



Consiglio Nazionale delle Ricerche



Nota Interna

**Studio di fattibilità di un sistema di misura a microonde
per indagini non invasive su manufatti in muratura**

Edoardo Bozzi, Guido Gagliardi, Emanuele Salerno

B4-06
apr-2002

I.E.I.
ISTITUTO DI
ELABORAZIONE DELLA
INFORMAZIONE

Pisa





Consiglio Nazionale delle Ricerche

**Studio di fattibilità di un sistema di misura a microonde
per indagini non invasive su manufatti in muratura**

Edoardo Bozzi, Guido Gagliardi, Emanuele Salerno

B4-06
apr-2002

Studio di fattibilità di un sistema di misura a microonde per indagini non invasive su manufatti in muratura

Edoardo Bozzi, Guido Gagliardi, Emanuele Salerno

CNR – Istituto di Elaborazione della Informazione

Via Moruzzi, 1, 56124 Pisa

Abstract

In questo studio si analizza la fattibilità di un sistema di misura a microonde per indagini non invasive su manufatti in muratura di interesse monumentale, la cui realizzazione è prevista tra le attività del progetto coordinato *Un sensore portatile per la diagnostica elettromagnetica non invasiva dello stato interno di strutture monumentali*, nell'ambito del programma *Agenzia 2000* del CNR. Lo scopo di tutto il sistema sarà quello di ottenere immagini della struttura interna di murature, con riferimento particolare alla presenza di cavità, inclusioni metalliche, e zone disomogenee di qualsiasi tipo, caratterizzate da variazioni della costante dielettrica complessa del materiale in esame. Dopo aver analizzato le specifiche iniziali del sistema, si prendono in esame le caratteristiche dei campioni di prova e del sistema di scansione e misura, compresi i trasduttori di trasmissione e ricezione, e si fa un'analisi approssimativa dei costi per la realizzazione di un sistema ridotto in geometria monostatica.

1. Introduzione

Le valutazioni riportate in questa nota rientrano nel lavoro preparatorio per l'attività prevista dal progetto coordinato *Un sensore portatile per la diagnostica elettromagnetica non invasiva dello stato interno di strutture monumentali*, finanziato nell'ambito del programma *Agenzia 2000* del CNR, proposta codice CNRC005511_003. Per l'unità operativa presso l'IEI-CNR l'impegno previsto è di 14 mesi-persona per un anno, a fronte di un finanziamento richiesto di € 20658. L'obiettivo cui tende il progetto è la realizzazione di un sistema elettromagnetico per la caratterizzazione non invasiva "sul

campo" di strutture in muratura, con particolare riferimento a manufatti di interesse monumentale. Naturalmente, sia per la limitatezza dei termini temporali posti dal progetto sia per l'entità del finanziamento effettivamente ricevuto, non si può pensare di realizzare una versione definitiva e utilizzabile sul campo di un simile sistema, ma le misure e la strumentazione che si realizza dovrebbero essere fatte tenendo presente lo scopo finale. Caratterizzare la struttura interna di manufatti in muratura significa rilevare la presenza, la natura e la forma geometrica di eventuali inclusioni presenti nei manufatti stessi, quali ad esempio vuoti, tubi o barre metalliche, travi, zone con contenuto di umidità eterogeneo, crepe, ecc. Voler indagare queste caratteristiche servendosi di radiazioni elettromagnetiche equivale a dire che si vuole realizzare una mappa della costante dielettrica complessa del manufatto. In funzione della costante dielettrica media dei materiali che si vogliono indagare e della profondità che si vuole raggiungere vanno stabilite le frequenze da utilizzare per la radiazione esplorante. I prodotti finali del sistema da realizzare dovrebbero essere immagini tomografiche ricostruite per mezzo di opportuni algoritmi sulla base di misure coerenti multifrequenza e con diverse geometrie di misura. La parte di progetto spettante all'unità IEI consiste nella realizzazione di un sistema da laboratorio per il posizionamento del sensore e le misure di campo elettromagnetico, corredato con il relativo software e hardware per il controllo del sistema stesso, la preelaborazione e la gestione dei dati misurati. L'implementazione degli algoritmi tomografici è riservata ad altre unità operative.

La prima fase del progetto prevede una serie di riunioni tra le varie unità operative allo scopo di definire delle specifiche iniziali alle quali attenersi per la realizzazione delle prime prove sperimentali, tese essenzialmente alla definizione di una geometria di misura e una banda di lavoro definitive per il sistema di misura. Ad oggi non è ancora stato possibile convocare tali riunioni, per cui il presente studio si basa sulle specifiche provvisorie ricevute dal coordinamento del progetto, descritte e discusse al paragrafo successivo. A partire da tali specifiche, sono state definite le caratteristiche ed è stato stilato un progetto di massima del sistema di misura da laboratorio, dal quale sono emerse le esigenze di materiale e di lavoro necessarie a completare la parte di progetto a noi assegnata, compatibilmente con le disponibilità finanziarie. Nel seguito della presente nota si prendono in esame le esigenze emergenti dalle specifiche provvisorie ricevute e si

ipotizza la struttura di un sistema di misura da laboratorio pensato anche per essere adattato ad un impiego sul campo. Un'analisi dei costi di prima approssimazione servirà ad avere un'idea della compatibilità del progetto con le disponibilità economiche. Prima della realizzazione del sistema sperimentale definitivo, tuttavia, sarà bene prevedere una fase di misure preliminari da realizzare con materiale già tutto disponibile o facilmente reperibile.

2. Specifiche iniziali

Per quanto riguarda il sistema di misura, il coordinamento del progetto ha fatto pervenire delle specifiche condizionate dal fatto che l'algoritmo di inversione tomografica previsto è basato su un modello di scattering lineare con opportuna funzione di Green, simile ai comuni algoritmi di *diffraction tomography*, ma con soluzione derivante dalla decomposizione ai valori singolari di un sistema di equazioni lineari. La lista delle specifiche può essere divisa in due gruppi di requisiti, uno relativo alla geometria di misura (quindi anche al sistema di posizionamento) e alle caratteristiche dei campioni di muratura, e uno relativo al sistema di misura e alla caratterizzazione dei sensori. Questi due gruppi di requisiti sono qui di seguito elencati separatamente e seguiti da una breve discussione. Partiamo dai requisiti sulla geometria del sistema.

