

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali - DICAM

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

***MONITORAGGIO PER LA  
DIAGNOSTICA STRUTTURALE  
DEL DAVID DI MICHELANGELO***

TESI DI LAUREA IN

MECCANICA DEI MATERIALI INNOVATIVI LS

CANDIDATO:

**Antonio Lolli**

RELATORE:

Chiar.mo Prof . Ing. **Giovanni Pascale**

CORRELATORI:

Chiar.mo Prof . Ing. **Francesco Ubertini**

Dott. Ing. **Filippo Bastianini**

Dott. Geol. **Fausto Peddis**

---

A.A. 2009-2010

Sessione II





# **INDICE**

<b>INTRODUZIONE</b> .....	1
<b>1 – IL DAVID DI MICHELANGELO</b> .....	3
1.1 – INTRODUZIONE.....	3
1.2 – STORIA E CARATTERISTICHE DEL DAVID.....	6
1.2.1 – <i>Storia del David</i> .....	6
1.2.2 – <i>Caratteristiche del marmo</i> .....	13
1.3 – ANALISI STATICA E MODELLAZIONE.....	16
1.3.1 – <i>Analisi statica del David</i> .....	16
1.3.2 – <i>Modellazione del David</i> .....	25
1.4 – ANALISI DELLE CONDIZIONI MICROCLIMATICHE .....	30
1.5 – ANALISI SISMICA.....	32
1.5.1 – <i>Storia sismica di Firenze</i> .....	32
1.5.2 – <i>Risposta sismica del David</i> .....	34
<b>2 - SENSORI BRAGG GRATING: GENERALITÀ E PROVE</b>	
<b>EFFETTUATE</b> .....	39
2.1 – INTRODUZIONE .....	39
2.2 – GENERALITÀ SU FIBRE OTTICHE E SENSORI BRAGG GRATING .....	39
2.2.1 – <i>Le fibre ottiche</i> .....	39
2.2.2 – <i>Fiber Bragg Grating</i> .....	41
2.3 – PROVE DI INCOLLAGGIO SU UN CAMPIONE DI MARMO .....	44
2.4 - PROVE DI TRAZIONE.....	45
2.4.1 – <i>Prova con adesivo cianocrilato vetro</i> .....	48
2.4.2 – <i>Prova con M-Bond 200</i> .....	49
2.5 – MONITORAGGIO DELLA FIBRA OTTICA IN ASSENZA DI CARICO .....	50
<b>3 – MONITORAGGIO DEL DAVID</b> .....	60
3.1– INTRODUZIONE .....	60
3.2 – ANALISI DELLO STATO DELLE FESSURE .....	60
3.3 – INSTALLAZIONE DEI SENSORI A FIBRA OTTICA E DELLA	
STRUMENTAZIONE NECESSARIA PER IL MONITORAGGIO.....	66
3.3.1 – <i>Installazione del sistema di monitoraggio</i> .....	66
3.3.2 – <i>Installazione dei sensori a fibra ottica</i> .....	71
3.4 – ELABORAZIONE DEI DATI OTTENUTI.....	78

3.4.1 – <i>Elaborazione dei dati rilevati dal dispositivo Smartbrick</i> .....	78
3.4.2 – <i>Elaborazione dei dati rilevati dai sensori</i> .....	94
<b>4 - ANALISI DELLO STATO TENSIONALE DEL DAVID</b> .....	116
4.1 – INTRODUZIONE.....	116
4.2 – RILIEVO DEL BASAMENTO .....	116
4.3 – TRACCIAMENTO DELLE SEZIONI ORIZZONTALI .....	119
4.4 – DETERMINAZIONE DEI BARICENTRI, ASSI PRINCIPALI D’INERZIA ED ELLISSE CENTRALE D’INERZIA .....	124
4.5 – DETERMINAZIONE DELLO STATO TENSIONALE .....	129
<b>5- ULTRASUONI</b> .....	133
5.1– INTRODUZIONE .....	133
5.2 – PROPAGAZIONE DELLE ONDE NEI MEZZI SOLIDI.....	134
5.2.1 – <i>Le onde</i> .....	134
5.2.2 – <i>Propagazione delle onde elastiche nei solidi monodimensionali</i> .....	137
5.2.3 – <i>Propagazione delle onde elastiche nei solidi tridimensionali</i> .....	139
5.2.4 – <i>Pressione, intensità e impedenza acustica</i> .....	140
5.3 – PROPAGAZIONE DEGLI ULTRASUONI .....	141
5.3.1 – <i>Propagazione degli ultrasuoni in un mezzo semi-infinito</i> .....	141
5.3.2 – <i>Attenuazione</i> .....	144
5.4 – STRUMENTAZIONE E TECNICHE DI MISURA AD ULTRASUONI .....	146
5.4.1 – <i>Strumentazione</i> .....	146
5.4.2 – <i>Tecniche di prova per trasmissione e per riflessione</i> .....	148
5.4.3 – <i>Operazioni propedeutiche a quelle di misura</i> .....	150
5.4.4 – <i>Esecuzione delle misure</i> .....	151
5.5 – APPLICAZIONE DELLE TECNICHE AD ULTRASUONI SU MARMO.....	153
<b>6- PROVE AD ULTRASUONI</b> .....	157
6.1 – INTRODUZIONE .....	157
6.2 – CARATTERISTICHE E FUNZIONAMENTO DELLO STRUMENTO AD ULTRASUONI .....	158
6.3 – PROVE SU CAMPIONI DI MARMO .....	163
6.3.1 – <i>Provini A e B</i> .....	164
6.3.2 – <i>Provini M1 e M2</i> .....	170
6.3.3 – <i>Provini C1e C2</i> .....	176
6.3.4 – <i>Provino di marmo di Lasa</i> .....	181

6.4 – PROVE SU CAMPIONI DI ROCCE DI DIVERSA NATURA .....	184
6.4.1 – Rocce metamorfiche : gneiss .....	184
6.4.2 – Rocce magmatiche : porfido e granito rosa di Baveno .....	188
6.4.3 – Rocce sedimentarie: arenarie e calcari .....	193
<b>7 – PROVE MECCANICHE SUI CAMPIONI DI MARMO .....</b>	<b>202</b>
7.1 – INTRODUZIONE .....	202
7.2 – DETERMINAZIONE DELLE COSTANTI ELASTICHE .....	202
7.2.1 – Incollaggio degli estensimetri .....	202
7.2.2 – Esecuzione delle prove ed elaborazione dei risultati .....	207
7.3 – PROVE DI FLESSIONE .....	214
7.4 – PROVE DI COMPRESSIONE.....	218
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>223</b>
<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>227</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>229</b>
<b>RIFERIMENTI INTERNET.....</b>	<b>232</b>

## **INTRODUZIONE**

La conservazione delle grandi statue in marmo richiede un'attenta valutazione, non solo del loro aspetto estetico, ma anche delle loro caratteristiche strutturali. Una adeguata protezione di queste opere, molte delle quali di inestimabile valore culturale, consente, infatti, di garantire il mantenimento anche in futuro della loro originaria bellezza.

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna ha avuto l'incarico di effettuare un monitoraggio del David di Michelangelo, una delle statue più famose al mondo ma che, purtroppo, presenta alcuni fenomeni di fessurazione a livello delle caviglie e del broncone, termine con cui viene indicato il tronco posizionato dietro alla gamba destra. Alcune sue particolarità, inoltre, contribuiscono a comprometterne la stabilità, come la scarsa resistenza del marmo di cui è costituito e la sua forma, molto sporgente in avanti e snella nella parte inferiore.

Questo elaborato di tesi ha lo scopo di descrivere il monitoraggio del David realizzato con sensori in fibra ottica, che, date le loro esigue dimensioni, hanno il vantaggio di non alterare la vista della statua ai numerosi turisti che ogni anno accorrono alla Galleria dell'Accademia di Firenze per ammirarla. Lo studio è stato effettuato sia dal punto di vista statico che dinamico in quanto la città di Firenze nel passato è stata soggetta a terremoti anche di notevole intensità che potrebbero ripresentarsi in futuro mettendo a rischio la sicurezza dell'opera. Oltre a questo sono trattati altri problemi correlati allo stato fessurativo esistente, come la necessità di testare uno strumento ad ultrasuoni che possa essere utilizzato nell'ambito della diagnostica della statua e la determinazione delle proprietà del marmo mediante prove ultrasoniche e meccaniche su provini provenienti da una cava della zona di Carrara.

Nel primo capitolo, dopo una parte introduttiva relativa alla storia del David e alle caratteristiche del materiale, vengono riportati i risultati delle analisi che sono già state effettuate sull'opera da diversi studiosi tra cui il Prof. Borri dell'Università di Perugia.

Il secondo capitolo presenta le generalità dei sensori a fibra ottica e le prove effettuate su questi ultimi prima di procedere alla loro applicazione sulla statua. Sono state eseguite prove di incollaggio per valutare il tipo di adesivo da utilizzare e prove di trazione per confrontare i valori di deformazione ottenuti da due estensimetri elettrici con quelli rilevati dai sensori considerati. In ultimo si è voluto monitorare un sensore in assenza di carichi applicati, per analizzare il suo comportamento nel tempo.

Nel terzo capitolo sono descritte le fasi di installazione del sistema di monitoraggio che sono state precedute da una accurata analisi dello stato delle lesioni al fine di scegliere la posizione più opportuna in cui applicare i sensori stessi. Successivamente è riportata l'elaborazione dei risultati ottenuti dal dispositivo Smartbrick, che verrà descritto nel dettaglio, e dai sensori.

Il quarto capitolo riguarda l'analisi dello stato tensionale esistente sulla sezione nelle vicinanze della fessura sulla quale è stata applicata la fibra. Dopo aver tracciato le sezioni orizzontali della statua mediante il software MeshLab e facendo ricorso alle regole della geometria delle masse e alla teoria dello sforzo normale eccentrico si è proceduto alla determinazione delle tensioni agenti sulla sezione.

Il quinto capitolo richiama gli aspetti teorici e le tecniche di esecuzione delle misure ad ultrasuoni in quanto sono descritte le strumentazioni utilizzate, le tecniche di prova e i parametri principali che vengono misurati.

Nel sesto capitolo sono descritte le prove ad ultrasuoni effettuate utilizzando lo strumento Epoch 1000 che hanno riguardato campioni di marmo e di altri tipi di rocce. Il loro scopo è stato quello di valutare il possibile utilizzo dello strumento nell'ambito della diagnostica del David e, contemporaneamente, di controllare l'influenza delle caratteristiche del materiale sui parametri misurati.

L'ultimo capitolo riporta le prove meccaniche realizzate su due campioni di marmo già utilizzati nelle prove ultrasoniche. Questi sono stati sottoposti a prove per la determinazione delle costanti elastiche (modulo elastico e coefficiente di Poisson), a prove di flessione e di compressione.

# **1- IL DAVID DI MICHELANGELO**

*“E veramente che questa opera ha tolto il grido a tutte le statue moderne et antiche, o greche o latine che elle si fossero....Perché in essa sono contorni di gambe bellissime et appiccicature e sveltezza di fianchi divine, né grazia che tal cosa pareggi, né piedi né mani né testa che a ogni suo membro di bontà, d'artificio e di parità né di disegno s'accordi tanto.*

*E certo chi vede questa non dee curarsi di vedere altra opera di scultura fatta nei nostri tempi o negli altri da qual si voglia artefice”*

*Giorgio Vasari*

## **1.1 - Introduzione**

Il David di Michelangelo, una tra le opere d'arte maggiormente famose al mondo, pur ripetendo nella sua posizione gli schemi classici, racchiude in sé non solo la visione particolare dell'artista ma di tutto il Rinascimento.

L'opera è il risultato di un attento studio anatomico al fine di rendere, con forme virili possenti e al tempo stesso armoniche, l'immagine del nudo eroico. La precisione nella realizzazione dei particolari anatomici si può notare nella torsione del collo attraversato da una vena, nella struttura dei tendini, nelle vene sulle mani e sui piedi, nella tensione muscolare delle gambe (contratta quella di destra su cui si appoggia il peso, distesa quella di sinistra, che si allunga per il movimento) e nella perfetta muscolatura del torso. Sono poche le inesattezze, come un muscolo sul polso destro inesistente in realtà, che Michelangelo si inventa per dare maggiore forza espressiva al suo movimento e una riduzione innaturale della spalla dovuta alla mancanza di materiale su cui lavorare.

Il progetto iniziale richiedeva una visione dal basso ad una grande distanza per cui Michelangelo ingrandì la testa e le mani che infatti appaiono sproporzionate. Questo effetto parzialmente visibile anche durante la sua esposizione in Piazza della Signoria si è attenuato in seguito al suo trasferimento nel museo dove è stato collocato in un piedistallo più basso di 63 centimetri. Nella realizzazione degli occhi, inoltre, inventò una nuova tecnica consistente nella perforazione delle pupille in modo da rendere gli occhi ancora più penetranti.

La statua si trova ora esposta alla Galleria dell'Accademia di Firenze ed è alta 5,17 metri, dimensioni che le valsero l'appellativo di Gigante che tradizionalmente spettava al suo avversario Golia.



Fig 1.1- Il David di Michelangelo.



Fig 1.2 – Particolare della mano.

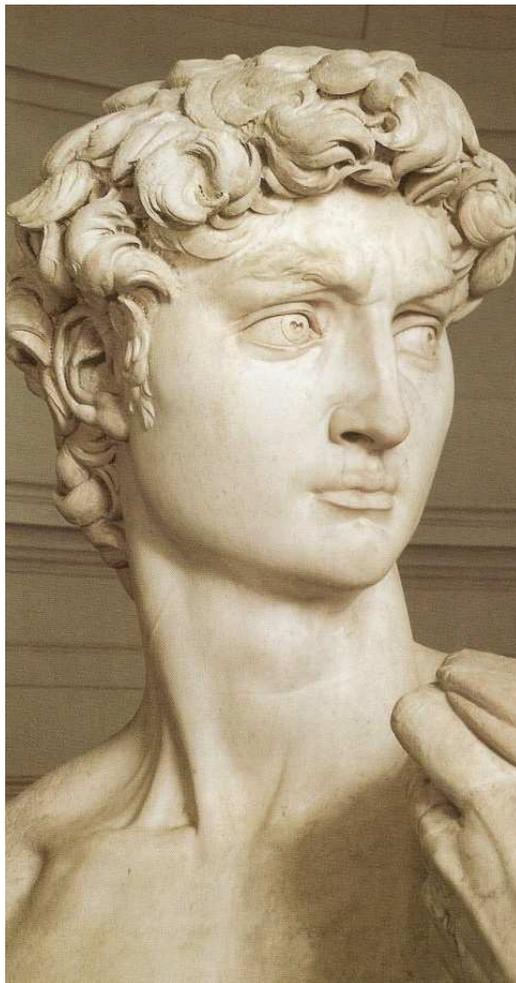


Fig 1.3 – Particolare del volto e del collo  
(Paolucci et al., 2004).

Una particolarità di questa scultura, rispetto alle altre aventi il medesimo soggetto (come ad esempio il David di Donatello) è l'assenza della testa di Golia. Questa potrebbe essere dovuta all'intenzione di Michelangelo di rappresentare l'eroe prescindendo dall'evento biblico, oppure più semplicemente alla scarsità di materiale.

Gli argomenti di questo capitolo sono stati tratti da:

- [1] Paolucci et al., 2004;
- [2] Borri, 2005;
- [3] Bracci et al., 2004;
- [4] Vannucci et al., 2001;
- [5] Vannucchi, 1991.

## **1.2 – Storia e caratteristiche del David**

### **1.2.1 – Storia del David**

Michelangelo Buonarroti iniziò a lavorare all'opera nel 1501 quando aveva appena 26 anni ma era già un artista famoso avendo realizzato capolavori quali la Pietà all'interno della Basilica di San Pietro e il Bacco oggi all'interno del museo del Bargello a Firenze. Il David fu commissionato all'artista dall'Opera del Duomo per ornare uno dei contrafforti della zona absidale della cattedrale di Santa Maria del Fiore di Firenze. Nell'Ottocento si riteneva che il blocco di marmo con cui è stato realizzato provenisse dalla cava dei Fantiscritti, sopra Carrara ma non si sa come si è arrivati a questa convinzione, se attraverso studi petrografici o sulla base di una tradizione orale. Il blocco comunque era già stato lavorato parzialmente da Agostino di Duccio nel 1464 e da Antonio Rossellino nel 1476. Entrambi gli artisti però avevano rinunciato a continuare l'opera giudicando il blocco di cattiva qualità e troppo fragile in relazione alle sue dimensioni.

Una scultura di questo tipo rappresentava una sfida dal punto di vista statico, in quanto doveva rappresentare un corpo maschile nudo e quindi essere più stretta alla base rispetto all'apice poggiando su due gambe e non su una zona

larga come ad esempio il panneggio di una veste. Michelangelo allora decise di rinforzare la gamba destra, quella gravata dal maggior carico, facendola appoggiare ad un tronco mozzo di albero detto *broncone*.



Fig 1.4 – Il broncone (Paolucci et al., 2004).

Il grande artista lavorò all'opera lontano dagli sguardi di tutti, in un recinto costruito da lui stesso nel cortile dell'Opera del duomo e al termine dei lavori il problema della collocazione accese un vero e proprio conflitto cittadino. Si decise di non collocarla più all'esterno della cattedrale e il gonfaloniere di giustizia della repubblica fiorentina Pier Soderini propose di collocarla in Piazza della Signoria, trasferendo il valore simbolico del David da un contesto religioso a uno civile. Il 25 gennaio del 1504 la decisione sul luogo esatto in cui collocare la statua fu presa da una commissione composta da numerosi artisti tra i quali Andrea della Robbia, Piero di Cosimo, Pietro Perugino, Leonardo da Vinci, Filippino Lippi, Sandro Botticelli, Cosimo Rosselli. Il dibattito fu molto acceso e questo rivela le tensioni e inimicizie che esistevano tra gli artisti del periodo. Giuliano da Sangallo, ad esempio, consigliò una

collocazione al coperto, come il cortile interno di Palazzo Vecchio o la loggia dei Lanzi in quanto secondo lui l'opera aveva problemi conservativi. Non si può escludere che Michelangelo abbia fatto di tutto perché il David comparisse in una posizione prestigiosa e visibile a tutti e alla fine la statua venne collocata davanti a Palazzo Vecchio nel posto prima occupato dalla *Giuditta e Oloferne* di Donatello, di peso molto modesto se confrontato con quello del David.

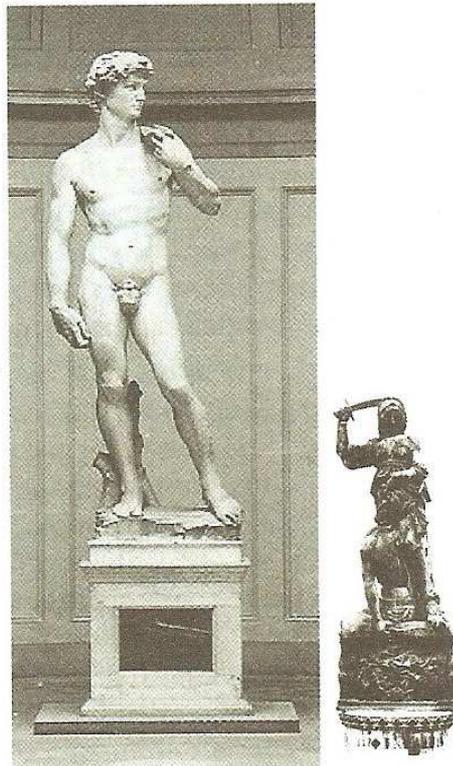


Fig 1.5 – David e Giuditta a confronto  
(Paolucci et al., 2004).

Il trasporto dell'enorme statua ebbe luogo tra il 14 e il 18 maggio del 1504 e l'opera venne posizionata all'interno di una gabbia lignea che scorreva su delle travi unte di grasso di sévo mentre il marmo era sollevato dal fondo per evitare che le vibrazioni del trasporto lo danneggiassero. Durante il tragitto, in una pausa notturna, un gruppo di giovani fedeli alla fazione filo-medicea, estromessa dal potere, aggredì la statua prendendola a sassate, in quanto simbolo riconosciuto del governo repubblicano. Arrivata a destinazione la scultura fu ornata sul luogo da una parziale doratura sulla cinghia della fionda

e sul broncone. Venne realizzata anche una ghirlanda consistente in un filo d'ottone con ventotto foglie di rame ma non si sa se fu posta realmente sul David. Nella figura 1.6 è rappresentata una ricostruzione della doratura della statua.



Fig 1.6 – Ricostruzione virtuale della doratura (Bracci et al., 2004).

Nel 1512 un fulmine colpì la statua interessando il basamento. Secondo alcuni studiosi questa potrebbe essere la causa dei cedimenti della base e dei cretti intorno alle caviglie rilevati nell'Ottocento.

Il 26 aprile 1527 durante un sollevamento popolare un gruppo di repubblicani asserragliati in Palazzo Vecchio gettarono oggetti da una finestra che colpirono la statua, provocando la rottura del braccio sinistro in tre pezzi. Questi furono salvati da Francesco Salviati e da Giorgio Vasari dopo che per tre giorni erano stati abbandonati per terra. In questa occasione si pensa possa

essersi prodotta la scheggiatura nella fionda, visibile a circa metà della schiena .

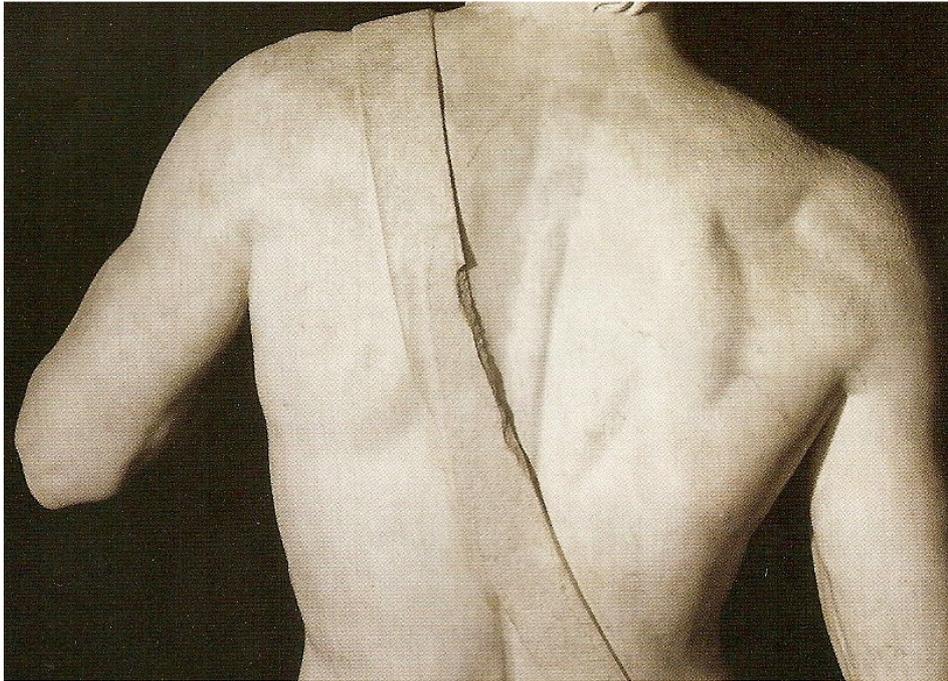


Fig 1.7 – Particolare della scheggiatura nella fionda (Paolucci et al., 2004).

I pezzi del braccio vennero nascosti in casa Salviati e con il ritorno del Granduca Cosimo I si provvide al restauro.

Il primo moderno intervento di restauro documentato fu eseguito nel 1813 da Stefano Ricci e nel 1843 Aristodemo Costoli fece un intervento di pulitura durante il quale non rilevò lesioni riconducibili a problematiche di tipo statico. Nel 1847 Clemente Papi eseguì un calco a tasselli della statua che provocò un temporaneo ma notevole aggravio di peso di circa 5000-6000 kg. Nel 1852 una prima commissione fu incaricata di valutare lo stato di conservazione del David e rivelò la presenza di due lesioni: un cretto visibile sul broncone e una leggerissima pelatura sulla parte inferiore della gamba sinistra. Tra il 1866 e il 1869 una seconda commissione rilevò quattro cretti nella parte destra della statua mentre una terza commissione nel 1872 rilevò diversi cretti visibili nella gamba destra e nel broncone, uno dei quali particolarmente profondo.

Tutte e tre le commissioni concordarono nel rilevare la sconnessione e l'avanzato degrado del basamento, da cui derivava la posizione non più

verticale della statua ma con una pendenza in avanti di circa un braccio (1 braccio fiorentino = 58,60 cm) in continuo aumento da un anno all'altro.

Nel 1873 venne deciso il trasferimento dell'opera all'Accademia, in un locale appositamente progettato dall'architetto Emilio de Fabris. Il trasporto da Piazza della Signoria all'Accademia avvenne tra il 30 luglio e l'8 agosto del 1873. La statua venne ingabbiata in un apposito "castello" di legno e disposta su delle rotaie, sistema giudicato più sicuro per evitare il rischio di ribaltamento.

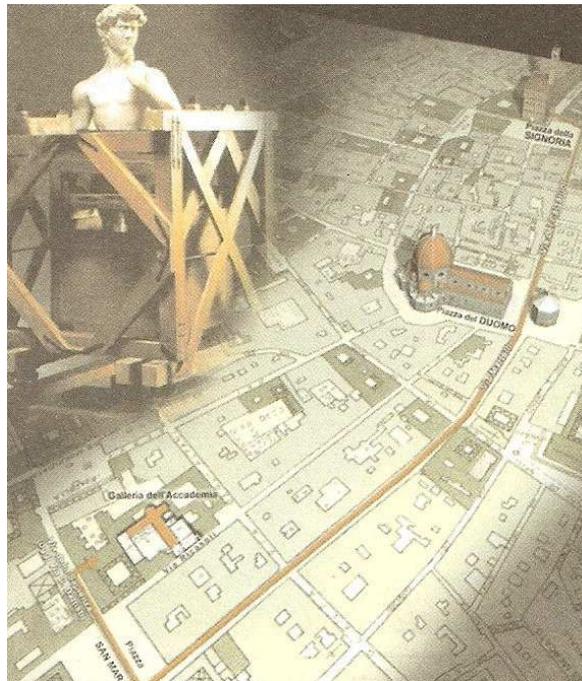


Fig 1.9 – Ricostruzione virtuale del tragitto del David (Borri, 2005).

La sistemazione all'interno della Galleria venne conclusa dopo molti anni, nel 1882. Il lavoro compiuto dall'architetto De Fabris è considerato un capolavoro della museografia celebrativa ottocentesca, in quanto il David venne collocato al centro di una esedra voltata ad abside come fosse l'altare eucaristico di una chiesa cattolica (fig 1.10). Si realizzò così una vera e propria mitizzazione del David, inondato dalla luce proveniente dai vetri della cupola e quasi trasfigurato al di là della storia. Così facendo però l'effetto prospettico della scultura finì per allontanarsi da quello voluto da Michelangelo, il quale molto probabilmente aveva considerato preferenziale

la vista frontale dallo spazio pubblico e accessibile a tutti da Piazza della Signoria.



Fig 1.10 – Tribuna del David.

L'ultimo intervento di mitizzazione fu realizzato dal soprintendente Corrado Ricci nel 1909. Egli dispose a destra e a sinistra della navata che precede la Tribuna altre sculture michelangeloesche: i *Prigioni* destinati alla tomba di Giulio II che furono lasciati non finiti da Michelangelo e la statua del *San Matteo* progettata per Santa Maria del Fiore e anch'essa non ultimata. In questo modo è stato creato un preludio grandioso che accompagna il visitatore alla contemplazione del capolavoro.

Dopo il trasloco, per colmare il vuoto venutosi a creare in piazza della Signoria, si pensò di sistemarvi la copia in bronzo del David, ma i fiorentini non ne vollero sapere di collocare davanti a Palazzo Vecchio una copia eseguita in un materiale così diverso dall'originale, allora questo fu posto al centro del nuovo piazzale costruito da Giuseppe Poggi lungo il viale di circonvallazione (l'attuale Piazzale Michelangelo). Il vuoto creatosi in piazza della Signoria restò tale fino al 1910, quando Luigi Arrighetti scolpì la copia in marmo che ancora oggi si può ammirare davanti Palazzo Vecchio. Il David

originale venne così riparato dalle intemperie e rimesso in piombo, quindi non fu giudicato necessario compiere altre operazioni di consolidamento e il Gigante rimase libero sulla sua nuova base, in mezzo alla Tribuna, come ancor oggi si vede.

Durante la prima e la seconda guerra mondiale la statua venne chiusa in una capsula in muratura (fig 1.11) per proteggerla da eventuali attacchi aerei.



Fig 1.11 – Demolizione delle opere in muratura alla fine della seconda guerra mondiale, (Paolucci et al., 2004).

### 1.2.2 – Caratteristiche del marmo

Il marmo del David è composto prevalentemente da calcite ed è caratterizzato da una struttura poligonale granoblastica con contatti tra i cristalli di calcite, i quali non sono isorientati. Le dimensioni dei cristalli variano da 200 a 500  $\mu\text{m}$ . Uno studio effettuato dal CNR ha mostrato

fenomeni di decadimento individuati dalla separazione diffusa tra i cristalli dovuta allo sviluppo della porosità intercrystallina.

Nella figura seguente (1.12) si può osservare la struttura cristallina di un dito del piede del David in cui è mostrata la porosità intercrystallina dovuta ai fenomeni di dilatazione termica dei cristalli di calcite.

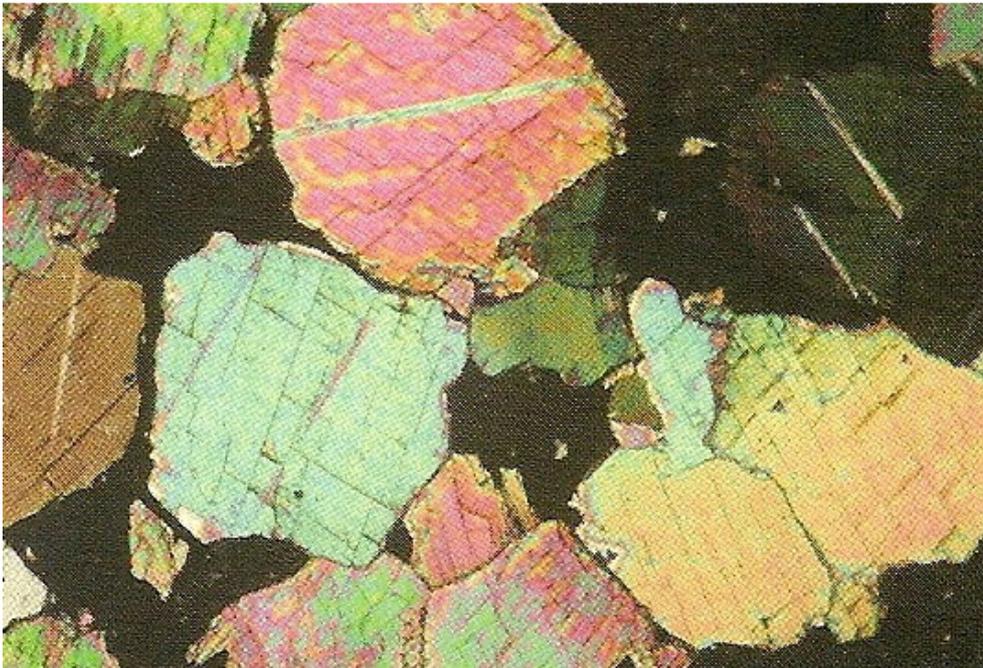


Fig 1.12 – Struttura cristallina di un dito del piede  
(Bracci et al., 2004).

Lungo la superficie del David sono distribuite numerose piccole cavità di circa un millimetro dette *taròli* e *tarme* a seconda delle loro dimensioni (fig 1.13). I primi hanno dimensioni inferiori al millimetro mentre le seconde di alcuni millimetri. Queste cavità non sono il risultato del deterioramento del materiale ma sono una caratteristica tipica della struttura del marmo estratto dalle Alpi Apuane. Nell'immagine seguente sono mostrati, nella parte sinistra, taròli presenti sulla superficie e in quella destra un ingrandimento degli stessi.



Fig 1.13 – Taròli sulla superficie del marmo (Bracci et al., 2004).

Un'indagine sperimentale effettuata dalla Regione Toscana nell'ambito dell'iniziativa per il "Progetto Marmi" ha permesso di confrontare, anche se indirettamente, i valori di resistenza a trazione del marmo con cui è stato realizzato il David rispetto ai valori medi di resistenza a trazione del marmo bianco estratto dalle cave attive nei pressi di Carrara.

Il valore determinato da una prova di trazione diretta su un provino di marmo abbastanza simile a quello che costituisce il David è  $3-4 \text{ N/mm}^2$ , mentre per il marmo bianco di Carrara la resistenza media a flessione è  $18,5 \text{ N/mm}^2$  e comunque nessun campione ha fornito un valore inferiore a  $7,2 \text{ N/mm}^2$ . È importante notare che le modalità con cui sono state effettuate le prove sono differenti. Il valore di resistenza riguardante il marmo utilizzato per realizzare il David, infatti, è stato determinato da una prova di trazione diretta mentre sui provini estratti dalle cave è stata effettuata una prova di flessione. La resistenza a trazione derivante da una prova a flessione è generalmente superiore a quella derivante da una prova di trazione diretta ma questo non giustifica una differenza di valori così marcata. Si può quindi affermare che il marmo utilizzato per la realizzazione del David ha proprietà meccaniche scadenti.

## 1.3 – Analisi statica e modellazione

### 1.3.1 - Analisi statica del David

Nell'intraprendere lo studio della stabilità del David di Michelangelo emergono quattro importanti caratteristiche che ne condizionano il comportamento meccanico:

- la qualità del marmo, di scarsa resistenza e facile degrado;
- la forma della statua, troppo sporgente in avanti e notevolmente snella nella zona delle caviglie;
- la vita attesa del David, da ipotizzare infinita;
- l'ancoraggio del basamento della statua alla fondazione.

Durante l'intervento di restauro del 2003 è emerso che le fratture nel tronco sono più numerose e di lunghezza notevolmente maggiore rispetto a quelle rilevate nel 1871, inoltre arrivano ad interessare anche il tratto inferiore del tronco stesso, che appare indebolito nella capacità di trasferire sollecitazioni di trazione al sottostante basamento. Nella gamba sinistra, inoltre, le lesioni risultano più numerose e di lunghezza maggiore anche se sono ancora definibili come "pelature". A seguito dell'intervento di restauro, comunque, le lesioni sono oggi poco visibili ad occhio nudo.

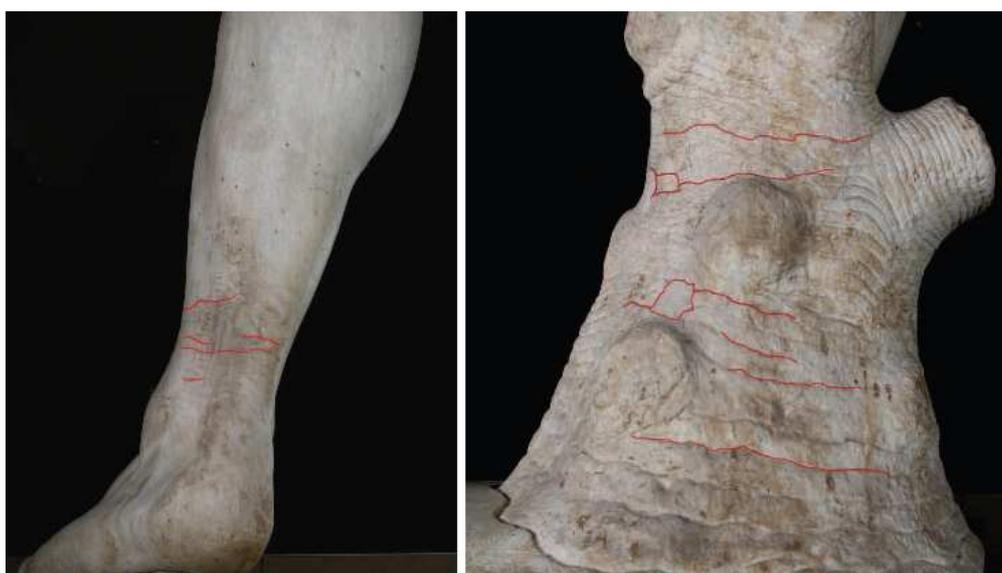


Fig 1.14 – Quadro fessurativo esistente (Borri, 2005).

Si assume che la causa principale delle lesioni sia l'inclinazione assunta dalla statua nel tempo e analizzando il dissesto dal punto di vista geotecnico è possibile fare alcune considerazioni. La differenza di peso del David e della Giuditta di Donatello, che prima occupava lo spazio antistante Palazzo Vecchio, è notevole e quindi si può pensare che per il David, oltre ad un nuovo basamento, sia stata realizzata anche una adeguata struttura di fondazione. La rotazione della fondazione della statua può essere dovuta a vari fattori:

- l'eccentricità dei carichi rispetto alla base d'appoggio;
- gli effetti delle vibrazioni cicliche dovute, ad esempio, ai carri che transitavano nelle vicinanze della statua.
- le azioni dovute ai terremoti e al vento.

Se si considera la proiezione verticale del baricentro del complesso statua + basamento nella situazione di massimo carico ( statua + calco + basamento) si nota che questo è in posizione eccentrica rispetto al baricentro della superficie di appoggio sul terreno. Questo comporta una distribuzione non uniforme delle pressioni di contatto e quindi cedimenti non uniformi. Nella figura seguente (1.15) è indicato con  $G_t$  il baricentro delle masse e con  $G_b$  il baricentro della base di appoggio sul terreno.

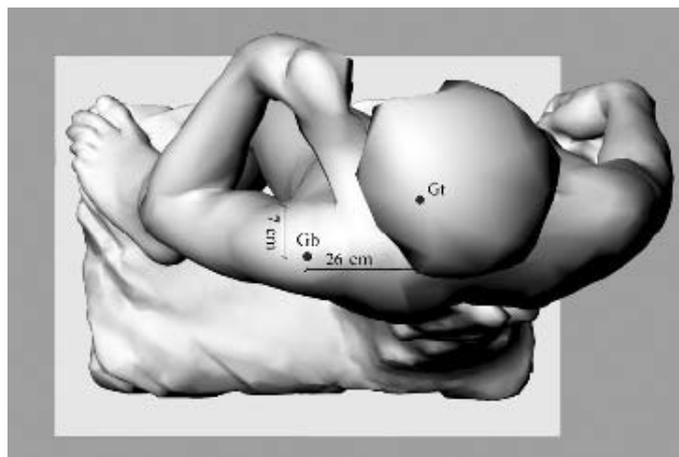


Fig 1.15 – Proiezione del baricentro delle masse (Borri, 2005).

Facendo ricorso alla modellazione elastica del terreno rappresentata nelle figure 1.16 e 1.17 si può notare che le tensioni verticali e, di conseguenza, gli abbassamenti hanno un andamento dissimmetrico sotto la statua con valori

maggiori verso il bordo anteriore del basamento. Stesse osservazioni possono essere fatte per la direzione ortogonale in quanto i cedimenti sono maggiori sotto la parte destra della statua. In particolare nella figura 1.16 è possibile osservare la vista laterale, mentre nella 1.17 quella frontale.

