



*INDAGINI GEOGNOSTICHE E STRUTTURALE PER IL RECUPERO
DELLA CHIESA DI S. MATTEO IN SCICLI (RG)*

**SISMICA SUPERFICIALE TOMOGRAFICA
(SATS E STPT)
RAPPORTO TECNICO DI PROVA**

Committente: SGM .

Maggio, 2003

Il Tecnico:

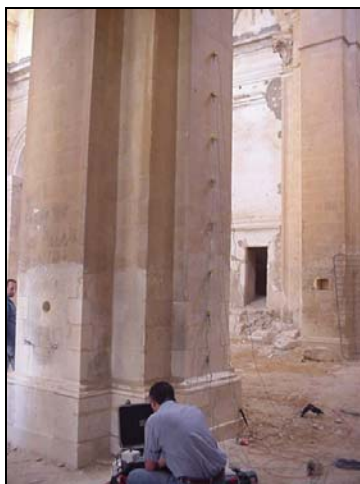
Dott. Giuseppe Coco

1.0 PREMESSA

Relativamente ai lavori di “*Recupero e Conservazione della Chiesa di S. Matteo in Scicli (RG)*”, nell’ambito dei lavori di Indagini Geognostiche e Strutturali, sono state eseguite prospezioni geofisiche del tipo sismico al fine di definire sia i rapporti geometrici tra il terreno in posto ed il materiale di riporto sia lo stato qualitativo della muratura. Pertanto, sono state eseguite n. 5 linee *tomografiche* superficiali (SAST) e n. una tomografia sismica sulla muratura con tecnica *per trasparenza* (STPT). Il risultato di tali indagini consiste nella definizione dell’*immagine* sismica in termini di velocità delle onde sismiche longitudinali dei mezzi investigati.



STPT



SAST



2.0 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA – CARATTERISTICHE GENERALI DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE

Per l'esecuzione di tali prova geofisica è stata utilizzata una strumentazione ad hoc costituita da:

- Sismografo M.A.E. modello A2000S digitale, 32 canali 16 bit a memoria incrementale e frequenza di campionamento variabile (max 41500 c/sec);
- Trasduttori di velocità del moto del suolo a componente verticale con frequenza propria > 10 Hz (SAST) ;
- Trasduttori di velocità del moto del suolo a componente verticale con risposta frequenza fino a 1 KHz (SCH);
- Sorgente sismica Massa battente 8 Kg (SAST);
- Sorgente sismica Massa battente 1 Kg (STPT).

3.0 METODOLOGIA DI CALCOLO- G. S. A. O. (GENERALIZED SIMULATED-ANNEALING OPTIMIZATION)

I dati ottenuti dalle prospezioni sismiche (SATS e STPT) sono state elaborati mediante lo stesso codice di calcolo di inversione tomografica G.S.A.O. , il quale non necessita di modellazioni *a priori*.

Tale algoritmo consente l'ottimizzazione *non lineare* dell'inversione dei tempi di primo arrivo delle fasi dirette e rifratte delle onde sismiche registrate durante una prospezione sismica tomografica.

Il vantaggio di tale tecnica è nell'assoluta indipendenza dal modello iniziale di velocità.

Le fasi di calcolo che vengono eseguite nel processo d'elaborazione dei dati, possono essere così sintetizzate:

▣ Calcolo dei travel - times attraverso un modello iniziale di velocità e determinazione dell'errore minimo quadrato ($E_0 = \text{least-square error}$), tra il travel – time calcolato e quello osservato. Per ogni iterazione i è possibile definire il “least – square error” secondo la formula:

$$E_i = \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N (t_j^{obs} - t_j^{cal})^2 \right] \quad (1)$$

dove N è il numero di campioni, j denota ogni osservazione, e t^{obs} e t^{cal} sono rispettivamente il tempo osservato e calcolato.

□ Perturbazione del modello di velocità mediante l’inserimento di una costante di velocità casuale, mantenendo la non linearità del sistema, e calcolo del nuovo “least – square error” E_1 .