- 1) *Configurazione di misura in riflessione (trasmettitore e ricevitore dallo stesso lato del campione sotto misura);*
- 2) *Scansione lineare per geometrie bidimensionali cilindriche;*
- 3) *Misure multivista (diverse posizioni del trasmettitore) e multistatiche (diverse posizioni del ricevitore) di campo diffuso (differenza tra il campo totale in presenza di strutture diffondenti e campo incidente in assenza di queste ma in presenza di struttura muraria o semispazio);*
- 4) *Misure multivista ma monostatiche (o bistatiche fisse): trasmettitore e ricevitore coincidono o viaggiano insieme a distanza fissa;*
- 5) *È comunque necessaria la conoscenza accurata (con precisione dell'ordine di $\mathcal{N}10$) della posizione di trasmettitore e ricevitore, ottenibile ad esempio montando le due antenne su slitte comandate da PC;*

- 6) *Oggetti da misurare: cilindri conduttori e/o dielettrici sia in spazio libero (preliminari per valutare l'accoppiamento tra le antenne) che immersi nella muratura;*
- 7) *Occorrono anche campioni di muratura privi di oggetti inclusi, delle stesse caratteristiche chimico-fisiche di quelli utilizzati per le misure, allo scopo di valutare il campo incidente.*

Da questo elenco si ricavano le prime indicazioni su come dovrà essere fatto il sistema. Dalle esigenze 1)-4) si evince innanzi tutto che per realizzare le misure complete dovranno essere disponibili due trasduttori, uno in trasmissione e uno in ricezione. Visto poi che la geometria del campione è considerata cilindrica (ovvero, con caratteristiche fisiche invarianti rispetto a una direzione nello spazio), la scansione potrà essere semplicemente lineare. Ciò vuol dire che i posizionatori di tipo x - y già disponibili presso il nostro laboratorio potranno eventualmente essere usati su un solo grado di libertà. Essendovi poi l'esigenza di misure solo in riflessione, non sarà necessario prevedere sistemi di posizionamento complicati sui due lati della parete. D'altra parte, questa caratteristica è prevista per tenere conto del fatto che il sistema tomografico deve poter essere utilizzato sul campo, in condizioni in cui anche banali problemi di accessibilità o di particolare forma dei manufatti potrebbero impedire l'installazione e l'allineamento di posizionatori troppo complicati. Uno dei due trasduttori, quello di illuminazione, potrebbe dunque spostarsi solidalmente ad un posizionatore lineare sul quale sia montato il trasduttore di ricezione. Le posizioni relative dei due trasduttori possono così essere conosciute con estrema esattezza e certamente entro i limiti stabiliti dall'esigenza 5), che richiede una precisione al di sotto di un decimo della lunghezza d'onda: teniamo presente che se si intende lavorare nel campo delle microonde la lunghezza d'onda in aria sarà comunque dell'ordine di parecchi centimetri. Il punto 3) richiama anche esigenze da imporre allo strumento di misura: la realizzazione di misure per differenza impone all'apparato requisiti di sensibilità e di robustezza nei confronti del rumore, di cui si dovrà tener conto nello stabilire i parametri di funzionamento dell'apparato stesso. Per quanto riguarda i punti 6) e 7), i requisiti minimi da soddisfare prevedono almeno un campione omogeneo di muratura, di dimensioni opportune, e un campione di caratteristiche geometriche esterne e materiale esattamente identici, nel quale possano

essere inserite le inclusioni diffondenti che si ha intenzione di mappare, e che dovranno anche poter essere montate su un supporto che consenta la misura in spazio libero. Nel caso di misure solo monostatiche (punto 4), basterà disporre di un solo trasduttore, che potrà quindi essere montato sul sistema di posizionamento principale senza bisogno di un posizionatore aggiuntivo per il trasduttore di misura. Cade così l'esigenza di avere una misura della posizione relativa dei trasduttori e rimane solo da assicurarsi della ripetibilità del posizionamento dell'illuminatore.

I requisiti per il sistema di misura a microonde sono i seguenti:

- 8) *La banda di frequenze di interesse deve essere la più grande possibile compatibilmente con il sensore;*
- 9) *Le frequenze utili vanno da 800 MHz in su;*
- 10) *Occorrerebbe la caratterizzazione dei trasduttori in presenza della struttura muraria (ossia o il campo lontano o lo spettro di onde piane trasmesse in modulo e fase). In ogni caso occorre il diagramma di irradiazione in un solo taglio principale dello spazio libero;*
- 11) *L'algoritmo di inversione prevede in ingresso il modulo e la fase del campo diffuso in un insieme equispaziato di punti di misura all'interfaccia (o vicino ad essa) in un intervallo di frequenze assegnato.*

Le nostre possibilità di effettuare misure in modulo e fase sono innanzi tutto limitate dalla strumentazione a disposizione. Nel nostro laboratorio disponiamo di un analizzatore vettoriale di reti modello Hewlett Packard 8753B, con sorgente sintetizzata integrata e *test set* per misure in trasmissione e riflessione. La banda coperta da questo strumento va da 300 kHz a 3 GHz, per cui, per le esigenze 8) e 9), la banda di lavoro dovrebbe essere comunque inclusa nell'intervallo 800 MHz - 3 GHz. L'effettiva copertura di questa banda dipenderà dalla banda passante delle antenne a disposizione. Tra le antenne già disponibili ve ne sono diverse che coprono diverse sottobande dell'intervallo considerato. L'ideale sarebbe trovare un trasduttore a banda talmente larga da coprire da solo le esigenze di misura. Tale trasduttore non è disponibile, per cui bisognerebbe trovarne uno sul mercato. La caratterizzazione dei trasduttori in presenza di muratura (punto 10) sarebbe possibile, qualora fossero conosciute in anticipo con sufficiente approssimazione le caratteristiche dielettriche delle murature sotto indagine, facendo ricorso a un codice di

simulazione elettromagnetica. Uno studio del genere esula certamente dalle nostre possibilità, in quanto richiederebbe un notevole investimento in tempo; l'uso delle antenne commerciali, tuttavia, dovrebbe assicurare la disponibilità dei diagrammi di irradiazione in spazio libero. Come già anticipato, il punto 11) introduce l'esigenza di effettuare misure in modulo e fase, e pone anche un vincolo al sistema di posizionamento, in quanto prescrive che i trasduttori siano posti in prossimità dell'interfaccia ariamuratura. Nelle applicazioni reali, la distanza del trasduttore dalla parete dovrebbe essere stabilita in base all'entità delle asperità presenti nella parete stessa. Come si è detto, la necessità di effettuare misure per differenza impone dei requisiti allo strumento di misura. Non è però possibile stabilirli in via preliminare, in quanto non si conosce la potenza relativa del segnale utile, ovvero della differenza tra il segnale in presenza di diffusori e il segnale proveniente da muratura omogenea. Si potrebbe fare una previsione di massima, ma indicazioni veramente affidabili possono essere ottenute solo da misure preliminari, fidando sul fatto che il nostro analizzatore vettoriale ha sensibilità e dinamica molto elevate (il livello di rumore può essere portato fino a -100 dBm, la dinamica fino a 100 dB, l'interferenza intercanale è tipicamente di -90 dB nella banda di nostro interesse, l'accuratezza relativa è di ± 0.5 dB), ed è in grado di fare misure con minima banda a frequenza intermedia di 10 Hz e di ridurre ulteriormente il rumore mediando su diverse misure successive. Le condizioni sperimentali che siamo in grado di ottenere in laboratorio, poi, assicurano una buona ripetibilità dei risultati.