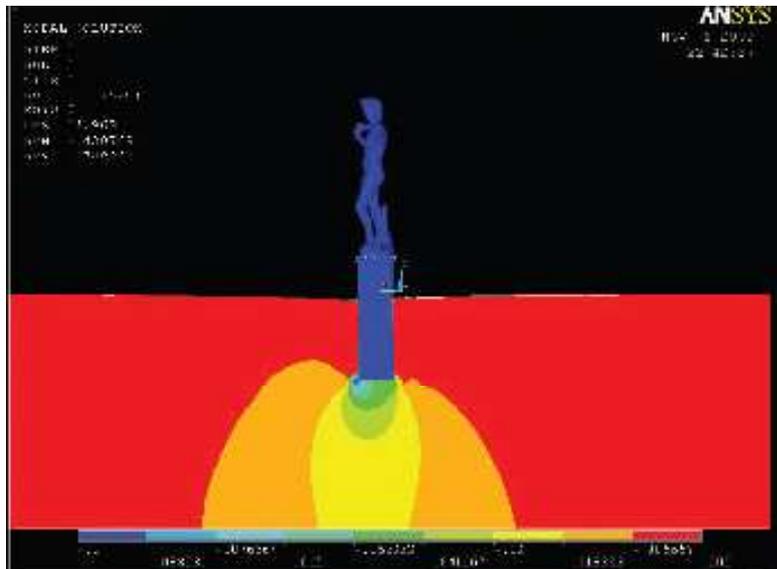


Fig 1.16 – Modellazione del terreno sotto la statua, vista laterale (Borri, 2005).

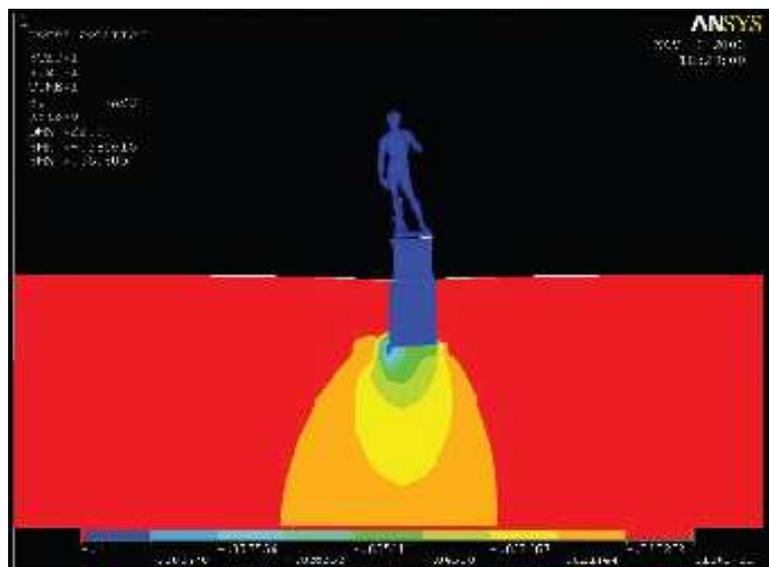


Fig 1.17 - Modellazione del terreno sotto la statua, vista frontale (Borri, 2005).

I moderni strumenti numerici di analisi strutturale consentono di indagare efficacemente sulla veridicità di ogni ipotesi diagnostica. L'indagine, nel caso in esame, è stata effettuata per verificare se l'inclinazione della statua sia la causa originaria delle lesioni.

L'ISTI-CNR in collaborazione con l'Università di Stanford ha realizzato un rilievo con tecnologia laser-scan dell'opera partendo dal quale si è ottenuto un modello tridimensionale agli *elementi finiti* che ha consentito di valutare il comportamento strutturale del David. In figura 1.18 è possibile osservare una fase del processo di acquisizione del modello. Il modello tridimensionale ottenuto dal rilievo ha fornito una superficie formata da oltre 50 milioni di triangoli che è stata poi semplificata a 20.000, 50.000 e 100.000 triangoli. Tali superfici hanno consentito di rappresentare il volume del solido della statua che è poi servito per la definizione degli oltre 400.000 elementi finiti del modello.

Utilizzando il programma *MeshLab* è possibile effettuare importanti operazioni sul modello, come la misura delle distanze e il tracciamento delle sezioni alle varie altezze della statua.



Fig 1.18 – Fasi del processo di acquisizione del modello digitale  
(Borri, 2005).

Nelle figure 1.19 e 1.20 sono osservabili attraverso MeshLab rispettivamente una visione dall'alto e una frontale del David. La figura 1.21 è una

rappresentazione del broncone ottenuta con lo stesso programma in cui è stata misurata l'altezza dell'elemento, pari a circa 1383 mm.

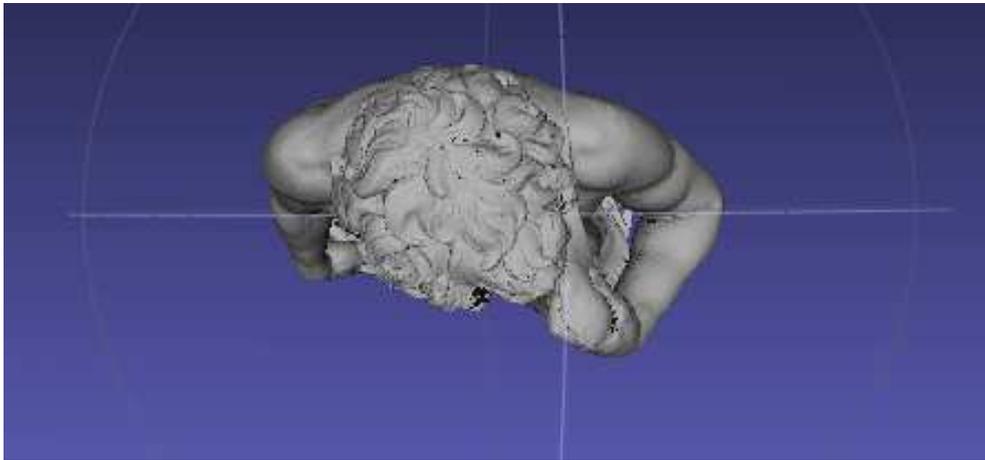


Fig 1.19 – Vista dall'alto utilizzando MeshLab.



Fig 1.20 – Vista frontale utilizzando MeshLab.

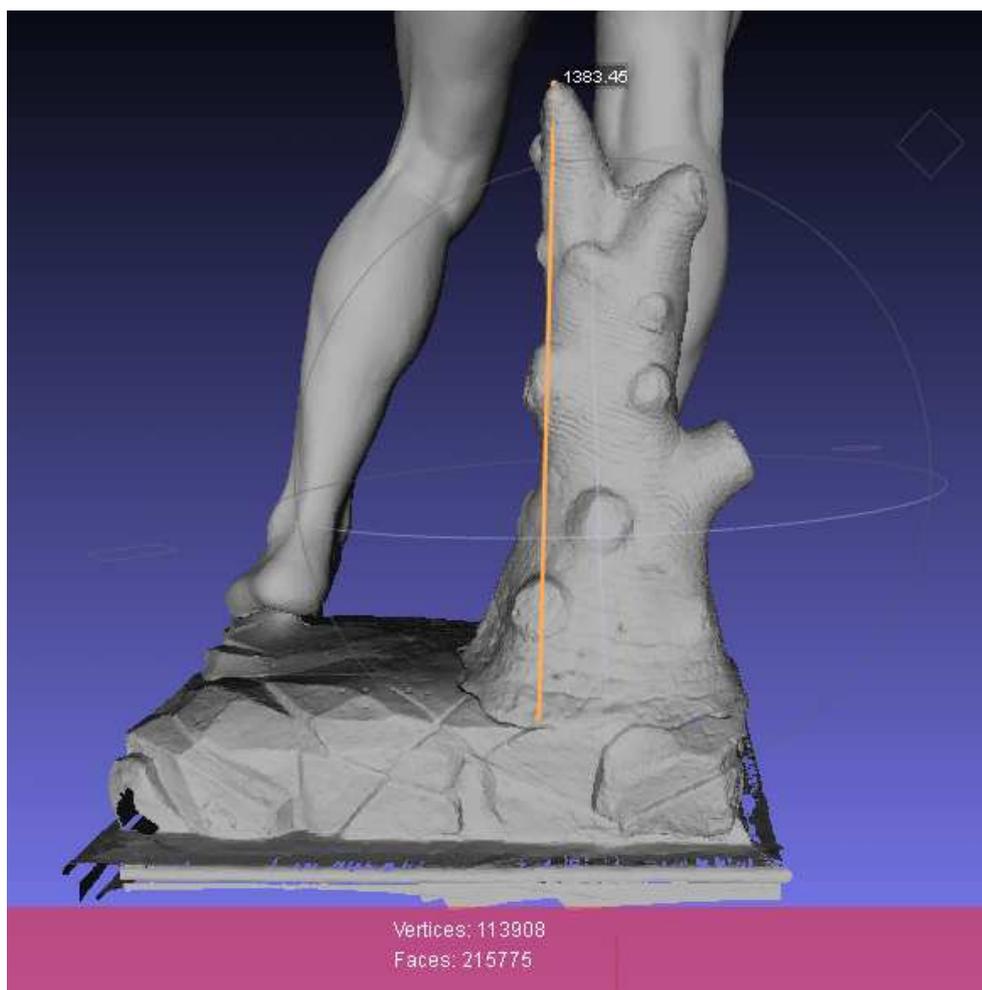


Fig 1.21 – Vista broncone utilizzando MeshLab.

Con l'ausilio di un codice di calcolo sono state poi effettuate le analisi strutturali [4] volte a valutare lo stato tensionale nei vari punti della statua, trascurando però i carichi dovuti al calco del 1847, prima in posizione verticale e poi per effetto di varie inclinazioni del basamento.

L'analisi condotta in condizioni di perfetta verticalità mostra che i punti di maggiori tensioni di trazione sono situati nelle zone posteriori del broncone e della caviglia sinistra. Da ciò appare evidente che il broncone rappresenti un elemento vitale per la statua senza il quale la stessa non riuscirebbe a sopportare le trazioni causate dall'eccentricità dei carichi. Il broncone è stato quindi accuratamente posizionato da Michelangelo in modo da assorbire le tensioni di trazione che nascono dalle distribuzioni delle masse.

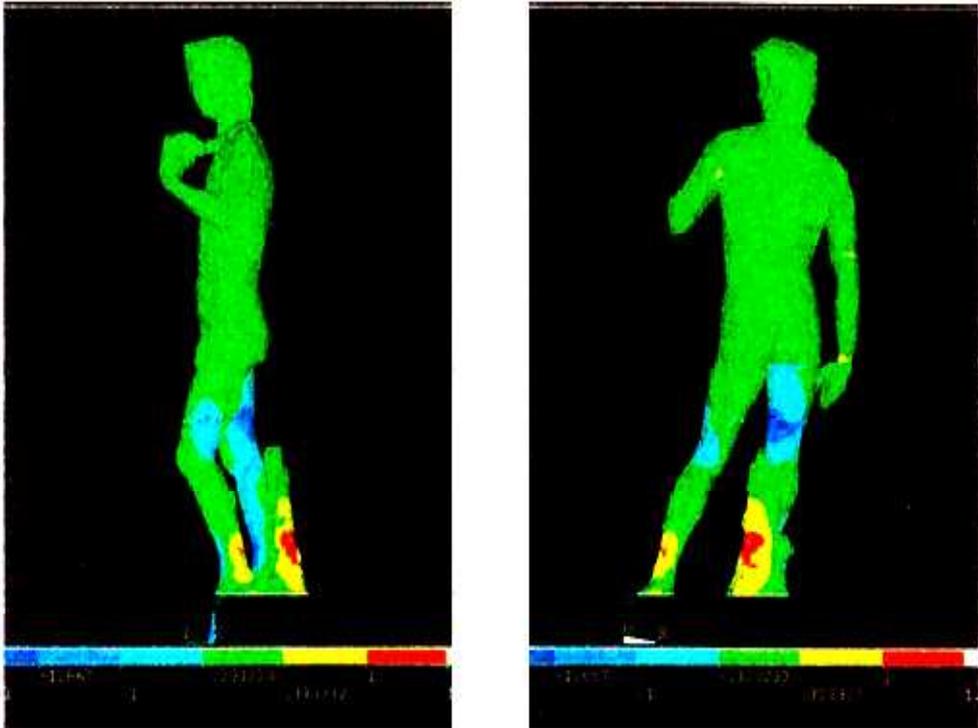


Fig 1.22 – Distribuzione delle tensioni verticali nel David nelle condizioni attuali (Borri, 2005).

Dal confronto tra le immagini ottenute dall'analisi FEM e le foto della statua emerge chiaramente che le zone maggiormente sollecitate sono quelle nelle quali si sono formate le lesioni. Le analisi effettuate sono di tipo elastico-lineare in quanto lo scopo dello studio era quello di individuare le zone caratterizzate dai maggiori valori di tensioni di trazione considerando la statua in condizioni originarie, ovvero non fessurata.

I risultati dell'elaborazione FEM consentono di mettere in relazione l'inclinazione con il quadro fessurativo rilevato e quindi consentono di associare le lesioni presenti ad un movimento della statua avvenuto nella seconda metà dell'Ottocento. In figura 1.23 si possono confrontare, sia per la gamba sinistra che per il broncone, la distribuzione delle tensioni verticali (a sinistra) e il quadro fessurativo esistente (a destra).



Fig 1.23 – Confronto tra quadro fessurativo e zone di massima tensione di trazione (Borri, 2005).

Una volta accertato che la causa principale delle lesioni sia stata l'inclinazione assunta dalla statua, è risultata chiara l'importanza di conoscere l'entità della rotazione. A tale scopo sono stati fatti rilievi a partire da immagini fotografiche reperite sia presso l'archivio storico degli Alinari che presso i discendenti del fotografo Anton Hautmann che a metà Ottocento aveva lavorato a Firenze. Da questa ricerca è stato possibile valutare l'inclinazione effettiva del David in quel periodo, pari a circa un grado in avanti.

Successivamente è stato analizzato il modello strutturale considerando la statua inclinata in avanti del valore ottenuto e si è trovata una tensione

massima nelle zone fratturate pari a  $2,1 \text{ N/mm}^2$  (fig 1.24). Questo valore rappresenta un limite superiore per la tensione di rottura del materiale con cui è stata realizzata la statua, poiché quando si aveva quell'inclinazione si avevano già fratture nelle zone soggette a trazione. Quel materiale, allora, ha una resistenza a trazione per flessione non superiore a quanto ottenuto dal modello strutturale in quella zona. Bisogna ricordare, però, che la fessurazione non è dovuta unicamente alle tensioni di trazione in quanto questa è stata sicuramente accelerata dai cicli termici e di gelo-disgelo.

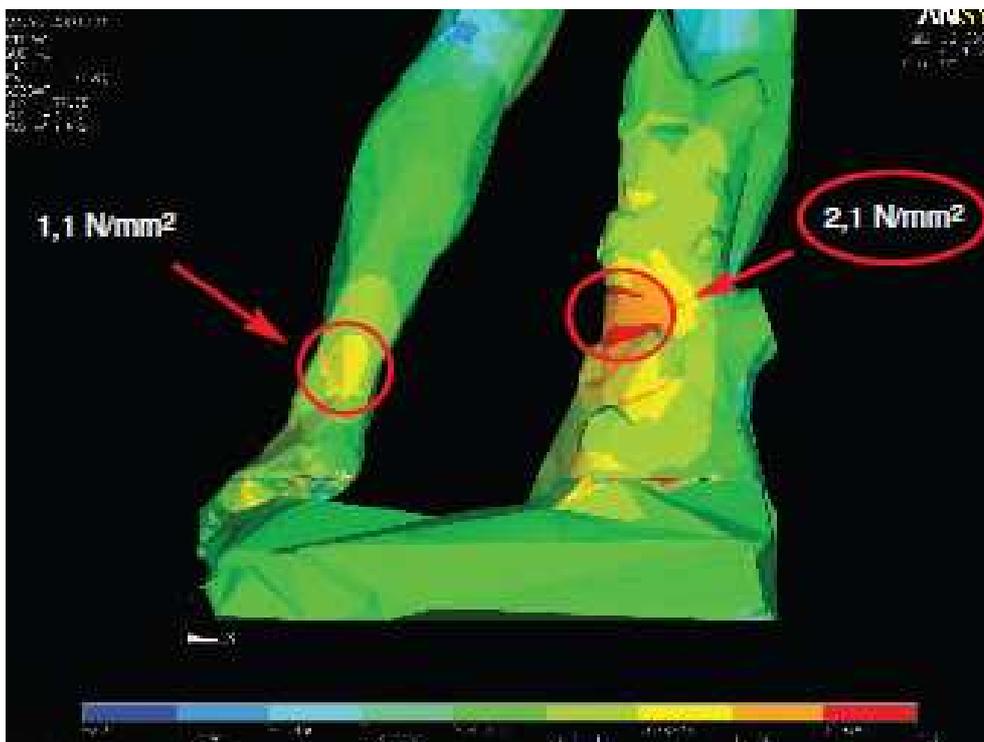


Fig 1.24 – Tensioni sulle due gambe per una inclinazione di un grado in avanti (Borri, 2005).

Successivamente si è voluto valutare se esiste una differenza tra il comportamento dello strato esterno di marmo, esposto per secoli agli agenti atmosferici e gli strati interni, sicuramente più protetti. Per fare questo è stato utilizzato un campione di marmo dismesso presso l'Opera del Duomo di Firenze, rappresentato in figura 1.25, che presenta caratteristiche abbastanza simili a quelle della statua in esame. Da questo campione sono stati estratti 6 provini dalla parte esterna e 6 provini dalla zona interna. In seguito sono state effettuate prove di flessione dalle quali si è ottenuta una resistenza ultima a

trazione leggermente superiore a  $3 \text{ N/mm}^2$  per i campioni prelevati dalle parti interne dell'elemento marmoreo e pari a  $2 \text{ N/mm}^2$  dai campioni estratti dalle zone esterne dello stesso, esposte agli agenti atmosferici.

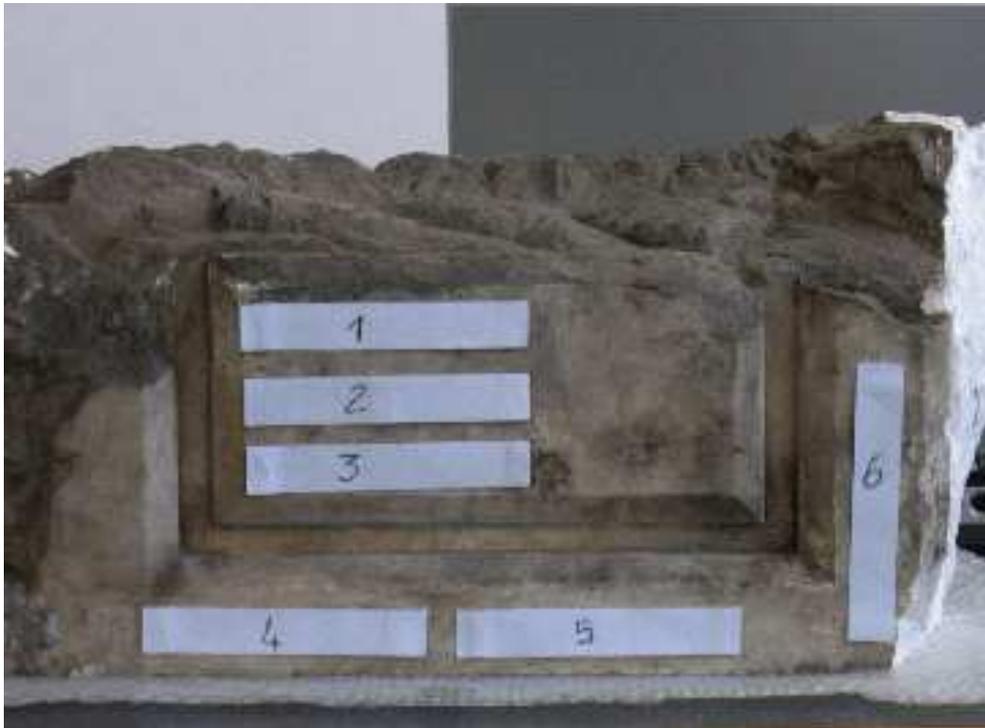


Fig 1.25 – Elemento marmoreo dismesso dall'Opera del Duomo  
(Borri, 2005).

Sulla base di questi risultati si può dire che le lesioni situate nella parte inferiore della statua interessano solo la fascia superficiale, indebolita dall'azione degli agenti atmosferici. La zona interna del materiale, essendo maggiormente protetta, presenta migliori proprietà ed è riuscita a conservare l'equilibrio scongiurando il crollo dell'opera. I valori ottenuti, tuttavia, non sono significativamente diversi fra loro, per cui si può concludere che le parti interne della statua hanno una resistenza non molto superiore a quella della fascia esterna.

### 1.3.2 – Modellazione del David

Analizzando la Pietà e il Mosè, due opere scultoree celeberrime di Michelangelo, si nota che entrambe sono caratterizzate da una forma

massiccia nella parte inferiore, in grado di trasferire bene il proprio peso alla base. Questo non può essere detto, invece, per il David.

La determinazione dello stato di sollecitazione di questa statua può essere ottenuta utilizzando modelli numerici in grado di descriverne il comportamento. Partendo da modelli semplificati, attraverso successivi affinamenti, si è ottenuto un modello solido tridimensionale agli elementi finiti. Una prima schematizzazione ha considerato le tensioni medie di compressione: mediante un'elaborazione del modello superficiale fornito dall'ISTI-CNR, il volume della statua è stato suddiviso in varie parti ed è stato determinato il valore delle tensioni medie di compressione agenti ad ogni livello esaminato. Questo ha consentito di mettere in evidenza i modesti valori delle tensioni normali e la concentrazione di oltre l'80% del peso al di sopra delle gambe. In figura 1.26 sono indicati i valori delle tensioni medie ottenuti.

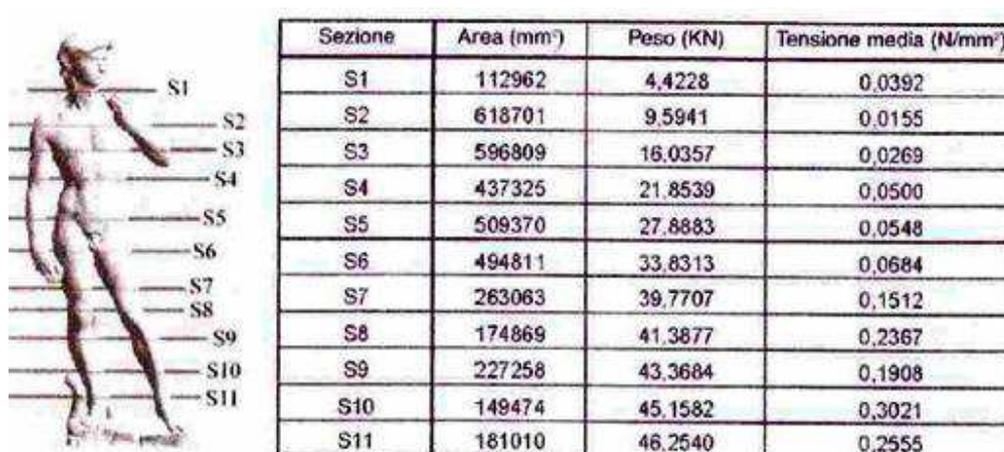


Fig 1.26 – Valori delle tensioni medie lungo l'altezza (Borri, 2005).

L'opera ai fini dell'analisi è stata considerata inizialmente come un elemento solido monodimensionale incastrato alla base. Con questa schematizzazione si è ottenuto che la parte esterna del broncone è soggetta a tensioni di trazione non trascurabili. Il David però nella parte inferiore non è caratterizzato da una sezione monoconnessa, ma da due gambe che dovrebbero essere analizzate indipendentemente l'una dall'altra.

Per questo motivo si è passati ad un modello a traliccio (fig 1.27) che ha confermato sostanzialmente i risultati precedentemente ottenuti.

L'analisi è stata poi ulteriormente perfezionata mettendo a punto diversi modelli tridimensionali che hanno consentito di rappresentare in modo

completo la distribuzione delle sollecitazioni. In questa fase si sono presentate notevoli difficoltà in quanto la superficie del David è stata acquisita con una tecnica che non consente l'utilizzazione immediata dei dati a causa della necessità di chiudere le zone, come le attaccature delle gambe e delle braccia, non raggiungibili con il laser.

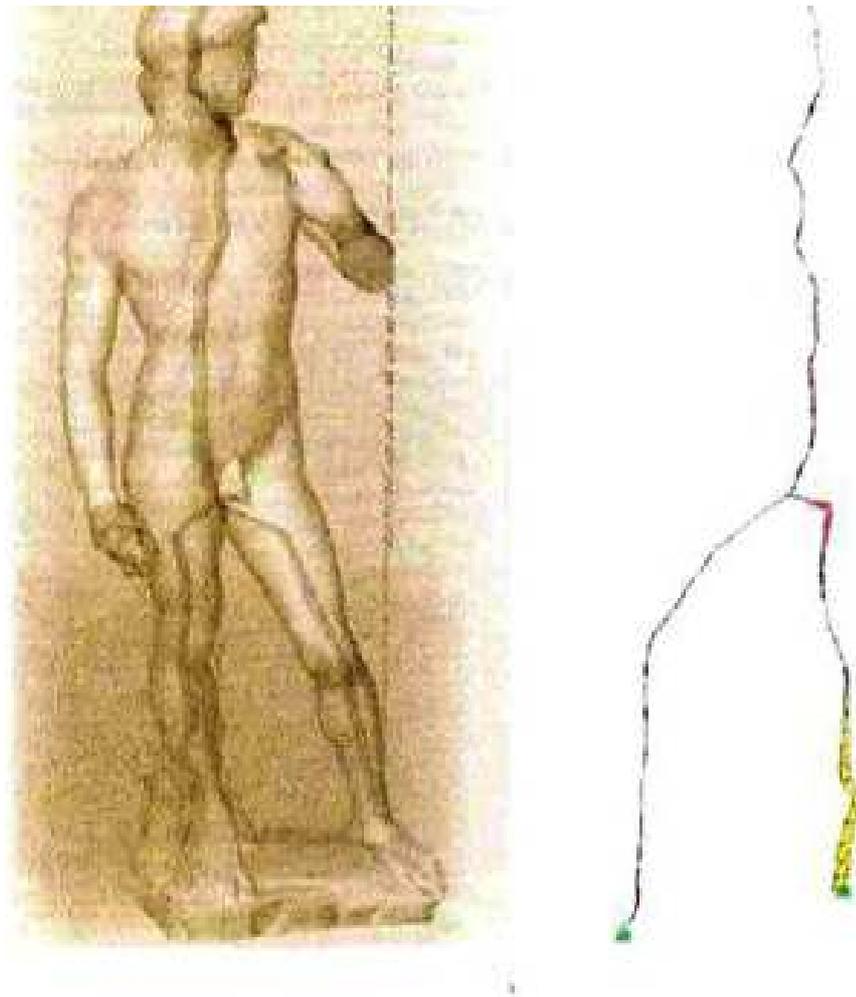


Fig 1.27 – A sinistra schematizzazione a traliccio e a destra distribuzione dei momenti (Borri, 2005).

Si è poi provveduto poi a ridurre il numero delle facce che costituiscono il modello passando da 20.000 triangoli a circa 12.000 e a trasformare la mesh in un unico soggetto tipo NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Le curve NURBS sono curve bidimensionali la cui forma è determinata da una serie di punti di controllo attraverso i quali passano le curve stesse; quando più curve vengono unite formano una superficie NURBS tridimensionale.



Fig 1.28 – Modello solido utilizzato (Borri, 2005).

Queste operazioni hanno portato ad un modello finale in cui il volume complessivo varia per meno del 2% da quello iniziale. L'analisi eseguita sul modello, considerando la statua perfettamente verticale, ha messo chiaramente in evidenza la stretta corrispondenza tra le zone più sollecitate e la posizione effettiva delle lesioni (fig 1.29).

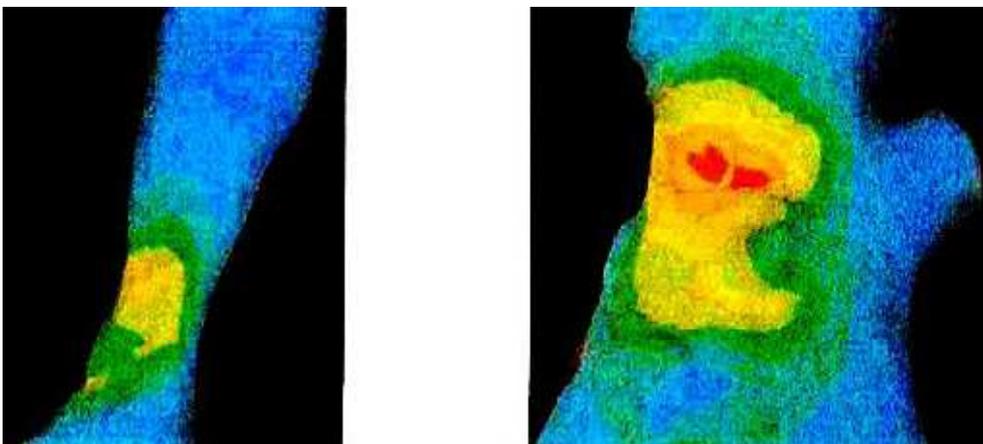


Fig 1.29 – Sovrapposizione tra mappatura delle tensioni verticali e posizione delle lesioni (Borri, 2005).

Successivamente è stato ideato un modello agli elementi finiti per considerare la presenza di uno stato fessurativo. Si è così considerata una riduzione della sezione causata dalla lesione tale da comportare un interessamento massimo di 10 mm di profondità. Considerando sempre la perfetta verticalità della

statua si sono ottenuti valori delle tensioni maggiori rispetto al caso di sezione interamente reagente e pari a  $2,1 \text{ N/mm}^2$  sulla parte destra e  $1,6 \text{ N/mm}^2$  su quella sinistra. Questi valori sono comunque abbastanza lontani dal valore limite di resistenza del materiale non degradato ( pari a  $3-4 \text{ N/mm}^2$ ).

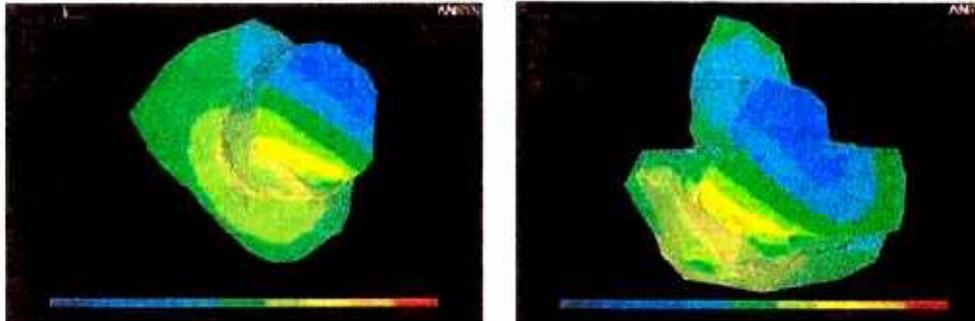


Fig 1.30 – Distribuzione delle tensioni normali nelle sezioni lesionate (Borri, 2005).

Per valutare l'importanza del broncone nella statica del David è stato ideato un modello privo dello stesso (fig 1.31), rimodellando la gamba destra. Questa analisi ha messo in evidenza che le tensioni avrebbero raggiunto un valore di circa  $4 \text{ N/mm}^2$ , il quale avrebbe portato sicuramente al collasso la sezione di maggiore sollecitazione.

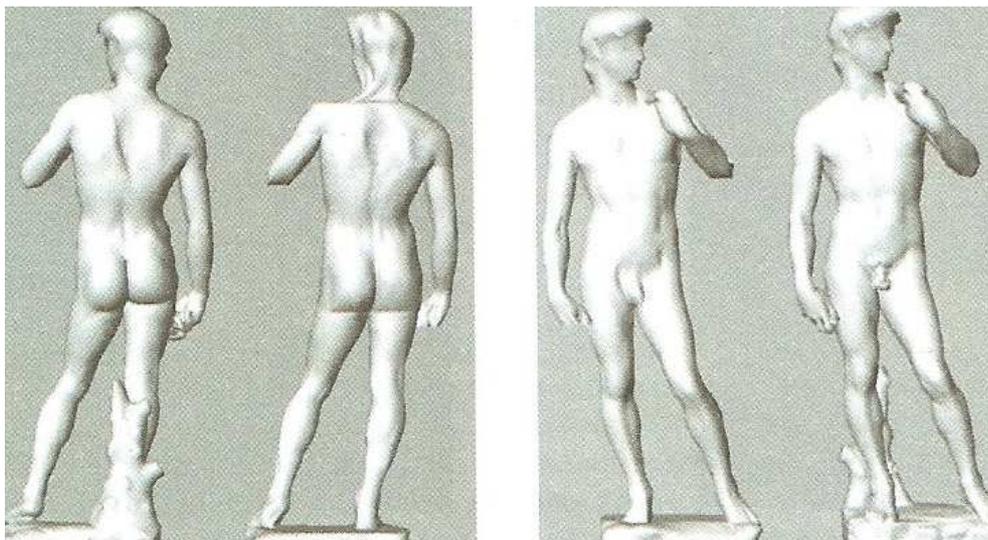


Fig 1.31 – Confronto tra il modello privo del broncone e l'originale (Borri, 2005).

## 1.4 – Analisi delle condizioni microclimatiche

L'analisi delle condizioni microclimatiche è una fase molto importante del programma di monitoraggio del David. È interessante valutare, infatti, le condizioni esistenti e la qualità dell'aria all'interno della Galleria dell'Accademia in modo da proteggere la statua da ogni aggressione chimica o fisica ma, al tempo stesso, di garantire un ambiente idoneo al costante flusso di visitatori che ogni giorno arriva in queste sale.

Durante uno studio effettuato dall'Opificio delle Pietre Dure di Firenze si sono rilevati dati a tre livelli di altezza ( testa, metà e piedi del David). L'analisi di questi valori ha mostrato una situazione microclimatica relativamente instabile. Le misure dei parametri microclimatici hanno coperto un periodo di circa sei mesi, dal 7 novembre 2002 al 28 aprile 2003 con un'interruzione durante il mese di febbraio.

La campagna di misure è stata suddivisa in due sotto-periodi: il primo va da novembre 2002 fino a gennaio 2003, il secondo da marzo ad aprile 2003.

Durante il primo sotto-periodo si sono registrate limitate variazioni della temperatura giornaliera e di conseguenza anche i valori di umidità sono stati abbastanza stabili. Durante il secondo sotto-periodo, invece, si sono rilevate variazioni di temperatura giornaliera maggiori con conseguenti variazioni più evidenti dell'umidità relativa.

Confrontando i parametri microclimatici rilevati ai tre livelli di altezza si può notare una tipica stratificazione atmosferica con l'aria più calda a livello della testa del David e valori igrometrici inferiori a quelli registrati negli altri punti. Questo può essere parzialmente dovuto all'effetto dell'irradiazione attraverso il lucernario situato sopra la statua. Nella figura 1.32 sono indicati in rosso i valori medi giornalieri della temperatura e in blu quelli dell'umidità relativa rilevati a livello della testa. Dall'analisi si può notare che la temperatura media giornaliera oscilla attorno a 20 °C. La situazione è opposta a livello dei piedi dove l'umidità relativa è leggermente maggiore e la temperatura più bassa. Nell'immagine 1.33 sono rappresentati i valori minimi e massimi giornalieri di temperatura e umidità relativa misurati a livello dei piedi. I valori massimi di temperatura sono disegnati in rosso e quelli minimi in

verde, mentre i valori massimi di umidità relativa sono riportati in blu e quelli minimi in azzurro.

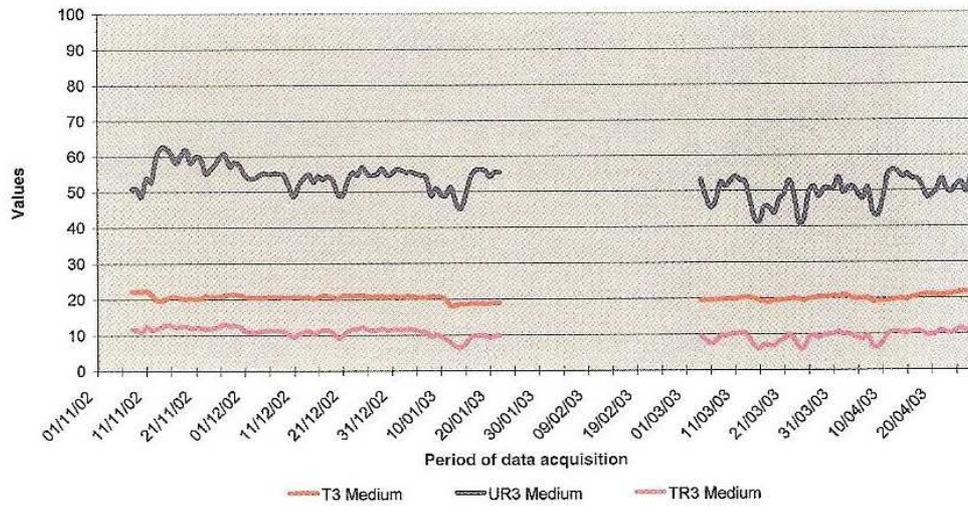


Fig 1.32 – Valori medi giornalieri di temperatura (in rosso) e di umidità Relativa ( in blu) a livello della testa (Bracci et al., 2004).

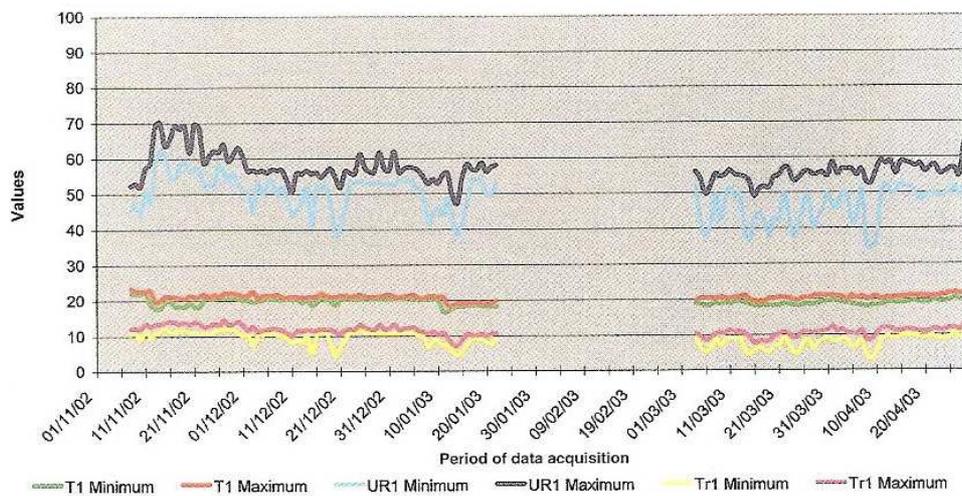


Fig 1.33 – Valori giornalieri massimi e minimi a livello dei piedi (Bracci et al., 2004).