□ Determinazione della probabilità P di ammettere il nuovo modello (cioè che il modello sia accettabile):

$$P = 1; \quad E_1 \leq E_0 \quad (2)$$

$$P = P_c = \exp\left[\frac{(E_{\min} - E_1)^q \Delta E}{T}\right]; \quad E_1 > E_0 \quad (3)$$

dove P_c è la probabilità di accettare la condizione, $\Delta E = E_0 - E_1$, q è una costante d’integrazione (che si determina empiricamente), e E_{\min} è il valore oggettivo della funzione dei minimi totali. Teoricamente si ha $E_{\min} = 0$. L’equazione (2), media tutti i valori accettati dal nuovo modello, laddove l’errore minimo quadrato (least – square error) è minore nell’iterazione prevista. Ciò consente, durante l’inversione dei dati, di sfuggire dall’intorno dei minimi, andando alla ricerca del minimo globale.

□ Ripetizione delle inversioni fino al raggiungimento della convergenza richiesta tra la differenza dell’errore minimo quadrato ed il successivo modello e la probabilità di accettare nuovi modelli di velocità a minimo errore.

4.0 SISMICA ASSIALE TOMOGRAFICA SUPERFICIALE (SATS)

I dati sismici ottenuti (tempi d’arrivo delle onde longitudinali), sono stati trattati tomograficamente, al fine di ricostruire profili 2D lungo le sezioni sismiche investigate.

Inoltre, i risultati dalla SATS (sezioni profondità e velocità), sono stati elaborati secondo modelli di calcolo statistici al fine di ricostruire mappe **2D** dell’andamento areale della velocità delle onde P e 3D della morfologia dei sismostrati individuati.

RISULTATI¹

Dall’analisi dei dati e dalle restituzioni numeriche e grafiche ottenute, si evincono i seguenti risultati:

- La profondità massima d’investigazione raggiunta (funzione della lunghezza dello stendimento eseguito) è stata pari a circa 7 metri dal piano campagna.
- Complessivamente s’intercettano tre mezzi fisici marcati:

$$\text{Mezzo 1} \rightarrow V_{p(\text{media})} \cong 400 \text{ m/s.}$$

¹ In allegato sono restituite le sezione tomografiche.

$$\begin{aligned} \text{Mezzo 2} &\rightarrow V_{p(\text{media})} \cong 750 \text{ m/s.} \\ \text{Mezzo 3} &\rightarrow V_{p(\text{media})} \geq 1000 \text{ m/s.} \end{aligned}$$

Facendo riferimento anche alle informazioni litostratigrafiche emerse dai sondaggi geognostici, si evince quanto segue:

- Il mezzo **1**, riferibile a materiale di riporto, sutura in modo irregolare i mezzi sottostanti e raggiunge spessori di 5.0 metri. Il mezzo **2**, è dato da terreno in posto costituito da un'alternanza calcareo - marnosa alterata e/o fratturata. Tale mezzo è spesso affiorante e contorna il mezzo **1**. Il mezzo **3**, riferibile all'alternanza calcareo marnosa relativamente integra, si intercetta a partire da circa 1 metro dal p.c. e si approfondisce fino a circa 5 m. dal p.c.

4.1 ELAORAZIONE STATISTICA 2D e 3D.

I risultati ottenuti durante la specifica campagna di indagini, sono stati analizzati mediante un procedimento statistico al fine di ricomporre attraverso delle ricostruzioni grafiche l'andamento morfologico del 1° orizzonte rifrangente in 3D e la distribuzione delle velocità delle onde longitudinali riguardanti lo spazio prossimo agli orizzonti fisici individuati in 2D.

Il metodo statistico utilizzato è noto col nome di **Kriging**. Il principio generale consiste nell'analisi delle letture effettuate e nella costruzione di un semivariogramma $G(D)$ che esprime la varianza delle differenze tra le letture stesse in funzione della loro reciproca distanza D .

In particolare il modello di semivariogramma utilizzato è caratterizzato da un andamento di tipo lineare.