3. Preparazione dei campioni

Almeno in fase di misure preliminari, bisognerebbe disporre di campioni di muratura il più possibile omogenei, al fine di mettersi in grado di valutare la bontà del sistema di misura e dell'algoritmo di ricostruzione. Una buona soluzione a queste esigenze potrebbe essere data dal calcestruzzo, che consentirebbe di preparare i due campioni necessari utilizzando esattamente la stessa miscela dei vari componenti, casseforme identiche e la stessa tecnica di gettata. Le cavità nel campione destinato ad accogliere gli oggetti diffondenti potrebbero essere ottenute includendo nella gettata dei tubi in materiale plastico di diametro opportuno, che potrebbero poi essere lasciati vuoti o riempiti con materiali di diversa natura, liquidi, granulari o in barre.

Le dimensioni devono essere stabilite in base alla lunghezza della linea di scansione che si intende sfruttare e alla profondità alla quale si vogliono rilevare le disomogeneità dielettriche. Un vincolo da tenere comunque presente è il peso, che dovrà essere compatibile con la movimentazione del campione in laboratorio. Oltre che dalla lunghezza della linea di scansione, le dimensioni del campione saranno definite dalle dimensioni fisiche del trasduttore. È necessario infatti che l'escursione dell'antenna lungo il campione mantenga sempre l'antenna sufficientemente lontana dai bordi, in maniera da simulare la scansione su un campione di lunghezza indefinita. Ciò vale per la dimensione del campione parallela alla linea di scansione. Da considerazioni analoghe, cioè dall'esigenza di simulare effettivamente la misura su un oggetto cilindrico, risulta un valore minimo per la dimensione del campione in direzione ortogonale alla linea di scansione. Assumendo una geometria di misura del tipo mostrato in Figura 1, si trova subito che le dimensioni del campione devono soddisfare le seguenti relazioni

$$L_c \geq L_i + L_s + D_t + D_r + 2L_g \quad (1)$$

$$H_c \geq \max\{D_r, D_t\} + 2L_g \quad (2)$$

in cui L_c e H_c sono la lunghezza e l'altezza del campione, L_i e L_s sono rispettivamente le corse dell'antenna trasmittente e dell'antenna ricevente, D_t e D_r i loro diametri, e L_g è la distanza minima che si vuole mantenere tra gli elementi di antenna e i bordi del campione. Quello mostrato in figura è solo uno dei possibili schemi per la misura in configurazione bistatica. Per ogni schema con scansione lineare, tuttavia, l'ingombro dell'apparato di misura produce grosso modo gli stessi vincoli per le dimensioni del campione. Nel caso particolare di misure monostatiche, si possono usare le stesse relazioni (1) e (2), con L_s e D_r uguali a zero, per cui

$$L_c \geq L_i + D_t + 2L_g \quad (3)$$

$$H_c \geq D_t + 2L_g \quad (4)$$

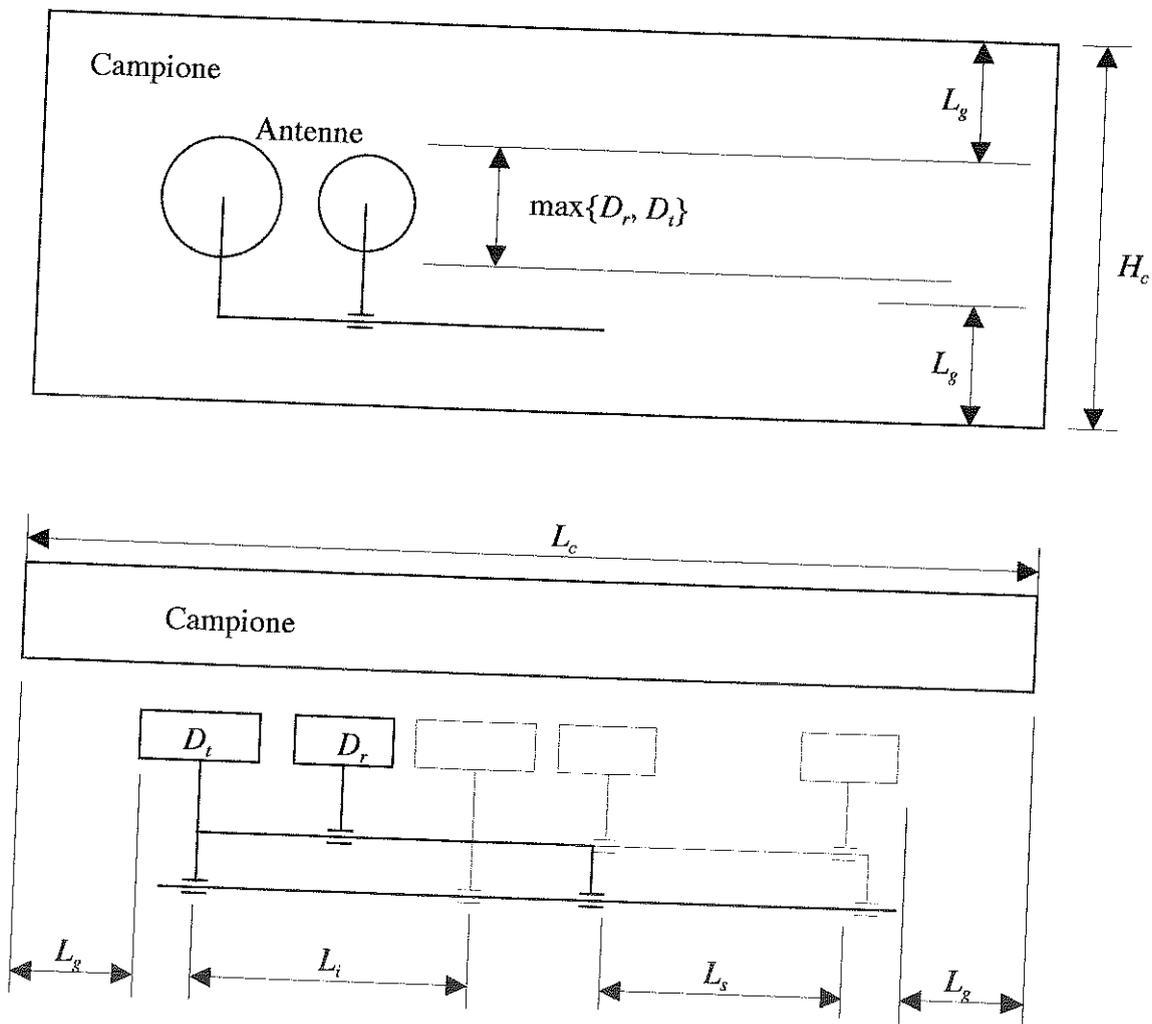


Fig. 1: Dimensionamento del campione di muratura

Se ad esempio volessimo realizzare un campione per misure monostatiche con l'antenna attualmente disponibile presso il nostro laboratorio (Wavetronics 6002-00) che è una tromba piramidale di ingombro orizzontale di circa 40 cm e verticale di circa 30 cm, assumendo di volere $L_g = 15$ cm e $L_i = 40$ cm, dovremmo costruire un campione con $L_c = 110$ cm e $H_c = 60$ cm. Tale campione, se realizzato in calcestruzzo con uno spessore di 20 cm avrebbe una massa di circa 300 kg, non indifferente ma ancora movimentabile in laboratorio, con opportuni accorgimenti. È da notare che siamo comunque sul massimo pensabile per misure in laboratorio con impianto di misura fisso e campioni posizionabili.

