale esaminato.

carte	s	F_r	f_r	ϵ
0	0.0	2490	1.000	1.0
10	3.5	2415	0.970	2.6
20	7.0	2392	0.961	3.1
30	10.5	2385	0.958	3.2
40	14.0	2377	0.955	3.4
50	17.5	2377	0.955	3.4

Tabella 1. Sensore A1. Risultati delle misure eseguite su spessori diversi dello stesso materiale. S in mm, F in MHz.

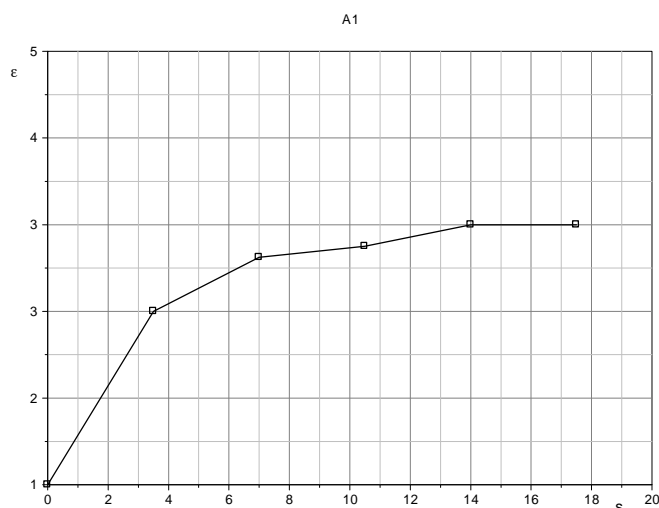


Figura 6. Sensore A1. Permittività stimata al variare dello spessore del materiale.

Risultati ottenuti col sensore C1

La tabella 2 riporta le misure della capacità ed i valori di permittività calcolati mediante l'equazione 19.

La figura 7 riporta i valori permittività in funzione dello spessore.

Carte	S	C(s)	Cr	ε
0	0	25.96	1.00	1.00
1	0.35	36.27	1.40	2.47
2	0.7	41.97	1.62	3.28
3	1.05	45.04	1.73	3.71
4	1.4	47.32	1.82	4.04
5	1.75	48.68	1.88	4.23
10	3.5	49.57	1.91	4.36
20	7	48.92	1.88	4.27
30	10.5	49.36	1.90	4.33
40	14	48.55	1.87	4.21

Tabella 2. Sensore C1. Risultati delle misure eseguite su spessori diversi dello stesso materiale. S in mm, C in pF, Cr = C(s)/C(0).

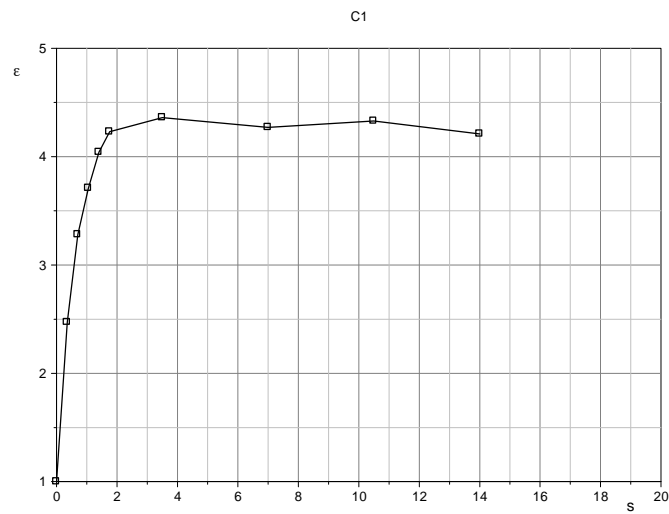


Figura 7. Sensore C1. Permittività stimata al variare dello spessore del materiale.

La risposta di C1 si stabilizza per spessori maggiori di ≈ 2 mm: il modello di risposta è dunque effettivamente applicabile per campioni con spessori superiori al suddetto valore.

Questo tipo di sensore fornisce informazioni sullo strato superficiale del materiale esaminato.

Esame di campioni con differenti valori di permittività

Per determinare l'intervallo di permittività per i quali il modello applicato è valido si sono impiegati tre gruppi di materiali:

- G1-Mezzi omogenei con permittività nota, costituiti da materiali plastici o da allumina.
- G2 - Mezzi omogenei con porosità η indotta, costituiti da piastrelle di resina con microsfere cave di vetro [6]
- G3 – Materiali lapidei, costituiti da piastrelle di marmo.

I gruppi sono composti dai seguenti campioni (vedi figure 8 ÷ 11).

G1

- P1: lastra di plexiglass con dimensioni 10×10×1 cm ($\epsilon = 2.55 \div 2.7$)
- T1: lastra di teflon con dimensioni 10×10×1 cm ($\epsilon = 2.08 \div 2.1$)
- A11: lastra di Allumina con dimensioni 10×10×1 cm ($\epsilon = 9.5$)

G2

- R1: piastrella con dimensioni 11.5×11.5×2 cm ($\epsilon = 3.1$), $\eta = 0.000$
- R2: piastrella con dimensioni 11.5×11.5×2 cm $\eta = 0.034$
- R3: piastrella con dimensioni 11.5×11.5×2 cm $\eta = 0.083$
- R4: piastrella con dimensioni 11.5×11.5×2 cm $\eta = 0.090$
- R5: piastrella con dimensioni 11.5×11.5×2 cm $\eta = 0.235$

G3

- MR: piastrella di marmo rosa con dimensioni 30×15×5 cm ($\epsilon = 6 - 8$)
- MB: piastrella di marmo bianco con dimensioni 30×15×4 cm ($\epsilon = 6 - 8$)
- MG: piastrella di marmo grigio con dimensioni 30×15×5 cm ($\epsilon = 6 - 8$).