Una volta definito il semivariogramma si procede a definire il set di pesi $L(i)$ che consentono la stima del

$$Z^1(p) = \sum_{i=1}^n (Z(i) * L(i))$$

dove :

$Z^1(p)$ = valore stimato al punto **p**

$Z(i)$ = valore misurato al punto **i**

n = numero di punti di misura

tale set di pesi deve possedere la proprietà

$$\sum L(i) = 1$$

e garantire la minimizzazione dell'espressione generale che rappresenta la varianza dell'errore associata alla stima relativa al punto \mathbf{p} , e cioè

$$2 \cdot \sum_{i=1}^n (L(i) \cdot G(D(i, p)) - G(D(i, p))) - \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n (L(i) \cdot L(j) \cdot G(D(i, j))) \right)$$

in cui :

$G(D(x,y))$ = varianza media associata alla distanza tra i punti x ed y

n = numero di punti di misura.

Tale minimizzazione viene ottenuta con la tecnica dei minimi vincolati di Lagrange, attraverso la soluzione di un sistema di n + 1 equazioni lineari.

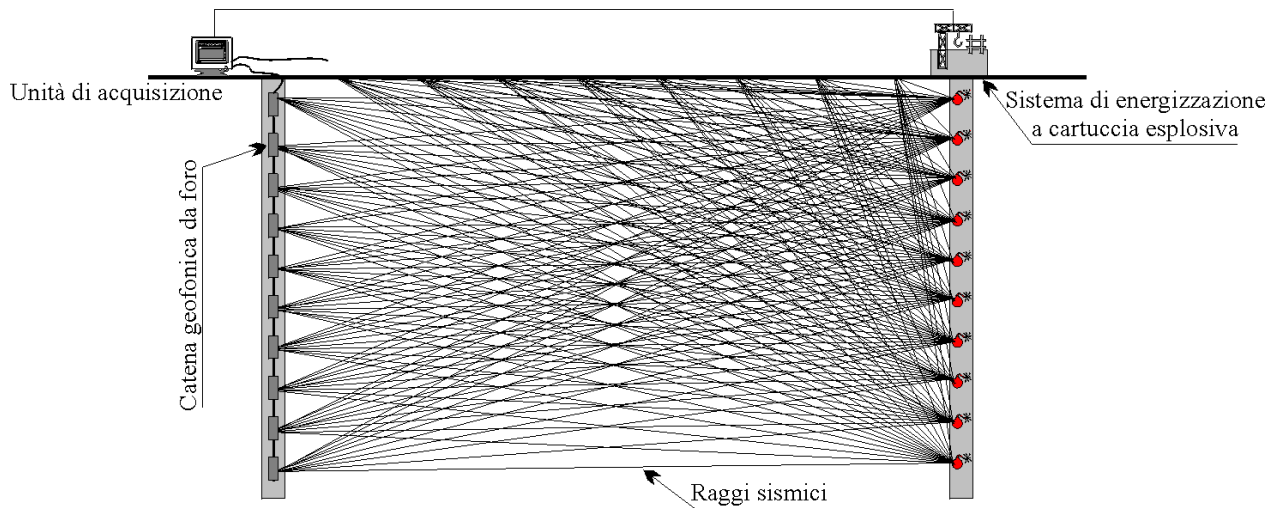
I risultati grafici sono riportati in allegato.

- In dettaglio si osserva, relativamente all'andamento morfologico 3D del mezzo fisico 1, che nell'area prossima all'altare e nelle due navate, in corrispondenza dell'ascissa 35, sono presenti aree in cui il materiale di riporto raggiunge circa 2.6 m di spessore, definendo morfologie concave con raggio di curvatura molto stretto. Nella parte restante della chiesa, tale materiale ricopre "pellicolarmente" il sottostante substrato, il quale si approfondisce gradualmente verso la zona prossima all'altare fino a raggiungere profondità di oltre 5 metri.
- La distribuzione areale della velocità delle onde P è stata ottenuta sezionando il volume investigato secondo dei piani paralleli, estratti ogni metro di profondità nell'intorno +/- 0.5 m, fino a 6 m di profondità. In particolare, si osserva che il valore di velocità riferibile a terreno di riporto ($V_p < 500$ m/sec) è concentrato, entro i primi 2 m +/- 0.5 m., nelle navate laterali e nell'area prossima all'altare. Nello stesso intervallo, i terreni in posto sono presenti nella maggior parte dell'area investigata. Dai 4 metri in poi si registrano solo velocità riferibili a terreno in posto.