## 1.5 – Analisi sismica

### 1.5.1 – Storia sismica di Firenze

Uno degli aspetti più importanti da analizzare durante lo studio del David di Michelangelo è il suo comportamento nei confronti delle azioni sismiche. La città di Firenze nel corso della sua storia ha subito alcuni terremoti di forte intensità, anche del 7° della scala Mercalli (MCS), nelle seguenti date:

- **7-8-1414:** sisma di intensità locale del 7° della scala MCS che causò la caduta di più di 200 comignoli e il crollo di alcuni tetti e muri;
- **28-9-1453:** terremoto di intensità locale del 7° della scala MCS che danneggiò notevolmente la città. Nella cattedrale di S. Maria del Fiore (all'epoca S. Reparata) si aprirono fenditure nelle volte;
- **13-6-1542:** evento sismico di intensità locale del 6° della scala MCS che non provocò danni alla città;
- **28-11-1554:** sisma di intensità locale del 6,5° della scala MCS che non causò danni significativi;
- **27-12-1770:** terremoto di intensità locale del 6° della scala MCS avvertito molto fortemente in città ma che provocò solo la caduta di alcuni comignoli;
- **12-3-1873:** evento di intensità locale pari al 6° della scala MCS che provocò alcuni danni e venne avvertito in modo molto intenso;
- **18-5-1895:** sisma di intensità pari al 7° grado della scala MCS che causò danni estesi ma generalmente non gravi nei quartieri del centro storico e danni più accentuati nei quartieri più periferici della città. Furono lesionate 14 chiese tra cui S. Maria del Fiore e in modo più grave S. Maria Novella, 9 conventi e monasteri, 16 palazzi tra cui Palazzo Vecchio e più di 1000 abitazioni private.
- **29-6-1919:** terremoto di intensità locale del 6° della scala MCS che provocò danni non particolarmente rilevanti.

L'area sismogenetica responsabile dei maggiori effetti macrosismici risentiti a Firenze (terremoti del 1453 e del 1895) si trova a sud della città a circa 15 km di distanza dal centro cittadino.

Sulla base di quanto descritto nella pagina precedente, si può osservare che il sisma più intenso che ha subito il David nel corso della sua storia, è stato quello del 18 maggio 1895 del 7° della scala Mercalli. In figura 1.33 è riportata una rappresentazione della città di Firenze suddivisa in zone a seconda dell'intensità del sisma del 1895, misurata utilizzando la Scala Macrosismica Europea (EMS92). Questa scala, creata nel 1992 e aggiornata nel 1998, rileva l'entità degli effetti di un terremoto. Si può osservare che, per gran parte dell'area analizzata, l'intensità stimata sia compresa tra il VI ed il VII grado e che i maggiori effetti sono concentrati nella parte nord-orientale della città, dove in alcuni punti si arrivano a toccare i gradi VIII e IX. Questo appare sorprendente in quanto tale area si trova a maggior distanza dalla sorgente di quella sud-orientale dove invece gli effetti sono solo del VI grado.

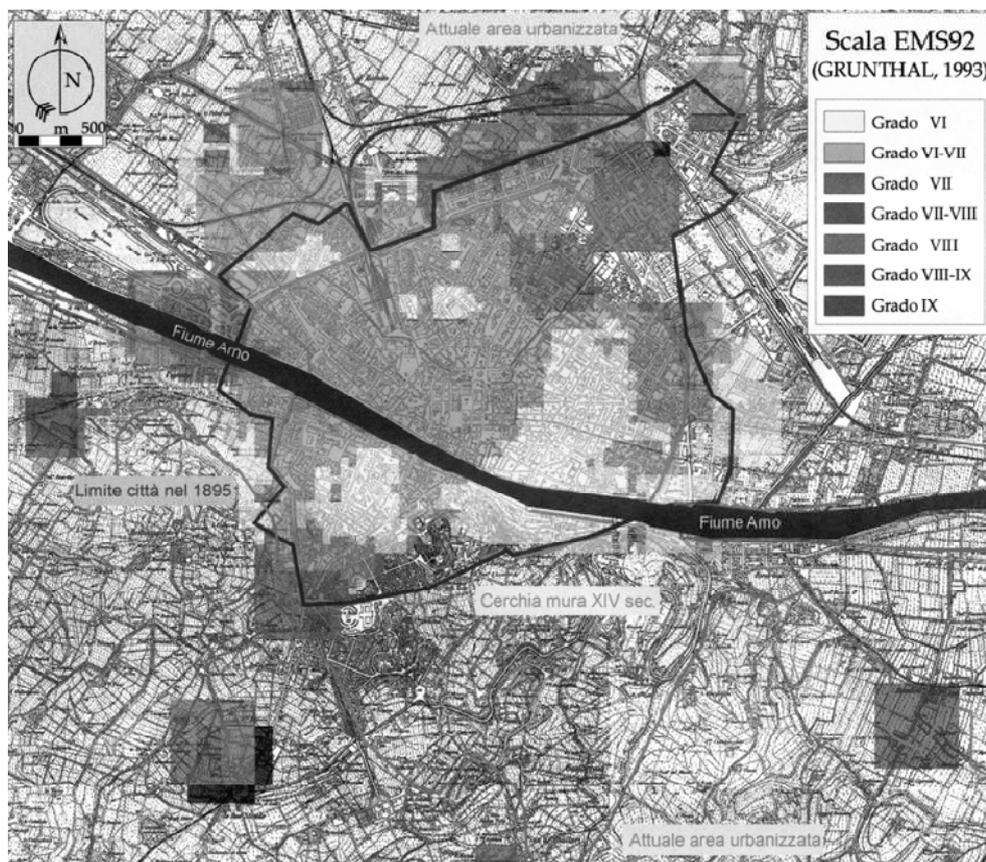


Fig 1.33 – Intensità EMS92 del terremoto del 1895 a Firenze  
(Vannucci et al., 2001).

In figura 1.34 è riportata una veduta aerea della città di Firenze in cui la freccia rossa indica la posizione della Galleria dell'Accademia. Dal confronto delle figure 1.33 e 1.34 si può concludere che la Galleria ha subito nel 1895

un evento di intensità compresa tra il VI e il VII grado della scala EMS. Il VI grado viene definito *leggermente dannoso* e comporta solo danni superficiali agli edifici, mentre il VII grado viene definito *dannoso* e causa danneggiamenti moderati alle costruzioni come crepe nei muri e parziale collasso dei comignoli.



Fig 1.34 – Veduta aerea di Firenze con indicata la posizione della Galleria.

### 1.5.2 – Risposta sismica del David

Un aspetto importante dell'analisi del David risulta essere la scelta del sisma di riferimento della statua, in quanto non si può considerare una protezione sismica uguale a quella di un manufatto ordinario, per il quale verrebbe adottato comunque un periodo di ritorno del sisma di progetto di 475 anni. Nel caso di un'opera così importante risulta più appropriato scegliere come sisma di progetto il massimo terremoto atteso per la zona considerata. Le indicazioni fornite a questo riguardo provengono da molteplici fonti: le mappe del Servizio Sismico Nazionale, ad esempio, indicano una accelerazione di picco al suolo di 0,16 g mentre uno studio molto dettagliato della sismicità dell'area fiorentina (Vannucchi, 1991) ha stimato,

considerando un tempo di ritorno di 1975 anni, un'accelerazione di picco al suolo pari a 0,21 g. Lo studio ha poi seguito due strade (Borri, 2005): inizialmente la statua è stata analizzata ipotizzandola libera di oscillare sul basamento, priva cioè delle staffe inserite nell'Ottocento. Successivamente è stato valutato il suo comportamento con l'ipotesi di vincolo alla base. Utilizzando un modello di calcolo, sono state effettuate valutazioni dei possibili fenomeni di ribaltamento cui il David potrebbe essere soggetto in caso di terremoto. Queste analisi hanno mostrato che la base della statua e la posizione non molto elevata del centro di massa porterebbero fenomeni di ribaltamento solo al di sopra di 0,8 g, valore caratteristico di sismi di intensità elevatissima che non dovrebbero avvenire nell'area fiorentina. In seguito è stata analizzata la situazione nello stato di fatto, cioè prendendo in considerazione anche le due zanche metalliche che collegano il basamento michelangiolesco al piedistallo ottocentesco e che bloccano l'insorgere di oscillazioni rigide. Queste zanche sono state inserite nel 1873 e proseguono verticalmente nel basamento ottocentesco per circa un metro. Nella figura 1.35 sono evidenziate mediante due cerchi rossi le zanche appena descritte.

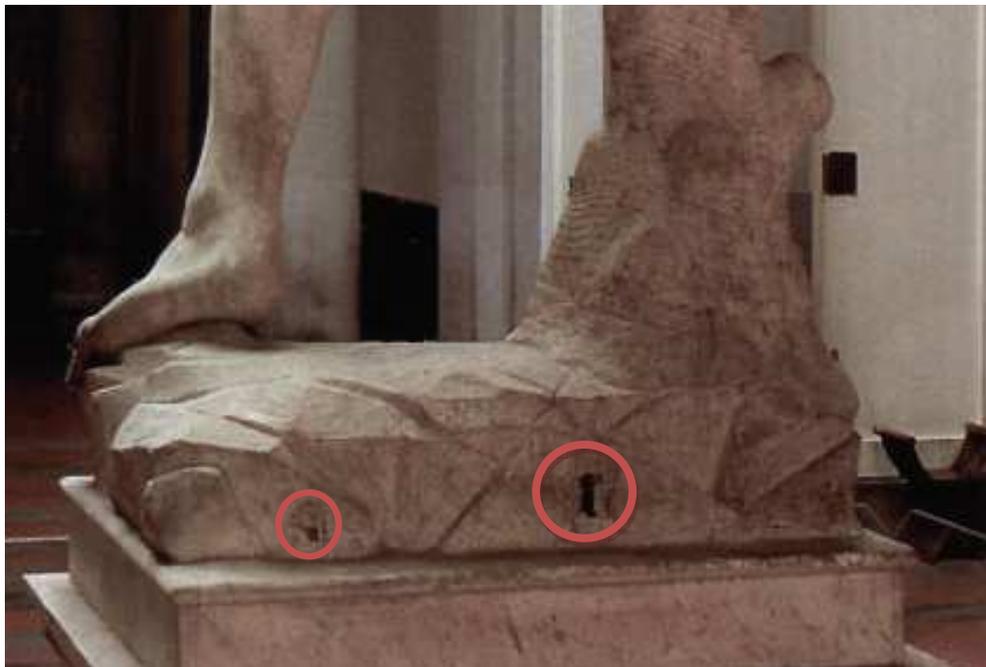


Fig 1.35 – Particolare del basamento con le due zanche (Borri, 2005).

Ipotizzando la statua incastrata alla base è stata realizzata una prima valutazione delle sue caratteristiche dinamiche. Dall'analisi modale del

modello tridimensionale è stato possibile ottenere le prime forme modali e le relative frequenze. In figura 1.36 è rappresentata la prima forma modale , mentre in figura 1.37 la seconda.

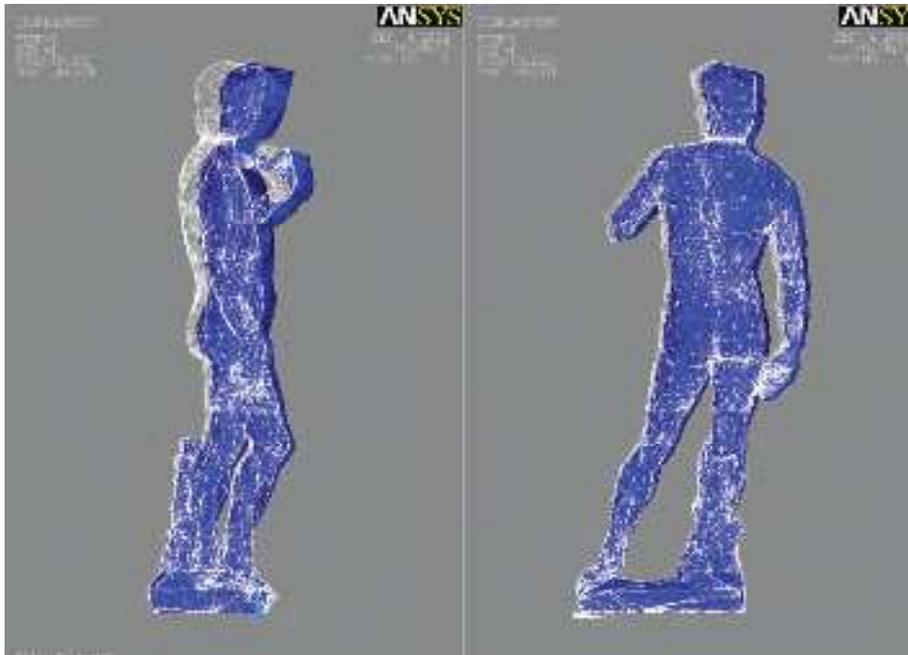


Fig 1.36 – Modi di vibrare: prima forma modale (Borri, 2005).

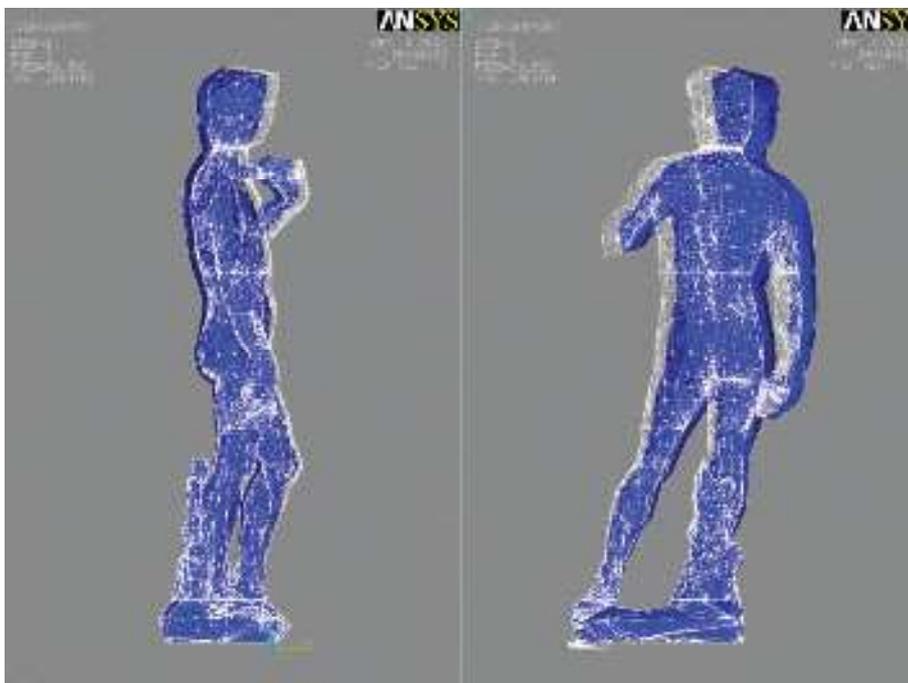


Fig 1.37 – Modi di vibrare: seconda forma modale (Borri, 2005).

Sulla base delle analisi numeriche si è potuto stimare un valore della frequenza principale della prima forma modale compreso tra 6 e 8 Hz, che corrisponde ad un periodo di circa 0,1 secondi.

Al fine di studiare il comportamento dinamico del David è stato utilizzato il modello a traliccio di figura 1.26 precedentemente descritto. Lo scopo finale è quello di valutare le storie di sollecitazione da confrontare con le resistenze ultime determinate in prossimità della sezione critica della gamba destra. Avendo a disposizione le informazioni ottenute dalle prove effettuate sul campione di marmo dismesso dall'Opera del Duomo di figura 1.25, sono stati costruiti i domini di collasso della sezione interessata, su cui è stata individuata una fascia di incertezza rappresentata in colore giallo. Le figure 1.38 a-b-c permettono di osservare i risultati ottenuti considerando un terremoto di progetto con PGA pari rispettivamente a 0,15g, 0,21g, 0,25g, in cui il termine PGA indica la *Peak ground acceleration*, ovvero l'accelerazione di picco al suolo. In queste figure i punti rossi rappresentano i valori raggiunti dalle caratteristiche di sollecitazione durante le analisi dinamiche effettuate alle diverse accelerazioni di picco.

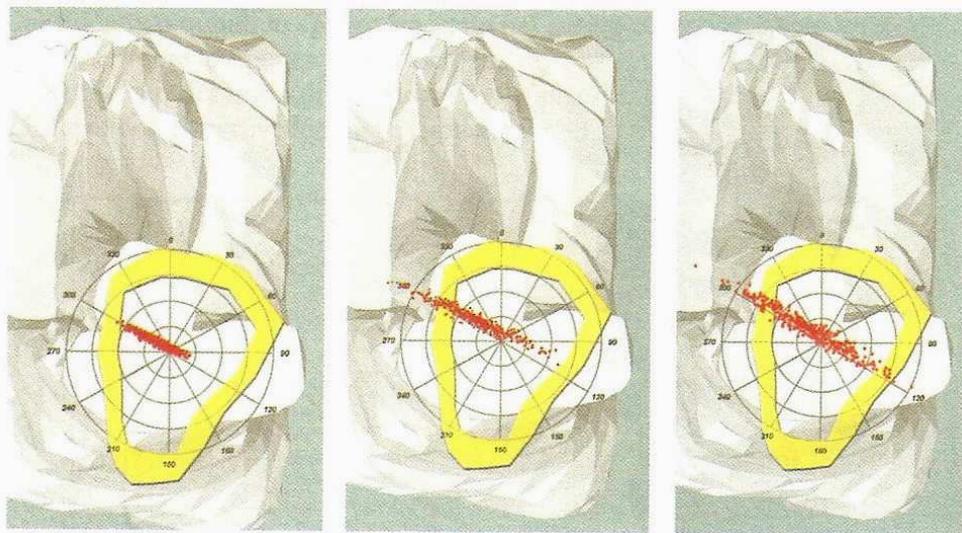


Fig 1.38a : PGA=0,15g    Fig 1.38b : PGA=0,21g    Fig 1.38c : PGA=0,25g  
(Borri, 2005).

Da queste immagini si può notare che già con un terremoto di progetto avente PGA pari a 0,15g, valore rappresentativo di un sisma non particolarmente

distruttivo, il David si trovi in condizioni di forte rischio. Considerando terremoti caratterizzati da valori di PGA superiori, ad esempio 0,21g, che sono previsti nel lungo periodo nell'area fiorentina, si hanno sollecitazioni di gran lunga superiori ai valori limite di resistenza della sezione. La situazione peggiora ulteriormente se si sottolinea che nelle analisi condotte fino ad ora sono state considerate condizioni meno gravose di quella reale in quanto sono stati trascurati i fenomeni di amplificazione locale che possono persino raddoppiare l'accelerazione di picco attesa.

Alcuni studi recenti, inoltre, assumono come massima intensità macrosismica della zona di Firenze valori superiori a quelli visti finora ( $I_{max}=8$ ), per cui il problema della stabilità del David alle azioni sismiche diventa assai rilevante. Risulta, quindi, sempre più necessario un intervento che fornisca garanzie di sicurezza conformi ad un'opera d'arte di così grande valore. Una possibile soluzione potrebbe essere l'inserimento di un sistema di isolamento sismico al di sotto del basamento ottocentesco che consenta di ridurre sia le sollecitazioni sismiche, sia gli effetti delle vibrazioni ambientali che si ripetono con notevole frequenza.

## **2 - SENSORI BRAGG GRATING: GENERALITÀ E PROVE EFFETTUATE**

### **2.1 – Introduzione**

In questo capitolo verranno descritte le analisi effettuate al laboratorio LISG della facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna al fine di accertare il corretto funzionamento dei sensori Bragg grating necessari ad effettuare il monitoraggio delle lesioni presenti nel David. Le fonti utilizzate sono le seguenti:

- [6] Zanolì, 2010;
- [7] Tonioni, 2009;
- [8] Kersey et al., 1997;
- [9] Moerman et al., 1999;
- [10] Culshaw et al., 1991;
- [11] Dakin et al., 1988;
- [12] Ansari, 1988.

Nella prima parte del capitolo, dopo una descrizione delle caratteristiche e delle proprietà principali di questi sensori, saranno presentati brevemente i risultati delle prove di incollaggio e di trazione riportati nella Tesi di Laurea di Lorenzo Zanolì. In seguito sarà descritto il monitoraggio della fibra ottica effettuato senza applicazione di alcun carico allo scopo di valutare l'influenza della temperatura nelle rilevazioni.

### **2.2 – Generalità su fibre ottiche e sensori Bragg Grating**

#### **2.2.1 – Le fibre ottiche**

Una fibra ottica, dal punto di vista strutturale, può essere considerata costituita da una serie di strati cilindrici di vetro o plastica. Il cilindro interno, detto *core* o nucleo, ha un diametro molto limitato ed è avvolto da un mantello cilindrico chiamato *cladding*. Questa struttura è protetta da uno o più

stati esterni detti *jacket*. In figura 2.1 è possibile osservare la struttura di base di una fibra ottica.

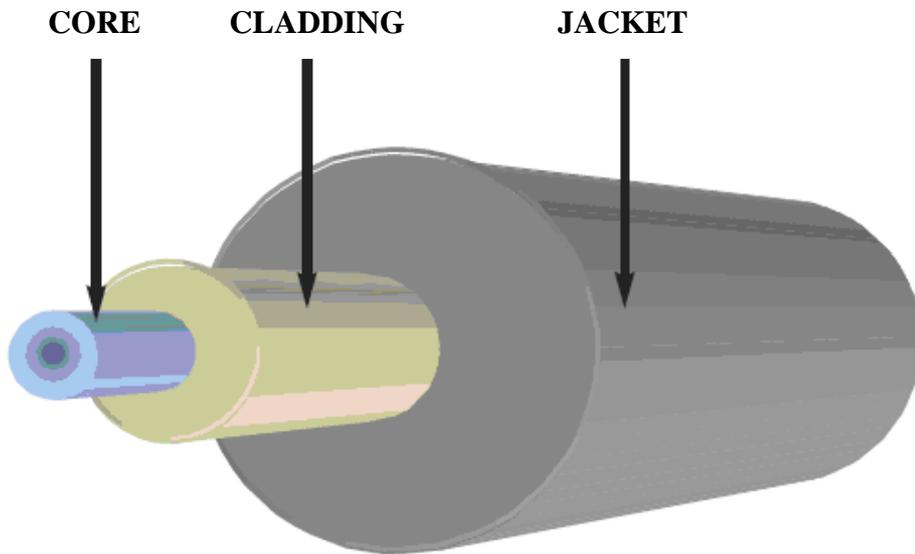


Fig 2.1 – Struttura di una fibra ottica.

Core e cladding hanno la funzione di trasmettere la luce nella fibra, mentre il jacket ha il compito di resistere alle tensioni meccaniche. I due strati interni sono costituiti da materiali caratterizzati da indici di rifrazione differenti. Il primo, infatti, deve avere un indice di rifrazione di circa 1,5, mentre il cladding deve averne uno di valore minore, generalmente pari a 1,475. Le fibre ottiche possono essere distinte in base diametro del core, agli indici di rifrazione, alle caratteristiche del materiale, al profilo di transizione dell'indice di rifrazione e al drogaggio (aggiunta di piccole quantità di altri materiali per modificare le caratteristiche ottiche).

La fibra ottica lavora come una specie di specchio tubolare in cui la luce entra nel core ad un certo angolo (angolo limite) e si propaga mediante una serie di riflessioni alla superficie di separazione fra i due materiali (core e cladding). La luce, prodotta da una sorgente ottica, mantiene invariate le sue proprietà lungo la fibra e viene trasmessa fino al punto in cui si vuole effettuare la misurazione. Queste fibre basano il loro funzionamento sul fenomeno della *riflessione totale* che si verifica se il mezzo da cui proviene il raggio ha indice di rifrazione maggiore di quello del secondo mezzo ( $n_1 > n_2$ ). In questo caso, infatti, esiste un angolo particolare (angolo limite  $\theta_1$ ) tale che,

per angoli superiori, si ha solo raggio riflesso (fig 2.2). Nel caso in cui il raggio di luce che attraversa il core presenti un angolo di incidenza non inferiore all'angolo limite, questo viene completamente riflesso ogni volta che incide la parete del nucleo e procede così fino ad emergere all'altro estremo del cilindro. Un dispositivo che presenta questo funzionamento è detto *guida di luce*.

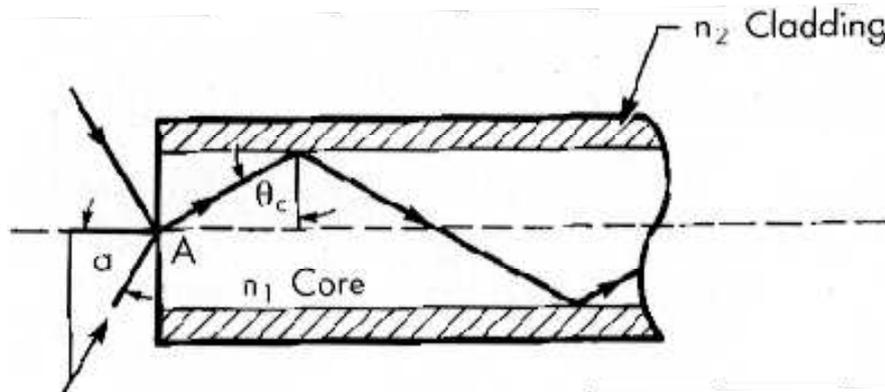


Fig 2.2 – Riflessione totale in una fibra ottica.

### 2.2.2 – Fiber Bragg Grating

I reticoli di Bragg (FBG) in fibra ( Fig 2.3) sono realizzati esponendo il nucleo di una fibra in silice drogata con il germanio ad un determinato pattern di interferenza di radiazione ultravioletta che genera una modifica permanente dell'indice di rifrazione con periodo  $\Lambda$ . Questi reticoli basano quindi il loro funzionamento sulle alterazioni periodiche dell'indice di rifrazione nel core della fibra ottica che possono essere ottenute esponendo la fibra ad una adeguata intensità di radiazione UV. Per questo motivo nel nucleo fotosensibile della fibra è inserito un vero e proprio reticolo di diffrazione di passo periodico che si comporta da filtro ottico selettivo in frequenza.

I reticoli utilizzati presentano generalmente una lunghezza di misura dell'ordine di 10 millimetri e nel caso in cui si inietti luce bianca in una fibra contenente un reticolo, la lunghezza d'onda che corrisponde al passo del reticolo viene completamente riflessa, mentre tutte le altre lunghezze d'onda che si propagano lungo il core della fibra attraversano il reticolo indisturbate.

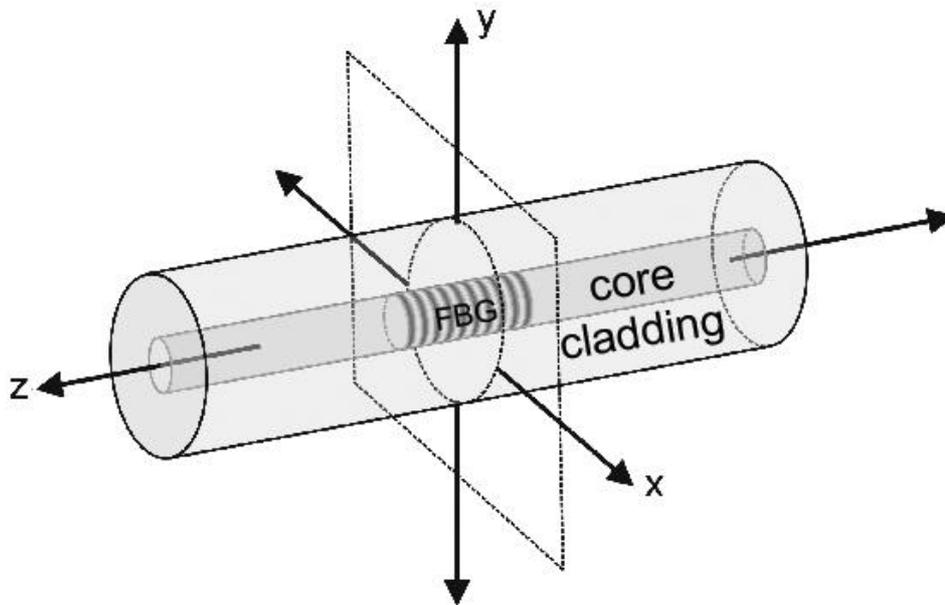


Fig 2.3 – Fibra ottica con reticolo di Bragg.

Questa particolare lunghezza d'onda  $\lambda$  prende il nome di *lunghezza d'onda di Bragg*, e può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (2.1)$$

Dove:

$n_{eff}$  = indice di rifrazione efficace,  $\Lambda$  = passo del reticolo.

Da quanto appena detto emerge che ogni cambiamento di periodo del reticolo, dovuto ad un allungamento, una compressione, oppure ad una variazione dell'indice di rifrazione causata da effetti termici, provoca uno spostamento del picco di Bragg. Il centro della curva di riflessione di un FBG ha una risposta alle deformazioni di circa 1 picometro/microstrain, dove un microstrain ( $1 \mu\epsilon$ ) corrisponde al rapporto tra l'allungamento subito dall'elemento sensibile e la lunghezza totale.

Il periodo dei reticoli dipende sia dall'allungamento della fibra che dalla sua temperatura, per cui è possibile misurare questi due parametri studiando lo spettro della luce riflessa. Nel caso in cui le variazioni di temperatura e le deformazioni avvengano contemporaneamente, è necessario avere a disposizione un reticolo di riferimento libero per misurare la temperatura e tramite questo valore correggere quello ottenuto dai reticoli accoppiati

meccanicamente alla struttura. In conclusione si può dire che i reticoli di Bragg possono essere utilizzati sia come estensimetri che come termometri, consentendo di determinare sia le deformazioni che la temperatura.

Uno dei vantaggi principali dei sensori FBG rispetto a quelli convenzionali, per quanto riguarda il monitoraggio in tempo reale, è la possibilità di poter monitorare a distanza. La risoluzione dei sensori basati su reticoli di Bragg, ovvero la capacità di rilevare una variazione molto piccola della deformazione, non può essere inferiore a  $1 \mu\epsilon$  ( $10^{-6}$ ) e considerando i limiti di stabilità a lungo termine dello strumento e un margine di sicurezza, può essere assunta pari a  $10 \mu\epsilon$ . Per questo motivo si considera:

$$\epsilon = 10 \mu\epsilon = 10^{-5} \quad (2.2)$$

Le fibre che sono state utilizzate presentano un diametro di  $125 \mu\text{m}$  e un modulo elastico di  $72 \text{ GPa}$ . Queste saranno incollate in due punti sulla statua del David per cui, non sapendo con precisione la distanza a cui incollarle, in tabella 2.1 sono elencati i minimi spostamenti  $\Delta l$  che si possono rilevare in funzione della distanza tra i due punti, compresa tra 1 e 6 cm..

<b>l (cm)</b>	<b><math>\Delta l</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
6	0,6
5	0,5
4	0,4
3	0,3
2	0,2
1	0,1

Tab 2.1 – Spostamenti minimi rilevabili

Nella tabella precedente i valori di  $\Delta l$  sono stati ottenuti, noto  $\epsilon$ , utilizzando la relazione:

$$\Delta l = \epsilon \cdot l \quad (2.3)$$

I sensori Bragg grating posti nelle fibre ottiche non sono in grado di rilevare gli spostamenti di compressione, per cui per poter effettuare un monitoraggio completo è necessario pre-caricare le fibre con uno sforzo normale  $N$  che corrisponda al massimo valore di richiusura della fessura che si intende misurare.

### **2.3 – Prove di incollaggio su un campione di marmo**

Su un campione di marmo bianco di Carrara sono state applicate cinque diverse tipologie di colla per valutare quale fosse la migliore da applicare sulla superficie del David, sia dal punto di vista delle caratteristiche adesive che della facilità di rimozione (Zanoli, 2010). Successivamente si sono poi applicate delle porzioni di fibra ottica analizzando il comportamento dei vari adesivi.

Gli adesivi usati in queste prove sono i seguenti :

- resina epossidica, Epoxy 50;
- resina epossidica, Bostik;
- metacrilato, Saratoga super colla vetro;
- cianocrilato, Super Attak vetro;
- cianocrilato, M-Bond 200.

Ognuno degli adesivi appena descritti è stato utilizzato per incollare una porzione di fibra in due punti del campione di marmo. L'incollaggio, inoltre, è stato effettuato su una faccia verticale del campione in modo da simulare le reali condizioni di applicazione sulla superficie del David. Per prima cosa sono state applicate sul campione due piccole quantità di ogni colla sopra le quali è stata successivamente posizionata una porzione di fibra ottica (fig 2.4).

La fibra è stata mantenuta in posizione per circa 20 minuti per aspettare che la colla polimerizzasse. Durante questa fase le superfici di incollaggio della resina Epoxy 50 e del Super Attak hanno mantenuto le loro dimensioni mentre la resina Bostik e la Saratoga si sono espanse verso il basso. L'adesivo M-Bond 200, inoltre, ha conservato le sue dimensioni anche se il catalizzatore applicato in precedenza si è espanso prima di seccarsi.



Fig 2.4 – Applicazione di una fibra ottica sul campione.

Successivamente si è proceduto alla rimozione delle fibre ottenendo la rottura in corrispondenza dei punti di incollaggio per tutti gli adesivi utilizzati. Per ognuno di questi, poi, si è misurata una lunghezza di incollaggio simile di circa 7 millimetri. Dopo aver riscaldato la superficie di incollaggio per 5 minuti, sono stati rimossi gli adesivi mediante un cacciavite dal bordo sinistro del campione. Entrambe le resine epossidiche sono state rimosse completamente mentre per le altre tre la rimozione è stata quasi completa, causando però una leggera scalfittura della superficie del marmo.

Dall'analisi dei risultati di queste prove è emerso che le colle più affidabili, sia dal punto di vista del tempo di polimerizzazione che della rigidità, sono i cianocrilati. Questi però sono più difficili da rimuovere, soprattutto rispetto alle resine epossidiche.

## **2.4 - Prove di trazione**

Lo scopo di queste prove è quello di confrontare i valori di deformazione ottenuti mediante due estensimetri elettrici rispetto a quelli rilevati da un sensore Bragg grating. La prova è stata eseguita due volte, utilizzando due diverse tipologie di adesivi cianocrilati (cianocrilato vetro e

M-Bond 200), due diversi sensori Bragg grating mantenendo però gli stessi estensimetri elettrici.

La strumentazione utilizzata consiste in:

- Barra di acciaio di dimensioni 120 x 3 x 1 cm;
- Piastra metallica di peso 90 grammi necessaria per precaricare la fibra ottica (fig 2.5);



Fig 2.5 – Piastra metallica.

- Fibra ottica con Bragg grating;
- Due estensimetri elettrici;
- Due adesivi cianocrilati.
- strumento FBG - Interrogation System, (fig 2.6);



Fig 2.6 – Strumento FBG Interrogation System.

- Macchina necessaria ad applicare i cicli di carico e scarico (fig 2.7);



Fig 2.7 – Macchina per la prova di trazione.

Per prima cosa sono stati incollati i due estensimetri lungo la barra di acciaio ed è stata applicata la fibra ottica in un punto della barra stessa. Il sensore Bragg Grating non essendo in grado di rilevare gli spostamenti di compressione deve essere precaricato prima di iniziare la prova. A questo scopo è stata utilizzata la piastra metallica di figura 2.5. La fibra è stata fatta passare tra i due strati interni di questa piastra che è stata in seguito chiusa, impedendole così di scorrere.

In seguito è stato applicato il secondo punto di colla, in posizione inferiore rispetto al primo e qualche centimetro sopra la piastra (fig 2.8). Dopo aver atteso che l'adesivo polimerizzasse, gli estensimetri e la fibra ottica sono stati collegati agli strumenti che consentono la determinazione delle variazioni di deformazione ed è stato possibile iniziare la prova.

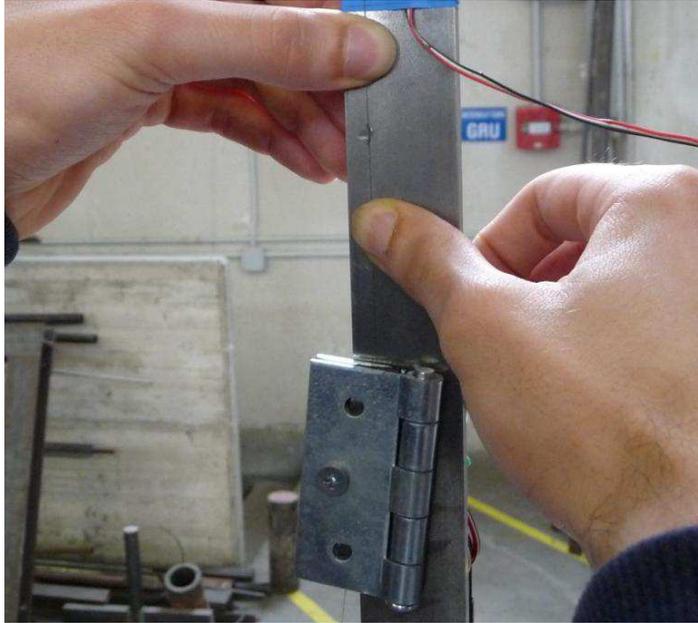


Fig 2.8 – Applicazione del secondo punto di colla.

Inizialmente sono state misurate le deformazioni con un carico di 0 KN e senza afferraggi, con ancora la piastra attaccata alla fibra ottica, poi è stata effettuata una seconda rilevazione dopo aver rimosso la piastra e una terza con la barra d'acciaio bloccata.

#### 2.4.1 – Prova con adesivo cianocrilato vetro

Durante la prima prova sono stati applicati 3 cicli completi e un ciclo parziale di carico e 3 cicli completi e uno parziale di scarico.

I sensori di Bragg forniscono risultati in termini di lunghezza d'onda (nanometri) mentre gli estensimetri in termini di deformazione (microstrain) per cui per riuscire a confrontarli è stato necessario convertire i valori ottenuti dal sensore in termini di deformazione utilizzando il fattore di conversione  $c$  pari a :

$$c = 1,2 \text{ pm} = 0,0012 \text{ nm} \quad (2.4)$$

Nel primo ciclo di carico è stata rilevata una notevole differenza di incremento di deformazione tra gli estensimetri e il sensore in quanto i valori sono pari a :

- 708,5  $\mu\epsilon$  misurato dal primo estensimetro;
- 745  $\mu\epsilon$  misurato dal secondo estensimetro;
- 666  $\mu\epsilon$  misurato dal sensore.

Dopo la prova di carico-scarico, il carico è stato portato ad un valore di 10,2 KN ed è stato mantenuto costante, consentendo di misurare le variazioni di deformazione per i due estensimetri e per il sensore Bragg grating dopo 24 e dopo 48 ore. I due estensimetri hanno rilevato piccolissimi incrementi di deformazione mentre il sensore ha rilevato una notevole diminuzione di deformazione nelle prime 24 ore che si è mantenuta pressoché costante nelle successive 24 ore.

#### **2.4.2 - Prova con M-Bond 200**

La prova è stata svolta in modo analogo alla precedente e sono stati applicati 3 cicli completi di carico e 3 cicli completi di scarico.

Le massime differenze di incremento di deformazione rilevate sono pari a:

- 703  $\mu\epsilon$  per il primo estensimetro;
- 715  $\mu\epsilon$  per il secondo estensimetro;
- 742  $\mu\epsilon$  per il sensore.