Per dimensioni maggiori, occorre pensare a un'area di test dedicata, magari in ambiente esterno, in cui le murature vengono realizzate in posizione fissa e il sistema di posizionamento e misura deve essere facilmente trasportabile e allestibile. Naturalmente un tale ambiente di misura non sarebbe in condizioni controllate come quelle del laboratorio, a scapito della ripetibilità delle misure.

4. Sistema di scansione

La strumentazione da utilizzare per le misure è costituita fundamentalmente dall'analizzatore vettoriale di reti Hp 8753B e da una o due antenne da definire. Il sistema di scansione deve quindi essere in grado di posizionare l'antenna trasmittente rispetto al campione e l'antenna ricevente rispetto alla trasmittente, seguendo i requisiti specificati al Paragrafo 2. Oltre a questo, va anche assicurato un collegamento adeguato tra le antenne e lo strumento di misura e tra questo e l'eventuale computer di controllo. L'esigenza di una procedura automatizzata è senz'altro da prevedere per l'impiego di routine, mentre non è immediata per le prime prove di laboratorio, considerando che l'analizzatore dispone di unità di ingresso-uscita comandabili dal suo stesso pannello frontale, e che, una volta equipaggiata la strumentazione con dispositivi di posizionamento di precisione, questi possono essere azionati anche a mano.

Anche tenendo presente il fatto che il sistema finale dovrà essere utilizzato sul campo, si è pensato di limitare il compito del posizionamento di precisione alla sola antenna ricevente, utilizzando un posizionatore a braccio comandato da computer, solidale al supporto dell'antenna trasmittente. Per ogni diversa posizione di quest'ultima, dunque, l'antenna ricevente potrà essere posizionata con estrema precisione. Quanto al movimento dell'antenna trasmittente, questa potrebbe essere fissata su un carrello che scorre su binari muniti di opportuni distanziatori dalla muratura sotto esame, e che potrebbe anche servire da appoggio per lo strumento con il relativo test set e per l'eventuale computer di controllo. La distanza tra le antenne e il campione sarebbe così assicurata, e la ripetibilità della posizione del carrello lungo il binario potrebbe essere ottenuta per mezzo di un posizionamento a vite senza fine o semplici tacche di riferimento sullo stesso binario. Un altro vantaggio di questo sistema sta nel fatto che tutta la strumentazione si muove solidalmente, e quindi non pone problemi di

collegamento tra elementi in moto relativo tra di loro. Una vista schematica di tutto il sistema nel caso di misura monostatica è mostrata alle Tavole I e II, che danno un'idea dell'ingombro totale di tutto il sistema. L'antenna trasmittente-ricevente rappresentata è la Wavetronics 6002-00 attualmente in nostro possesso. La misura in modalità bistatica potrà essere realizzata partendo da questo stesso sistema, semplicemente fissando al carrello anche il braccio di posizionamento dell'antenna di misura.

5. Modalità di misura

L'analizzatore di reti vettoriale Hp 8753B in nostro possesso è in grado di effettuare misure sia in trasmissione sia in riflessione su tutta la banda richiesta di 0.8-3.0 GHz. È quindi già possibile ottenere dati in geometria sia monostatica sia bistatica. La potenza disponibile in trasmissione da parte della sorgente sintetizzata è di 20 dBm. Se questa non fosse sufficiente ad ottenere misure abbastanza immuni da rumore, occorrerà prevedere un'amplificazione del segnale in trasmissione. Il test-set in trasmissione-riflessione Hp 85044A accetta un potenza massima di 30 dBm al suo ingresso a radiofrequenza. Utilizzando questo dispositivo potremo quindi arrivare a una potenza massima di 1 W in antenna. Lo strumento di misura è dotato di interfaccia standard IEEE-488 verso calcolatore e verso altre eventuali periferiche. Le periferiche attualmente disponibili sono un plotter interfacciato IEEE-488 e un doppio drive per floppy disk Hp 9122C, anch'esso con interfaccia IEEE-488, sul quale potranno essere salvati dati di calibrazione, settaggio dello strumento, e dati di misura, eventualmente già preelaborati per differenza con misure di riferimento. L'uso del drive dovrebbe rendere abbastanza veloci le operazioni per le misure preliminari in laboratorio, anche prima di aver completato l'implementazione del software per la gestione dei sistemi di misura e posizionamento. Almeno una scheda IEEE-488 è già installata su personal computer, completa di interfacce software per diversi linguaggi ad alto livello.

6. Antenne

Gli unici elementi che non siano già disponibili al fine di iniziare la sperimentazione sono una o due antenne che coprano interamente la banda di interesse.

Tipo	Modello	Banda (GHz)	Ingombro h×w×l (mm)	Massa	Prezzo (tasse escl.)
Log-periodica	Schwarzbeck USLP 9142	0.7-5.0			€ 1650.00
Log-periodica	Schwarzbeck USLP 9143	0.3-4.0	550×22×666		€ 2100.00
Horn	Schwarzbeck BBHA9120A	0.75-5.0	142×245×220		€ 2820.00
Biconica precisione	Seibersdorf PCD 8250	0.08-2.5	130×?×147		€ 4022.00
Spirale	BAE Systems AST-1507A	0.5-4.0	90×90×40		\$ 3257.00
Horn	BAE Systems H-1734	0.5-6.0	121×191×154		
Log-periodica	BAE Systems APN-106A	0.3-3.0	250×250×300		
Spirale	European Ant. PSA 75301R/ 170	0.5-3.0	240×240×134	kg 1	€ 2150.00 (1pz) € 1600.00 (cad. × 2pz)
Log-periodica	Trival Antene AD-22/D	1.3-2.7	125×125×450	kg 1.8	€ 290.90

Tab. I

Oltre che i requisiti di banda, sono da soddisfare anche esigenze relative a peso e ingombro, specialmente per quanto riguarda l'antenna ricevente. Da un'indagine sulle antenne disponibili in commercio è risultato che interessanti per banda e ingombro sono

le antenne log-periodiche, le antenne a tromba e le antenne a spirale. In Tabella I sono mostrati alcuni modelli disponibili in commercio con le loro principali caratteristiche geometriche ed elettriche. Tra le differenze di caratteristiche di trasmissione-ricezione, c'è da tener presente che le antenne a spirale funzionano normalmente in polarizzazione circolare mentre tutte le altre funzionano in polarizzazione lineare, per cui c'è eventualmente da tener conto di questa caratteristica nel modellare la propagazione. L'antenna biconica è normalmente usata come strumento di misura di precisione nel campo dell'inquinamento elettromagnetico; da qui la notevole differenza di prezzo rispetto agli altri modelli, salvo il modello a spirale della BAE Systems, che è concepito per impieghi militari.