5.0 SISMICA TOMOGRAFICA SU COLONNA MURARIA (STPT)

La Tomografia sismica è una tecnica d'indagine indiretta che consente la ricostruzione di un'immagine del sottosuolo mediante l'impiego dei tempi di percorso delle onde sismiche che si propagano attraverso una data sezione determinata da sorgente e ricevitori.

- *Esempio grafico assimilabile alla tecnica "per trasparenza" utilizzata*



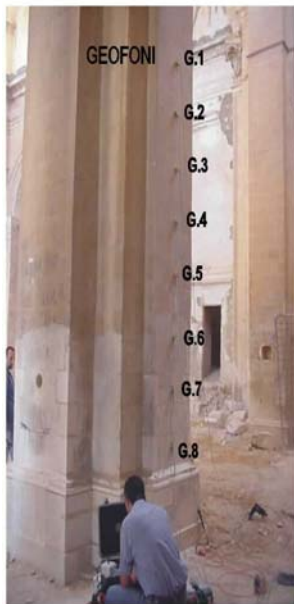
RISULTATI

- Da questa immagine 2D, che rappresenta la sezione centrale alla colonna muraria investigata, si osserva una zona pressoché diagonale al profilo “*imaging*” 2D (in rosso) ad alta velocità (> 3000 m/s) e ad alta densità di raggi sismici. Il piede della colonna e la sommità (a circa cinque metri dalla base - considerando le posizioni geofoniche utilizzate), evidenziano entrambi, velocità molto più basse (1200 m/s.). Pertanto, si può desumere che la colonna muraria investigata lungo una sezione longitudinale ad essa, risulta essere costituita da materiale qualitativamente non omogeneo, con salti di velocità passanti da 1200 a 3800 m/s.

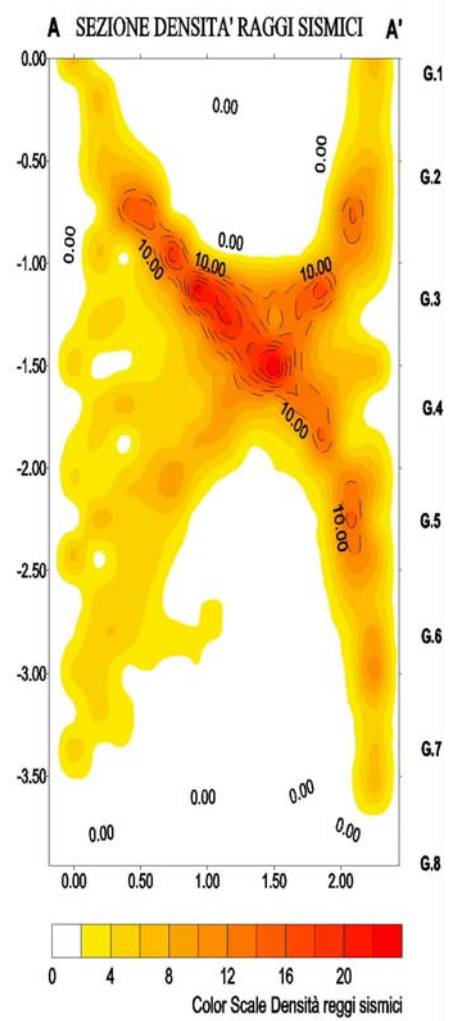
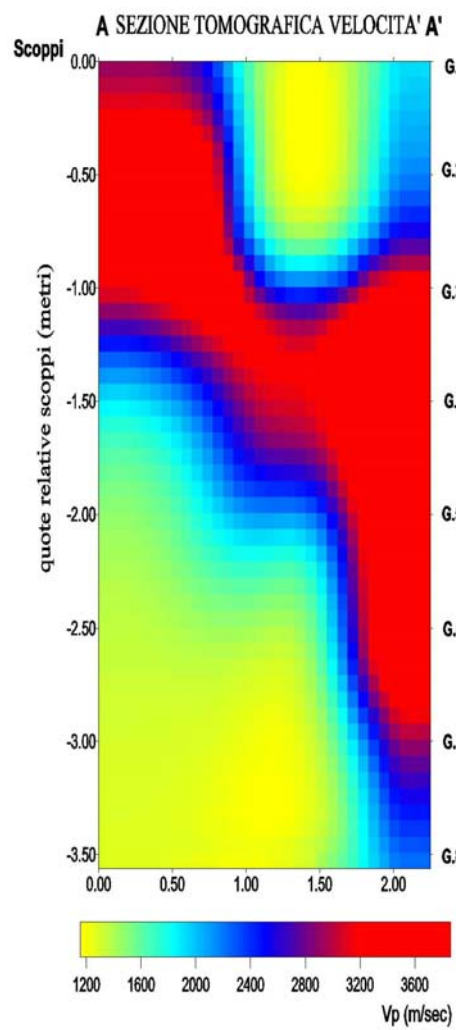
ALLEGATI