I risultati ottenuti dai due estensimetri e dal sensore di Bragg sono coerenti e la piccola variabilità riscontrata dipende dai valori di incremento e decremento del carico che non sono esattamente uguali nei tre cicli di carico-scarico. Anche in questo caso dopo la prova di carico-scarico il carico è stato portato ad un valore di 10,2 KN ed è stato mantenuto costante. Dai valori ottenuti è possibile notare che il secondo estensimetro ha rilevato un leggero incremento di deformazione mentre il primo estensimetro e il sensore hanno rilevato una diminuzione di deformazione:

- $\epsilon = - 3 \mu\epsilon$  per il primo estensimetro;
- $\epsilon = 6 \mu\epsilon$  per il secondo estensimetro;
- $\epsilon = - 12 \mu\epsilon$  per il sensore.

Questi risultati evidenziano una coerenza anche nel lungo periodo ma si vede chiaramente che la variazione di deformazione rilevata dal sensore Bragg grating è superiore a quella dei due estensimetri.

## 2.5 - Monitoraggio della fibra ottica in assenza di carico

Dalle prove precedentemente effettuate si è osservata una diminuzione del valore di deformazione rilevata dal sensore Bragg Grating per cui si è proceduto ad effettuare un monitoraggio della fibra senza applicare alcun carico per valutare il comportamento nel tempo, misurando anche la temperatura e l'umidità presenti al momento della rilevazione. Gli strumenti utilizzati per eseguire la prova all'interno del laboratorio LARM dell'Università di Bologna sono stati i seguenti:

- Fibra ottica con Bragg grating ( $\lambda = 1535,04$ );
- Strumento FBG- Interrogation System;
- Computer (fig 2.9);
- Barra d'acciaio sulla quale è stata applicata la fibra (fig 2.10);
- Termoigrometro (fig 2.11);

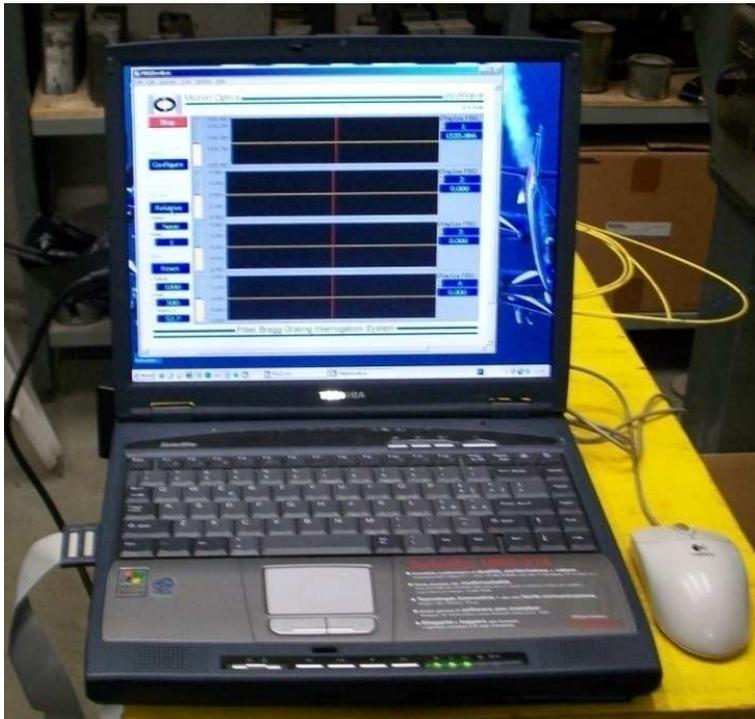


Fig 2.9 – Computer utilizzato nel monitoraggio.

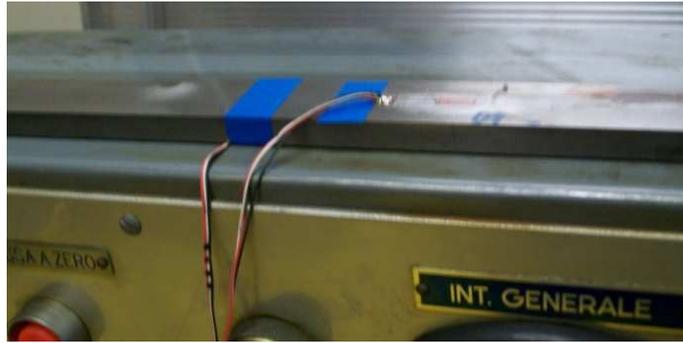


Fig 2.10 – Barra d'acciaio.



Fig 2.11 – Termoigrometro.

Il monitoraggio è stato effettuato per circa due mesi: dal 29 marzo 2010 al 20 maggio 2010. I risultati sono riportati in tabella 2.1, nella quale per ogni misurazione sono indicati la data e l'ora del rilievo, la temperatura dell'ambiente al momento della misura e i valori forniti dal sensore in termini di lunghezza d'onda (nanometri). Si è proceduto poi a convertire in termini di deformazione (microstrain) i valori in nanometri ottenuti dal sensore

utilizzando il fattore di conversione  $c$  sempre pari a 0,0012 nm. Questi valori sono riportati nell'ultima colonna della tabella seguente.

<b>Data</b>	<b>Ora</b>	<b>Temperatura ( °C )</b>	<b>Lunghezza d'onda ( nm )</b>	<b>Deformazione ( μm )</b>
29/3	10:55	24,4	1535,944	1279953
30/3	12:05	22,2	1535,905	1279921
1/4	12:45	21,4	1535,878	1279898
2/4	11:12	20,7	1535,865	1279887
6/4	9:00	19,3	1535,84	1279866
9/4	9:19	20,4	1535,861	1279884
12/4	12:15	18,8	1535,825	1279854
13/4	9:50	18,5	1535,816	1279847
16/4	8:50	18,9	1535,83	1279858
19/4	10:10	18,4	1535,81	1279841
21/4	7:50	19,9	1535,85	1279875
23/4	15:25	20,6	1535,862	1279885
28/4	10:57	20,9	1535,865	1279887
29/4	9:57	21	1535,872	1279893
4/5	14:43	21,6	1535,881	1279901
5/5	14:44	21,3	1535,871	1279893
10/5	10:54	21	1535,857	1279881
12/5	14:50	21,3	1535,851	1279876
14/5	9:13	21,5	1535,86	1279883
20/5	10:58	21,6	1535,861	1279884

Tab 2.1 – Valori rilevati durante il monitoraggio.

Eseguendo la differenza di ognuno dei valori di deformazione e di temperatura rilevati rispetto al loro valore minimo, pari rispettivamente a 1279841  $\mu\text{e}$  e 18,4°C, è stato possibile tracciare il grafico seguente (fig 2.12) in cui è rappresentata anche la linea di tendenza che evidenzia la relazione lineare esistente tra le due grandezze.

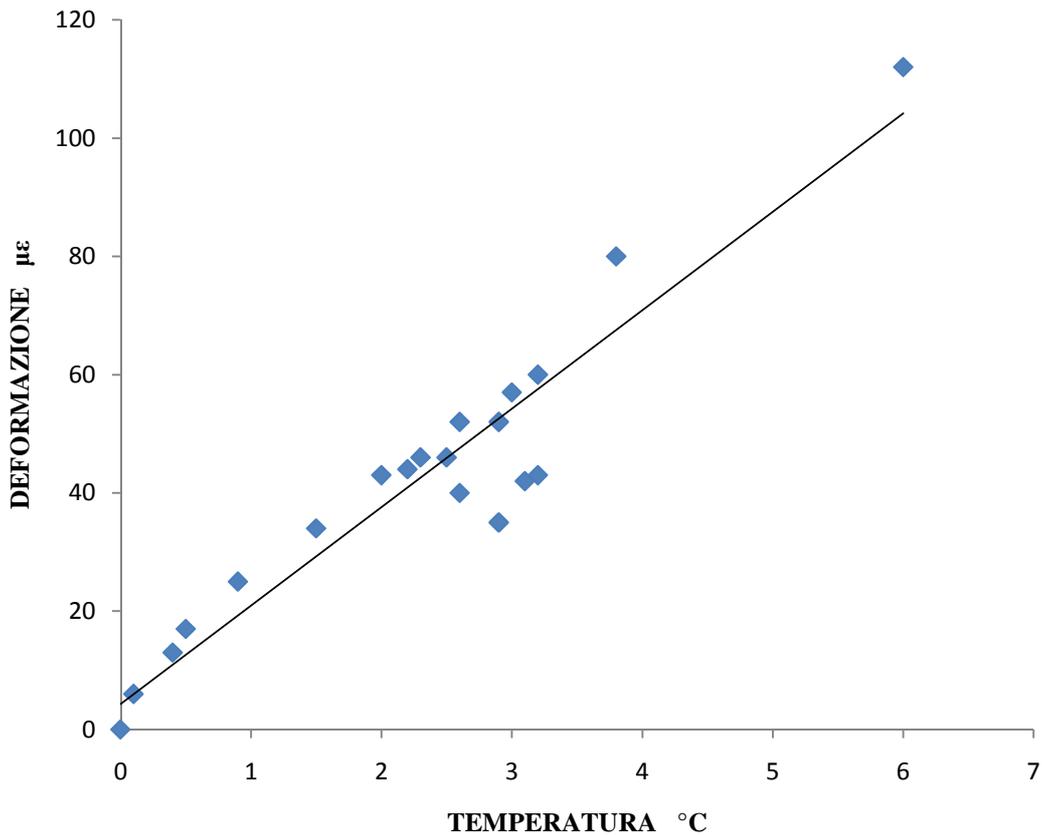


Fig 2.12 – Diagramma deformazione – temperatura.

Successivamente è stata effettuata la depurazione dei valori della deformazione dagli effetti della dilatazione della barra di acciaio e dalla variazione dell'indice di rifrazione. Per la prima depurazione si è considerata la seguente relazione:

$$\varepsilon = \varepsilon_{mis} - \alpha \cdot \Delta t \quad (2.5)$$

con  $\alpha$  = coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio =  $11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

I tabella 2.2 sono riportati i passaggi numerici necessari ad eseguire la prima depurazione. I valori di deformazione così ottenuti, sottratti al valore minimo, sono riportati in funzione del tempo di rilevazione in giorni nel grafico seguente (fig 2.13).

$\epsilon$ mis	$\alpha$	$\Delta t$	$\alpha \cdot \Delta t$	$\alpha \cdot \Delta t \cdot 10^{-6}$	$\epsilon$
1279953	0,000011	6	0,000066	66	1279887
1279921		3,8	4,18E-05	41,8	1279879
1279898		3	0,000033	33	1279865
1279887		2,3	2,53E-05	25,3	1279862
1279866		0,9	9,9E-06	9,9	1279856
1279884		2	0,000022	22	1279862
1279854		0,4	4,4E-06	4,4	1279850
1279847		0,1	1,1E-06	1,1	1279846
1279858		0,5	5,5E-06	5,5	1279853
1279841		0	0	0	1279841
1279875		1,5	1,65E-05	16,5	1279859
1279885		2,2	2,42E-05	24,2	1279861
1279887		2,5	2,75E-05	27,5	1279860
1279893		2,6	2,86E-05	28,6	1279864
1279901		3,2	3,52E-05	35,2	1279866
1279893		2,9	3,19E-05	31,9	1279861
1279881		2,6	2,86E-05	28,6	1279852
1279876		2,9	3,19E-05	31,9	1279844
1279883		3,1	3,41E-05	34,1	1279849
1279884		3,2	3,52E-05	35,2	1279849

Tab 2.2 – Passaggi numerici necessari per la prima depurazione.

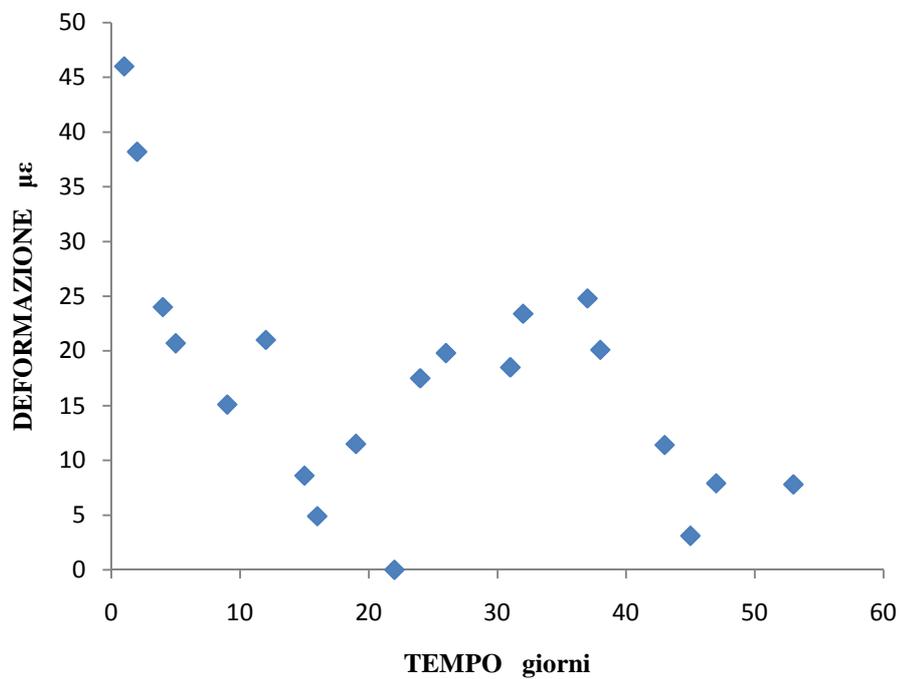


Fig 2.13 – Grafico deformazione – tempo dopo la prima depurazione.

Dal grafico si può osservare una differenza di deformazione massima di 46  $\mu\epsilon$ .

Per quanto concerne la seconda depurazione si è considerato che cambiamenti di temperatura comportano dilatazione termica nel pitch ma, come effetto dominante, anche variazioni dell'indice di rifrazione. Queste variazioni determinano una differenza di deformazione  $\Delta\epsilon$  pari a :

$$\Delta\epsilon = \epsilon \cdot (\alpha_A + \alpha_n) \cdot \Delta t \quad (2.6)$$

Dove:

$\Delta\epsilon$  = differenza di deformazione dovuta alla variazione dell'indice di rifrazione;

$\epsilon$  = valore di deformazione ottenuto dalla depurazione precedente;

$\Delta t$  = differenza di temperatura;

$$(\alpha_A + \alpha_n) = \frac{1}{\lambda_b} \cdot \frac{\delta\lambda_b}{\delta T} \approx 6,67 \cdot 10^{-6} K^{-1} \quad (2.7)$$

$\lambda_b$  = lunghezza d'onda di Bragg.

Una volta determinato  $\Delta\epsilon$ , il valore di deformazione al termine delle due depurazioni,  $\epsilon_{fin}$ , può essere determinato dalla relazione seguente:

$$\epsilon_{fin} = \epsilon - \Delta\epsilon \quad (2.8)$$

Dove:

$\epsilon$  = deformazione ottenuta al termine della prima depurazione;

$\Delta\epsilon$  = differenza di deformazione determinata dalla relazione 2.6.

In tabella 2.3 sono riportati i passaggi numerici necessari ad effettuare la seconda depurazione.

$\epsilon$	$\alpha_{\Lambda} + \alpha_n$	$\Delta t$	$\Delta \epsilon$	$\epsilon$ finale
1279887	0,00000667	6	51,22108	1279836
1279879		3,8	32,43981	1279847
1279865		3	25,6101	1279839
1279862		2,3	19,63436	1279842
1279856		0,9	7,682976	1279848
1279862		2	17,07336	1279845
1279850		0,4	3,41464	1279847
1279846		0,1	0,853657	1279845
1279853		0,5	4,26831	1279849
1279841		0	0	1279841
1279859		1,5	12,80499	1279846
1279861		2,2	18,78068	1279842
1279860		2,5	21,34167	1279839
1279864		2,6	22,1954	1279842
1279866		3,2	27,31746	1279839
1279861		2,9	24,75635	1279836
1279852		2,6	22,19519	1279830
1279844		2,9	24,75602	1279819
1279849		3,1	26,46344	1279823
1279849		3,2	27,3171	1279822

Tab 2.3 – Passaggi numerici necessari alla seconda depurazione.

Utilizzando i valori ottenuti è stato possibile ottenere il seguente grafico (fig 2.14) in cui, come nel caso precedente, ad ogni valore di deformazione è stato sottratto il valore minimo.

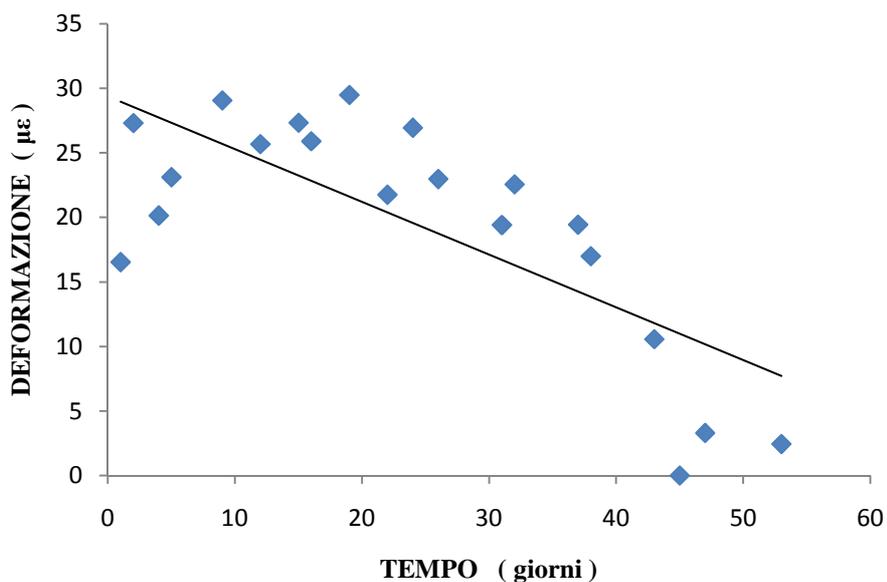


Fig 2.14 – Grafico deformazione – tempo dopo la seconda depurazione.

Analizzando il grafico di figura 2.10 si è riscontrata una graduale diminuzione del valore di deformazione misurata nell'ultima parte del periodo di rilevazione, a partire cioè dal mese di maggio. Questa ha portato ad un aumento della differenza massima di deformazione che è arrivata a circa 29,5  $\mu\epsilon$ . Non considerando, infatti, le rilevazioni relative all'ultimo mese la differenza massima di deformazione è pari a circa 13  $\mu\epsilon$ , in sintonia, quindi, con la tolleranza del sistema di misura. Nella tabella 2.4 sono riportati nella prima colonna i valori di deformazione iniziali in microstrain e nelle altre colonne quelli ottenuti al termine delle due depurazioni.

È importante notare che nel grafico di fig 2.8 i valori di temperatura che si discostano maggiormente dalla linea di tendenza sono proprio quelli relativi all'ultimo periodo di rilevazione. Se si considera, inoltre, l'andamento della temperatura nel tempo (fig 2.15) si può riscontrare che in corrispondenza dell'ultimo mese la temperatura è stata praticamente costante, quindi la diminuzione di deformazione è da imputare ad altre cause.

<b>DEF. INIZIALI <math>\mu\epsilon</math></b>	<b>DEF. DOPO 1° DEP. <math>\mu\epsilon</math></b>	<b>DEF. DOPO 2° DEP. <math>\mu\epsilon</math></b>
1279953	1279887	1279836
1279921	1279879	1279847
1279898	1279865	1279839
1279887	1279862	1279842
1279866	1279856	1279848
1279884	1279862	1279845
1279854	1279850	1279847
1279847	1279846	1279845
1279858	1279853	1279849
1279841	1279841	1279841
1279875	1279859	1279846
1279885	1279861	1279842
1279887	1279860	1279839
1279893	1279864	1279842
1279901	1279866	1279839
1279893	1279861	1279836
1279881	1279852	1279830
1279876	1279844	1279819
1279883	1279849	1279823
1279884	1279849	1279822

Tab 2.4 – Deformazioni ottenute

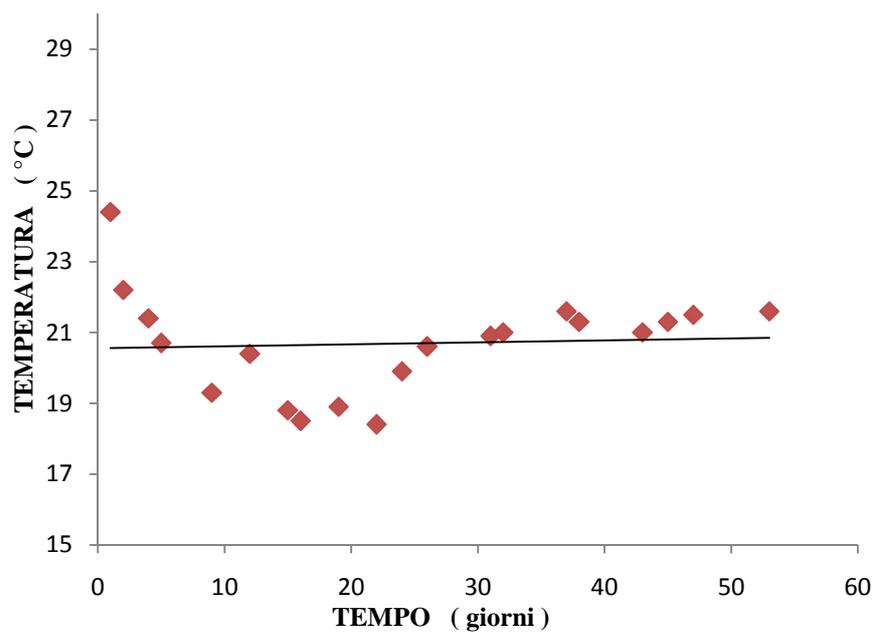


Fig 2.15 – Grafico temperatura – tempo.

Quanto appena detto è osservabile più chiaramente in figura 2.16 in cui è possibile confrontare l'andamento della deformazione e della temperatura in funzione del tempo espresso in giorni.

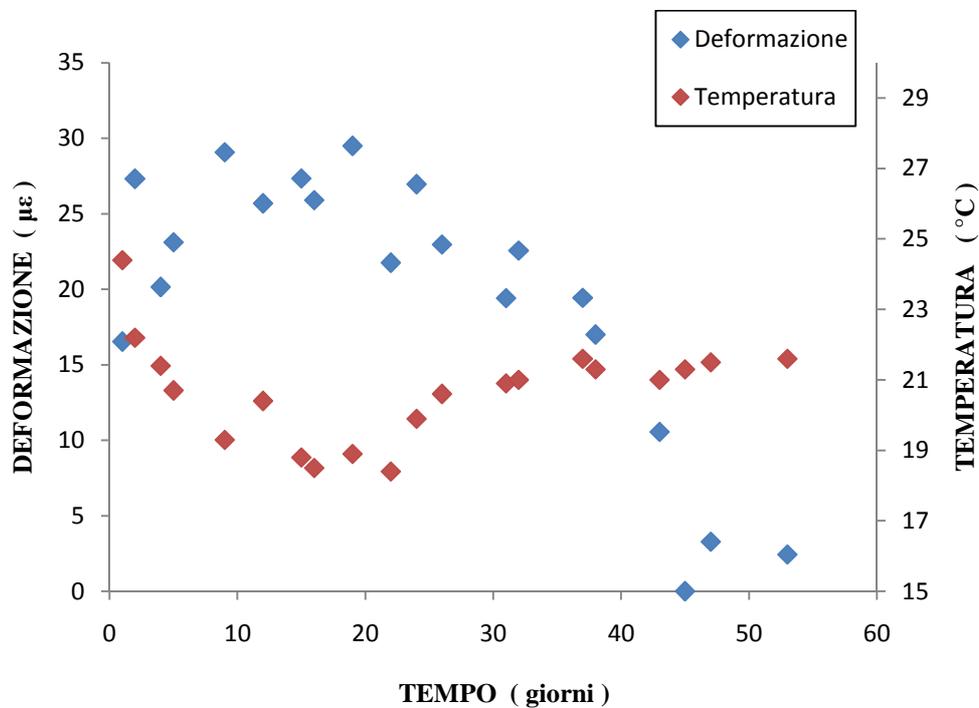


Fig 2.16 – Grafico deformazione e temperatura nel tempo.

Le ipotesi più plausibili sulle cause della diminuzione di deformazione nel tempo sono:

- uno scorrimento della guaina che riveste la fibra rispetto all'adesivo;
- uno scorrimento della fibra rispetto alla guaina.

Allo scopo di ridurre questi scorrimenti, si è deciso di allungare il tratto incollato di fibra.

## **3 - MONITORAGGIO DEL DAVID**

### **3.1– Introduzione**

In questo capitolo saranno descritte le operazioni di installazione del sistema di monitoraggio e dei sensori sulla statua del David effettuate a fine maggio 2010 dal personale del laboratorio LARM dell'Università di Bologna e a cui ho avuto l'onore di partecipare. Preventivamente è stata necessaria un'attenta analisi dello stato delle fessure al fine di scegliere le posizioni più adeguate in cui applicare le fibre ottiche.

Successivamente verrà mostrata l'elaborazione dei dati ottenuti:

- dai sensori a fibra ottica collegati allo strumento FBG- Interrogation System e ad un computer;
- dal dispositivo Smartbrick che consente di effettuare due tipi di acquisizioni: dai sensori quasi statici e da quelli dinamici in caso di evento sismico.

### **3.2 – Analisi dello stato delle fessure**

Al fine di determinare i punti in cui saranno posizionate le fibre, come si è detto, sono state analizzate le fessure presenti sul broncone e sulla gamba sinistra. Nelle figure 3.1 e 3.2 si può osservare una visione d'insieme delle fessure presenti sul broncone, nelle figure 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 sono presenti particolari delle fessure sul broncone, mentre nelle figure 3.7 e 3.8 sono visibili le fessure esistenti sulla gamba sinistra. In tutte le fotografie in esame sono presenti anche strumenti di misura della lunghezza aventi la funzione di evidenziare l'entità delle fessure analizzate.



Fig 3.1 – Fessure sul broncone

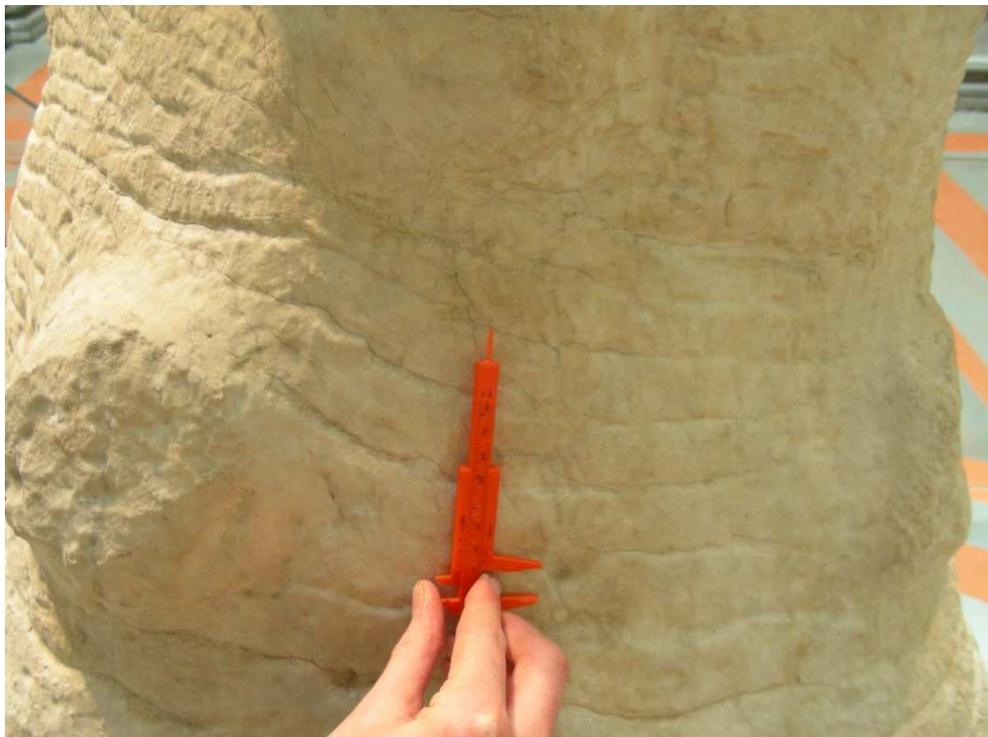


Fig 3.2 – Fessure sul broncone.

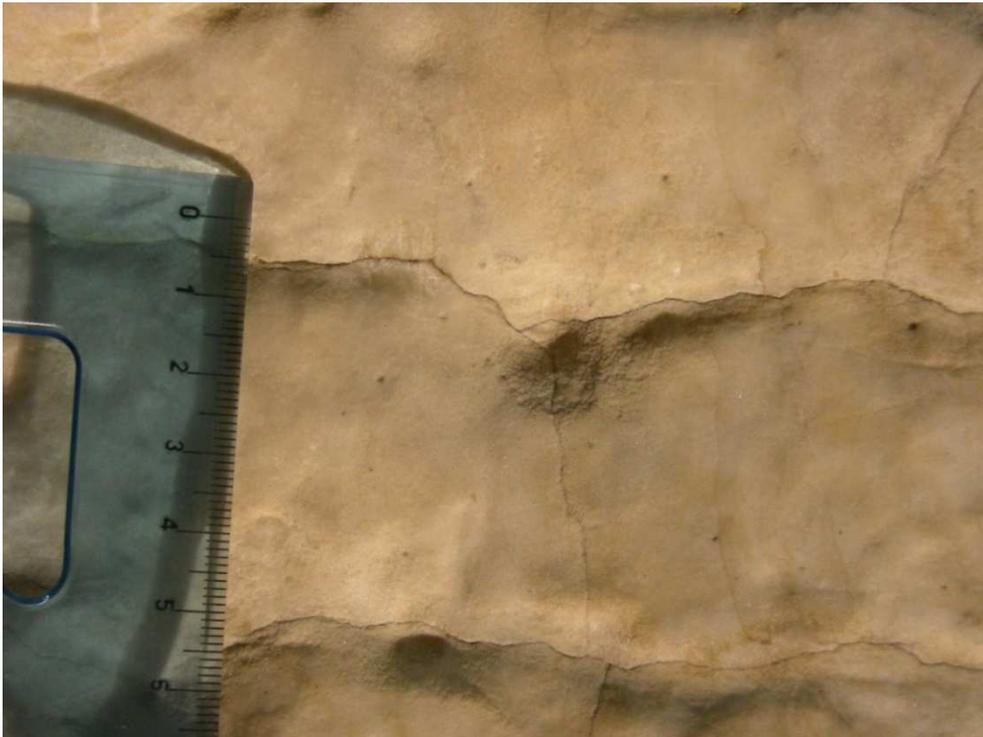


Fig 3.3 – Particolare fessure sul broncone.



Fig 3.4 – Particolare fessure sul broncone.



Fig 3.5 – Particolare fessure sul broncone.

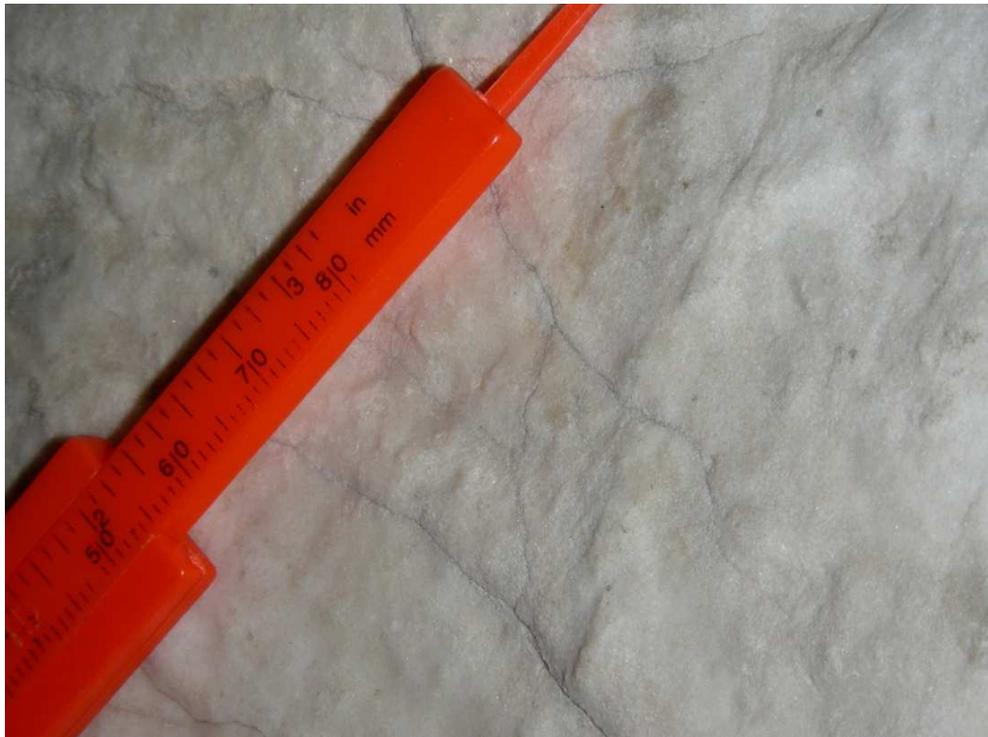


Fig 3.6 – Particolare fessure sul broncone.



Fig 3.7 – Fessure sulla gamba sinistra.



Fig 3.8 – Fessure sulla gamba sinistra.

Da questo studio è emerso che le fessure più estese e importanti sono quelle sul broncone per cui si è deciso di applicare le prime tre fibre sul broncone stesso e in particolare:

- una sulla fessura più evidente;
- una sul marmo ma non in corrispondenza di una fessura, avente la funzione di misurare la deformazione termica del marmo;
- una libera in prossimità della parte alta del broncone, avente la funzione di depurare la misura della deformazione dalla quota dovuta alla variazione di temperatura. Questo è reso possibile dal fatto che i sensori Bragg Grating sono in grado di misurare sia le deformazioni che la temperatura, secondo quanto già affermato nel paragrafo 2.2.2.

In figura 3.9 è rappresentato, tramite MeshLab, il broncone, in cui sono riportate le posizioni approssimative della fibra sulla fessura, situata nella parte bassa e di quella sul marmo non fessurato.

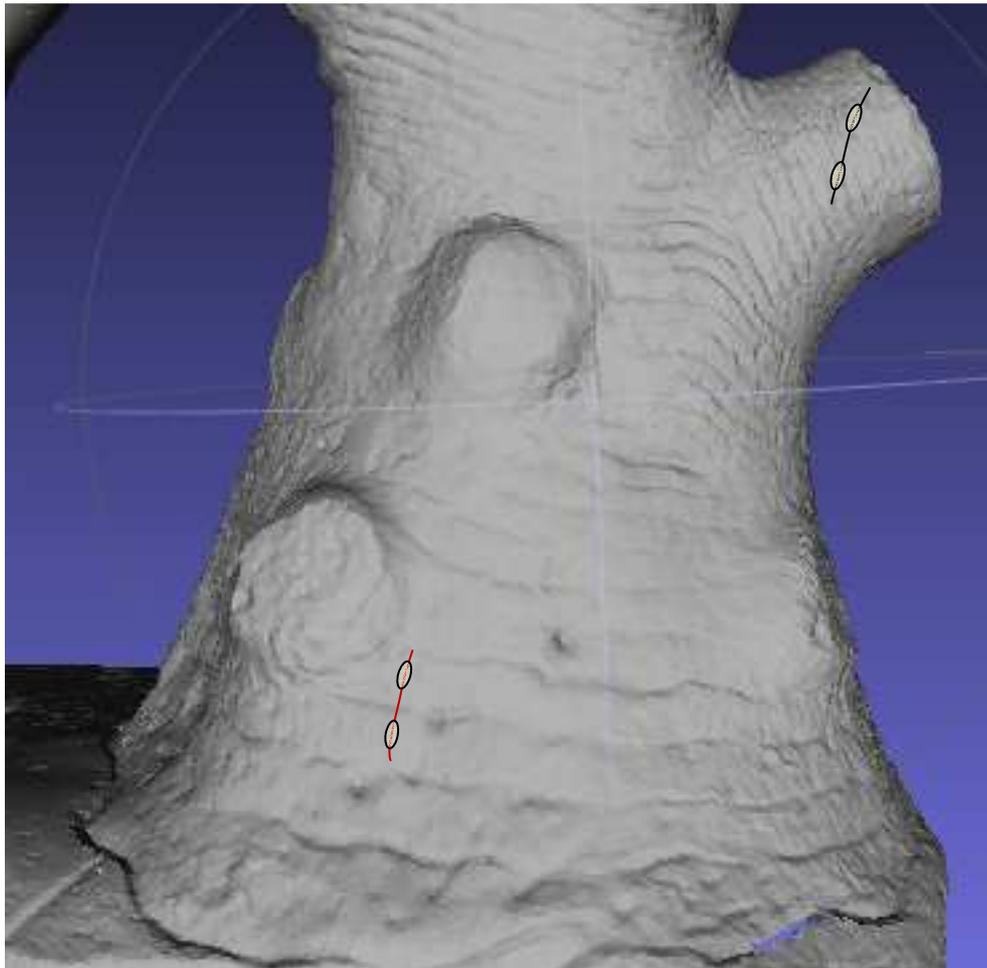


Fig 3.9 – Posizione e punti di incollaggio fibre.

In questa figura la prima fibra è raffigurata da una linea rossa, la seconda da una linea nera e i loro punti di incollaggio sul marmo da piccoli ovali bianchi. Si può notare che la fibra sul marmo non fessurato è stata posizionata in una protuberanza del broncone che si può ritenere praticamente non sollecitata, consentendo così alla fibra di misurare unicamente la deformazione termica.

### **3.3 - Installazione dei sensori a fibra ottica e della strumentazione necessaria per il monitoraggio**

#### **3.3.1 – Installazione del sistema di monitoraggio**

Una volta decise le posizioni di applicazione delle fibre, si è proceduto all'installazione del sistema di monitoraggio, inteso come l'insieme della strumentazione e dei collegamenti necessari ad effettuare le misurazioni. Per prima cosa è stato scelto il luogo più opportuno in cui collocare il dispositivo *Smartbrick*. Questo è uno strumento per il monitoraggio strutturale e ambientale sviluppato dalla ditta SestoSensor, basato su un'innovativa unità di raccolta dati senza fili e completamente autosufficiente. Una volta installato sulla struttura da monitorare, sia essa un edificio, un ponte o un bene culturale come una statua, questo dispositivo acquisisce dati sull'andamento dei parametri strutturali ed ambientali e li rende disponibili caricandoli periodicamente su un server internet remoto. Contemporaneamente, i dati vengono analizzati dal processore interno dello strumento attraverso una "rete neurale" in grado di discriminare eventuali comportamenti anomali. Nel caso in cui vengano rilevate anomalie, il dispositivo è in grado di inviare direttamente messaggi di avvertimento via sms o posta elettronica.

In figura 3.10 è riportato uno schema che riassume le modalità di funzionamento dello *Smartbrick* appena descritte. In questa immagine i dispositivi sono applicati su un edificio industriale e su un ponte romano, ma possono essere utilizzati in una grande varietà di opere tra cui strutture civili, cave, miniere, serbatoi, gallerie, infrastrutture di trasporto, beni appartenenti al patrimonio storico e opere idrauliche.