Le misure sono state fatte mettendo il campione su un blocco di polistirolo e appoggiando il sensore al centro di una faccia; il condensatore è stato fatto aderire al campione con una pressione costante (vedi figure 11 e 12).

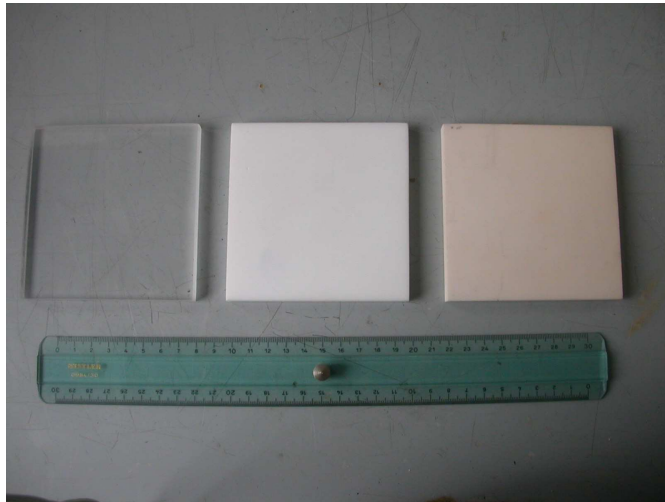


Figura 8. Campioni del gruppo G1.

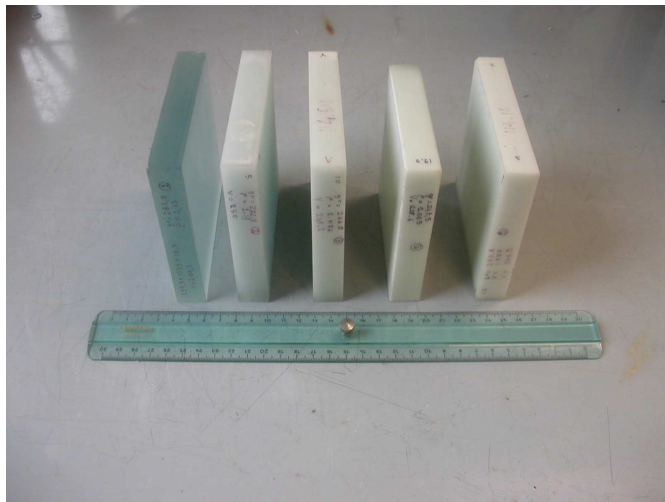


Figura 9. Campioni del gruppo G2.



Figura 10. Campioni del gruppo G3.



Figura 11. Ispezione mediante il sensore A1.



Figura 12. Ispezione mediante il sensore C1. Sul condensatore è appoggiato un peso per ridurre l'aria tra il sensore e la faccia del materiale.

Risultati ottenuti col sensore A1

La figura 13 mostra i grafici dei segnali ottenuti col sensore A1 in aria e a contatto coi materiali ispezionati. La scala delle ampiezze è lineare, quella delle frequenze è quotata in codici di comando del VCO.

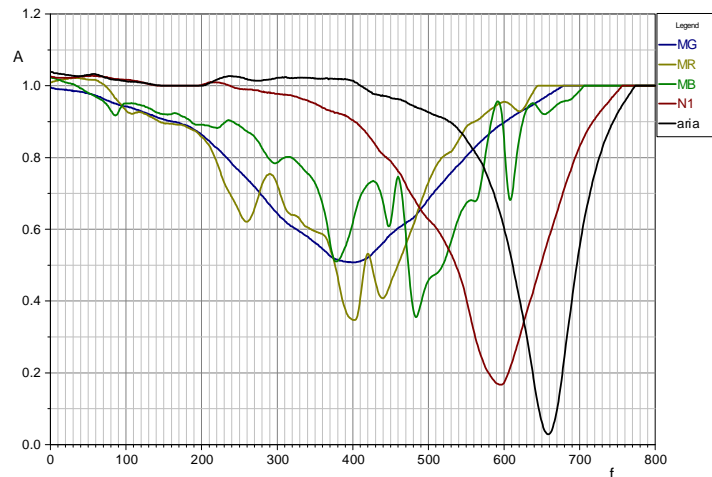


Figura 13. Segnali ottenuti nell'ispezione di materiali plastici e lapidei col sensore A1.

La tabella 3 riporta i risultati della misure ricavate per ciascun campione; la tabella riporta inoltre i valori ricavati in aria, usati per normalizzare i valori di frequenza. I valori di permittività sono stati ottenuti applicando l'equazione 13.

Gruppo	Campione	F_r	A	f_r	ϵ
	aria	2480	17	1.000	1.0
G1	P1	2410	22	0.972	2.5
	T1	2435	30	0.982	1.9
	Al1	2145	5	0.865	9.4
G2	R1	2400	10	0.968	2.7
	R2	2410	10	0.972	2.5
	R3	2420	11	0.976	2.2
	R4	2436	12	0.982	1.9
	R5	2436	12	0.982	1.9
G3	MB	2277	8	0.918	5.7
	MR	2259	9	0.911	6.1
	MG	2229	6	0.899	6.9

Tabella 3. Risultati delle misure puntuali eseguite col sensore A1.

Risultati ottenuti col sensore C1

La tabella 4 riporta i risultati delle misure ricavate per ciascun campione utilizzando il sensore C1; la tabella riporta inoltre i valori di permittività ottenuti attraverso l'equazione 19.

	C	ϵ
aria	26.6	1.0
P1	36.1	2.4
T1	31.3	1.7
Al1	74.8	7.9
R1	44.3	3.5
R2	39.7	2.9
R3	38.0	2.6
R4	34.9	2.2
R5	36.5	2.4
MB	61.0	5.9
MR	68.2	6.9
MG	122.6	14.7

Tabella 4. Risultati delle misure puntuali eseguite col sensore C1.

Analisi dei risultati

La figura 14 mostra il diagramma Ampiezza-Frequenza dei valori misurati col sensore A1.