7. Stima preliminare dei costi

Dato il costo notevole delle antenne, una prima serie di misure potrebbe essere realizzata in geometria monostatica utilizzando un sistema come quello mostrato alle Tavole I e II e l'antenna a tromba wavetronics già disponibile, sulla sua banda passante di 1.7-2.6 GHz. Un supporto per ancorare questa antenna al carrello portastrumenti è descritto alle Tavole III-VII.

In Tabella II è riportata una stima approssimativa di spesa per la realizzazione del prototipo di sistema monostatico e i campioni di muratura.

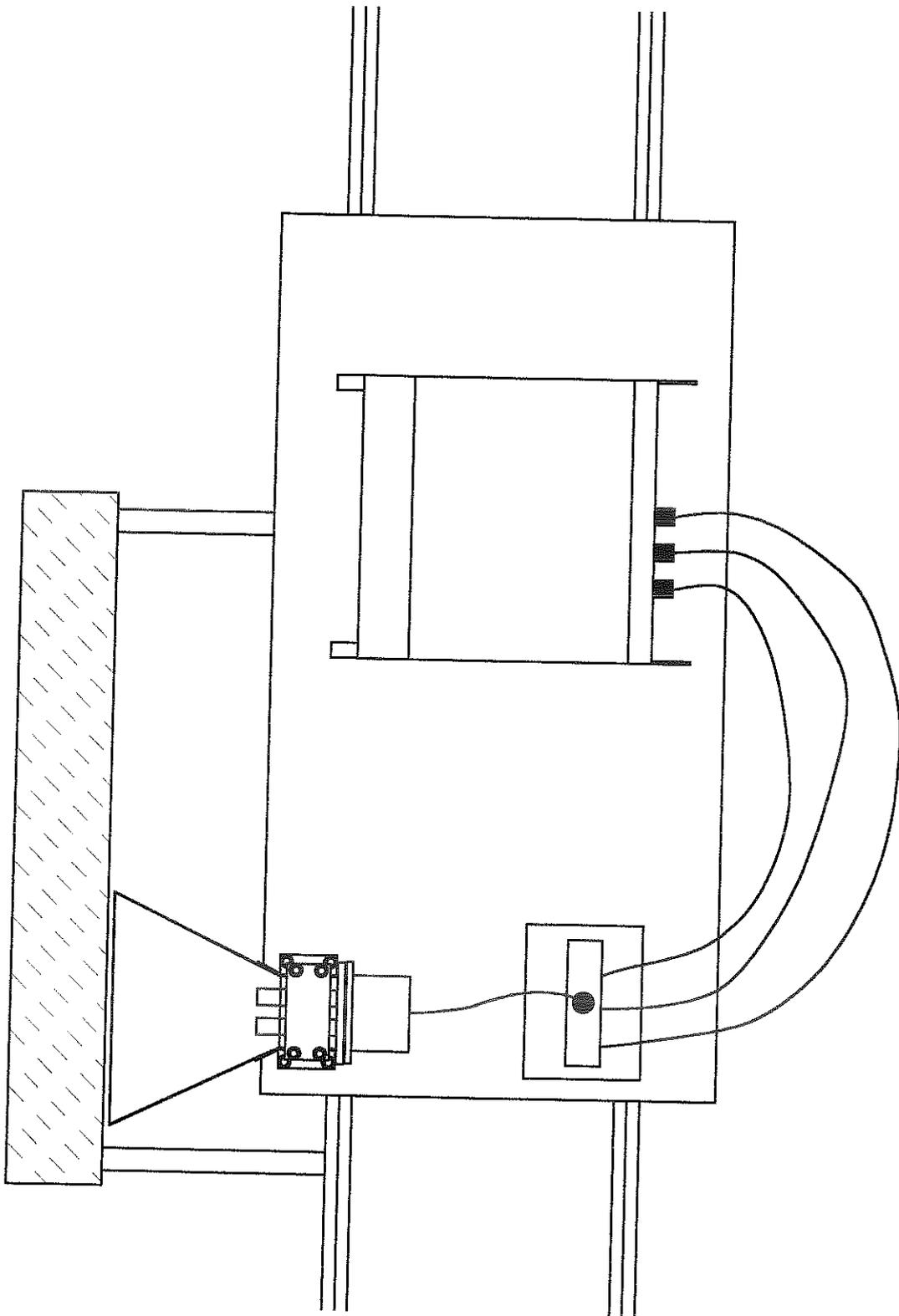
Componente	n.	Costo stimato
Campione calcestruzzo cm 110×60×20	2	€ 100.00
Carrello portastrumenti	1	€ 150.00
Binari con sistema di posizionamento carr. m 2	1	€ 100.00
Supporto antenna a tromba (Tavv. III-VII)	1	€ 50.00
Totale		€ 400.00

Tab. II

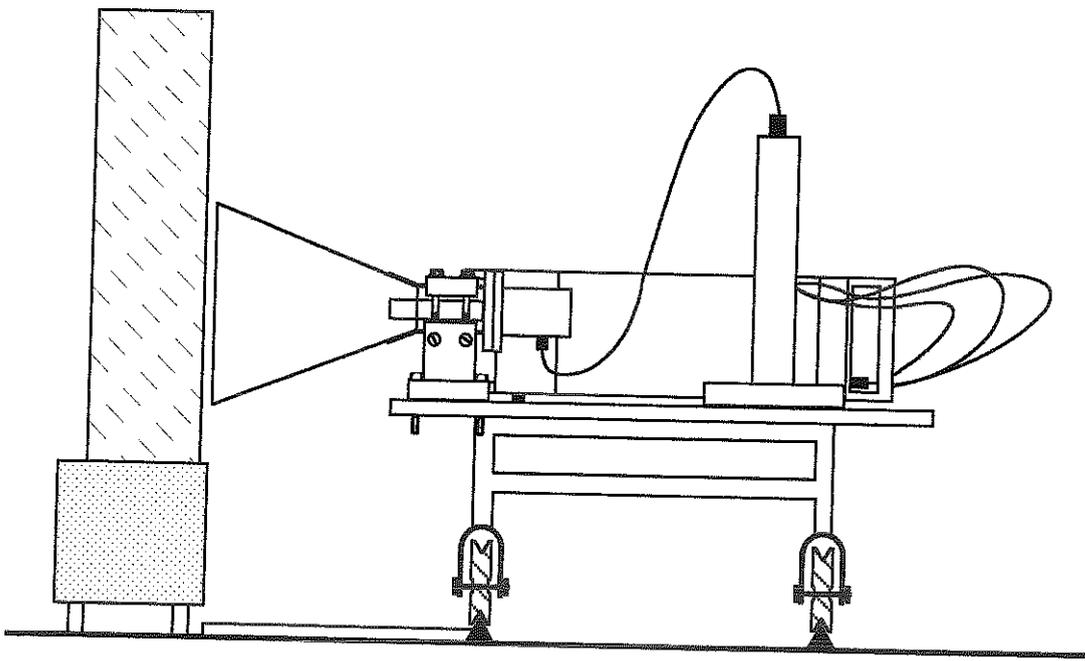
Con questo impegno abbastanza limitato saremo in grado di realizzare una serie preliminare di misure su banda ridotta. Se vogliamo coprire l'intera banda prevista di 0.8-