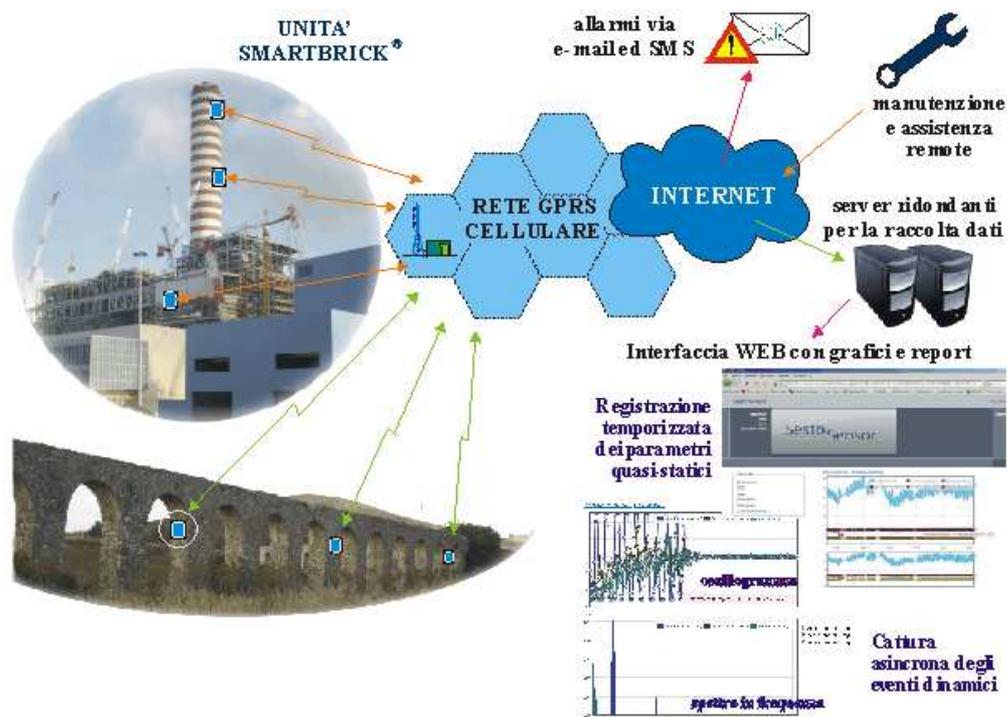


Fig 3.10 – Schema funzionamento Smartbrick.

In figura 3.11 è possibile osservare le caratteristiche e i componenti fondamentali dello Smartbrick che possono essere riassunti in:

- connettività cellulare quadribanda EGSM 850-900/1800-1900 MHz;
- alimentazione mediante batterie interne di lunga durata (superiore a 5 anni);
- sensore di temperatura incorporato avente risoluzione 0,1°C e precisione assoluta  $\pm 1,5^\circ\text{C}$ ;
- inclinometro incorporato a 2 assi strumentati (rollio e beccheggio) con risoluzione 0,001°;
- accelerometro incorporato a 3 assi strumentati (X,Y,Z) con frequenza di campionamento fino a 4100 Hz e livello di soglia sismico fino a 20  $\text{mg}_{\text{pk-pk}}$ ;
- contenitore (Smartbrick classic) di ingombro 125 x 185 x 100 mm;
- diverse porte per sensori aggiuntivi.

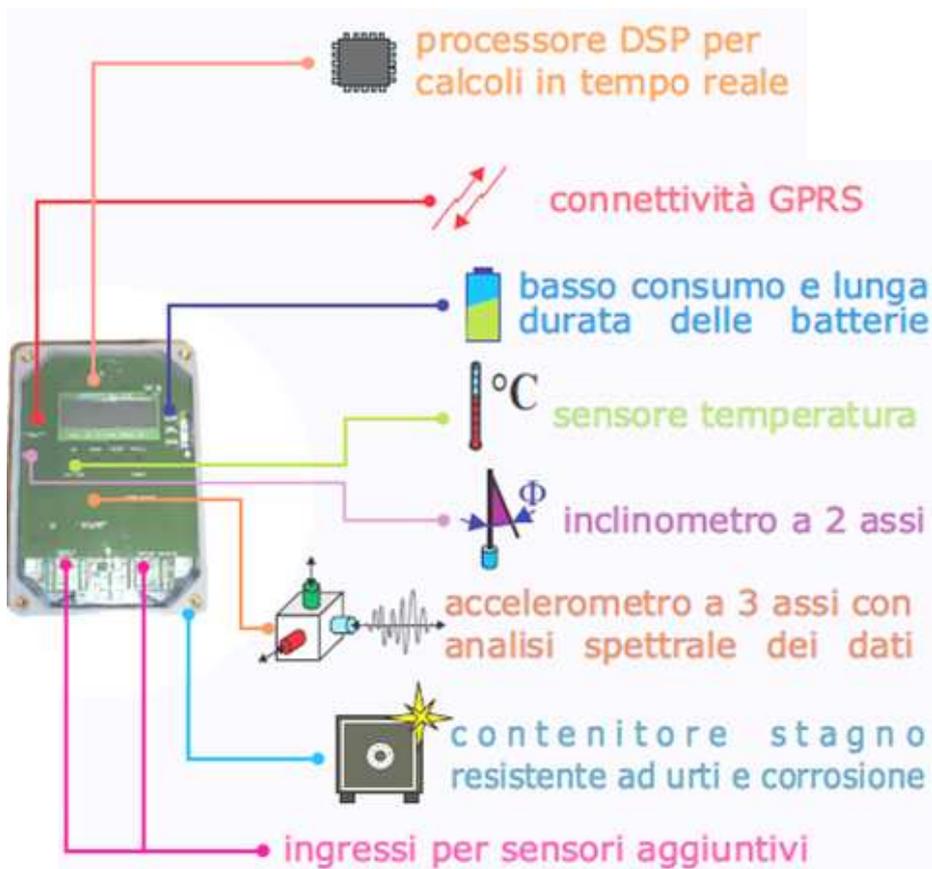


Fig 3.11 – Caratteristiche e componenti Smartbrick.

Si è deciso di installare il dispositivo Smartbrick sul lato posteriore del David, appoggiandolo sul basamento ottocentesco e non su quello michelangiolesco. Le ragioni di questa scelta derivano dalla necessità di avere a disposizione una superficie sufficientemente estesa e piana su cui posizionare lo strumento. In figura 3.12 si può osservare la fase di montaggio dello Smartbrick in situ, mentre in figura 3.13 è visibile il dispositivo stesso appena installato sull'opera. Infine nella fotografia di figura 3.14 è rappresentata una visione d'insieme del basamento della statua una volta collocato lo Smartbrick nella posizione scelta.

In seguito si è proceduto ad installare l'unità di lettura dei sensori, costituita dall' FBG- Interrogation System e da un computer. Questa è stata disposta in un mobiletto situato dietro il David (fig 3.15), in adiacenza ai cristalli di protezione della statua.



Fig 3.12 – Montaggio Smartbrick.



Fig 3.13 – Smartbrick installato sul basamento.



Fig 3.14 – Visione d'insieme basamento e Smartbrick.



Fig 3.15 – Mobiletto con l'unità di lettura dei sensori.

### 3.3.2 – Installazione dei sensori a fibra ottica

Dopo aver installato la strumentazione necessaria si è proceduto ad effettuare le operazioni di applicazione dei sensori a fibra ottica sul broncone della statua. Queste operazioni sono state eseguite sotto la supervisione della restauratrice Cinzia Parnigotti che si occupa specificatamente del David di Michelangelo. In base ai risultati delle prove di incollaggio descritte nel paragrafo 2.3, si è potuto constatare che la colla più idonea a questo tipo di operazione è il cianocrilato M-Bond 200, il quale presenta la particolarità di richiedere un catalizzatore per poter polimerizzare. In figura 3.16 è possibile osservare a sinistra l'adesivo M-Bond 200 e a destra il catalizzatore.



Fig 3.16 – M-Bond 200 e catalizzatore.

Per prima cosa è stato necessario stendere il catalizzatore mediante un pennello a punta sottile sui punti della superficie di marmo scelti per l'incollaggio e dopo alcuni minuti si è potuto procedere ad applicare l'adesivo direttamente sulla superficie catalizzata, sempre mediante l'utilizzo di un

pennello. In figura 3.17 è rappresentata la fase di applicazione dell'adesivo in corrispondenza della fessura più importante presente sul broncone. Per ciascuna delle fibre in esame sono stati predisposti due punti di incollaggio in modo tale da consentire alle fibre s tessedi essere precaricate, visto che, come si è detto nel paragrafo 2.2.2, queste non sono in grado di rilevare gli spostamenti di compressione. Nel caso della fibra applicata sulla fessura, i due punti sono posizionati uno sopra e uno sotto la fessura stessa.



Fig 3.17 – Applicazione dell'adesivo sul broncone.

Prima di applicare le fibre è stato necessario saldarle tra loro in modo tale da collegare i sensori presenti in ognuna di esse. Questa operazione è stata effettuata utilizzando lo strumento Fujikura riportato in figura 3.18.

In corrispondenza dei punti di incollaggio della fessura sul broncone è stata applicata la fibra ottica con Bragg Grating avente lunghezza d'onda  $\lambda$  pari a 1551,72 nanometri (fig 3.19 e 3.20). Successivamente con le medesime modalità la seconda fibra, saldata alla prima e avente lunghezza d'onda  $\lambda$  di 1563,05 nanometri, è stata collocata sul marmo non fessurato in corrispondenza di una protuberanza del broncone (fig 3.21). Infine è stata

posizionata la fibra libera avente lunghezza d'onda  $\lambda$  pari a 1540,56 nm sull'estremità superiore del broncone (fig 3.22).



Fig 3.18 – Strumento utilizzato per la saldatura delle fibre.



Fig 3.19 – Applicazione di una fibra sulla fessura più evidente del broncone.



Fig 3.20 – Applicazione di una fibra sulla fessura più evidente del broncone.



Fig 3.21 – Applicazione di una fibra sul marmo non fessurato.



Fig 3.22 – Posizionamento della fibra libera.

Durante le fasi appena descritte è stato necessario utilizzare un foglietto di teflon con il quale la fibra è stata mantenuta aderente alla superficie del marmo, evitando che le dita andassero a contatto con l'adesivo. In figura 3.23 si può osservare un particolare della fibra applicata sulla fessura e i suoi punti di incollaggio mentre nelle figure 3.24 e 3.25 sono riportate fotografie del broncone una volta applicate le fibre necessarie al monitoraggio. Le immagini 3.26 e 3.27 consentono, invece, di valutare la distanza esistente tra i punti di incollaggio delle fibre sul broncone. Analizzando queste figure, infatti, emerge che questa distanza è di circa 1,8 cm per la fibra applicata sulla fessura e di 2,5 cm per quella disposta sul marmo non fessurato.



Fig 3.23 – Particolare fibra applicata sulla fessura.



Fig 3.24 – Vista del broncone una volta applicati i sensori.



Fig 3.25 – Vista del broncone una volta applicati i sensori.



Fig 3.26 – Distanza punti di incollaggio fibra su fessura.



Fig 3.27 – Distanza punti di incollaggio fibra su marmo non fessurato.

### **3.4 – Elaborazione dei dati ottenuti**

#### **3.4.1 – Elaborazione dei dati rilevati dal dispositivo Smartbrick**

Come si è detto nell'introduzione a questo capitolo, il dispositivo Smartbrick effettua due tipi di acquisizione dati:

- acquisizione dai sensori quasi statici, ogni 60 minuti;
- acquisizione dai sensori dinamici, in caso di evento sismico.

Le grandezze statiche rilevate possono essere riassunte nell'elenco qui sotto riportato:

- temperatura del dispositivo (device temperature), intesa come la temperatura dell'aria all'interno dello strumento;
- temperatura del materiale cui il device è attaccato (substrate temperature);
- ampiezza picco-picco dell'accelerazione relativa alle vibrazioni di sottofondo e rilevata sui tre assi X, Y, Z (environmental vibrational noise). Questi assi sono riferiti al circuito interno del device e in

particolare l'asse X è l'asse verticale, l'asse Y quello orizzontale e l'asse Z è la direzione avanti-indietro guardando il dispositivo dal pannello frontale;

- contatore degli eventi di shock totali (shock counter), compresi gli eventi che non sono stati abbastanza forti da innescare l'acquisizione dati;
- rollio e beccheggio del piano orizzontale cui il device è fissato, entrambi rilevati dall'inclinometro (roll inclinometer e pitch inclinometer). Il rollio è il movimento di oscillazione attorno all'asse longitudinale, mentre il beccheggio quello attorno al proprio asse trasversale.

Ogni acquisizione dinamica genera, inoltre, una tabella di oscillogrammi tempo/accelerazione con 3 colonne, una per ciascun asse strumentato. Nei file di dati normalmente le informazioni dei sensori quasi statici sono presentate in una tabella all'inizio, seguita da una o più tabelle di acquisizioni dinamiche. Ciascuna di queste presenta una riga iniziale che segnala la data e l'ora dell'evento e il valore massimo di accelerazione picco-picco raggiunto.

Il monitoraggio è iniziato il 31 maggio 2010 e per i primi 10 giorni è stata tenuta una sensibilità agli eventi dinamici molto alta, quindi ne sono stati rilevati tanti anche se poco significativi. A partire dall'11 giugno 2010 si è deciso di ridurre la sensibilità del device in modo tale da diminuire il numero di eventi dinamici rilevati e le false attivazioni. Si è resa necessaria, inoltre, la sostituzione dello Smartbrick per un mal funzionamento del cellulare durante la quale, però, a causa di un disguido tecnico, è stato impossibile leggere la temperatura del materiale da quel momento in avanti.

Il giorno 6 settembre 2010, inoltre, è stato necessario sostituire la batteria ormai scarica dello Smartbrick e contemporaneamente si è proceduto ad effettuare l'upgrade del software consentendo, così, di rendere nuovamente leggibile il sensore di temperatura degli inclinometri. In figura 3.28 è possibile osservare una parte di un file di dati ottenuto dal device e relativo ai giorni 9 e 10 settembre, mentre in figura 3.29 è riportata l'elaborazione di questi dati in un foglio di lavoro Excel. I valori presenti in queste figure sono

suddivisi a seconda della loro origine in *Data log* se ottenuti dai sensori quasi statici e *Seism Event* se provenienti dai sensori dinamici. Come si può vedere dalla figura 3.29, la tabella Excel è suddivisa in 14 colonne che contengono nell'ordine: ora e data dell'evento, data, ora, numero identificativo del tipo di evento (100 in caso di Data log, 250 in presenza di Seism Event), tipo di evento, valore massimo dell'accelerazione picco-picco dell'evento dinamico, temperatura del dispositivo, temperatura del materiale, ampiezza picco-picco dell'accelerazione nelle tre direzioni X, Y, Z, rilevata dai sensori statici, contatore degli eventi di shock, rollio e beccheggio.

**Date(YMD) Time(hms),Task,Note,DynRel,TEMP oC ,TltTmp oC,X Acc mg,Y Acc mg,Z Acc mg,Shock Cnt,Roll o,Pitch o**

```

10/09/10 07:52:47,100,Data
log,,20.7,20.5,6.1,8.1,6.1,0,0.070,-0.248
10/09/10 06:52:47,100,Data
log,,20.5,20.4,9.1,5.1,6.1,0,0.071,-0.248
10/09/10 05:52:47,100,Data
log,,20.6,20.5,9.1,7.1,12.2,0,0.071,-0.249
10/09/10 04:52:47,100,Data
log,,20.5,20.5,5.1,5.1,8.1,0,0.071,-0.248
10/09/10 03:52:47,100,Data
log,,20.5,20.5,4.1,3.1,8.1,0,0.071,-0.249
10/09/10 02:52:47,100,Data
log,,20.5,20.5,6.1,7.1,9.1,0,0.071,-0.249
10/09/10 01:52:47,100,Data
log,,20.6,20.6,7.1,4.1,12.2,0,0.071,-0.249
10/09/10 00:52:47,100,Data
log,,20.6,20.6,9.1,5.1,9.1,0,0.071,-0.249
10/09/09 23:52:47,100,Data
log,,20.7,20.7,6.1,7.1,9.1,0,0.071,-0.250
10/09/09 22:52:47,100,Data
log,,20.9,20.8,7.1,6.1,10.2,0,0.071,-0.250
10/09/09 21:52:47,100,Data
log,,20.9,20.9,7.1,7.1,12.2,0,0.070,-0.252
10/09/09 20:52:47,100,Data
log,,21.0,21.1,4.1,4.1,8.1,0,0.070,-0.252
10/09/09 19:52:47,100,Data
log,,21.2,21.2,6.1,4.1,7.1,0,0.070,-0.253
10/09/09 18:52:47,100,Data
log,,21.5,21.3,8.1,2.1,9.1,0,0.070,-0.253
10/09/09 17:52:47,100,Data
log,,21.6,21.4,5.1,12.2,8.1,0,0.070,-0.254
10/09/09 16:52:47,100,Data
log,,21.8,21.5,10.2,9.1,9.1,0,0.069,-0.254
10/09/09 15:52:47,100,Data
log,,22.0,21.5,4.1,11.2,8.1,0,0.069,-0.254

```

Fig 3.28 – Parte del file di dati inviato dallo Smartbrick relativo ai giorni 9 e 10 Settembre.

Date/Time	Date (YMD)	Time(hms)	Task	Note	Max accel	Device temperat	Substrate tenX environ.	Y environ.	Z environ.	Shock ccu	Roll	Inclin	Pitch	Inclinometer (arc deg.)
10/09/2010 7:52	10/09/2010	7:52:47	100	Data log		20,7	20,5	6,1	8,1	6,1	0	0,127	0,212	0,212
10/09/2010 8:52	10/09/2010	8:52:47	100	Data log		20,5	20,4	9,1	5,1	6,1	0	0,128	0,212	0,212
10/09/2010 9:52	10/09/2010	9:52:47	100	Data log		20,6	20,5	9,1	7,1	12,2	0	0,128	0,211	0,211
10/09/2010 4:52	10/09/2010	4:52:47	100	Data log		20,5	20,5	5,1	5,1	8,1	0	0,128	0,212	0,212
10/09/2010 3:52	10/09/2010	3:52:47	100	Data log		20,5	20,5	4,1	3,1	8,1	0	0,128	0,211	0,211
10/09/2010 2:52	10/09/2010	2:52:47	100	Data log		20,5	20,5	6,1	7,1	9,1	0	0,128	0,211	0,211
10/09/2010 1:52	10/09/2010	1:52:47	100	Data log		20,6	20,6	7,1	4,1	12,2	0	0,128	0,211	0,211
10/09/2010 0:52	10/09/2010	0:52:47	100	Data log		20,6	20,6	9,1	5,1	9,1	0	0,128	0,211	0,211
09/09/2010 23:52	09/09/2010	23:52:47	100	Data log		20,7	20,7	6,1	7,1	9,1	0	0,128	0,21	0,21
09/09/2010 22:52	09/09/2010	22:52:47	100	Data log		20,9	20,8	7,1	6,1	10,2	0	0,128	0,21	0,21
09/09/2010 21:52	09/09/2010	21:52:47	100	Data log		20,9	20,9	7,1	7,1	12,2	0	0,127	0,208	0,208
09/09/2010 20:52	09/09/2010	20:52:47	100	Data log		21	21,1	4,1	4,1	8,1	0	0,127	0,208	0,208
09/09/2010 19:52	09/09/2010	19:52:47	100	Data log		21,2	21,2	6,1	4,1	7,1	0	0,127	0,207	0,207
09/09/2010 18:52	09/09/2010	18:52:47	100	Data log		21,5	21,3	8,1	2,1	9,1	0	0,127	0,207	0,207
09/09/2010 17:52	09/09/2010	17:52:47	100	Data log		21,6	21,4	5,1	12,2	8,1	0	0,127	0,205	0,205
09/09/2010 16:52	09/09/2010	16:52:47	100	Data log		21,8	21,5	10,2	9,1	9,1	0	0,126	0,205	0,205
09/09/2010 15:52	09/09/2010	15:52:47	100	Data log		22	21,5	4,1	11,2	8,1	0	0,126	0,205	0,205
09/09/2010 14:52	09/09/2010	14:52:47	100	Data log		22	21,4	8,1	6,1	13,2	0	0,125	0,205	0,205
09/09/2010 13:52	09/09/2010	13:52:47	100	Data log		21,9	21,4	7,1	6,1	10,2	0	0,126	0,205	0,205
09/09/2010 12:52	09/09/2010	12:52:47	100	Data log		21,8	21,3	5,1	9,1	9,1	0	0,126	0,207	0,207
09/09/2010 11:52	09/09/2010	11:52:47	100	Data log		21,8	21,2	9,1	7,1	12,2	0	0,126	0,207	0,207
09/09/2010 10:52	09/09/2010	10:52:47	100	Data log		21,6	21,1	8,1	8,1	7,1	0	0,126	0,205	0,205
09/09/2010 9:52	09/09/2010	9:52:47	100	Data log		21,4	20,9	9,1	9,1	9,1	0	0,126	0,205	0,205
09/09/2010 8:52	09/09/2010	8:52:47	100	Data log		21,2	20,7	9,1	6,1	14,2	0	0,127	0,21	0,21
09/09/2010 7:52	09/09/2010	7:52:47	100	Data log		20,9	20,6	7,1	5,1	12,2	0	0,126	0,211	0,211
09/09/2010 6:52	09/09/2010	6:52:47	100	Data log		20,6	20,5	4,1	6,1	10,2	0	0,128	0,212	0,212
09/09/2010 5:52	09/09/2010	5:52:47	100	Data log		20,6	20,5	4,1	5,1	8,1	0	0,128	0,211	0,211
09/09/2010 4:52	09/09/2010	4:52:47	100	Data log		20,6	20,5	5,1	5,1	9,1	0	0,128	0,211	0,211

Fig 3.29 – File Excel contenente parte dei dati rilevati dallo Smartbrick nei giorni 9 e 10 settembre.

Successivamente si è proceduto a graficare i dati ottenuti per visualizzare il loro andamento nel tempo e comprendere meglio il loro significato. Nelle figure 3.30, 3.31 e 3.32 è rappresentato l'andamento nel tempo dei valori delle temperature (device and substrate temperature), del rollio (roll inclinometer) e del beccheggio (pitch inclinometer). I grafici presentano due assi verticali di cui quello a sinistra riporta i valori delle temperature in °C mentre quello di destra è relativo ai valori angolari rilevati dall'inclinometro in gradi (rollio e beccheggio). L'asse orizzontale, invece, presenta la data e l'ora in cui sono effettuate le misurazioni e in particolare, la figura 3.30 è relativa ai valori rilevati tra l'8 e il 18 agosto 2010, la figura 3.31 a quelli osservati tra il 18 e il 28 agosto 2010, mentre la figura 3.32 a quelli misurati tra il 6 e il 16 settembre 2010. L'andamento dei valori delle temperature nel tempo è di tipo periodico e i punti relativi alla temperatura dell'aria che si discostano da questa forma rappresentano i valori corrispondenti agli istanti in cui il dispositivo si aziona per le acquisizioni periodiche. Come si può vedere dalla figura 3.32 le temperature dell'aria e del materiale assumono valori abbastanza vicini in quanto si ha meno di 1°C di scarto tra i loro valori. Lo scarto maggiore tra queste temperature avviene durante gli orari di apertura al pubblico a causa della presenza dei turisti che comporta un maggior movimento dell'aria nell'ambiente.

In figura 3.37 è rappresentato l'andamento dei valori delle ampiezze picco-picco delle accelerazioni rilevate sui tre assi X, Y, Z tra il 18 e il 28 agosto 2010. In questo grafico si può osservare che la maggior parte di questi valori è compresa tra i 15 e i 30 mg pk-pk.

In figura 3.38, infine, è riportato, come esempio, l'andamento dei valori massimi delle accelerazioni picco-picco relative agli eventi dinamici misurati tra il 31 maggio e il 10 giugno 2010, quando, cioè, la sensibilità del dispositivo era molto elevata. È interessante notare l'elevato numero di eventi rilevati i quali però, come si vedrà più avanti, risultano essere scarsamente significativi.

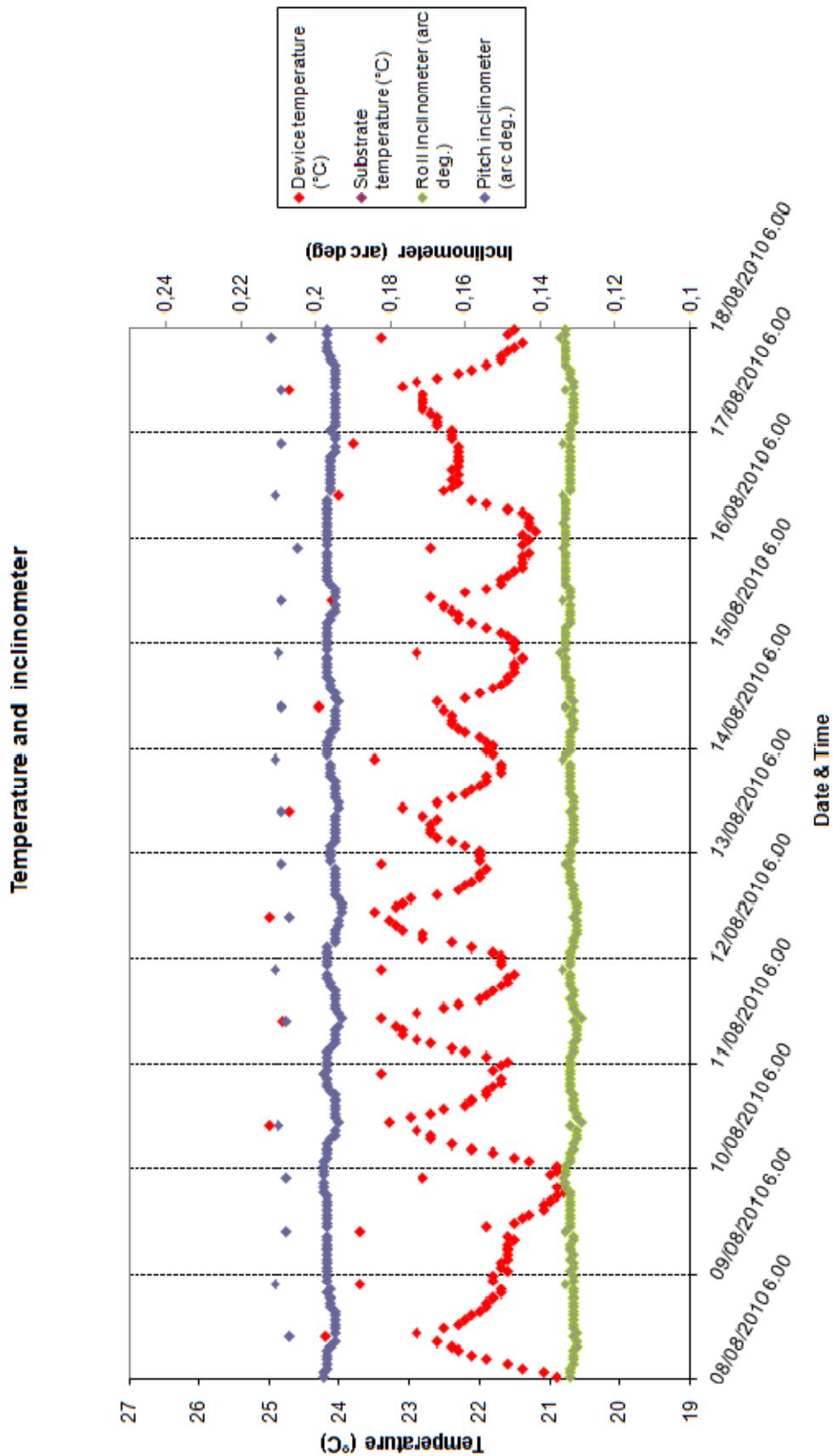


Fig 3.30 – Andamento nel tempo dei valori di alcune grandezze statiche rilevati tra l'8 e il 18 agosto 2010.

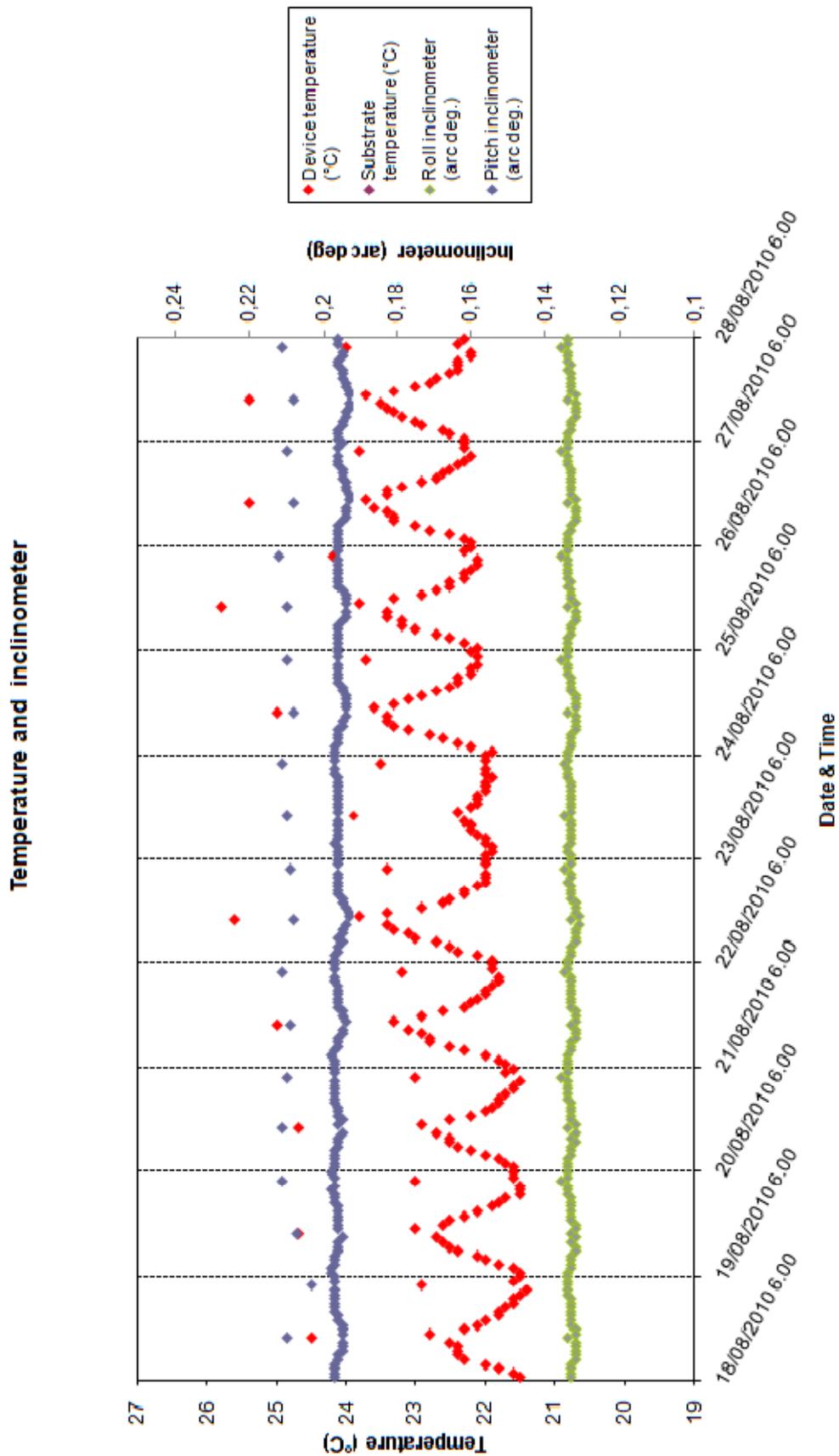


Fig 3.31 – Andamento nel tempo dei valori di alcune grandezze statiche rilevati tra il 18 e il 28 agosto 2010.

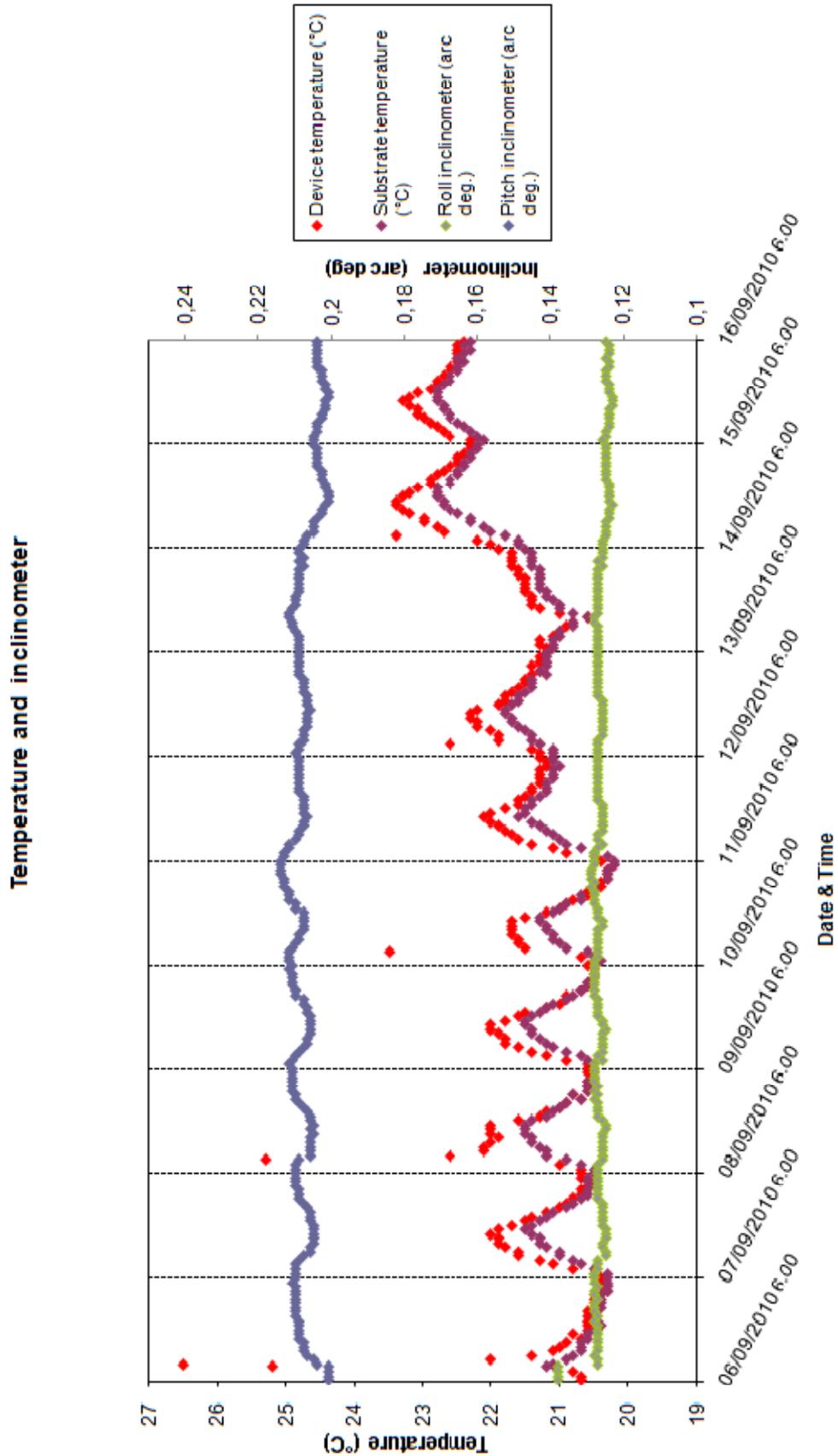


Fig 3.32 – Andamento nel tempo dei valori di alcune grandezze statiche rilevati tra il 6 e il 16 settembre 2010.

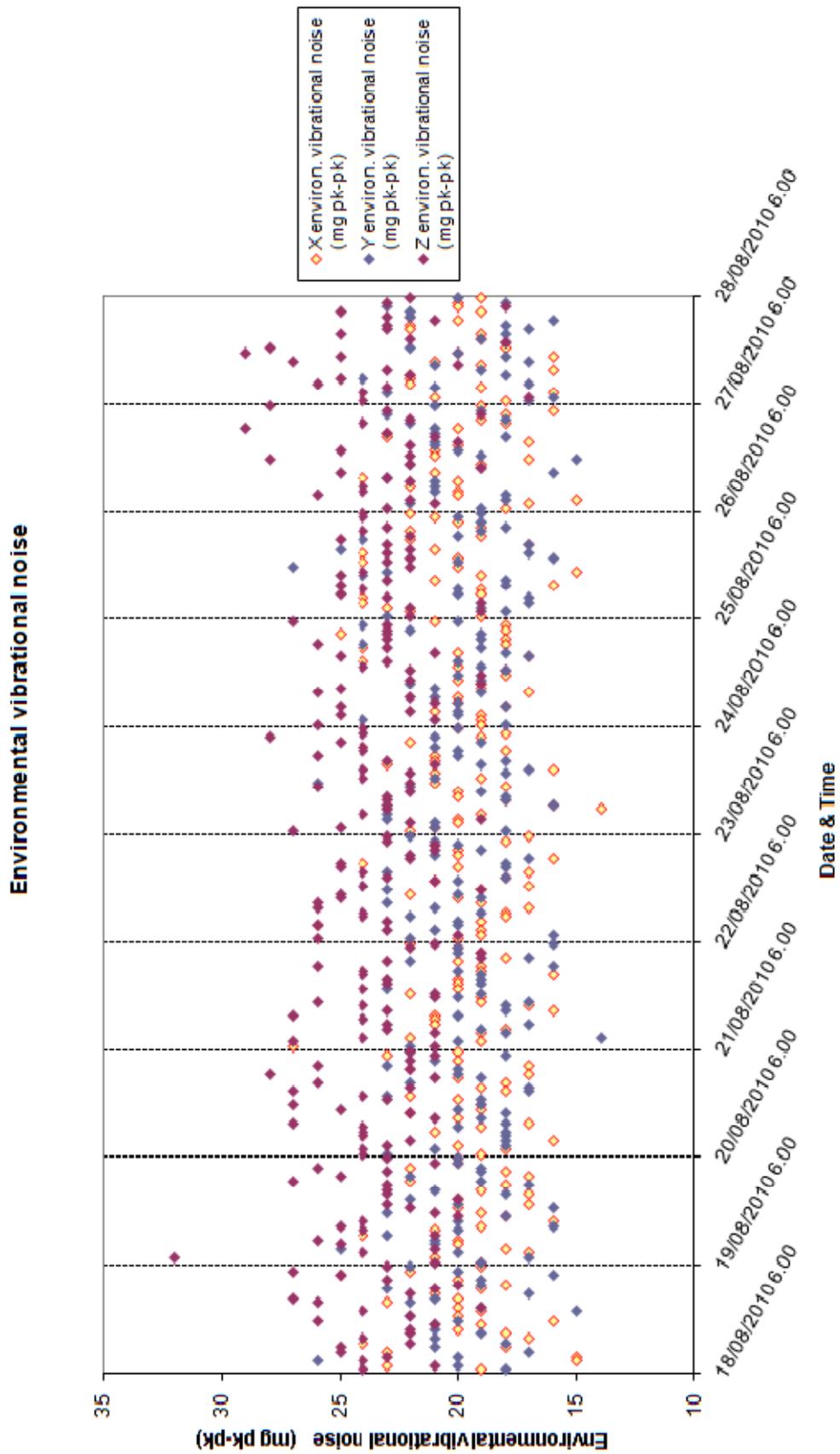


Fig 3.33 – Andamento nel tempo delle ampiezze picco.-picco dell’accelerazione rilevate tra il 18 e il 28 agosto 2010.