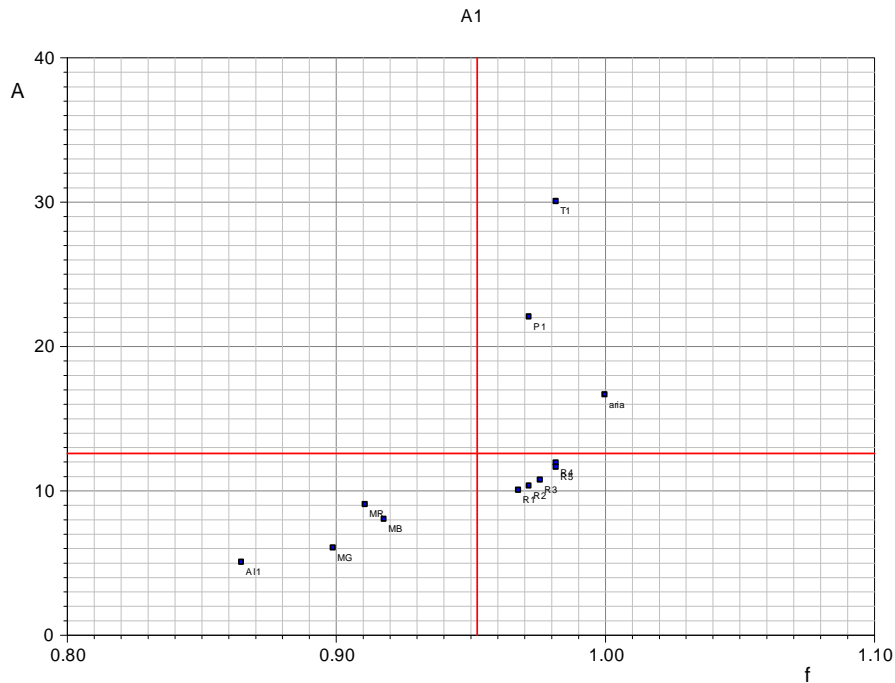


Figura 14. Sensore A1. Valori di ampiezza del picco di risonanza in funzione della frequenza di risonanza.

In questo diagramma si osserva una separazione dei campioni in tre gruppi:

- un gruppo con alti valori di f ed alti valori di A , comprendente i materiali plastici omogenei a bassa permittività (teflon e plexiglass)
- un gruppo con alti valori di f e bassi valori di A , comprendente i campioni di resina con porosità
- un gruppo con bassi valori di f e bassi valori di A , comprendente i campioni lapidei ed il campione di allumina.

La figura 15 mostra il grafico dei valori di permittività riportati nelle tabelle 3 4, insieme coi valori tabulati per alcuni dei campioni esaminati.

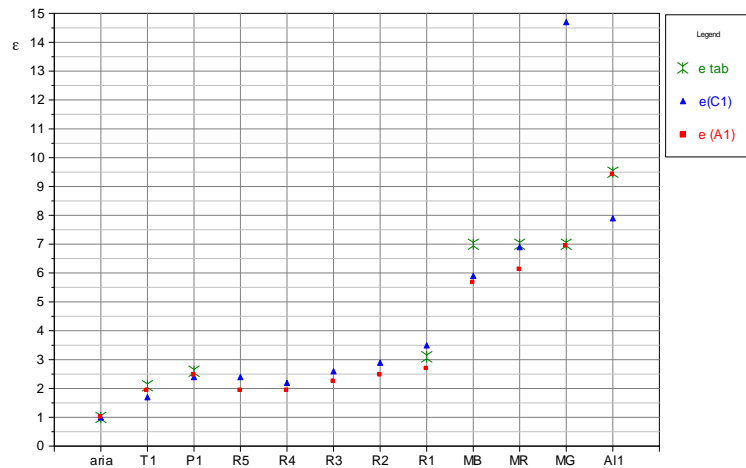


Figura 15. Valori di permittività stimati coi sensori A1 e C1.

Per i materiali plastici omogenei o con porosità la permittività calcolata in base alla frequenza di risonanza del sensore A1 è in buon accordo con quella calcolata in base alla capacità del sensore C1: le variazioni di permittività da un campione all'altro sono concordi per entrambi i sensori. Inoltre, i valori stimati coincidono con quelli tabulati. La differenza dei valori stimati per ciascun campione può essere attribuita al diverso spessore esaminato dai sensori; per esempio, la distribuzione delle microsfere nei campioni di resina non è omogenea, e si possono avere quindi misure diverse considerando lo strato superficiale di circa 2 mm (visto da C1) oppure uno spessore di 20 mm (visto da A1).

Questo fatto, insieme con un possibile spostamento dal modello teorico, può influire sulle misure fatte sui campioni lapidei. In questo caso si hanno valori sostanzialmente identici per MB, simili per MR ($\Delta\epsilon \approx 1$, $\Delta\epsilon/\epsilon \approx \pm 15\%$) e nettamente diversi per MG ($\Delta\epsilon \approx 7$): ciò può essere causato dalla differenza dello strato superficiale di MG rispetto agli altri due campioni.

Il valore di permittività del campione di Allumina calcolato in base alla risposta teorica di A1 coincide col valore nominale, mentre quello ottenuto con C1 è inferiore ($\Delta\epsilon \approx 1.5$, $\Delta\epsilon/\epsilon \approx 16\%$): anche questa differenza può essere imputata al diverso spessore di misura.

Comunque, entrambi i sensori rispondono alla permittività in un ampio intervallo di valori (da 1 ad almeno 10); inoltre, sono sensibili a variazioni di permittività in questo intervallo, e rispondono quindi al criterio d'impiego, che consiste non tanto nella determinazione assoluta della permittività dell'oggetto esaminato, quanto all'individuazione di variazioni della struttura dell'oggetto, individuabili anche senza trasformare i valori di misura (frequenza o capacità) in valori di permittività.