3.0 GHz, dovremo prevedere almeno l'acquisto di un'antenna adeguata; ne occorreranno due, più un posizionatore per la ricevente, per essere in grado di fare misure bistatiche. Per esempio, il costo di due antenne a spirale European Antennas PSA 75301R/170 dovrebbe aggirarsi, considerando l'IVA al 20%, intorno a € 3800.00: una spesa compatibile con il budget a disposizione, ma da valutare attentamente in funzione della fattibilità delle misure previste. In Tabella II, con "sistema di posizionamento carrello" si deve intendere un sistema ad azionamento manuale che consenta semplicemente la ripetibilità della geometria di misura, e non l'automatizzazione di tutto il processo. Eventuali stime sul costo di un tale sistema potranno essere fatte in una fase successiva del progetto, insieme alle valutazioni relative al prezzo del posizionatore per il sensore bistatico, alle eventuali interfacce hardware e software, e alla stima del tempo totale richiesto per la sperimentazione con i conseguenti costi per personale ed ammortamenti.

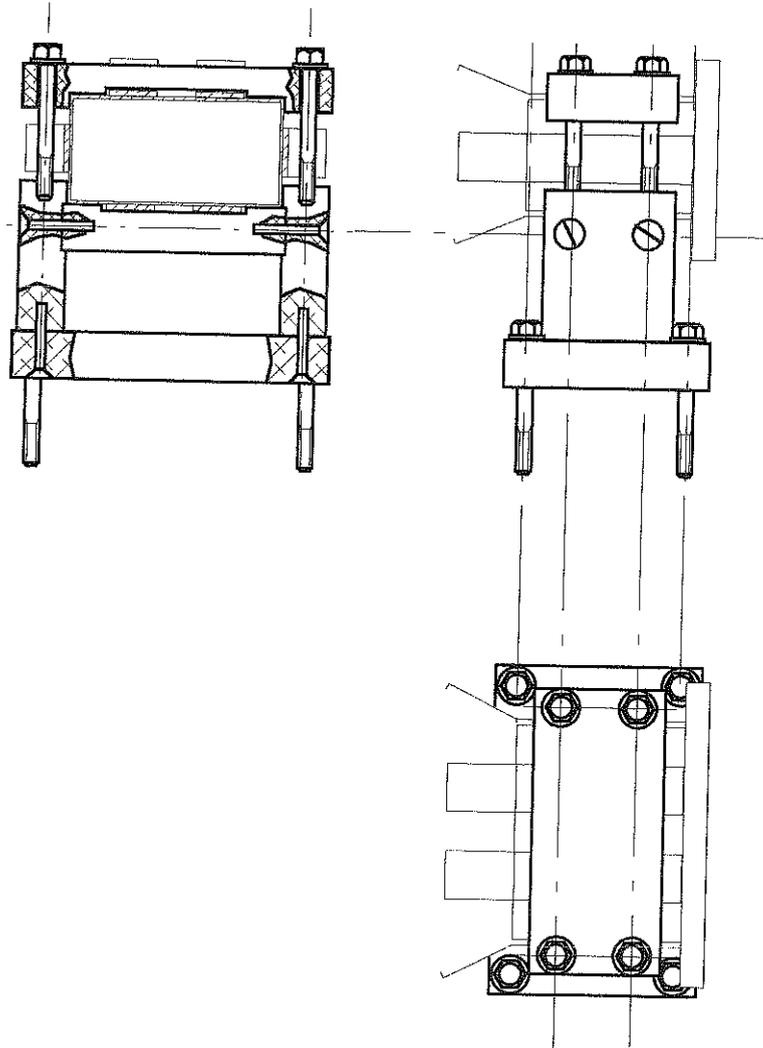
Riteniamo che tutte queste valutazioni possano essere fatte con maggiore attendibilità quando saranno disponibili i risultati delle prime misure monostatiche; rimandiamo dunque a tale momento tutte le stime più dettagliate.