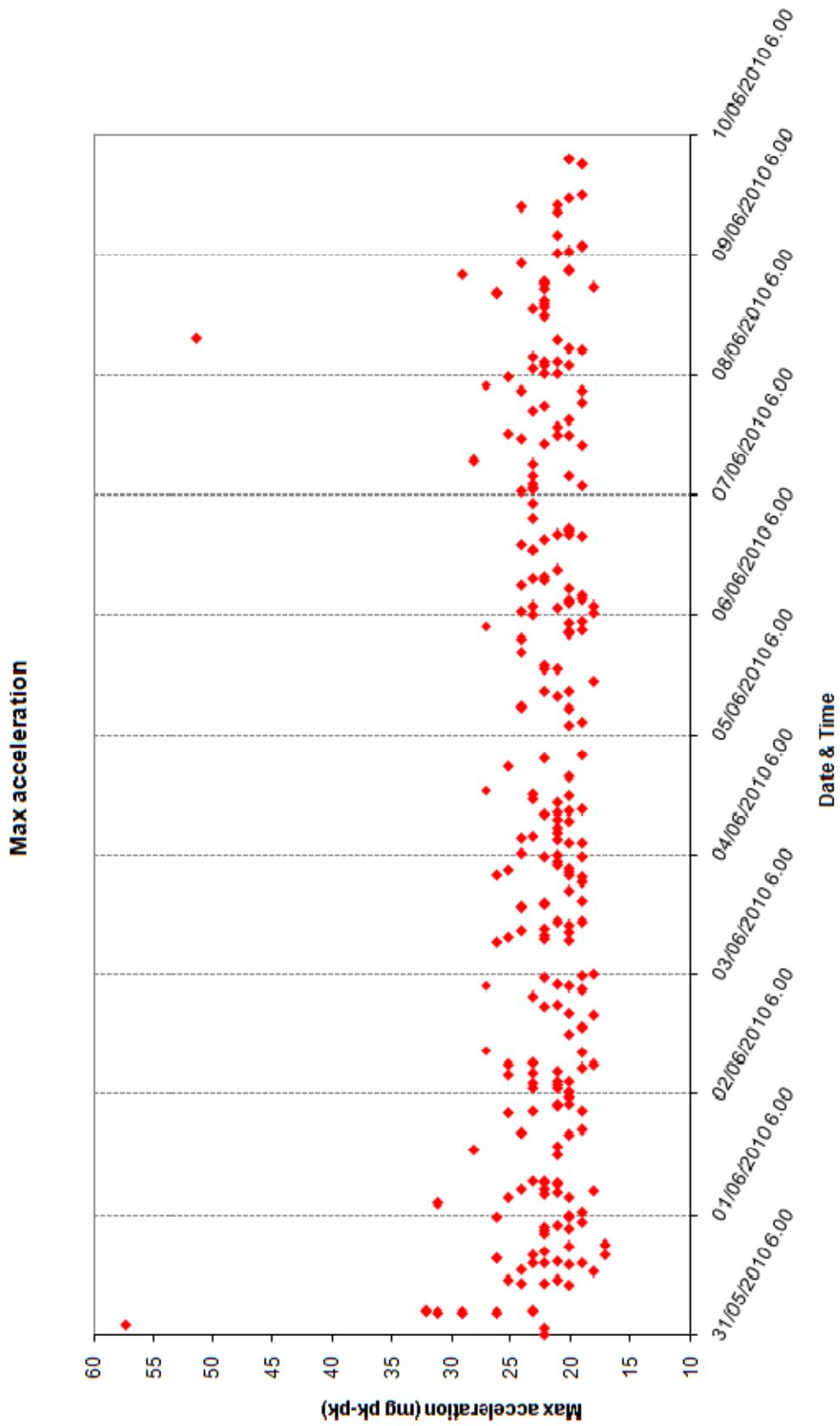


Fig 3.34 - Andamento dei valori massimi delle accelerazioni picco-picco rilevate tra il 31 maggio e il 10 giugno 2010.

Come si è detto all'inizio di questo paragrafo ogni acquisizione dinamica genera una tabella di oscillogrammi tempo/accelerazione con 3 colonne, una per ciascun asse strumentato. Nella tabella 3.4 sono riportati i valori rilevati durante l'evento dinamico del 31 maggio 2010 delle ore 23:54 che presenta un valore massimo dell'accelerazione picco-picco di 20,1465 mg. La prima colonna di questa tabella contiene la successione progressiva degli istanti in cui sono state effettuate le misurazioni, le quali sono avvenute ad intervalli di 0,01 secondi l'una dall'altra e sono durate circa 4 secondi per ciascun evento dinamico. Le successive 3 colonne riportano le accelerazioni rilevate per ciascun asse strumentato mentre nelle ultime 3 colonne, denominate denoise x, y e z, i segnali rumorosi sono stati resi più leggibili sostanzialmente tagliando le componenti di rumore a frequenza più alta.

L'evento dinamico considerato è stato rappresentato in un oscillogramma tempo-accelerazione dove i valori sono riportati con un colore diverso a seconda dell'asse strumentato rispetto al quale sono stati rilevati (fig 3.39). In un oscillogramma come questo si vede solo il rumore dei sensori e la stabilizzazione degli amplificatori quindi niente di significativo dal punto di vista del monitoraggio.

Nelle figure 3.40, 3.41 e 3.42 sono stati tracciati gli oscillogrammi relativi ad altri eventi dinamici, in particolare la prima immagine è relativa all'evento del 1° giugno 2010 alle ore 6:46, la seconda all'evento del 2 giugno 2010 alle ore 14:40 e la terza all'evento dell'8 giugno alle ore 13:30. Questi grafici sono stati ottenuti a partire da una tabella strutturata in modo analogo a quella vista per l'evento del 31 maggio. Anche in questi casi gli eventi rilevati sono poco significativi e l'unica particolarità risulta essere il picco isolato presente nell'oscillogramma dell'8 giugno. Un valore così anomalo in gergo viene chiamato *spike* e può essere dovuto ad una interferenza o ad un disturbo radio, per cui non risulta essere significativo ai fini del monitoraggio.

<b>31/05/2010</b>	<b>23.54.56</b>	<b>250</b>	<b>Seism Event</b>	<b>20,1465</b>	<b>20,1465</b>	<b>20,1465</b>
<b>Time(sec)- Freq(Hz)</b>	<b>X ACC mg</b>	<b>Y ACC mg</b>	<b>Z ACC mg</b>	<b>denoise x</b>	<b>denoise y</b>	<b>denoise z</b>
0	31,7308	26,694	27,7014			
0	28,7087	26,694	27,7014			
0,01	26,694	24,6794	25,6867			
0,02	27,7014	25,6867	28,7087			
0,03	27,7014	27,7014	28,7087	31,78666	28,76464	31,33894
0,04	25,6867	22,6648	26,694	31,22701	28,5408	31,11509
0,05	30,7235	26,694	28,7087	31,33893	28,5408	31,33893
0,06	29,716	24,6794	27,7014	30,21969	27,60063	30,35399
0,07	28,7087	25,6867	28,7087	29,95107	27,53347	30,4883
0,08	28,7087	27,7014	31,7308	29,81675	27,46632	30,55545
0,09	26,694	24,6794	25,6867	29,88391	27,66779	30,89124
0,1	29,716	26,694	29,716	29,88391	27,60063	31,15987
0,11	26,694	27,7014	29,716	29,88391	27,26486	31,09271
0,12	27,7014	24,6794	29,716	30,08538	27,53347	31,15987
0,13	27,7014	24,6794	28,7087	29,95106	27,53347	31,09272
0,14	28,7087	26,694	29,716	29,74959	27,46632	31,29419
0,15	27,7014	25,6867	29,716	29,61528	27,46632	31,29419
0,16	26,694	25,6867	28,7087	29,68243	27,39916	31,02557
0,17	27,7014	27,7014	30,7235	29,54813	27,19769	31,02557
0,18	27,7014	24,6794	32,7381	29,34666	27,33201	31,02557
0,19	27,7014	22,6648	27,7014	29,07805	26,92907	30,68979
0,2	28,7087	26,694	27,7014	29,1452	26,99623	30,62264
0,21	28,7087	26,694	27,7014	28,87658	27,26485	30,68979
0,22	26,694	23,6721	30,7235	28,60796	26,86192	30,62264
0,23	26,694	25,6867	28,7087	28,60796	26,72761	30,42117
0,24	29,716	26,694	27,7014	28,60796	26,39184	30,21971
0,25	24,6794	21,6574	25,6867	28,60796	26,32468	29,88392
0,26	26,694	28,7087	29,716	28,27219	26,32468	29,34667
0,27	22,6648	21,6574	24,6794	28,20503	26,52614	29,34667
0,28	28,7087	25,6867	28,7087	28,13787	26,45899	29,34667
0,29	23,6721	28,7087	29,716	27,93641	26,19037	29,27951
0,3	24,6794	20,6501	28,7087	28,13787	26,39183	28,87657
0,31	27,7014	23,6721	26,694	27,8021	26,12321	28,74226
0,32	26,694	20,6501	25,6867	27,46633	25,92175	28,74226
0,33	27,7014	26,694	25,6867	27,73495	25,92175	28,80941
0,34	22,6648	24,6794	24,6794	27,80211	25,58598	28,67511
0,35	26,694	25,6867	27,7014	28,13788	25,78745	28,94373
0,36	27,7014	25,6867	27,7014	28,00357	25,58599	29,01088
0,37	25,6867	22,6648	26,694	28,00357	25,38452	28,67511
0,38	29,716	26,694	24,6794	28,07072	25,65314	28,67511
0,3899	21,6574	21,6574	26,694	28,07072	25,72029	28,74227
0,4	24,6794	23,6721	27,7014	27,93641	26,12322	28,80942
0,41	28,7087	21,6574	26,694	27,93641	25,98891	28,80942
0,42	27,7014	23,6721	27,7014	28,20503	25,78745	28,94373
0,43	27,7014	24,6794	28,7087	28,20503	25,51883	28,94373

Tab 3.4 – Alcuni valori rilevati durante l’evento dinamico del 31 maggio

2010 delle ore 23:54.

Shock event 31 may 2010 23:54 UTC

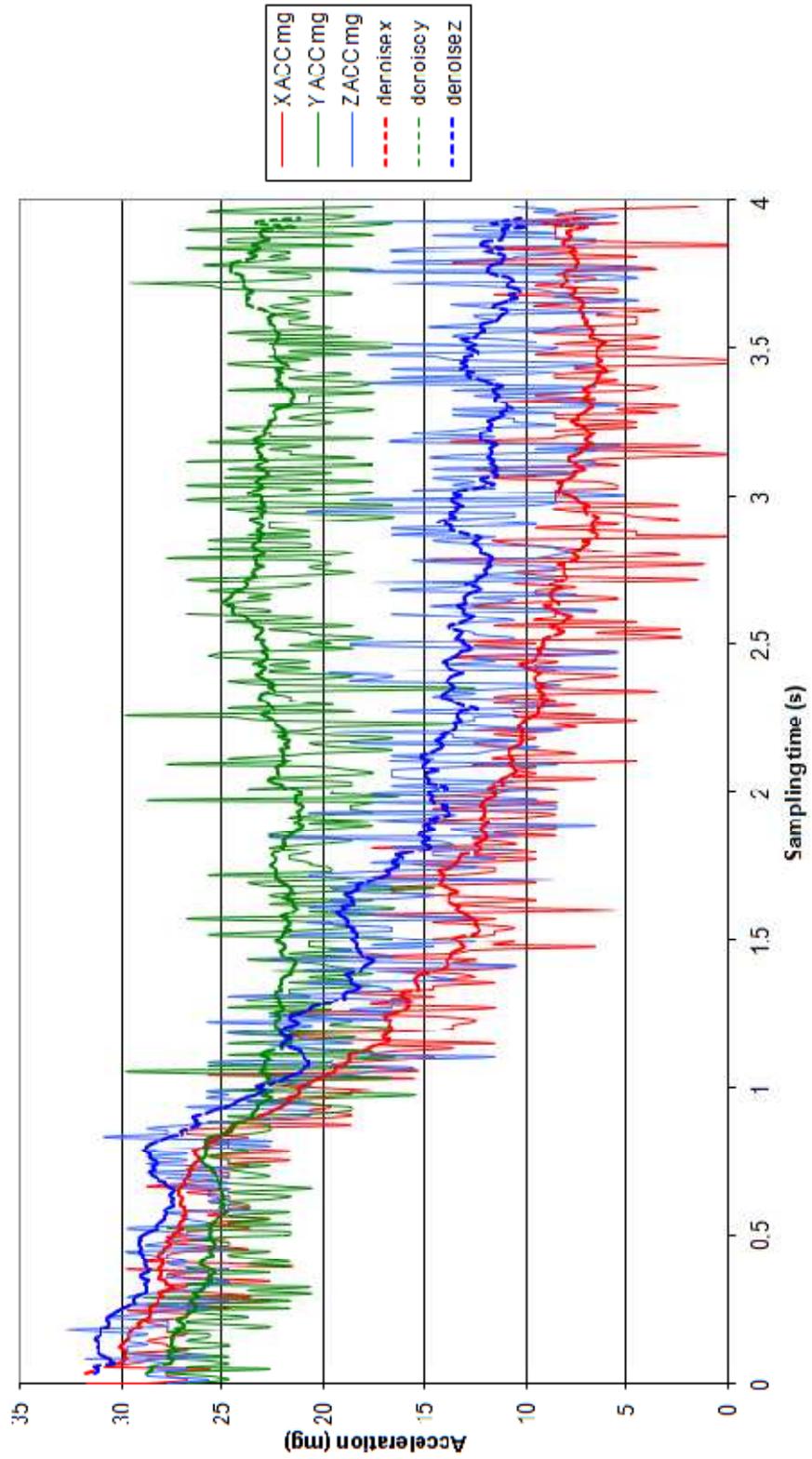


Fig 3.39 – Evento dinamico del 31 maggio 2010 alle ore 23:54.

Shock event 01 jun 2010 6:46 UTC

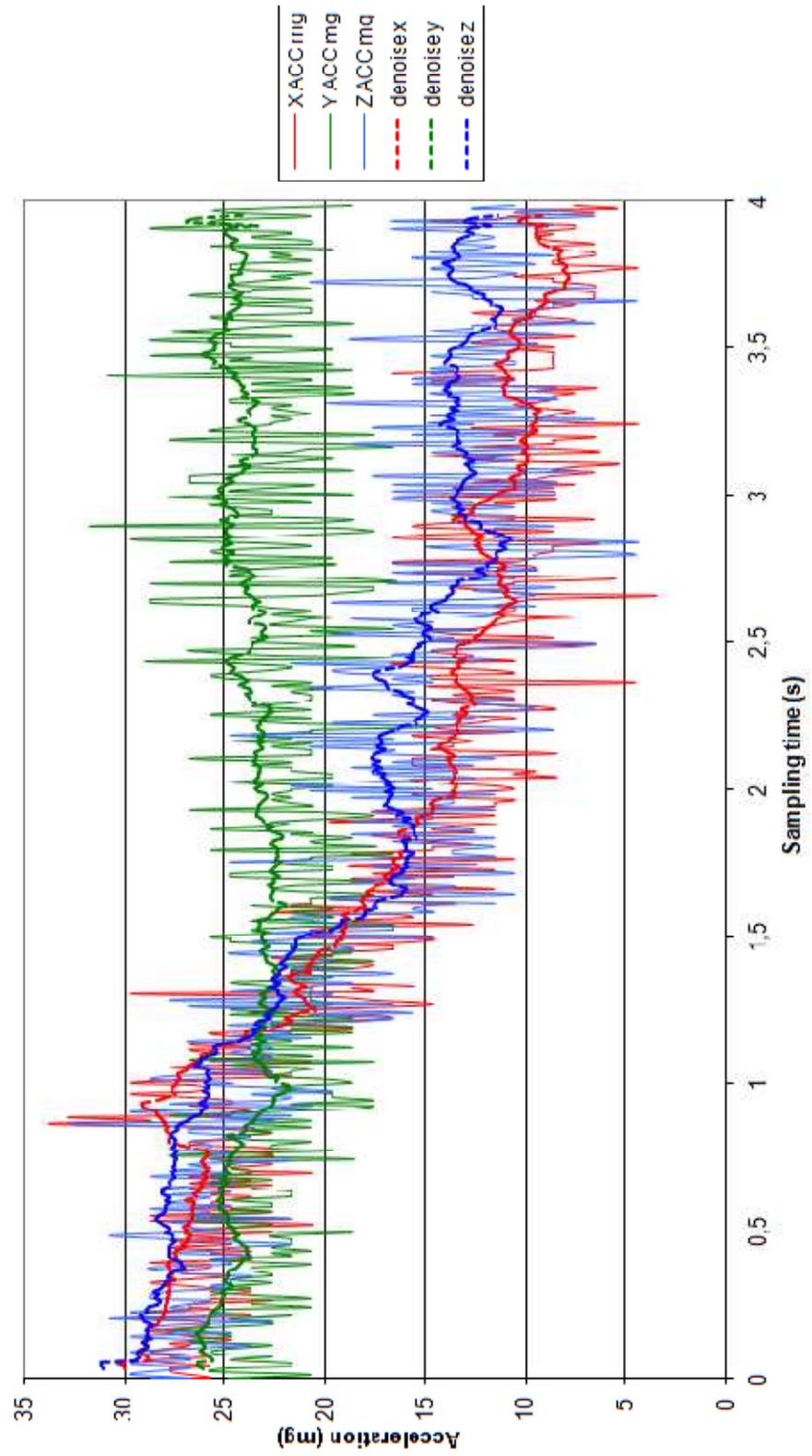


Fig 3.40 – Evento dinamico del 1 giugno 2010 alle ore 6:46.

Shock event 02 jun 2010 14:40 UTC

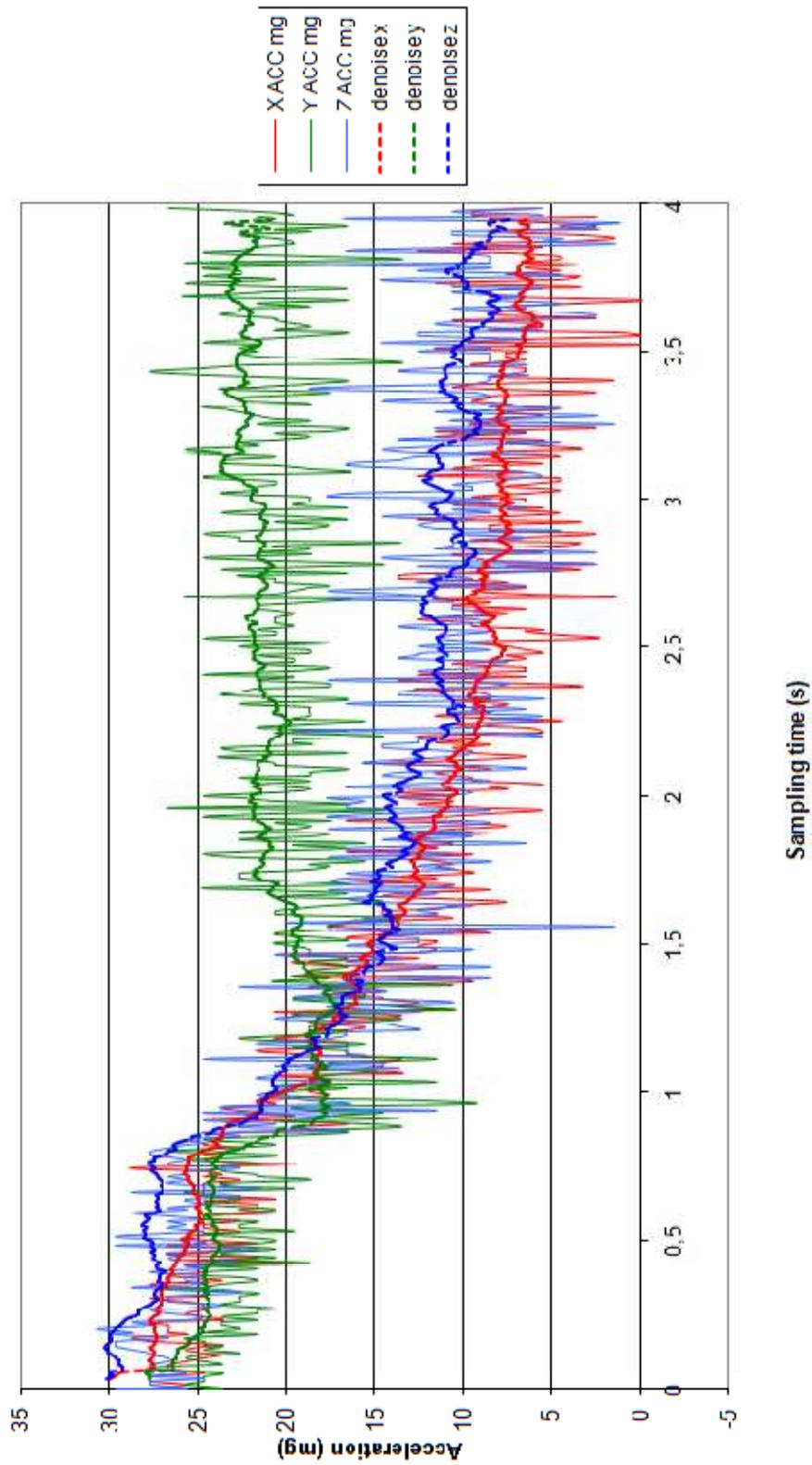


Fig 3.41 – Evento dinamico del 2 giugno 2010 alle ore 14:40.

Shock event 08 jun 2010 13:30 UTC

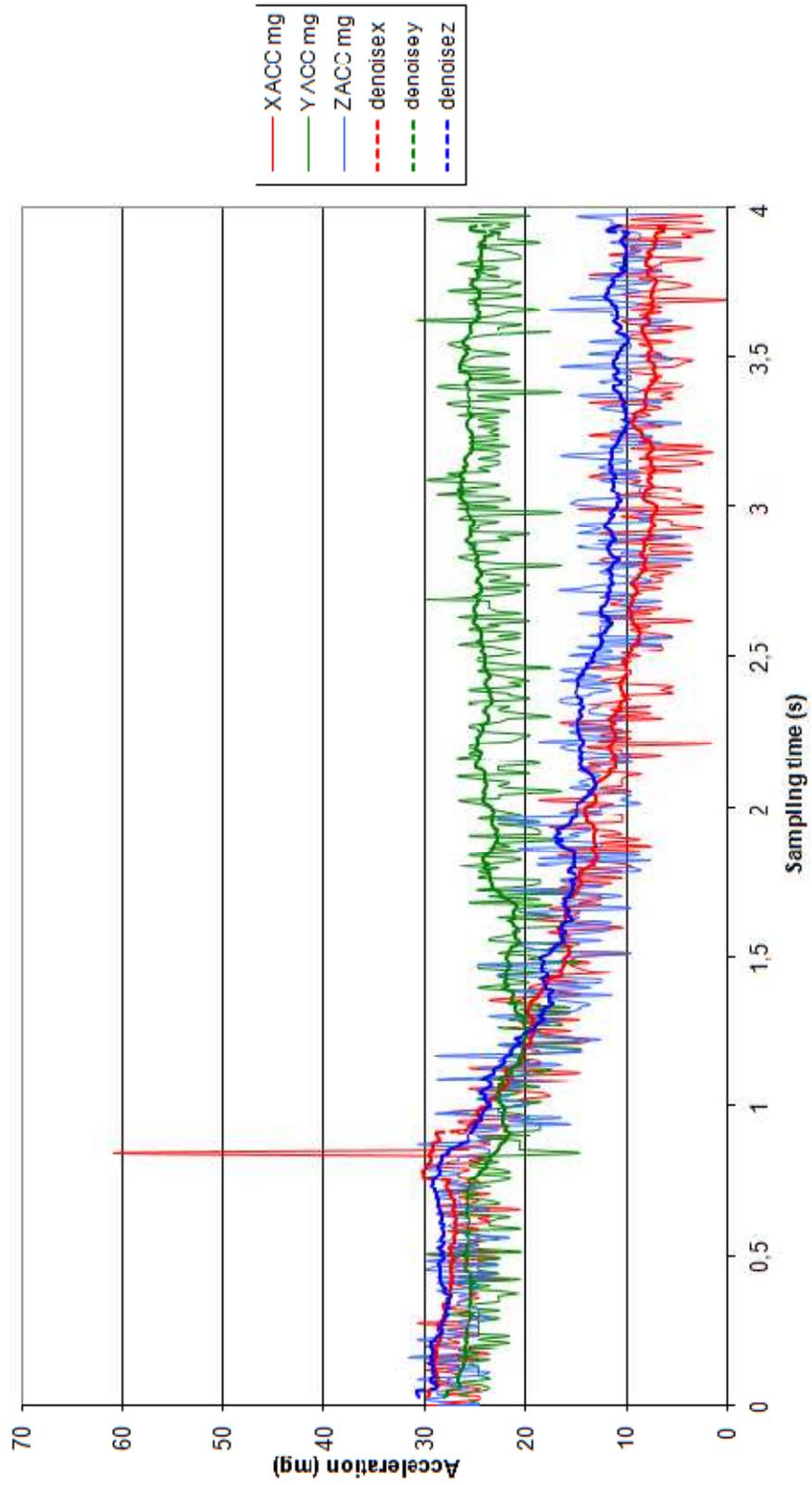


Fig 3.42 – Evento dinamico dell' 8 giugno 2010 alle ore 13:30.

### 3.4.2 – Elaborazione dei dati rilevati dai sensori

I dati rilevati dai sensori possono essere osservati nel computer posizionato nel mobiletto di figura 3.15 che contiene l'unità di lettura. Al fine di consentire l'acquisizione a distanza si è utilizzata l'applicazione UltraVNC con la quale è stato possibile collegarsi in remoto al computer a Firenze da un qualsiasi altro computer, rendendo molto più agevole il lavoro. In tabella 3.5 è possibile osservare i valori rilevati dai sensori nei primi due giorni di monitoraggio ( 31 maggio e 1 giugno 2010). La tabella è costituita da 11 colonne che riportano nell'ordine: due numeri rappresentativi della rilevazione effettuata ( prime due colonne), millisecondi, secondi, minuti, ore, giorno, mese e anno di rilevazione, valori di lunghezza d'onda della fibra libera, di quella applicata sulla fessura e di quella sul marmo non fessurato (ultime tre colonne). Successivamente si è proceduto all'elaborazione di questi valori in un foglio di lavoro Excel, un esempio della quale è rappresentato in figura 3.43 relativamente ai primi dati analizzati. In questa figura sono presenti 15 colonne identificate da lettere che vanno da U a AI che presentano:

- colonna U: tempo di rilevazione in giorni;
- colonne V, W, X: medie di cinque valori di lunghezza d'onda dei tre sensori applicati;
- colonna Y: differenza tra i valori di lunghezza d'onda della fibra sulla fessura e di quelli della fibra libera con lo scopo di depurare la lunghezza d'onda dalla quota dovuta alla variazione di temperatura;
- colonna Z: differenza tra i valori di lunghezza d'onda della fibra sul marmo non fessurato e quelli della fibra libera con lo scopo di depurare la lunghezza d'onda dalla quota dovuta alla variazione di temperatura;
- colonne AA, AB AC: trasformazione delle lunghezze d'onda (in nanometri) in termini di deformazione (microstrain) attraverso il fattore di conversione  $c$  (cfr relazione 2.4);

- colonne AD, AE: differenza tra i valori di lunghezza d'onda delle colonne Y e Z ai vari istanti e il valore relativo all'istante iniziale per porre il valore iniziale come riferimento;
- colonna AF: differenza tra le deformazioni rilevate dalla fibra sulla fessura (colonna AB) e quelle rilevate dalla fibra libera (colonna AA) con lo scopo di depurare la misura di deformazione dalla quota dovuta alla variazione di temperatura;
- colonna AG: differenza tra le deformazioni rilevate dalla fibra sul marmo non fessurato (colonna AC) e quelle rilevate dalla fibra libera (colonna AA) con lo scopo di depurare la misura di deformazione dalla quota dovuta alla variazione di temperatura;
- colonne AH, AI: differenza tra le deformazioni delle colonne AF e AH ai vari istanti e le deformazioni relative all'istante iniziale per porre il valore iniziale come riferimento.

Dati rilevati dalle fibre nei giorni 31-5-2010 e 1-6-2010										
942	23455500	59	39	18	31	5	2010	1540,088	1551,443	1562,885
943	23455527	59	39	18	31	5	2010	1540,09	1551,443	1562,886
944	23455538	59	39	18	31	5	2010	1540,089	1551,444	1562,884
945	23455557	59	39	18	31	5	2010	1540,089	1551,446	1562,887
946	23455576	0	40	18	31	5	2010	1540,089	1551,444	1562,888
1331	24655480	59	59	18	31	5	2010	1540,088	1551,443	1562,888
1332	24655499	59	59	18	31	5	2010	1540,091	1551,442	1562,888
1333	24655525	59	59	18	31	5	2010	1540,091	1551,443	1562,887
1334	24655538	59	59	18	31	5	2010	1540,089	1551,443	1562,889
1335	24655557	0	0	19	31	5	2010	1540,09	1551,444	1562,888
1435	25855491	59	19	19	31	5	2010	1540,09	1551,44	1562,89
1436	25855510	59	19	19	31	5	2010	1540,089	1551,441	1562,89
1437	25855534	59	19	19	31	5	2010	1540,09	1551,441	1562,892
1438	25855548	59	19	19	31	5	2010	1540,09	1551,442	1562,89
1439	25855567	0	20	19	31	5	2010	1540,088	1551,443	1562,892
1811	27055496	59	39	19	31	5	2010	1540,09	1551,442	1562,889
1812	27055511	59	39	19	31	5	2010	1540,089	1551,442	1562,888
1813	27055530	59	39	19	31	5	2010	1540,089	1551,441	1562,893
1814	27055554	59	39	19	31	5	2010	1540,087	1551,441	1562,894
1815	27055568	0	40	19	31	5	2010	1540,088	1551,441	1562,893
227	28255502	59	59	19	31	5	2010	1540,088	1551,44	1562,893
228	28255526	59	59	19	31	5	2010	1540,084	1551,437	1562,89
229	28255540	59	59	19	31	5	2010	1540,089	1551,439	1562,89
230	28255564	59	59	19	31	5	2010	1540,09	1551,442	1562,893

Tab 3.5 – Alcuni valori rilevati dai sensori nei primi giorni di monitoraggio.

U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI
0,0	1540,089	1551,444	1562,886	11,355	22,797	1283408	1292870	1302405	0	0,0012	9461	18997,5	0	0
0,0	1540,089	1551,444	1562,886	11,355	22,797	1283408	1292870	1302405	0	0,0012	9461	18997,5	0	0
0,0	1540,089	1551,444	1562,886	11,355	22,797	1283408	1292870	1302405	0	0,0012	9461	18997,5	0	0
0,0	1540,089	1551,444	1562,886	11,355	22,797	1283408	1292870	1302405	0	0,0012	9461	18997,5	0	0
0,0	1540,089	1551,444	1562,886	11,355	22,797	1283408	1292870	1302405	0	0,0012	9461	18997,5	0	0
0,0	1540,09	1551,443	1562,888	11,3532	22,7982	1283408	1292869	1302407	0,0018	0,0012	9461	18998,5	1,5	1
0,0	1540,09	1551,443	1562,888	11,3532	22,7982	1283408	1292869	1302407	-0,0018	0,0012	9461	18998,5	-1,5	1
0,0	1540,09	1551,443	1562,888	11,3532	22,7982	1283408	1292869	1302407	0,0018	0,0012	9461	18998,5	1,5	1
0,0	1540,09	1551,443	1562,888	11,3532	22,7982	1283408	1292869	1302407	-0,0018	0,0012	9461	18998,5	-1,5	1
0,0	1540,09	1551,443	1562,888	11,3532	22,7982	1283408	1292869	1302407	-0,0018	0,0012	9461	18998,5	-1,5	1
0,0	1540,09	1551,441	1562,891	11,352	22,8014	1283408	1292868	1302409	-0,003	0,0044	9460	19001,17	-2,5	3,666667
0,0	1540,09	1551,441	1562,891	11,352	22,8014	1283408	1292868	1302409	-0,003	0,0044	9460	19001,17	-2,5	3,666667
0,0	1540,09	1551,441	1562,891	11,352	22,8014	1283408	1292868	1302409	-0,003	0,0044	9460	19001,17	-2,5	3,666667
0,0	1540,09	1551,441	1562,891	11,352	22,8014	1283408	1292868	1302409	-0,003	0,0044	9460	19001,17	-2,5	3,666667
0,0	1540,089	1551,441	1562,891	11,3528	22,8028	1283407	1292868	1302410	-0,0022	0,0058	9460,667	19002,33	-1,83333	4,833333
0,0	1540,089	1551,441	1562,891	11,3528	22,8028	1283407	1292868	1302410	-0,0022	0,0058	9460,667	19002,33	-1,83333	4,833333
0,0	1540,089	1551,441	1562,891	11,3528	22,8028	1283407	1292868	1302410	-0,0022	0,0058	9460,667	19002,33	-1,83333	4,833333
0,0	1540,089	1551,441	1562,891	11,3528	22,8028	1283407	1292868	1302410	-0,0022	0,0058	9460,667	19002,33	-1,83333	4,833333
0,1	1540,088	1551,44	1562,892	11,3516	22,8038	1283407	1292867	1302410	-0,0034	0,0068	9459,667	19003,17	-2,83333	5,666667
0,1	1540,088	1551,44	1562,892	11,3516	22,8038	1283407	1292867	1302410	-0,0034	0,0068	9459,667	19003,17	-2,83333	5,666667
0,1	1540,088	1551,44	1562,892	11,3516	22,8038	1283407	1292867	1302410	-0,0034	0,0068	9459,667	19003,17	-2,83333	5,666667
0,1	1540,088	1551,44	1562,892	11,3516	22,8038	1283407	1292867	1302410	-0,0034	0,0068	9459,667	19003,17	-2,83333	5,666667
0,1	1540,087	1551,438	1562,891	11,3514	22,8046	1283406	1292865	1302410	-0,0036	0,0076	9459,5	19003,83	-3	6,333333
0,1	1540,087	1551,438	1562,891	11,3514	22,8046	1283406	1292865	1302410	0,0036	0,0076	9459,5	19003,83	3	6,333333
0,1	1540,087	1551,438	1562,891	11,3514	22,8046	1283406	1292865	1302410	-0,0036	0,0076	9459,5	19003,83	-3	6,333333
0,1	1540,087	1551,438	1562,891	11,3514	22,8046	1283406	1292865	1302410	-0,0036	0,0076	9459,5	19003,83	-3	6,333333
0,1	1540,087	1551,44	1562,894	11,3522	22,8064	1283406	1292866	1302412	-0,0028	0,0094	9460,167	19005,33	-2,33333	7,833333
0,1	1540,087	1551,44	1562,894	11,3522	22,8064	1283406	1292866	1302412	-0,0028	0,0094	9460,167	19005,33	-2,33333	7,833333

Fig 3.43 – Elaborazione primi valori rilevati dai sensori.

Successivamente i dati rilevati dai sensori sono stati rappresentati nei grafici presenti nelle pagine seguenti. In figura 3.44 sono rappresentate le lunghezze d'onda della fibra sulla fessura relative al periodo 0-90 giorni, cioè ai primi 90 giorni di rilevazione, mentre nella figura seguente (fig 3.45) sono osservabili i valori della stessa fibra relativi al periodo di rilevazione compreso tra i giorni 83 (23 agosto 2010) e 104 (13 settembre 2010). In figura 3.46 sono presenti le lunghezze d'onda della fibra sul marmo non fessurato nel periodo compreso tra i giorni 0 (31 maggio 2010) e 90 (30 agosto 2010), mentre in figura 3.47 sono rappresentati i valori di lunghezza d'onda della stessa fibra nel periodo 83-104 giorni. Infine nelle figure 3.48 e 3.49 sono riportate le lunghezze d'onda della fibra libera negli stessi periodi temporali visti per le altre due fibre.

Si è poi proceduto a tracciare i grafici dei valori depurati dalla quota dovuta alla variazione di temperatura e determinati secondo le modalità viste in tabella 3.43. In figura 3.50 possono essere osservati due diversi andamenti: quello blu indica le lunghezze d'onda depurate della fibra sulla fessura relative al periodo 0-90 giorni, mentre quello rosso riporta le lunghezze d'onda depurate della fibra sul marmo non fessurato per lo stesso periodo di rilevazione. In figura 3.51 sono tracciati gli andamenti delle stesse grandezze della figura precedente relativi però al periodo compreso tra il giorno 83 e il 104. Analizzando questi grafici si può notare che per la maggior parte del tempo i due andamenti si trovano in opposizione, in quanto quando il primo presenta un minimo, il secondo ha invece un massimo.

In figura 3.52 sono rappresentati i valori di deformazione in  $\mu\epsilon$  depurati relativi al periodo 0-90 giorni e in quella seguente gli stessi valori nel periodo 83-104 giorni. Anche gli andamenti di queste deformazioni, misurate dalla fibra sulla fessura e da quella sul marmo non fessurato e depurate dalla quota dovuta alla variazione di temperatura, si trovano per la maggior parte del tempo in opposizione.