Ispezione locale dei campioni lapidei

La mappa della permittività superficiale e prossimale di un materiale può essere ricavata collocando il sensore in differenti posizioni: la risoluzione spaziale di misura è determinata sostanzialmente dalle dimensioni del sensore.

Nell'esperienza descritta sono stati esaminati i campioni di marmo del gruppo G3 ed una piastrella di nylon con dimensioni 23.6×16.4×3 cm (N1).

L'ispezione è stata condotta in modo manuale, ricavando una serie di 5 misure per ciascuna faccia lungo l'asse centrale. Il sensore è stata traslato ogni volta di 5 cm (vedi figure 16 e 17); le posizioni di misura con lo stesso numero sulle facce opposte sono allineate.

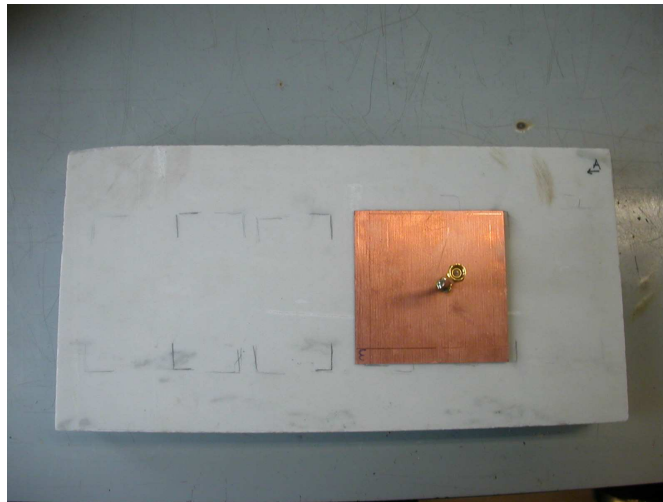


Figura 16. Misure locali sul campione di marmo bianco col sensore A1.

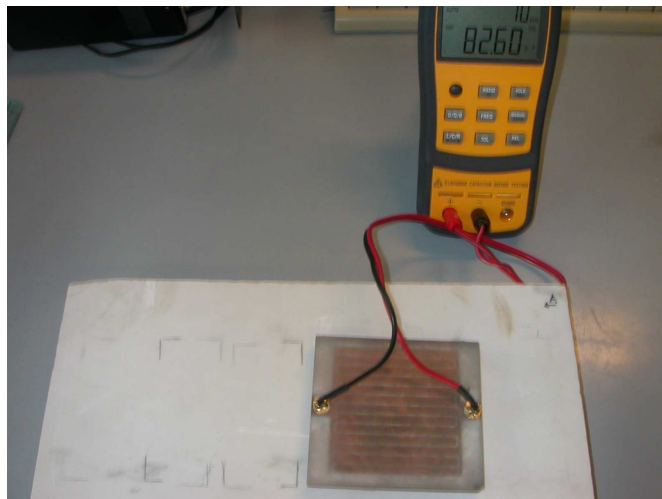


Figura 17. Misure locali sul campione di marmo bianco col sensore C1.

Risultati ottenuti col sensore A1

Le tabelle 5 ÷ 8 riportano i risultati delle misure eseguite col sensore A1. Le frequenze sono state normalizzate rispetto ai valori di riferimento ottenuti con la sonda in aria, dati da:

Gruppo	F _r	A
N	2465	26.9
G3, G4	2320	21.6

	Faccia A			Faccia B		
	F _r	A	f _r	F _r	A	f _r
1	2402	14.2	0.974	2403	14.3	0.975
2	2409	18.5	0.977	2406	17.9	0.976
3	2410	18.3	0.978	2410	17.9	0.978
4	2408	16.8	0.977	2409	18.2	0.977
5	2408	15.1	0.977	2409	14.8	0.977
sd	3.1	1.9	0.001	2.9	1.9	0.001
CV	0.1	11.6	0.1	0.1	11.4	0.1
m	2407	16.6	0.977	2407	16.6	0.977

Tabella 5. Sensore A1. Risultati delle misure eseguite sul campione N1.

	Faccia A			Faccia B		
	F _r	A	f _r	F _r	A	f _r
1	2227	8.4	0.903	2257	10.1	0.916
2	2257	8.7	0.916	2255	12.0	0.915
3	2292	7.1	0.930	2245	11.5	0.911
4	2271	8.1	0.921	2269	7.7	0.920
5	2285	7.2	0.927	2277	9.5	0.924
sd	25.8	0.7	0.010	12.5	1.7	0.005
CV	1.1	9.2	1.1	0.6	16.7	0.6
m	2266	7.9	0.919	2261	10.2	0.917

Tabella 6. Sensore A1. Risultati delle misure eseguite sul campione MB di G3.

	Faccia A			Faccia B		
	F _r	A	f _r	F _r	A	f _r
1	2235	9.0	0.907	2230	10.0	0.905
2	2169	9.7	0.880	2209	9.0	0.896
3	2249	8.4	0.912	2206	9.6	0.895
4	2245	10.9	0.911	2243	9.8	0.910
5	2273	9.1	0.922	2271	9.1	0.921
sd	39.0	1.0	0.016	26.7	0.4	0.011
CV	1.7	10.1	1.7	1.2	4.7	1.2
m	2234	9.4	0.906	2232	9.5	0.905

Tabella 7. Sensore A1. Risultati delle misure eseguite sul campione MR di G3.

	Faccia A			Faccia B		
	F _r	A	f _r	F _r	A	f _r
1	2218	5.4	0.900	2223	5.5	0.902
2	2217	5.2	0.899	2233	5.5	0.906
3	2209	5.7	0.896	2228	5.6	0.904
4	2221	5.4	0.901	2227	5.1	0.903
5	2222	5.7	0.901	2228	5.8	0.904
sd	5.1	0.2	0.002	3.6	0.2	0.001
CV	0.2	4.0	0.2	0.2	4.4	0.2
m	2217	5.5	0.900	2228	5.5	0.904

Tabella 8. Sensore A1. Risultati delle misure eseguite sul campione MG di G3.