- SEZIONE SISMO-TOMOGRAFICA

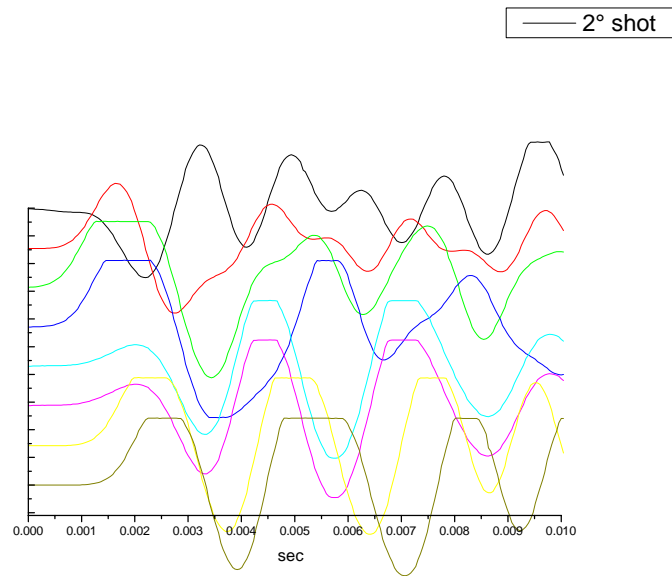
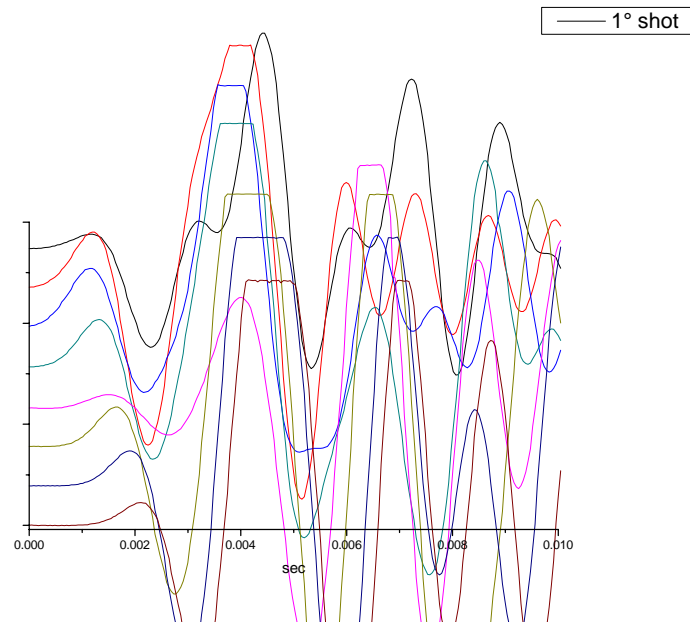
ILLUSTRAZIONE FOTOGRAFICA



TOMOGRAFIA SISMICA - TSPT -



- ESEMPIO TRACCE SISMICHE STPT



— 7° shot