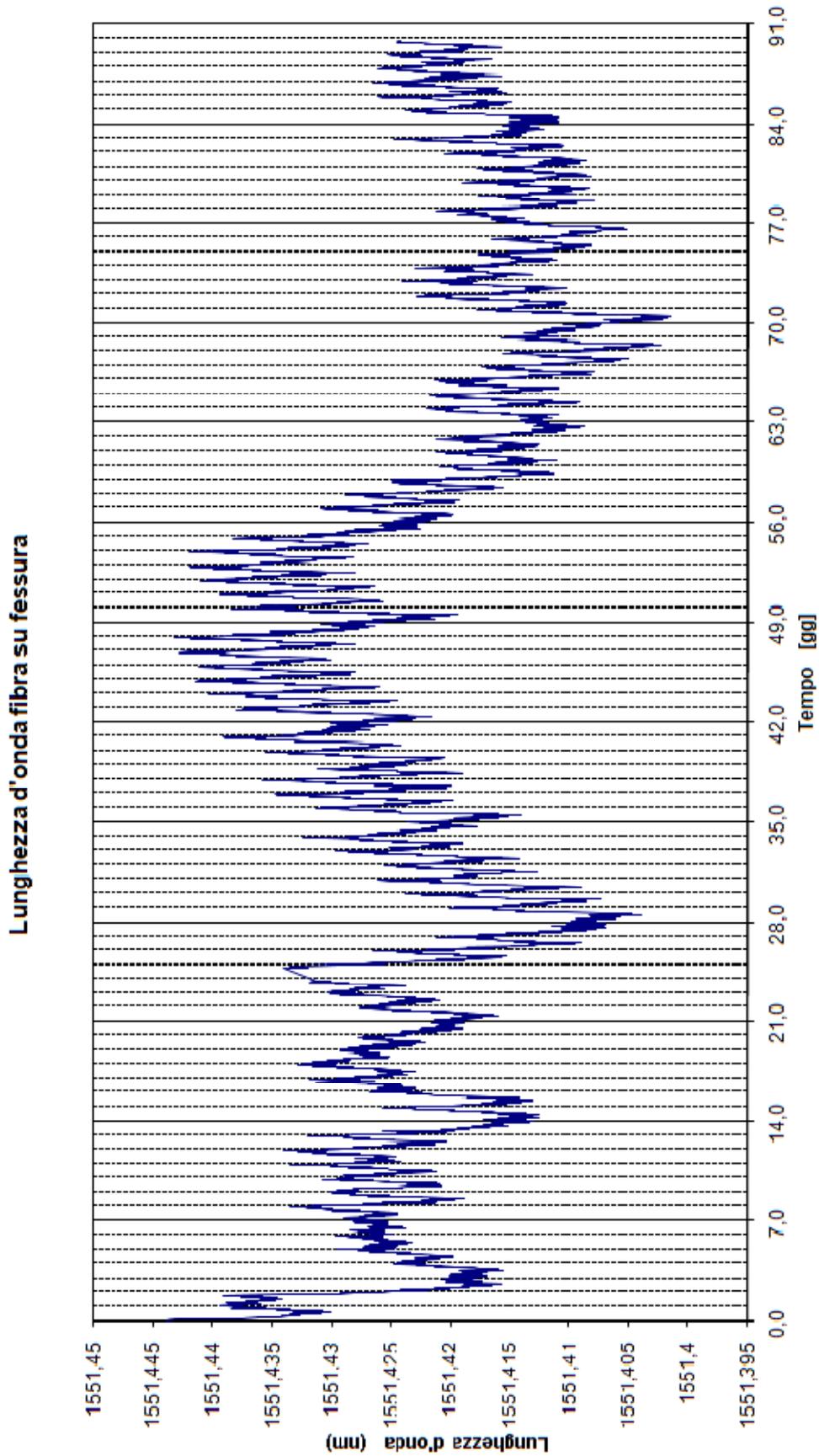


Fig 3.44 – Lunghezze d’onda fibra sulla fessura nel periodo 0-90 giorni.

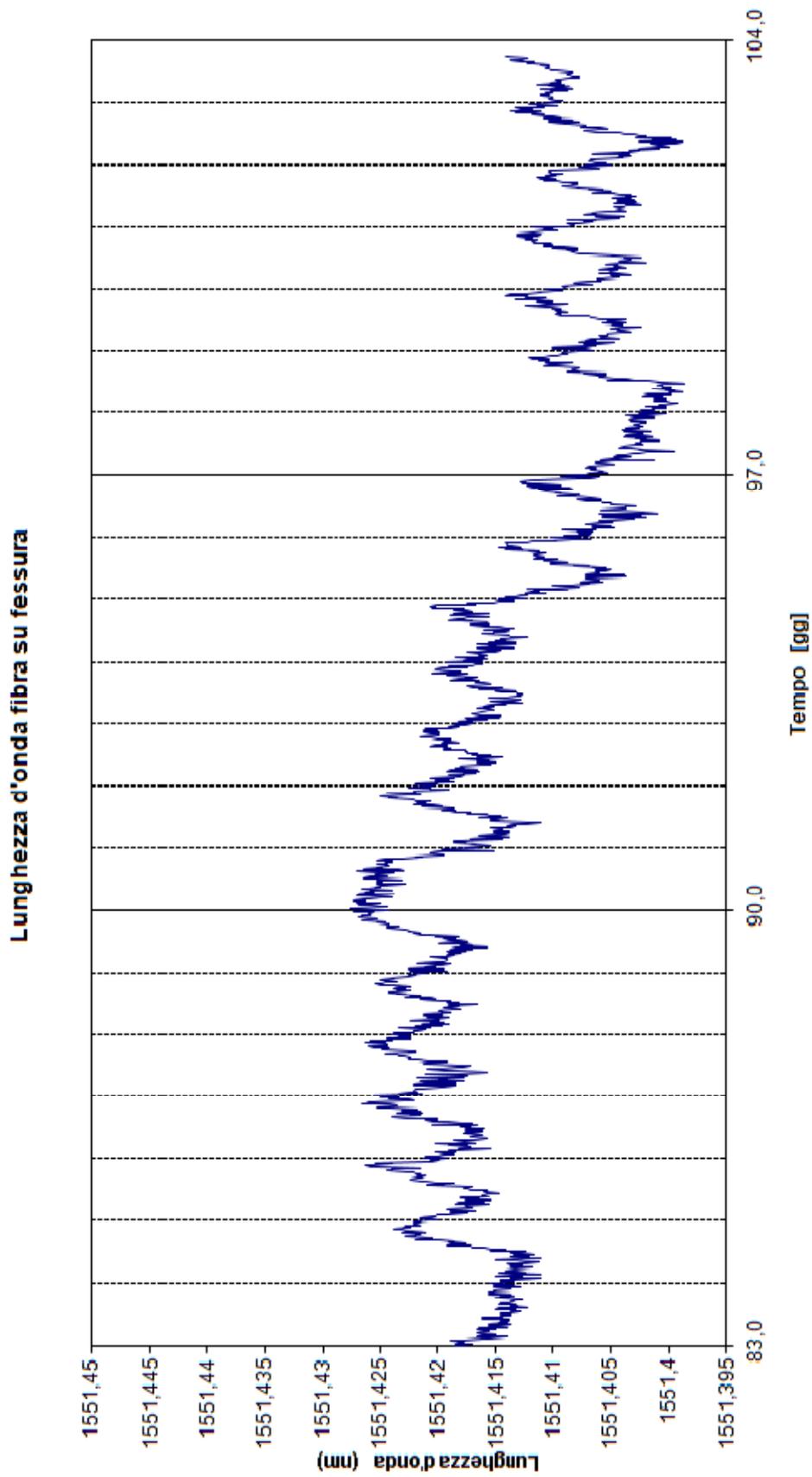


Fig 3.45 – Lunghezze d’onda fibra sulla fessura nel periodo 83-104 giorni.

Lunghezza d'onda fibra su marmo non fessurato

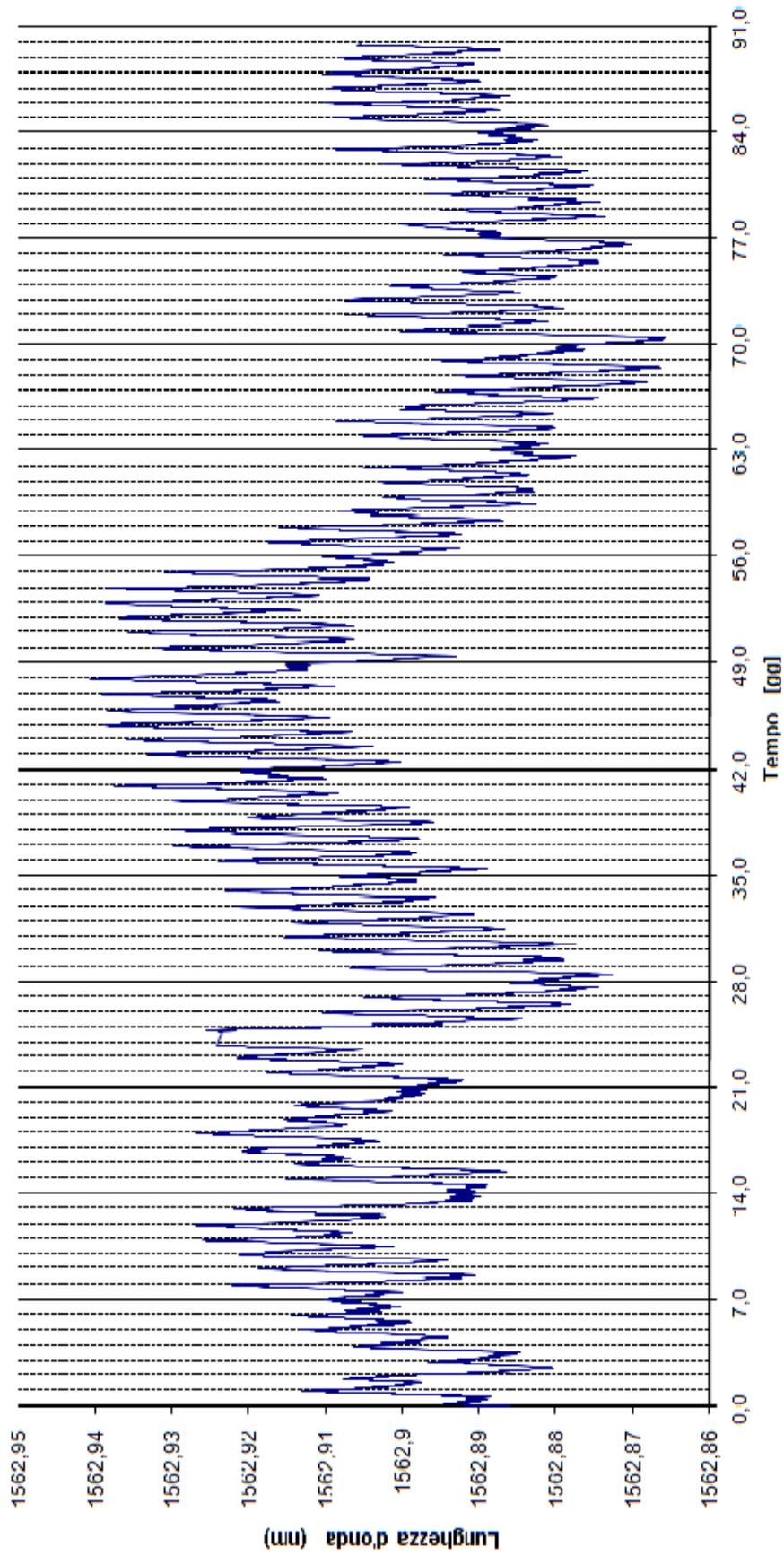


Fig 3.46 - Lunghezze d'onda fibra su marmo non fessurato nel periodo 0-90 giorni.

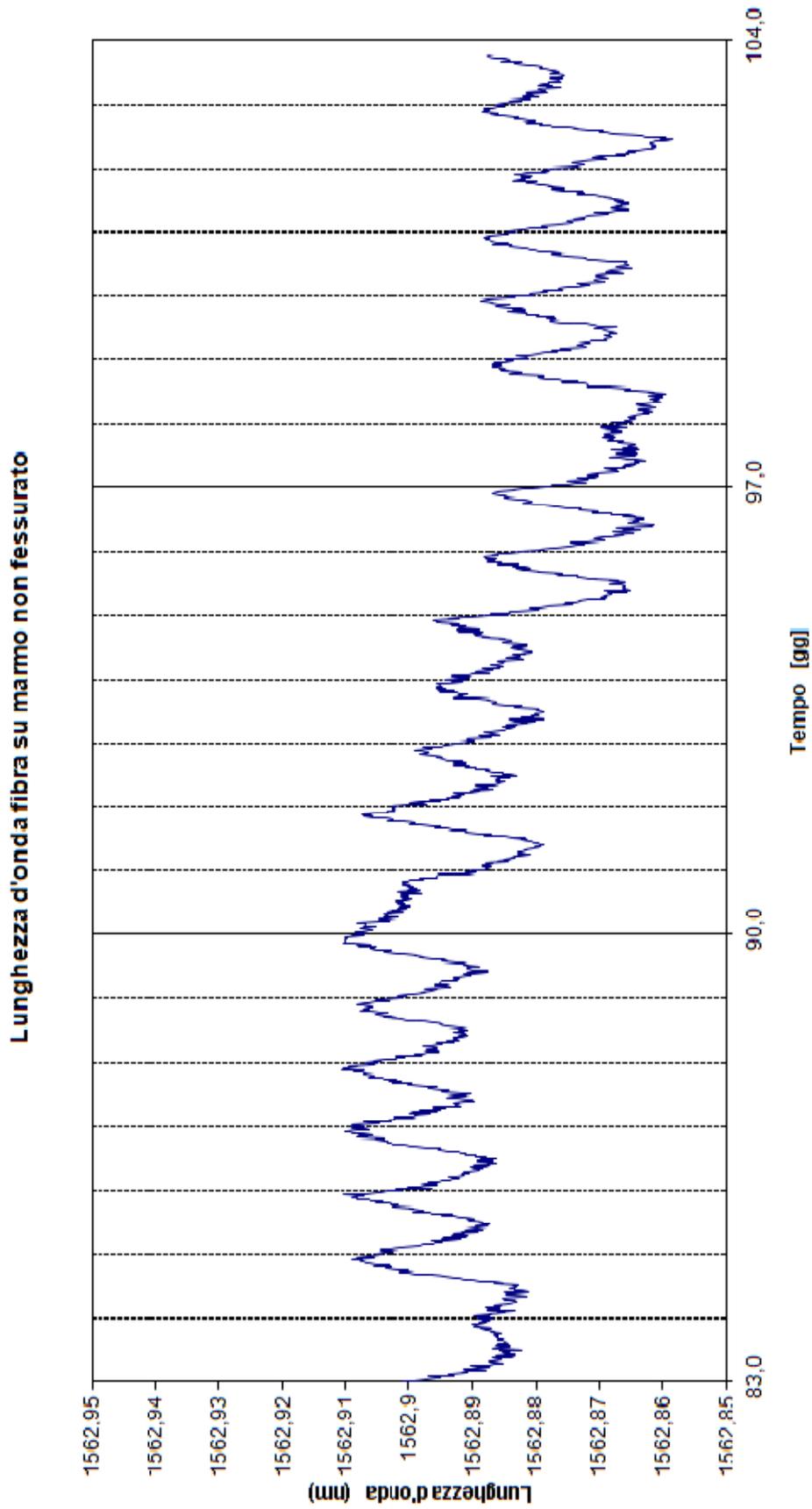


Fig 3.47 – Lunghezze d’onda fibra su marmo non fessurato nel periodo 83-104 giorni.

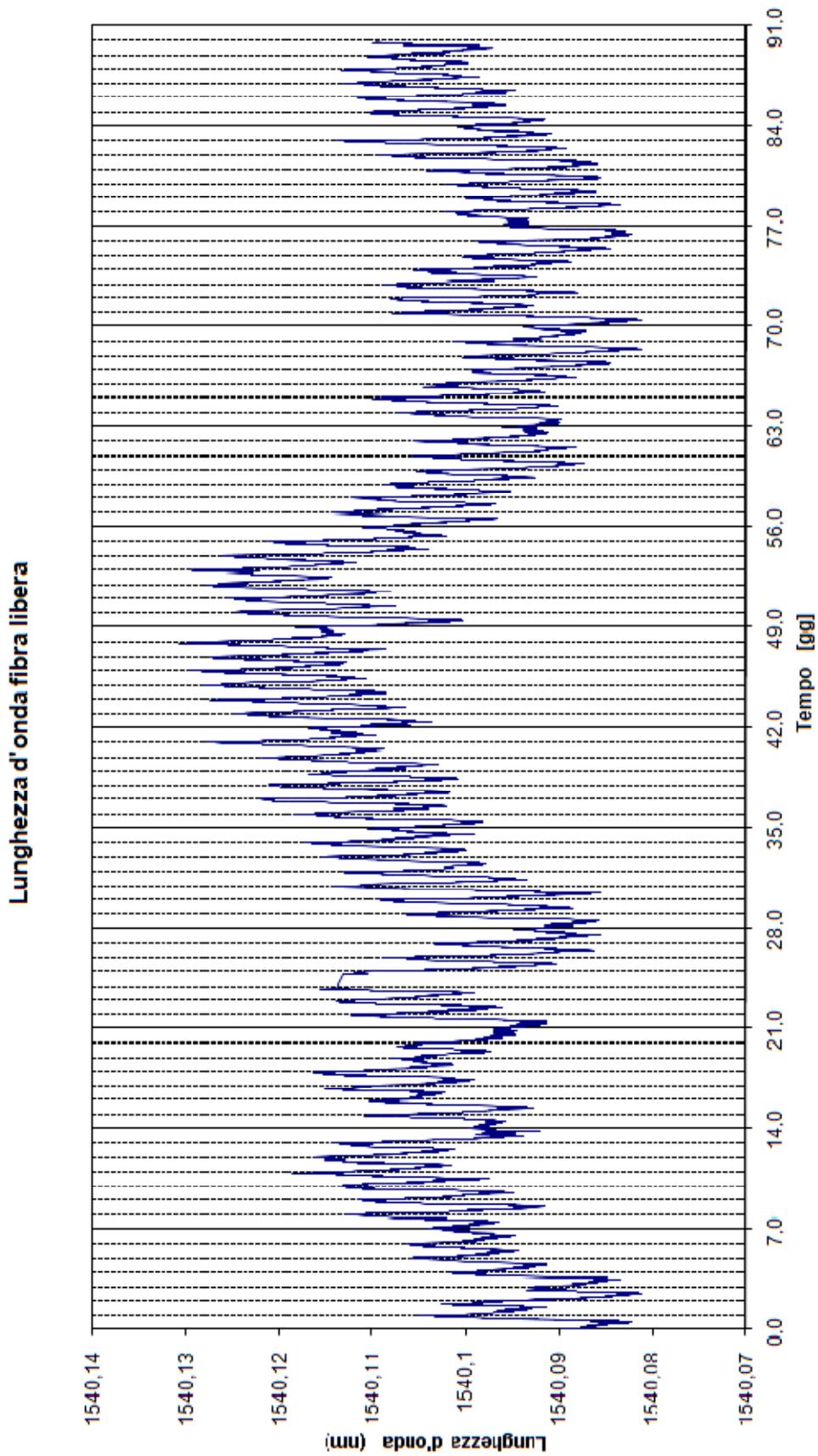


Fig 3.48 – Lunghezze d’onda fibra libera nel periodo 0-90 giorni.

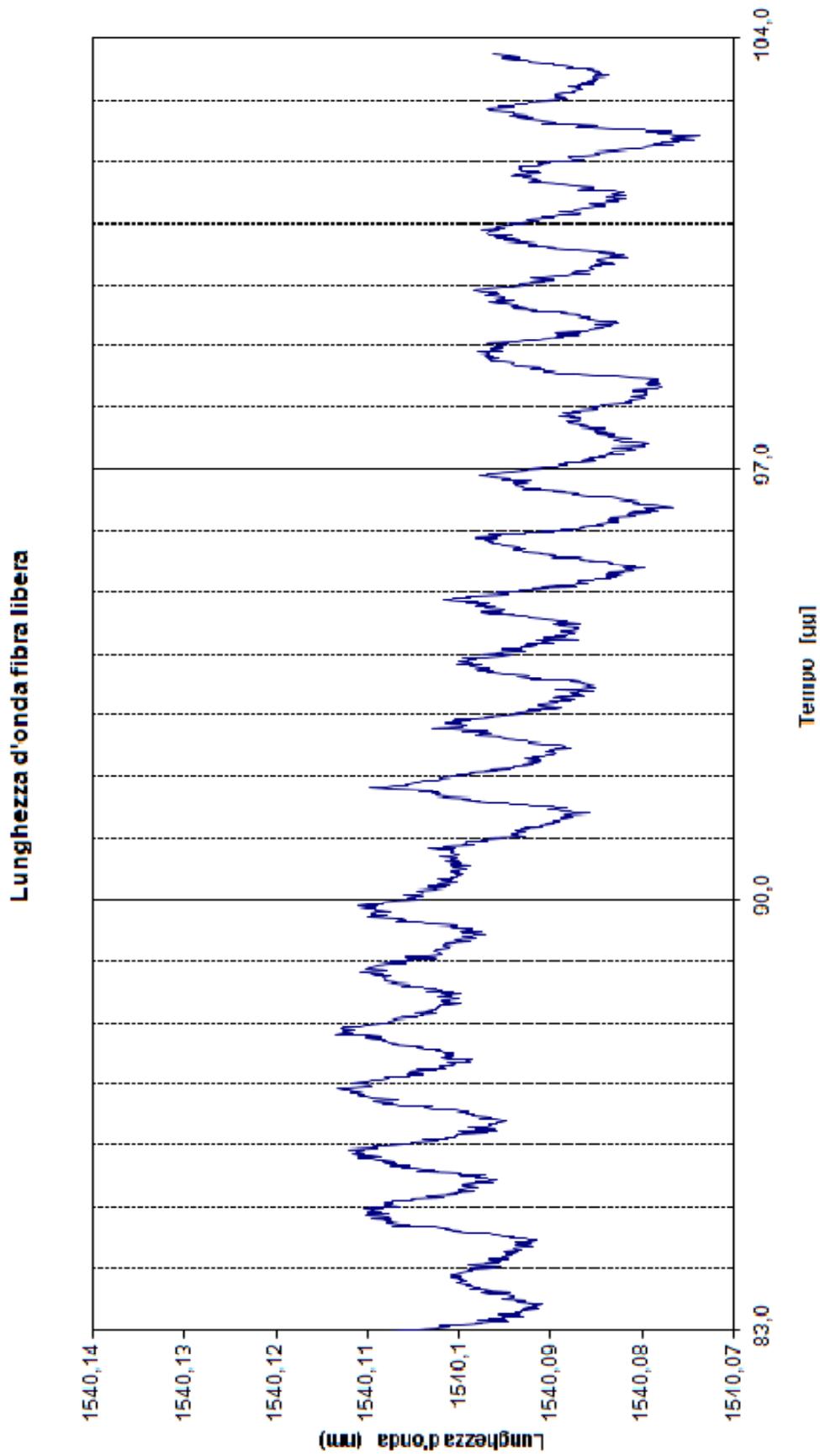


Fig 3.49 – Lunghezze d’onda fibra libera nel periodo 83-104 giorni.

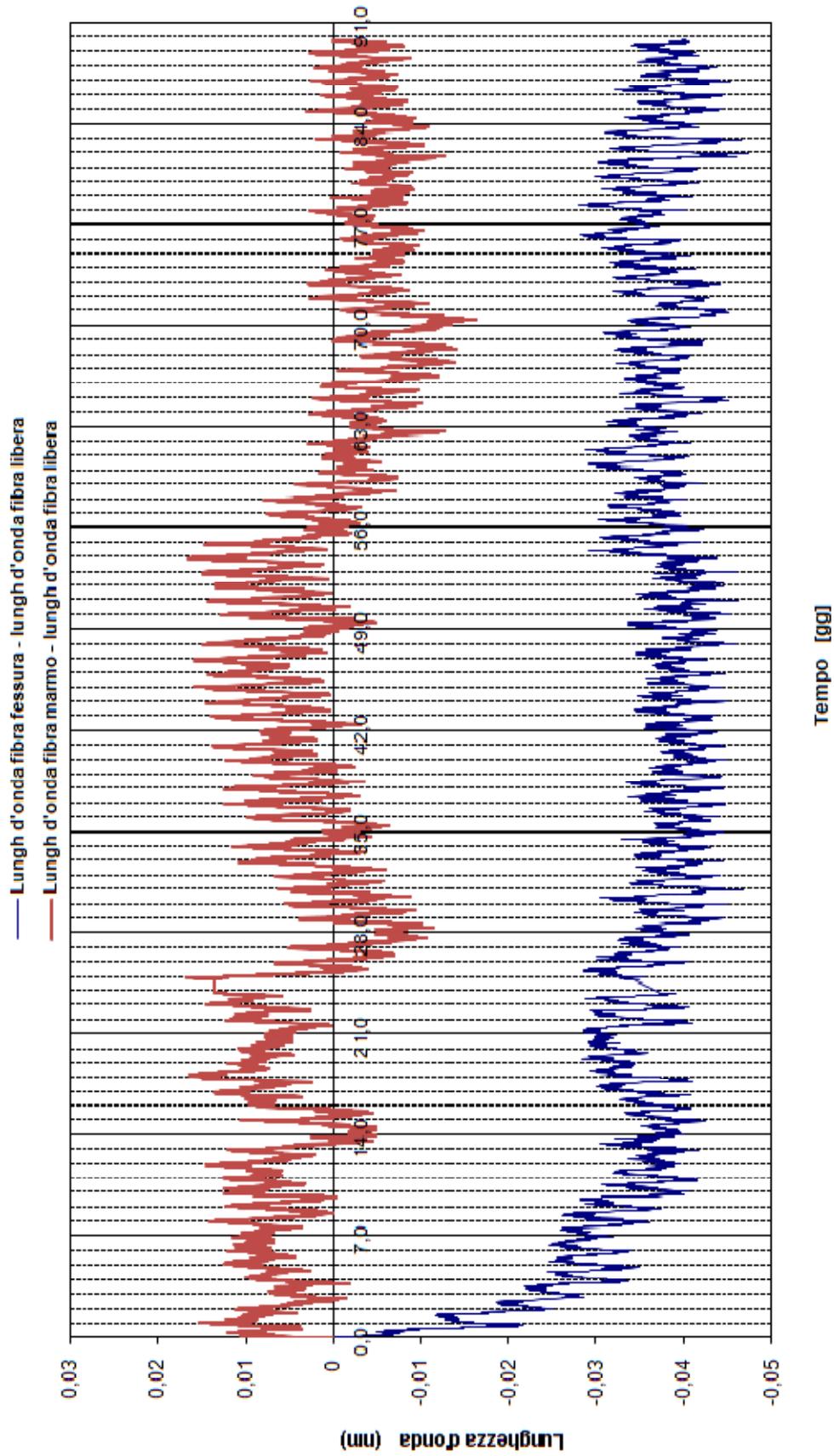


Fig 3.50 – Lunghezze d'onda depurate, periodo 0-90 giorni.

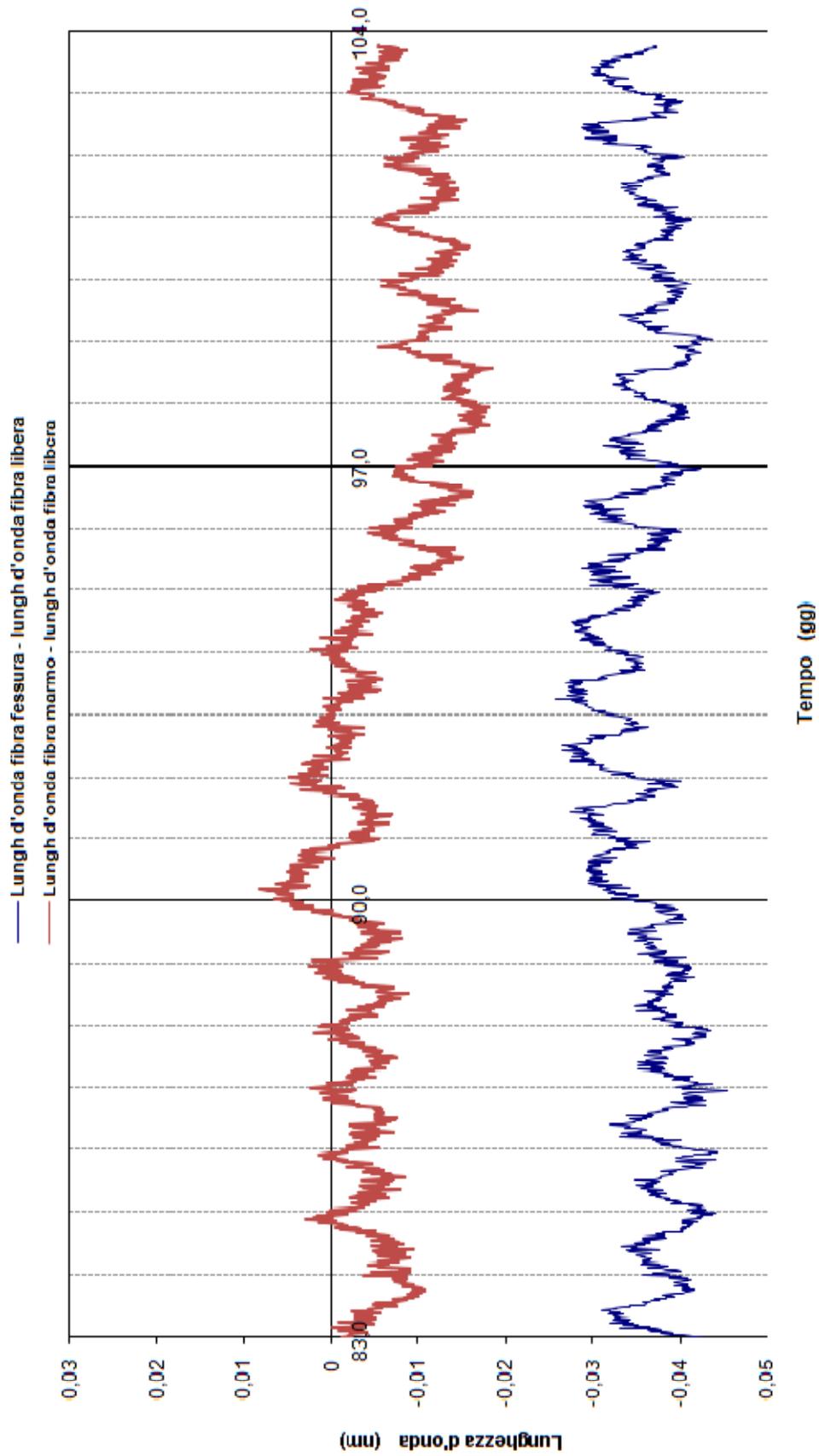


Fig 3.51 – Lunghezze d'onda depurate, periodo 83-104 giorni.

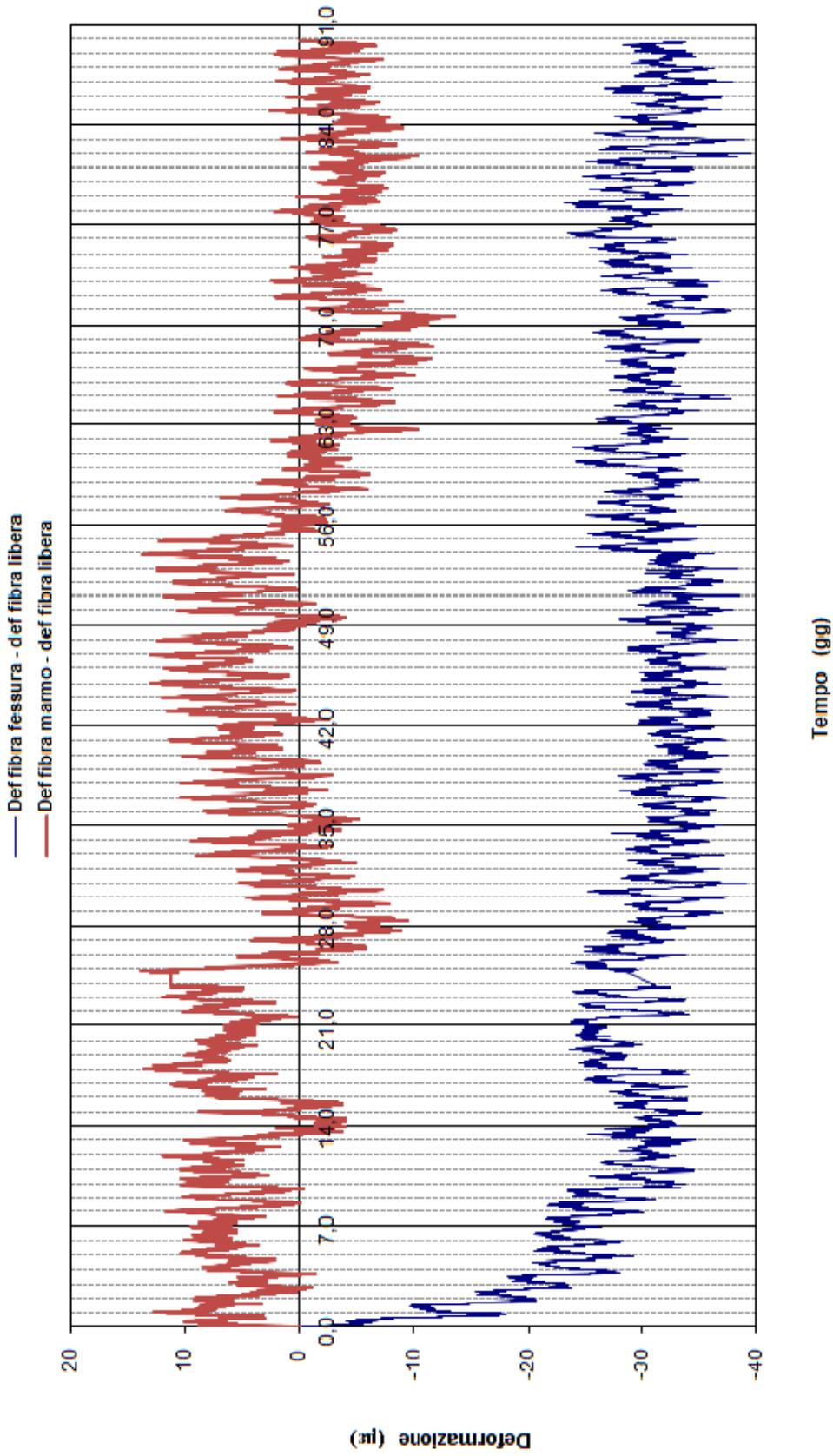


Fig 3.52 – Deformazioni in µm depurate, periodo 0-90 giorni.

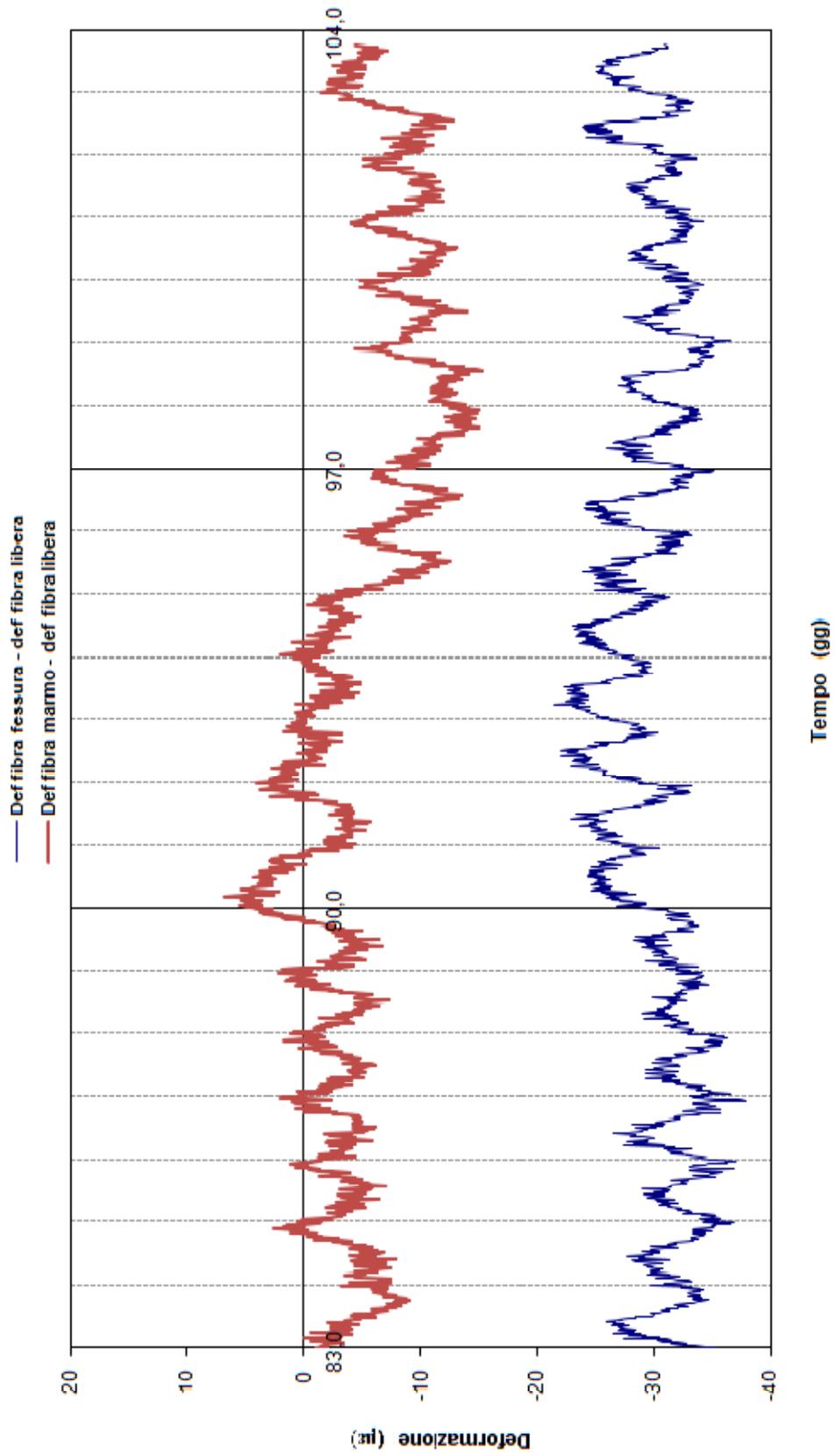


Fig 3.53 – Deformazioni in µm depurate, periodo 83-104 giorni.

Al fine di comprendere meglio il motivo di questa opposizione è stato aggiunto l'andamento della temperatura a quelli delle deformazioni depurate. In figura 3.54 e 3.55 infatti si possono osservare in verde i punti rappresentativi della temperatura del materiale (substrate temperature) e in rosa quelli della temperatura dell'aria all'interno del dispositivo (device temperature). All'aumentare della temperatura è stato riscontrato un aumento della deformazione rilevata dalla fibra sul marmo non fessurato e una diminuzione di quella rilevata dalla fibra sulla fessura. Questo è coerente con quanto ci si aspettava, in quanto un aumento della temperatura comporta una dilatazione del materiale, la quale determina un aumento della deformazione rilevata dalla fibra sul marmo. La fibra sulla fessura, invece, ha rilevato una diminuzione della deformazione poiché la dilatazione del materiale dovuta, come si è detto, all'aumento della temperatura è andata ad interessare la fessura causando una diminuzione della sua ampiezza. Probabilmente su questo incide anche il fatto che l'incremento di temperatura misurato non è uniforme all'interno del marmo che costituisce il David. Quando, infatti, la parte esterna si dilata, quella interna subisce un effetto molto inferiore in quanto risente meno delle variazioni di temperatura. La figura 3.54 è relativa al periodo di tempo compreso tra i giorni 70 e 80 dall'inizio delle rilevazioni, mentre la figura successiva (fig 3.55) si riferisce al periodo compreso tra i giorni 80 e 90.

Secondo quanto detto nel paragrafo 2.2.2 i sensori Bragg Grating consentono di rilevare sia le deformazioni che la temperatura e quindi possono essere utilizzati sia come estensimetri che come termometri. La fibra libera è stata disposta sulla sommità del broncone con lo scopo di fungere da sensore di temperatura. La figura 3.56 consente di confrontare i valori rilevati dal sensore libero con le temperature del materiale e dell'aria all'interno del dispositivo nel periodo di tempo compreso tra 70 e 80 giorni. Le lunghezze d'onda della fibra sono rappresentate in blu, mentre le temperature da punti rossi e verdi. Si può notare che le temperature, in particolare la device temperature, seguono perfettamente l'andamento delle lunghezze d'onda e questo consente di appurare che il sensore può essere utilizzato anche come rilevatore della temperatura.