Risultati ottenuti col sensore C1

Le tabelle 9 ÷ 12 riportano i risultati delle misure eseguite col sensore C1. La capacità misurata con la sonda in aria è $C_{aria} = 25.78$.

	Faccia A	Faccia B
	C	C
1	32.84	32.73
2	32.81	33.23
3	33.00	32.62
4	33.03	31.80
5	33.03	31.57
sd	0.1	0.7
CV	0.3	2.1
m	32.9	32.4

Tabella 9. Sensore C1. Risultati delle misure eseguite sul campione N1.

	Faccia A	Faccia B
	C	C
1	61.49	50.01
2	61.08	51.94
3	60.49	50.28
4	54.96	49.16
5	58.86	51.05
sd	2.7	1.1
CV	4.5	2.1
m	59.4	50.5

Tabella 10. Sensore C1. Risultati delle misure eseguite sul campione MB di G3.

	Faccia A	Faccia B
	C	C
1	68.80	64.63
2	69.97	65.14
3	70.33	65.84
4	70.21	65.98
5	66.70	63.67
sd	1.5	0.9
CV	2.2	1.5
m	69.2	65.1

Tabella 11. Sensore C1. Risultati delle misure eseguite sul campione MR di G3.

	Faccia A	Faccia B
	C	C
1	121.65	127.73
2	119.95	140.64
3	119.66	154.27
4	155.86	139.91
5	145.81	160.12
sd	17.1	12.8
CV	12.9	8.9
m	132.6	144.5

Tabella 12. Sensore C1. Risultati delle misure eseguite sul campione MG di G3.

Analisi dei risultati

Dati grezzi di A1

Le figure 18 e 19 mostrano i diagrammi Box-Whisker delle frequenze di risonanza misurate col sensore A1 (vedi tabelle 5 ÷ 8).

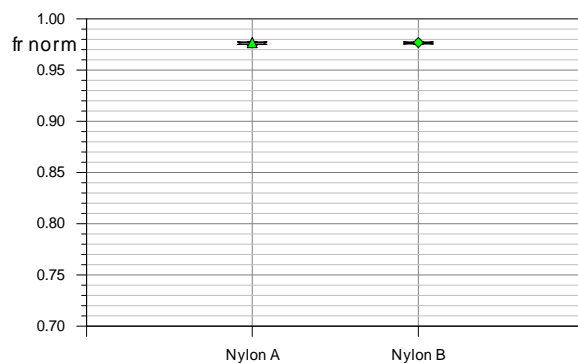


Figura 18. Diagramma Box-Whisker dei valori della frequenza di risonanza sulle due facce del campione N1.

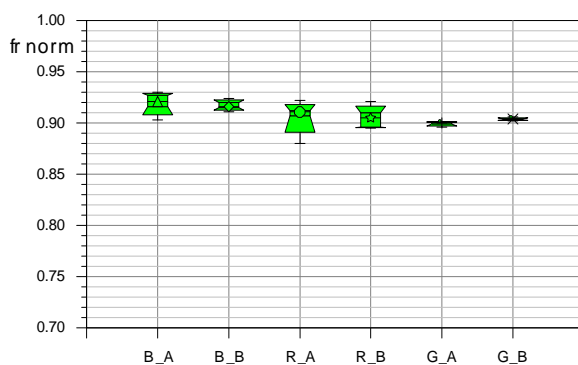


Figura 19. Diagramma Box-Whisker dei valori della frequenza di risonanza sulle due facce dei campioni di marmo del gruppo G3.

Le figure 20 e 21 mostrano i diagrammi Box-Whisker dei valori di ampiezza del picco di risonanza misurate col sensore A1 (vedi tabelle 5 ÷ 8).

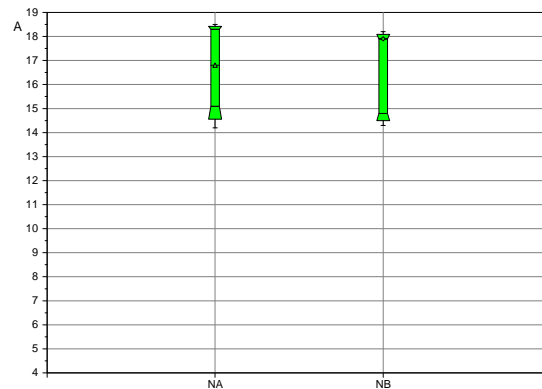


Figura 20. Diagramma Box-Whisker dei valori di ampiezza del picco di risonanza sulle due facce del campione N1.

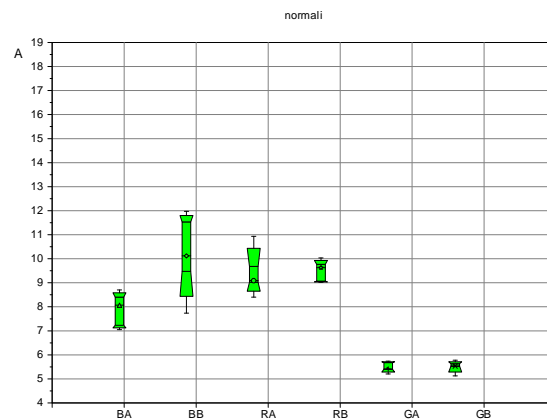


Figura 21. Diagramma Box-Whisker dei valori di ampiezza del picco di risonanza sulle due facce dei campioni di marmo del gruppo G4.

Le frequenze di risonanza ottenute nelle 5 posizioni di misura sulle due facce del campione N1 (vedi figura 18) sono molto simili tra loro ($CV=0.1\%$): ciò è dovuto all'omogeneità del campione.