TAV. I

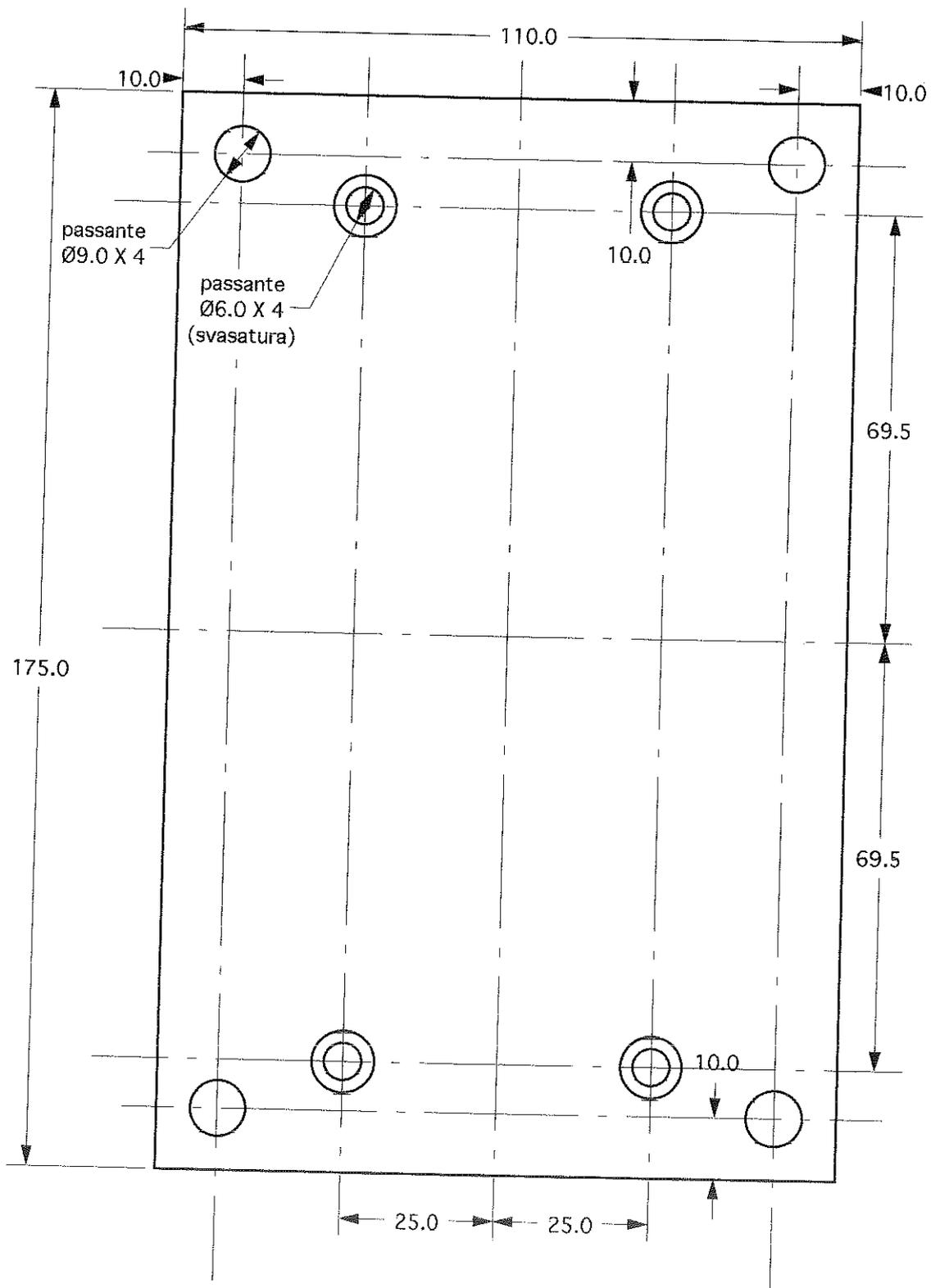


TAV. II



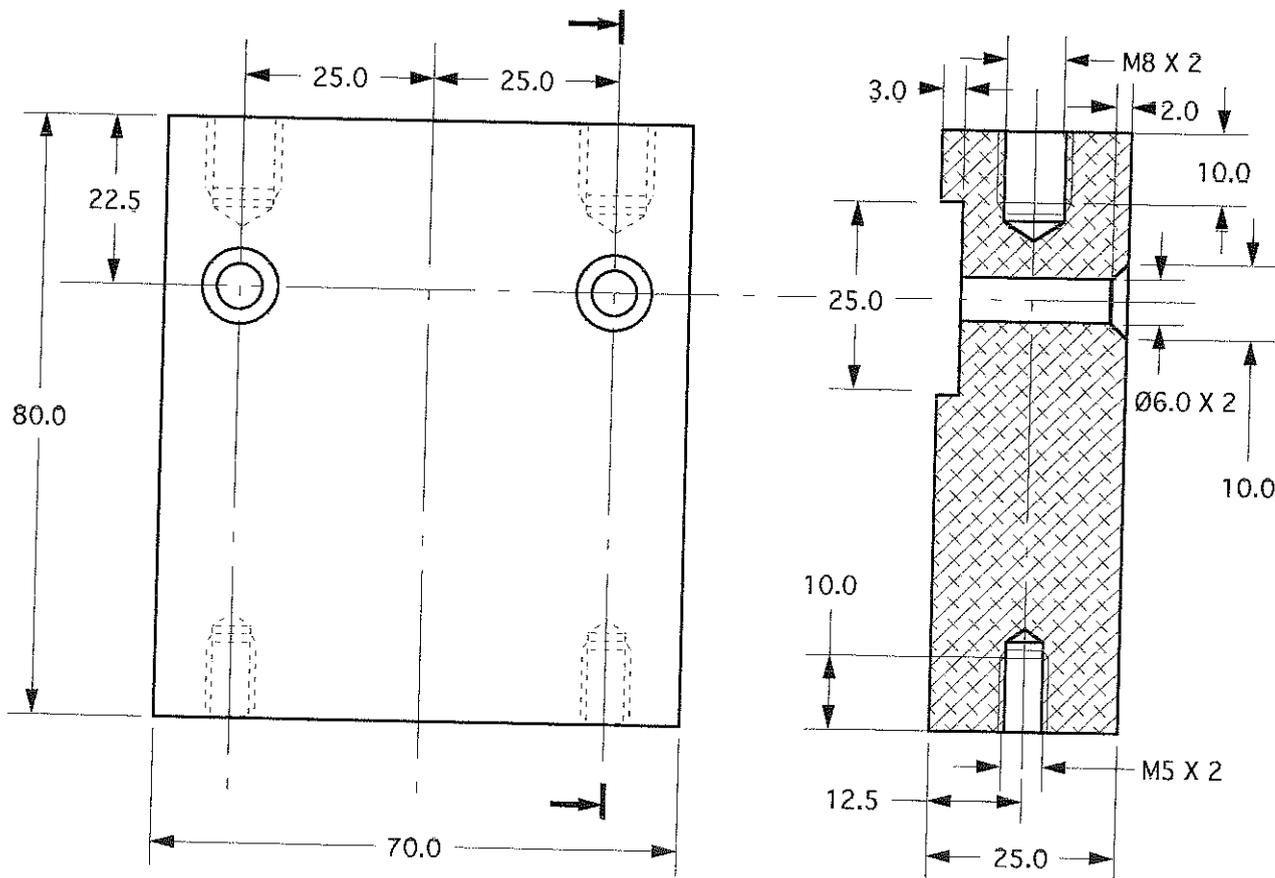
TAV. III

Supporto antenna a tromba Wavetronics
Part.: Complessivo
Scala: 1:4



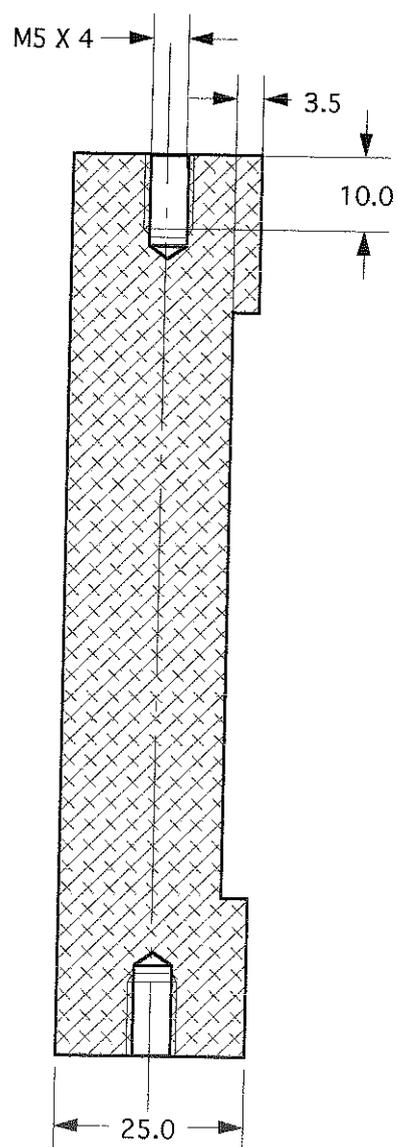
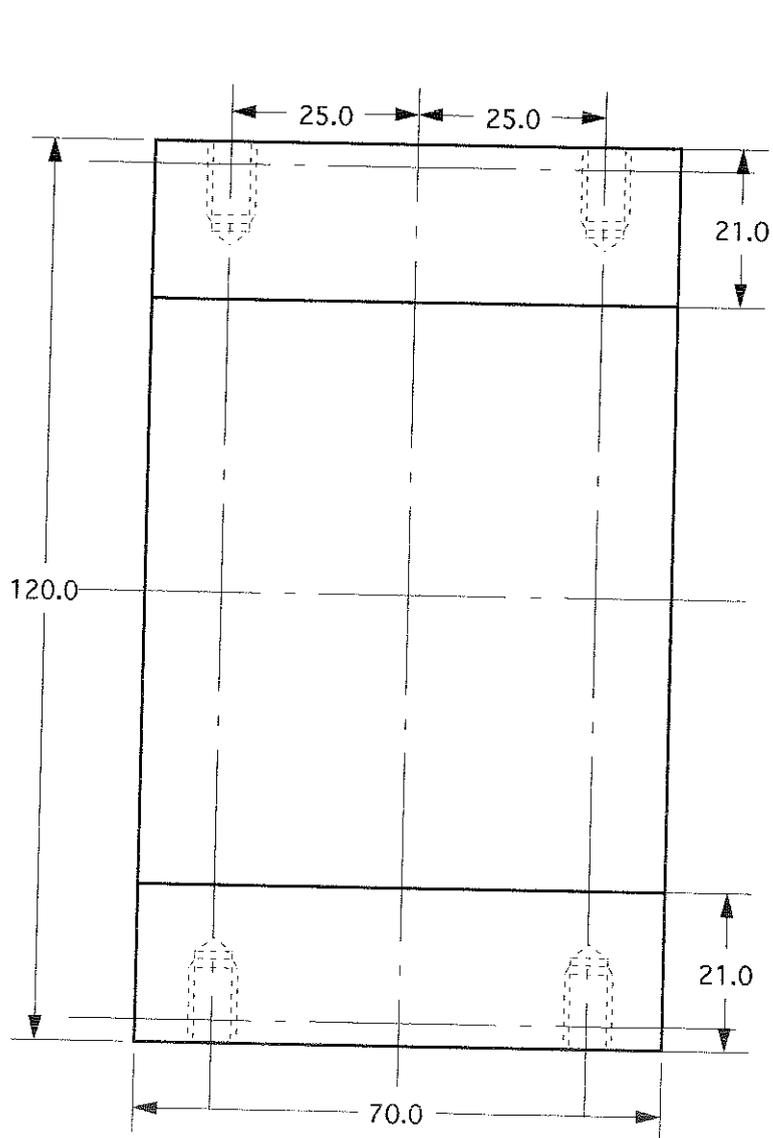
TAV. IV

Supporto antenna a tromba Wavetronics
Part.: Base
Scala: 1:1
Alluminio, spessore 25 mm