Per i campioni MB e MR si hanno dispersioni notevolmente superiori a quelle di N1 ($CV \approx 1.1\%$) (vedi figura 19); per i campioni MG si ha una dispersione inferiore a quella di MB e MR, e superiore a quella di N1 ($CV \approx 0.2$): ciò è dovuto alla struttura del materiale lapideo, che è meno omogeneo dei materiali plastici

Le ampiezze del picco di risonanza ottenute nelle 5 posizioni di misura sulle due facce del campione N1 (vedi figura 20) sono molto simili tra loro ($m \approx 17\text{ dB}$) ed hanno la stessa dispersione ($CV \approx 12\%$).

Per il campione MB sulla faccia A si ha $m \approx 8\text{ dB}$, inferiore al valor medio sulla faccia B ($m \approx 10\text{ dB}$); per i campioni MR e MG si hanno gli stessi valori medi su entrambe le facce.

Per il campione MG si hanno il valor medio di A più basso ($m \approx 6$ dB) e la dispersione di valori più bassa ($CV \approx 4$ %): la struttura di MG sembra diversa da quella degli altri due campioni lapidei.

La figura 22 mostra il diagramma Ampiezza-Frequenza dei valori misurati col sensore A1 sui campioni lapidei del gruppo G3.

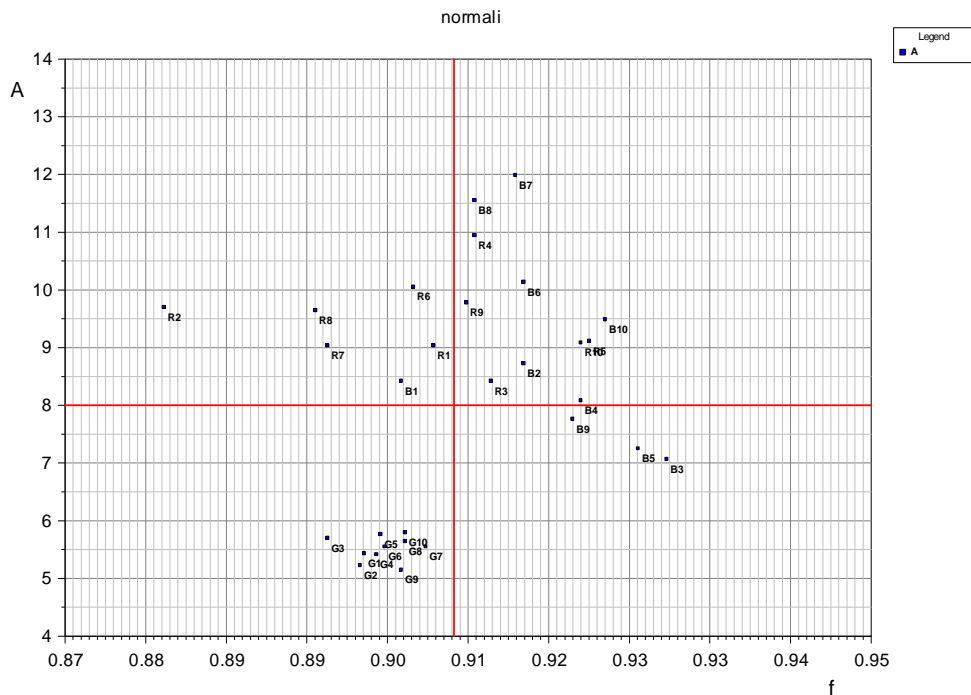


Figura 22. Valori di ampiezza del picco di risonanza in funzione dalla frequenza di risonanza, ottenuti nelle misure locali sui campioni lapidei.

I valori di MB e MR sono espansi su in intervallo relativamente ampio di frequenza, hanno un'ampiezza di picco maggiore di 6 dB e sono sovrapposti; invece, le misure relative a MG sono ben raggruppate in un piccolo intervallo di frequenza e di ampiezza, e sono separate da quelle relative agli altri campioni lapidei.

Dati grezzi di C1

Le figure 23 e 24 mostrano i diagrammi Box-Whisker delle capacità misurate col sensore C1 (vedi tabelle 9 ÷ 12).

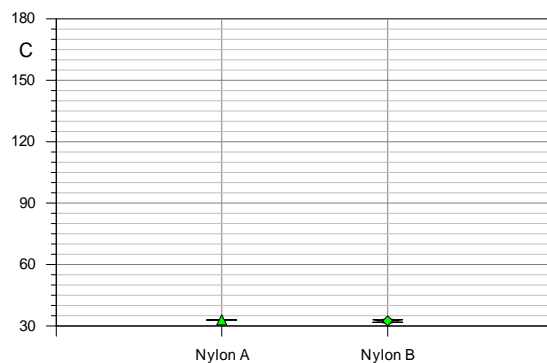


Figura 23. Diagramma Box-Whisker dei valori di capacità misurati col sensore C1 sulle due facce del campione N1.

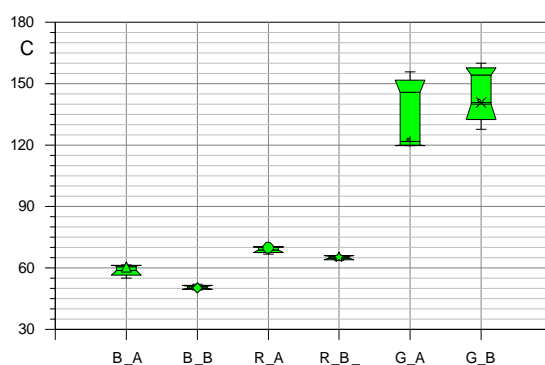


Figura 24. Diagramma Box-Whisker dei valori di capacità misurati col sensore C1 sulle due facce dei campioni di marmo del gruppo G3.

Per il campione N1 (vedi figura 23) i valori medi delle misure sulle due facce sono sostanzialmente identici ($m \approx 10$ pF); la dispersione delle misure è la più bassa tra i campioni esaminati ($CV \approx 1$ %).