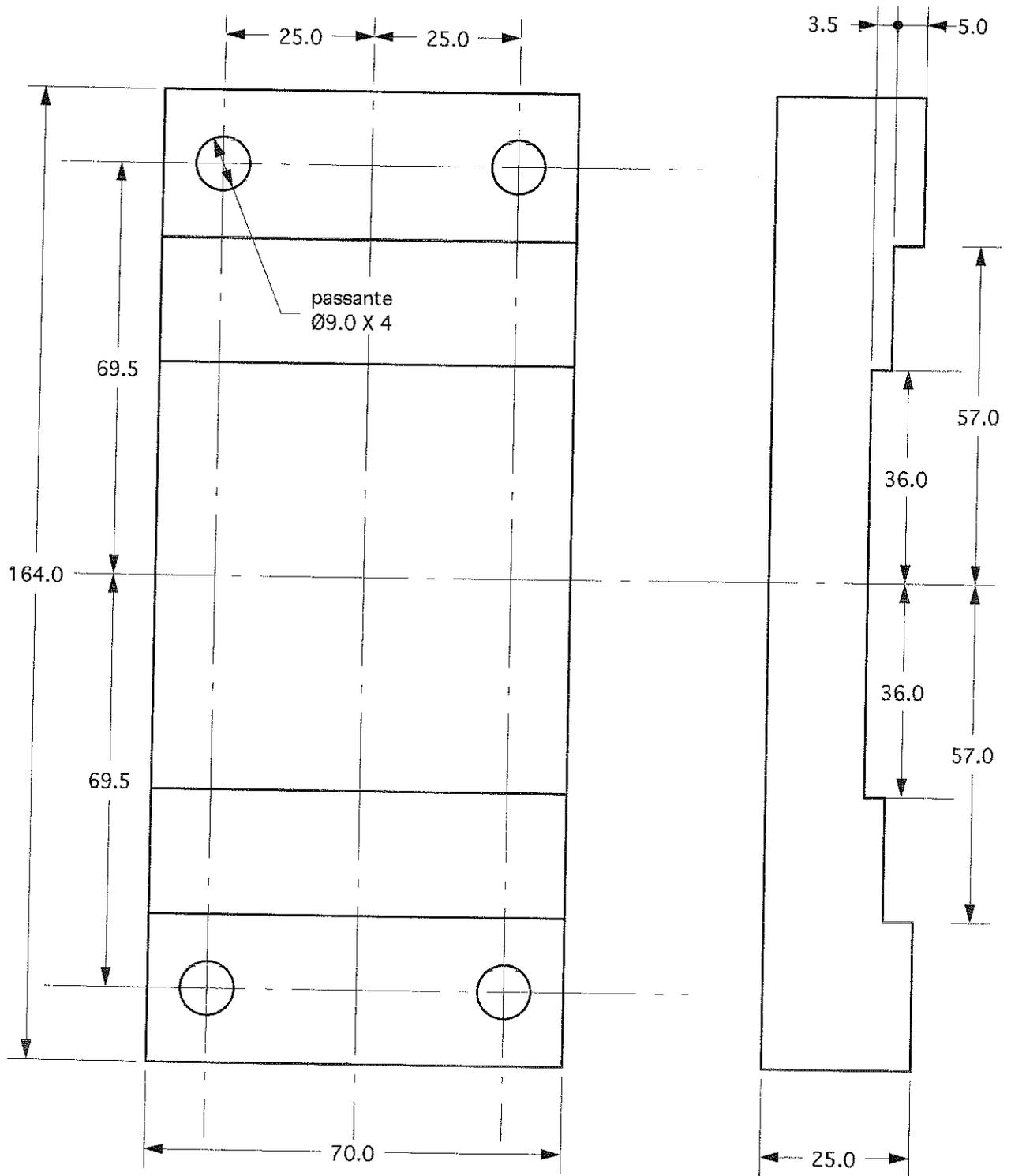
TAV. V

Supporto antenna a tromba Wavetronics
Part.: Piedritto (X 2)
Scala: 1:1
Alluminio



TAV. VI

Supporto antenna a tromba Wavetronics
Part.: Piastra sostegno inferiore
Scala: 1:1
Alluminio



TAV. VII

Supporto antenna a tromba Wavetronics
Part.: Piastra sostegno superiore
Scala: 1:1
Alluminio