Per i campioni MB e MR si hanno il valor medio delle misure sulla faccia A è maggiore di quello delle misure sulla faccia B molto simili (vedi figura 24). I valori di misura per MB sono leggermente inferiori a quelle di MR; la dispersione dei valori di MB è più alta ($CV \approx 4$ %) di quella di MR ($CV \approx 4$ %).

Per il campione MG si hanno il valor medio e la dispersione più alti ($m \approx 120$ pF, $CV \approx 10$ %): anche per le misure eseguite col sensore C1 la struttura di MG sembra diversa da quella degli altri due campioni lapidei.

Valori di permittività

La figura 25 mostra il grafico dei valori di permittività ottenuti coi due sensori nelle 5 posizioni di misura su ciascuna faccia dei campioni del gruppo G3; per ciascun marmo gli indici 1 ÷ 5 individuano le posizioni di misura sulla faccia A, gli indici 6 ÷ 10 quelle sulla faccia B.

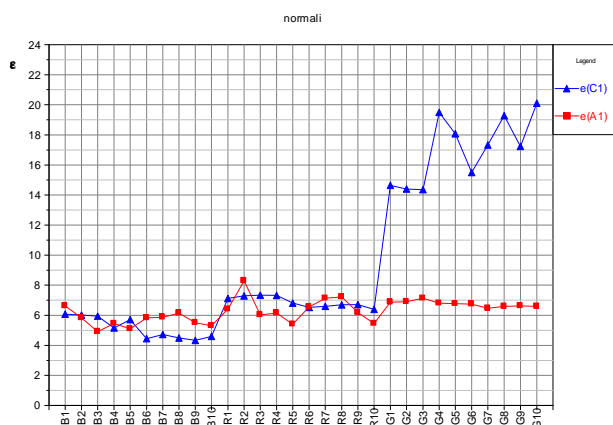


Figura 25. Permittività misurata col sensore A1 e col sensore C1 sulle due facce dei campioni lapidei.

I valori ottenuti col sensore A1 non mostrano mediamente differenze tra le due facce dei tre campioni; la permittività media stimata per MB ($\epsilon \approx 5.5$) è minore di quella stimata per MR e MG ($\epsilon \approx 6.5$).

I valori ottenuti col sensore C1 mostrano invece differenze tra le due facce dei campioni.

Per MB e MR le permittività stimate sulla faccia A sono leggermente maggiori di quelle della faccia B ($\Delta\epsilon \approx 0.5$). Questo comportamento è imputabile al fatto che la faccia A, semilavorata, è lucida, mentre la faccia B, non lavorata, è ruvida al tatto: di conseguenza, pur appoggiando il sensore nello stesso modo sulle due facce, nell'ispezione della faccia B tra il piano del condensatore e il campione rimane intrappolata una certa quantità di aria che determina un abbassamento della capacità di misura e conseguentemente della stima della permittività.

I valori di MR sono maggiori di quelli di MB ($\Delta\epsilon \approx 1.5$): esiste quindi una differenza tra le strutture dei due campioni.

I valori stimati per MG sono notevolmente superiori a quelli degli altri due marmi e presentano una notevole dispersione; i valori di misura sul lato A del campione sono mediamente minori di quelli sul lato B.

I valori ottenuti col sensore A1 sui campioni MB e MR sono simili a quelli ottenuti col sensore C1 ($\Delta\epsilon \leq 1.5$). Invece, per il campione MG le misure ottenute col sensore A1 sulle due facce del campione trattato e di quello non trattato sono molto simili e differiscono notevolmente da quelle ottenute col sensore C1 ($\Delta\epsilon \approx 10$): per questo tipo di marmo le caratteristiche dello strato superficiale differiscono da quelle degli strati interni molto di più di quanto accade per gli altri due tipi.

La figura 26 mostra il diagramma Permittività misurata con C1 - Permittività misurata con A1 sui campioni lapidei del gruppo G3.

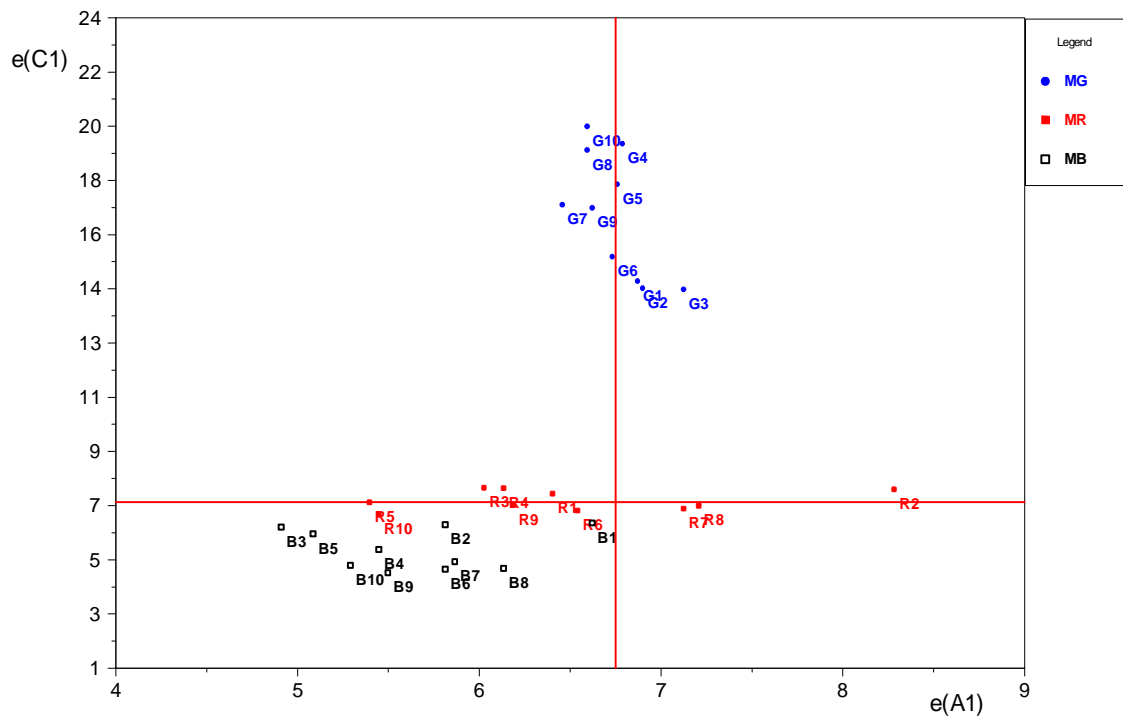


Figura 26. Valori della permittività stimata col sensore A1 e col sensore C1 nelle misure locali sui campioni lapidei.

In questo grafico i punti relativi ai campioni MG sono nettamente separati da quelli relativi agli altri campioni; si ha una piccola dispersione dei valori ottenuti col sensore A1 ($\Delta\epsilon \approx 0.5$) ed una grossa dispersione dei valori ottenuti col sensore C1 ($\Delta\epsilon \approx 6$).

I punti relativi ai campioni MB e MR sono abbastanza separati. Per i valori ottenuti col sensore A1 si ha $\Delta\epsilon \approx 1.5$ per MB e $\Delta\epsilon \approx 2.5$ per MR, per i valori ottenuti col sensore C1 si ha $\Delta\epsilon \approx 2$ per MB e $\Delta\epsilon \approx 1$ per MR.

Conclusioni

Entrambe le tecniche per l'analisi non distruttiva di materiali dielettrici descritte nel lavoro forniscono in ogni punto di misura dei risultati, dipendenti dal volume di materiale in esame, la cui area di base è sostanzialmente uguale a quella del sensore impiegato (antenna a patch o condensatore complanare), e la cui altezza dipende dal tipo di sensore impiegato.

Usando il sensore a condensatore, si ha un'interazione del campo col materiale in una profondità di qualche millimetro, e si ottiene così un'analisi dello strato superficiale del campione in esame. Con questo sensore è stato quindi possibile distinguere le due facce di uno stesso campione lapideo grazie alla loro diversa rugosità; inoltre si è riscontrata una forte differenza della permittività del marmo MG rispetto agli altri due. Tale differenza può essere imputata alla presenza di un sottile strato di materiale ad alta permittività sulla superficie del campione MG, oppure ad una diversa struttura del campione stesso.

Invece, con l'antenna a patch l'interazione del campo vicino col materiale avviene per una profondità di qualche centimetro e si ottiene così un'analisi degli strati prossimali del campione in esame. Con questo tipo di analisi non è possibile distinguere tra loro né le singole facce dei campioni di marmo, né un campione dall'altro. L'antenna inoltre non ha riscontrato nemmeno particolari diversità nel marmo MG, apparse così evidenti col condensatore. Ciò può dipendere dal fatto che la misura ottenuta sull'antenna è mediata su uno spessore maggiore rispetto a quello che determina la risposta del sensore a condensatore.

Combinando infine le due tecniche si sono potuti distinguere tra loro i materiali lapidei a nostra disposizione.

Attraverso verifiche in laboratorio si è notato che i due sensori hanno un orientamento, per cui le misure possono essere affette da un piccolo errore ($\approx 3\%$) dovuto al diverso orientamento del sensore sul campione. Ciò comunque non compromette le prestazioni di misura.

Utilizzando questi sensori e infittendo i punti su cui eseguire misure locali (per esempio, attraverso uno scanner elettromeccanico), è possibile creare mappe della permittività superficiale o prossimale dei campioni.

In conclusione, il sistema d'ispezione impiegato consente di eseguire in modo semplice i due tipi d'ispezione descritti, archiviando i risultati delle misure in modo da consentire differenti tipi di analisi orientate alla caratterizzazione dei materiali esaminati.

L'impiego del sistema è previsto per la ricerca di difetti superficiali o prossimali in materiali dielettrici, mediante il confronto tra le misure correnti e quelle ottenute come riferimento su campioni con condizioni note: l'individuazione di anomalie, corrispondenti a possibili difetti, è basata sulla determinazione di variazioni della grandezza misurata (frequenza di risonanza o capacità). Il sistema è comunque in grado di fornire stime accettabili della permittività del materiale esaminato.

Riferimenti

- 1) E. Bozzi, M. Chimenti, E. Fantini, G. Gagliardi, M. Orsolini, A. Ribolini, A. Zucchelli, *“Progetto di un sistema per misure non invasive a microonde”*, Rapporto Tecnico B4-03 ISTI-CNR, febbraio 2005.
- 2) E. Bozzi, M. Chimenti, O. Salvetti, A. Zucchelli, *“Ispezione mediante ultrasuoni di materiali lapidei; risultati preliminari su campioni di marmo”*, Rapporto tecnico B4-27 ISTI-CNR, ottobre 2003.
- 3) G. Gagliardi, A. Zucchelli, *“Analisi mediante simulazione e sperimentazione di sensori a risonanza realizzati con antenne a patch per l’indagine non distruttiva a microonde su materiali dielettrici”*, Nota Interna B4-12 I.S.T.I. – CNR Pisa, Novembre 2002.
- 4) E. Bozzi, M. Chimenti, *“Misura della costante dielettrica di campioni solidi mediante sensore elettromagnetico ”*, Rapporto tecnico B4-02 ISTI-CNR, febbraio 2005.
- 5) E. Bozzi, M. Chimenti, E. Fantini, G. Gagliardi, A. Landucci, A. Ribolini, *“Prototipo del Modulo di Controllo”*, Rapporto tecnico B4-04 ISTI-CNR, maggio 2007.
- 6) E. Bozzi, M. Chimenti, A. Zucchelli, *“Un metodo per il rilevamento della porosità di materiali dielettrici mediante misure in campo vicino con antenne a patch”*, Rapporto tecnico B4-02 ISTI-CNR, aprile 2006.