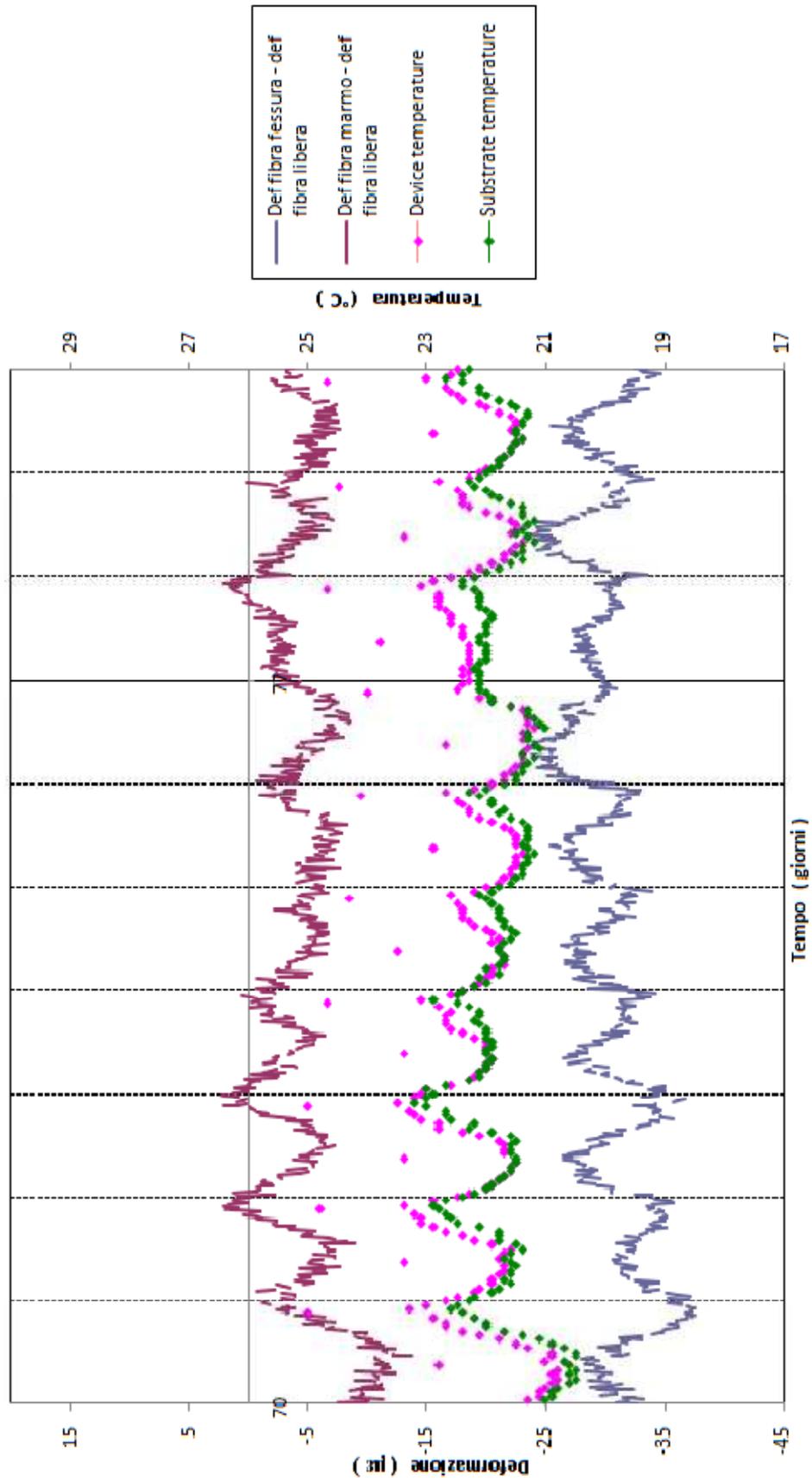


Fig 3.54 – Deformazioni depurate e temperature nel periodo 70 - 80 giorni.

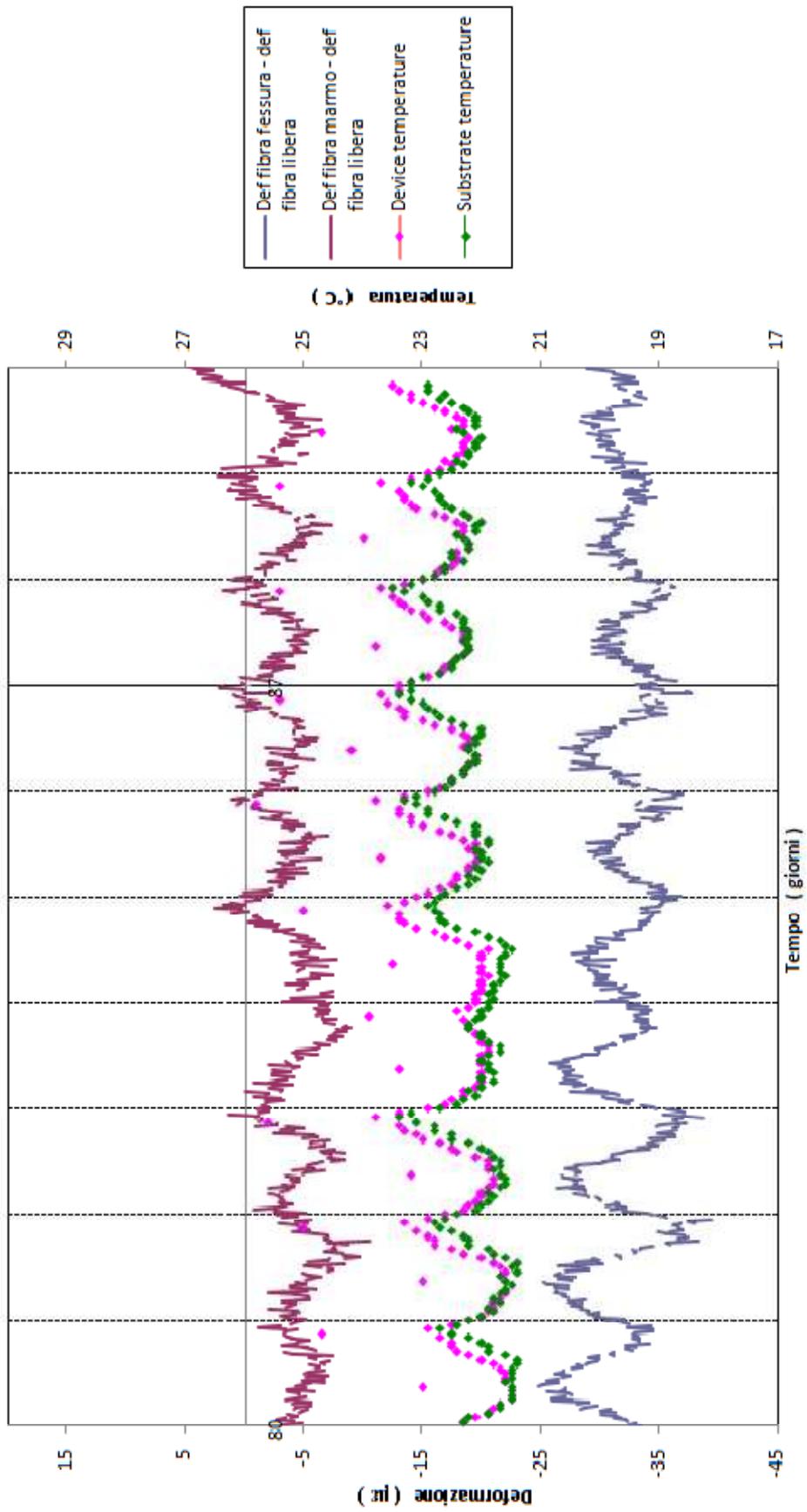


Fig 3.55 – Deformazioni depurate e temperatura nel periodo 80 - 90 giorni.

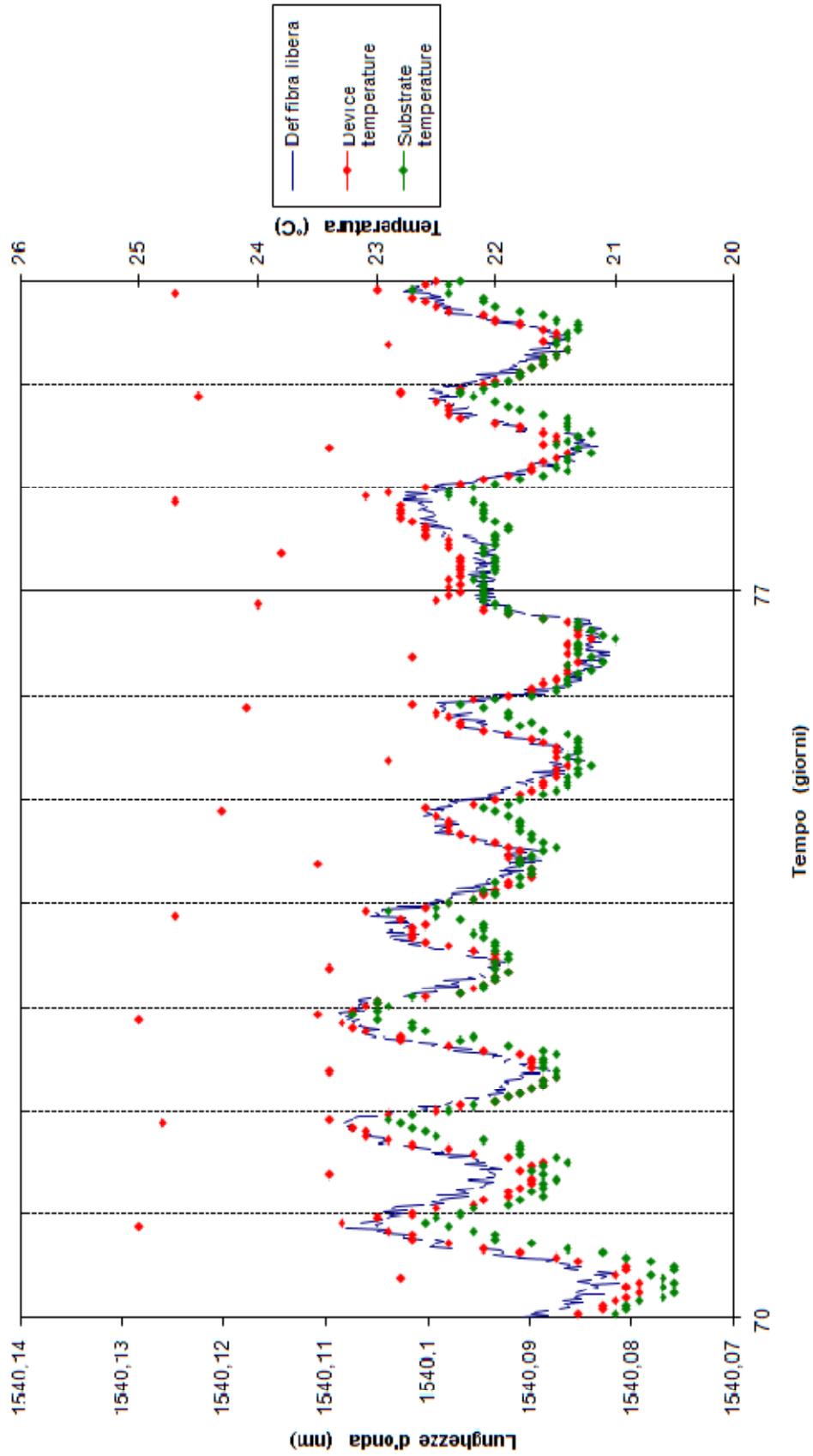


Fig 3.56 – Confronto tra lunghezze d’onda della fibra libera e temperature nel periodo 70-80 giorni.

Note le deformazioni depurate si è proceduto a determinare l'apertura della fessura in corrispondenza della quale è stato applicato il sensore Bragg Grating. Per prima cosa si è deciso di trascurare i primi 14 giorni di rilevazione in quanto i valori ottenuti in questo periodo risentono dell'assestamento della strumentazione. Il calcolo dell'apertura della fessura è stato effettuato utilizzando la formula:

$$\Delta l = \varepsilon \cdot l \quad (3.1)$$

Dove:

$\varepsilon$  = deformazioni depurate rilevate dal sensore sulla fessura;

$l$  = lunghezza del tratto utile dell'incollaggio, valutato dalla figura 3.26 in circa 1,8 cm.

I valori in  $\mu\text{m}$  così ottenuti sono stati poi confrontati con l'andamento della temperatura del materiale (substrate temperature) e, infine, sono stati tracciati i grafici presenti nelle figure seguenti. In fig 3.57 si possono osservare in blu i valori assunti dall'apertura della fessura e in verde i punti rappresentativi della temperatura del substrato relativi al periodo di rilevazione 14 – 90 giorni. Nelle figure 3.58 e 3.59 sono riportate le stesse grandezze con la stessa simbologia viste per la figura 3.57, relativamente però al periodo 60 - 70 giorni e 70 - 80 giorni rispettivamente. Lo scopo di questi ultimi due grafici è quello di consentire una migliore visualizzazione degli andamenti grazie ad una riduzione dell'intervallo temporale considerato. Dalla loro analisi emerge che un aumento della temperatura comporta una diminuzione dell'apertura della fessura e questo rispecchia quanto detto nelle pagine precedenti riguardo agli effetti della dilatazione del materiale sulle deformazioni rilevate. In corrispondenza della fessura, infatti, un aumento della temperatura determina una dilatazione del marmo in prossimità della fessura stessa che causa una diminuzione della sua apertura.

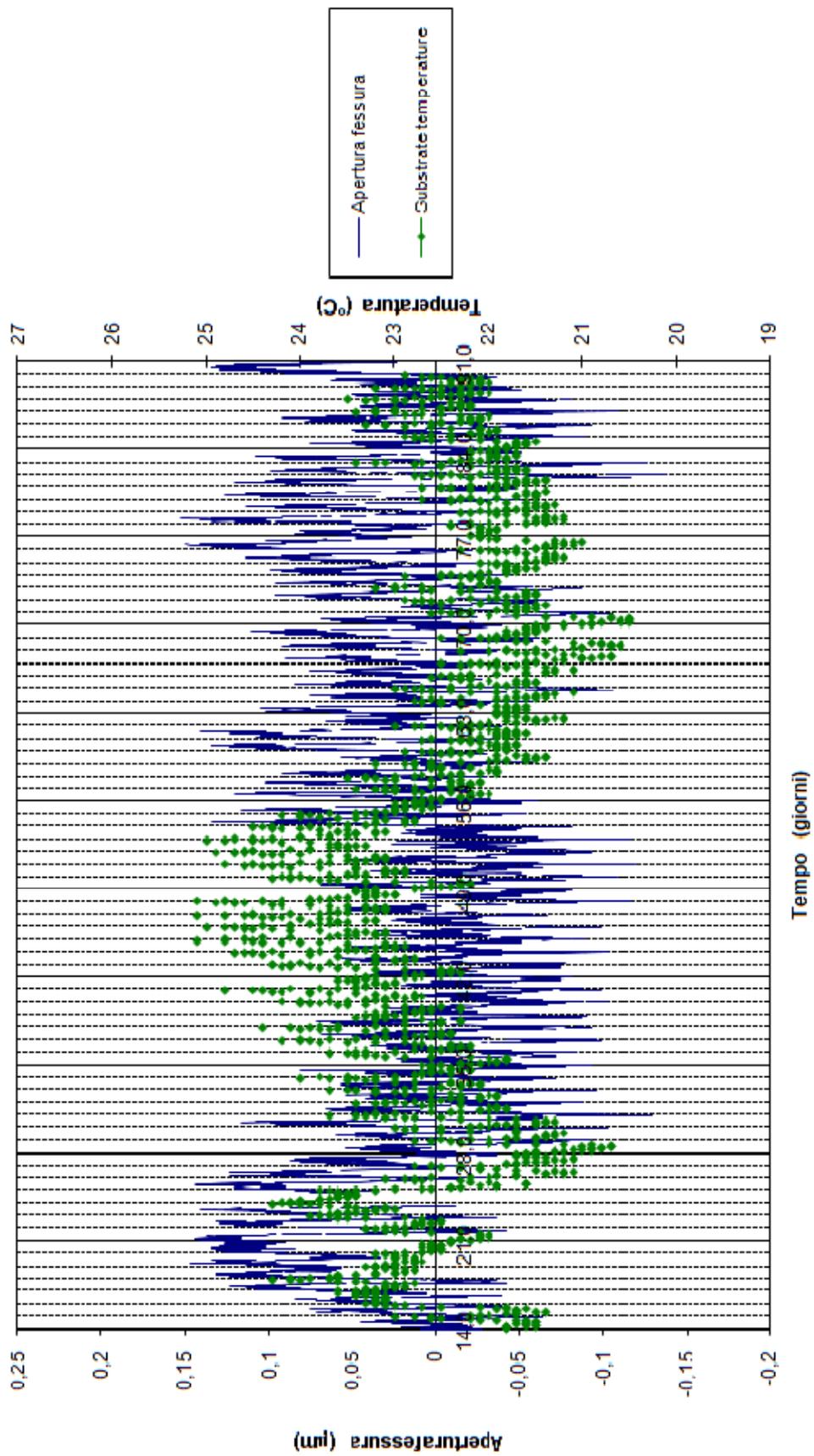


Fig 3.57 – Apertura della fessura e temperatura del substrato nel periodo 14 – 90 giorni.

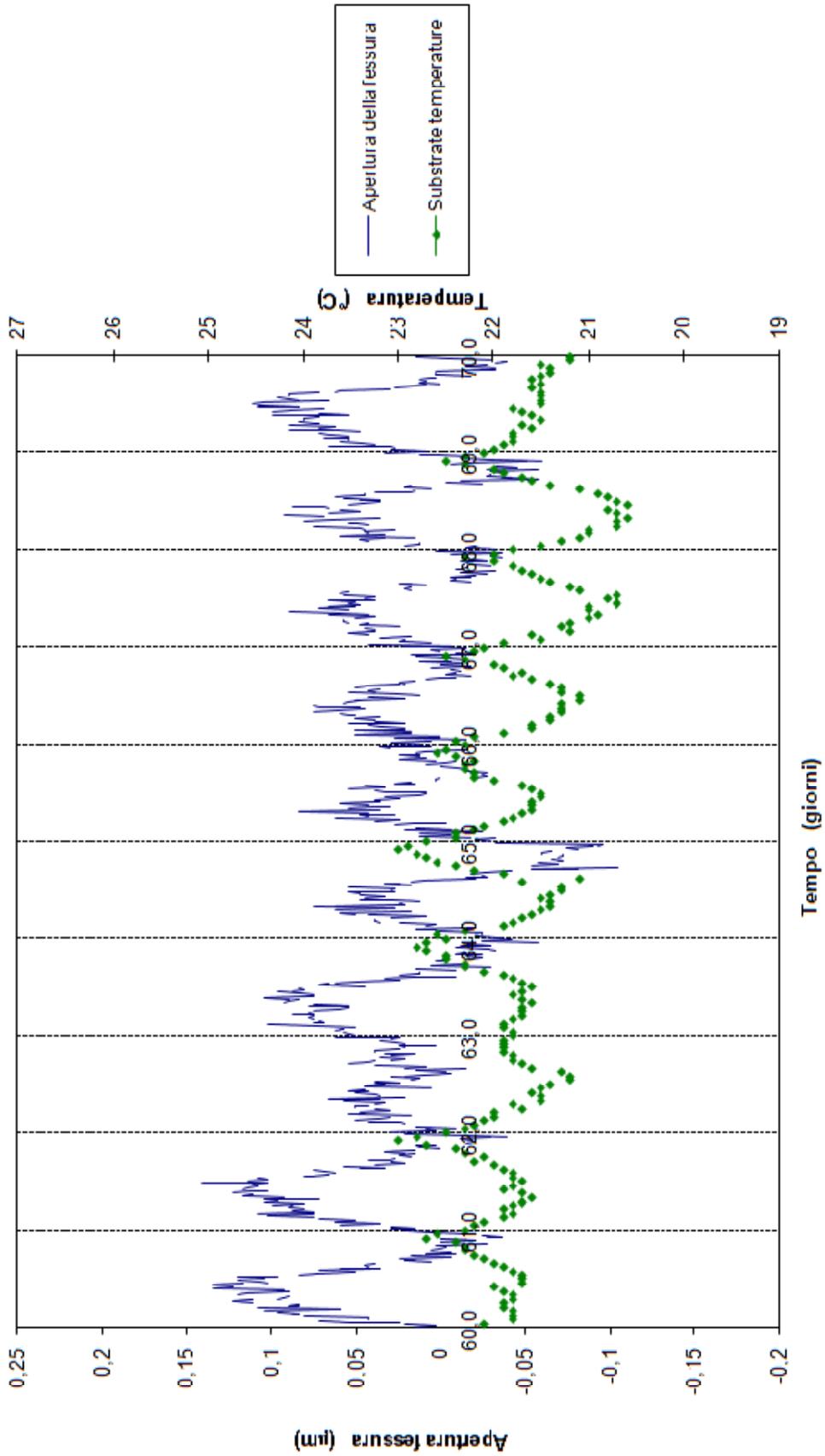


Fig 3.58 – Apertura della fessura e temperatura del substrato nel periodo 60 – 70 giorni.

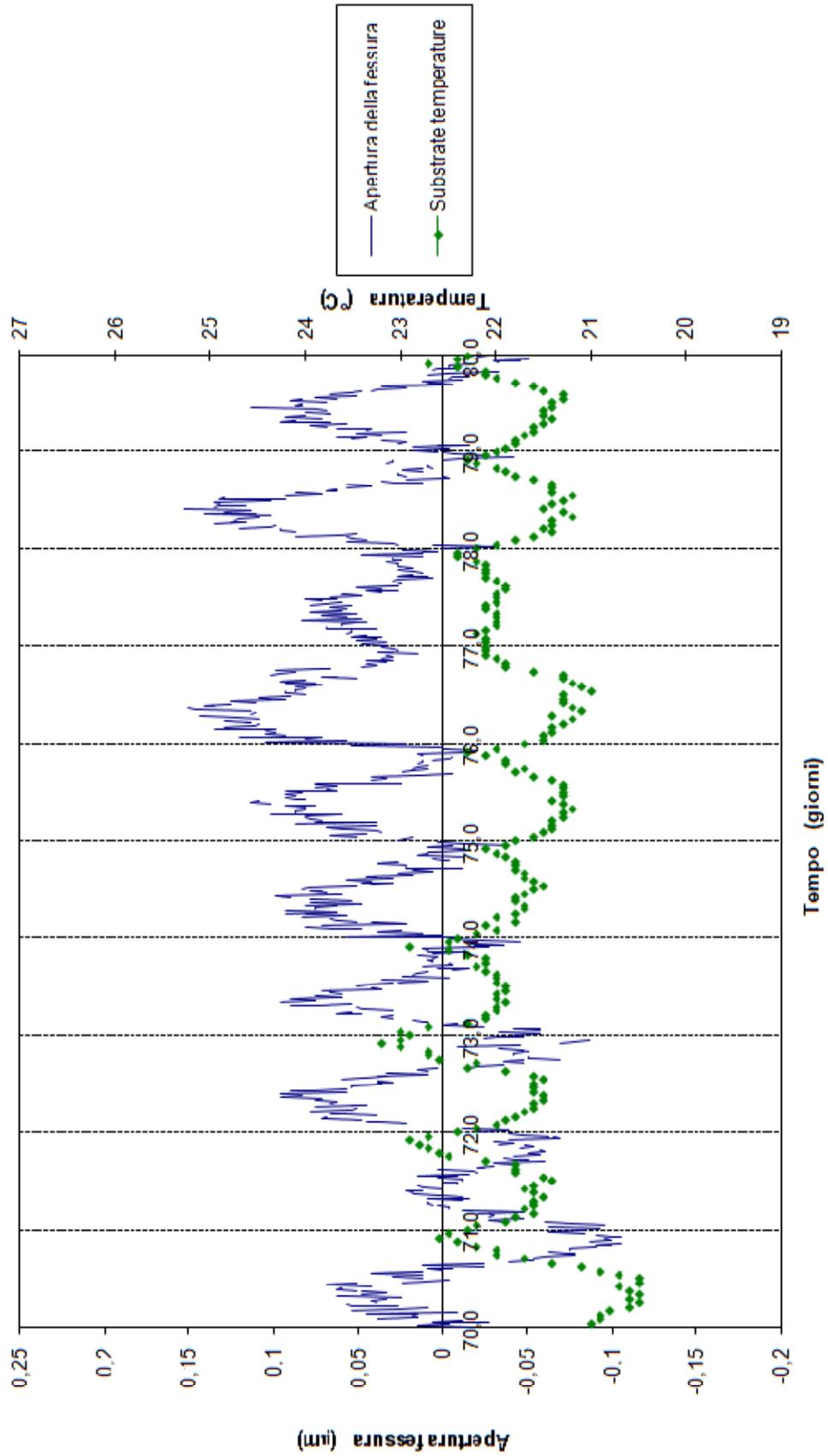


Fig 3.59 – Apertura della fessura e temperatura del substrato nel periodo 70 – 80 giorni.

## **4 - ANALISI DELLO STATO TENSIONALE DEL DAVID**

### **4.1 - Introduzione**

In questo capitolo saranno trattati gli aspetti teorici e i passaggi numerici e grafici necessari alla determinazione dello stato tensionale agente nella sezione orizzontale della statua posta nei pressi della fessura monitorata dal sensore Bragg Grating. Utilizzando il software MeshLab è stato possibile tracciare le sezioni orizzontali del David a diverse altezze e in particolare quella situata a 58 cm dalla base del basamento michelangiolesco. Questa, infatti, è l'altezza stimata nelle vicinanze della quale si trova la fessura analizzata. Successivamente applicando le regole della geometria delle masse e alcuni importanti comandi di Autocad, si è proceduto alla determinazione dei baricentri, degli assi principali d'inerzia e dell'ellisse centrale d'inerzia della sezione considerata. Una volta note queste grandezze applicando la teoria dello sforzo normale eccentrico è stato possibile valutare lo stato tensionale agente.

### **4.2 – Rilievo del basamento**

Per prima cosa si è sentita l'esigenza di avere a disposizione le dimensioni geometriche del basamento ottocentesco per una completa analisi dell'opera. Queste informazioni sono state fornite dall'Arch. Camilla Colla che aveva già effettuato alcuni studi sulla statua. In figura 4.1 sono riportate le dimensioni della parte anteriore del basamento, quella cioè che si osserva guardando frontalmente il David. La figura successiva (fig 4.2), invece, permette di osservare le dimensioni della parte posteriore, mentre le figure 4.3 e 4.4 contengono quelle dei lati destro e sinistro del basamento stesso.

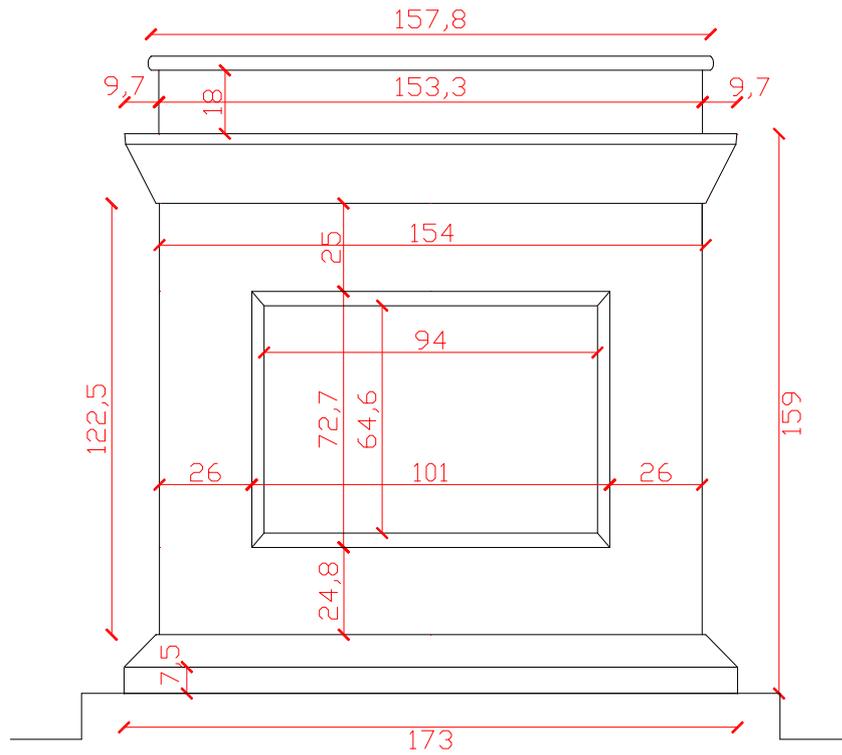


Fig 4.1 – Prospetto basamento fronte.

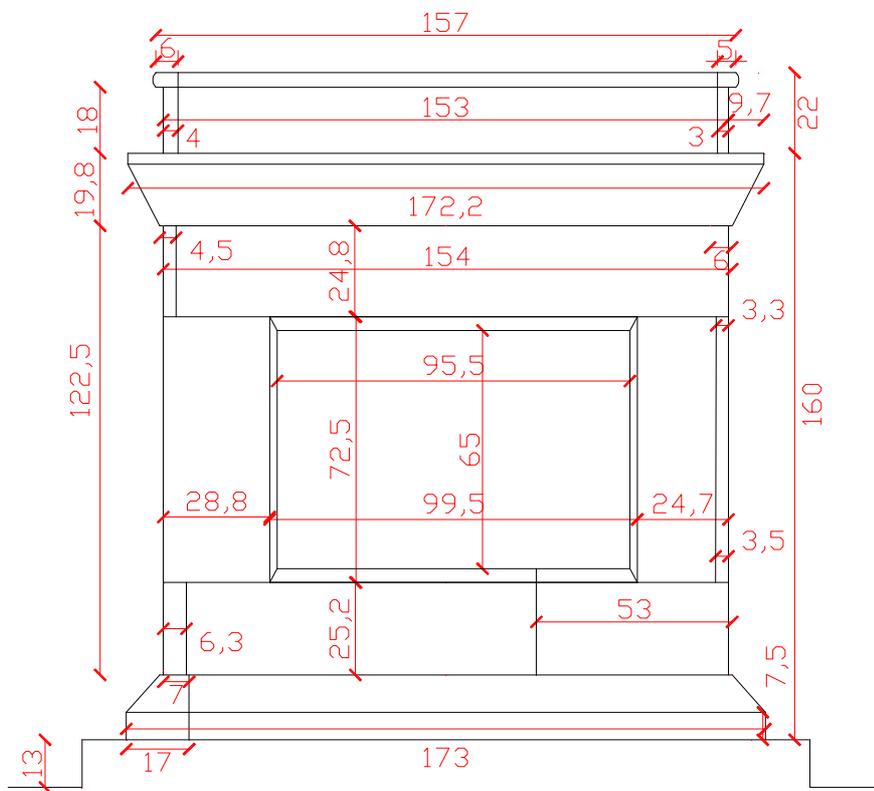


Fig 4.2 – Prospetto basamento retro.

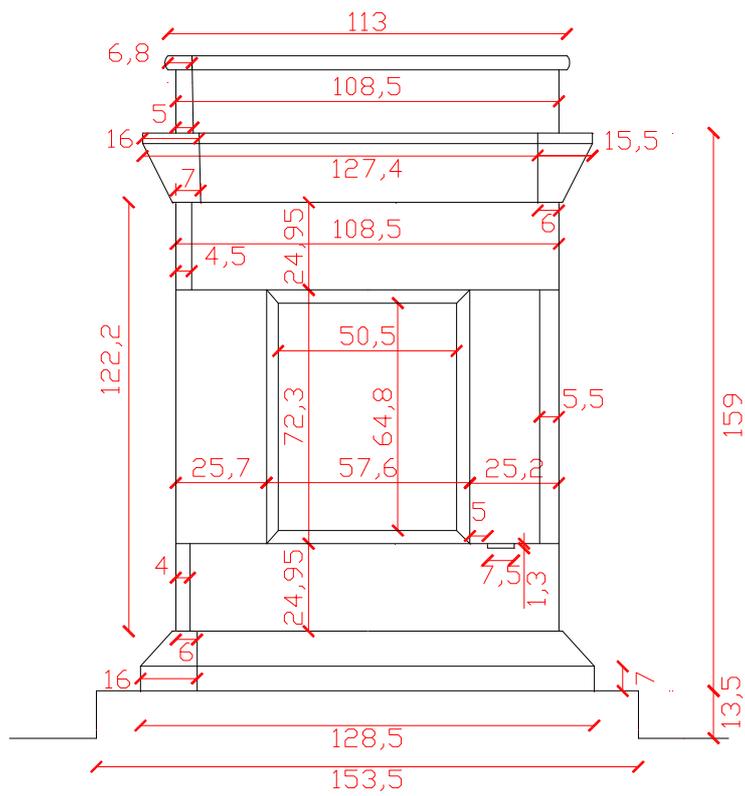


Fig 4.3 – Prospetto basamento lato destro

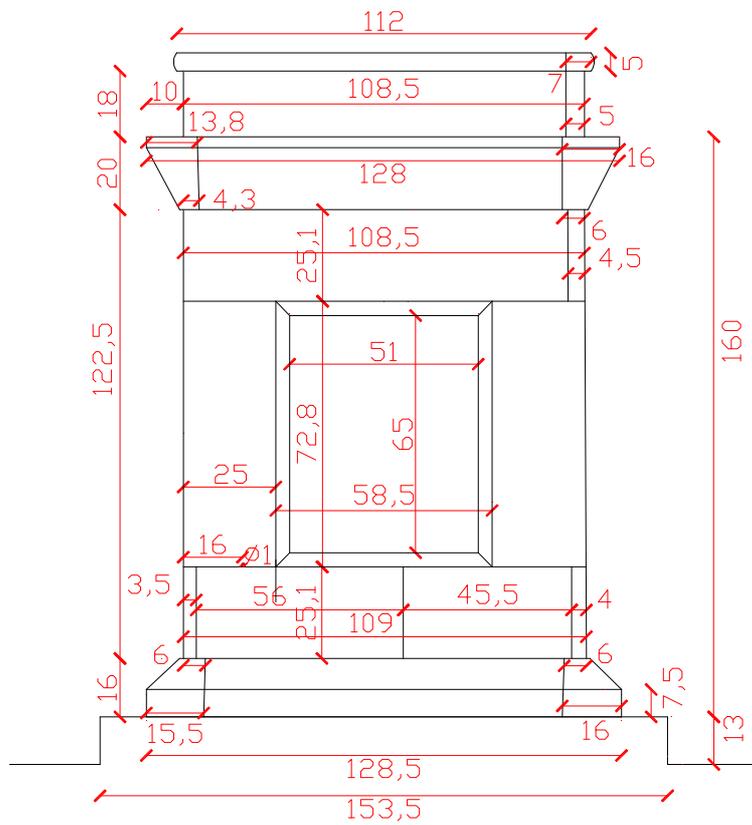


Fig 4.4 – Prospetto basamento lato sinistro.

### 4.3 – Tracciamento delle sezioni orizzontali

Grazie alla collaborazione con il Visual Computing Lab del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Pisa è stato possibile utilizzare il software Meshlab, di cui si è già parlato nel paragrafo 1.3.1, al fine di tracciare le sezioni orizzontali del David. La figura 4.5 consente di appurare la precisione con cui questo programma è in grado di riprodurre la statua in esame.



Fig 4.5 – David visualizzato mediante MeshLab.

Prima di procedere al tracciamento delle sezioni è stata stabilita una terna di assi di riferimento in cui l'asse x è stato assunto in corrispondenza della base del basamento michelangiolesco, parallelo ad essa e diretto verso sinistra, l'asse y ortogonale al precedente e diretto lungo la direzione retro-fronte del

David, l'asse z, invece, verticale e diretto verso l'alto. In figura 4.6 sono rappresentati i tre assi con colori diversi, in particolare l'asse x in colore rosso, l'asse y verde e l'asse z blu.

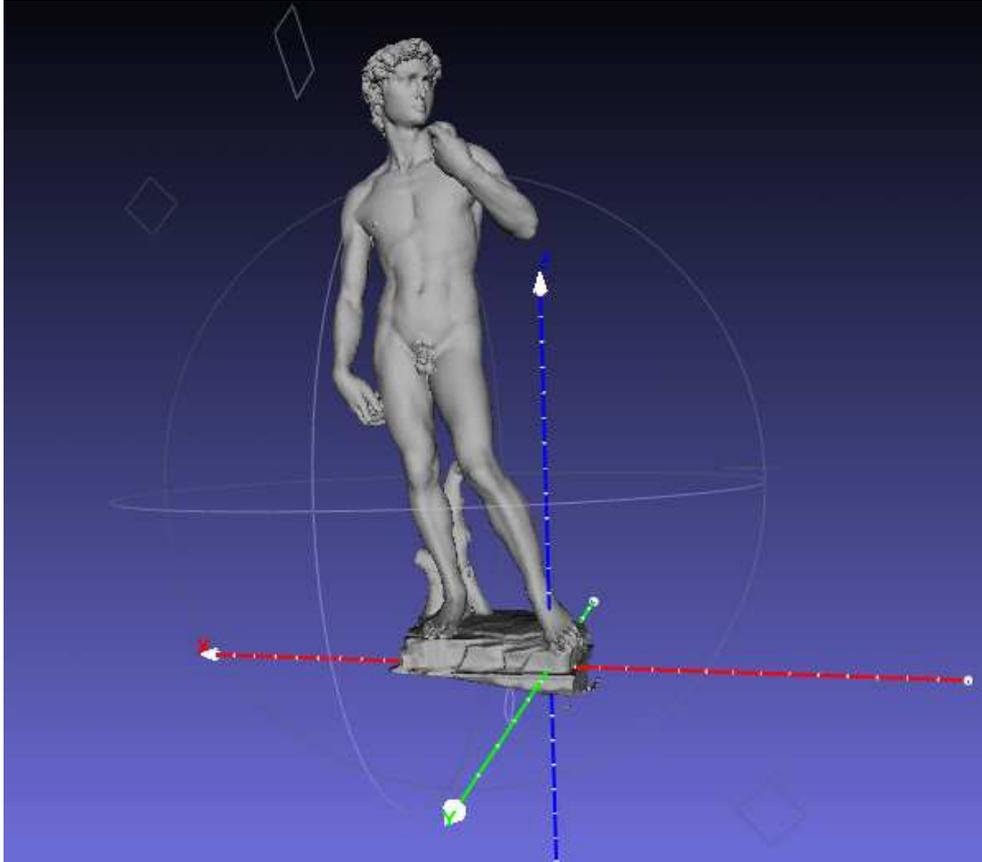


Fig 4.6 – Terna di assi di riferimento considerata.

La sezione orizzontale di maggiore interesse è quella posta all'altezza di 58 cm in quanto questa è la quota nei pressi della quale è stato applicato il sensore. Per ottenere una sezione ortogonale ad un certo asse si utilizza il filtro : *Cross section single plane* in cui i parametri importanti sono l'offset del piano dall'origine e la tripla degli assi che indica la normale al piano che interseca la mesh, in particolare:

- 1,0,0 rappresenta il piano perpendicolare all'asse x;
- 0,1,0 indica il piano perpendicolare all'asse y;
- 0,0,1 rappresenta il piano perpendicolare all'asse z.

In figura 4.7 è riportata la sezione orizzontale all'altezza di 58 cm ottenuta mediante l'utilizzo del comando appena descritto.

In figura 4.8, invece, è possibile osservare la statua, resa trasparente grazie alla modifica dello stile di visualizzazione, con la sezione colorata in rosso.

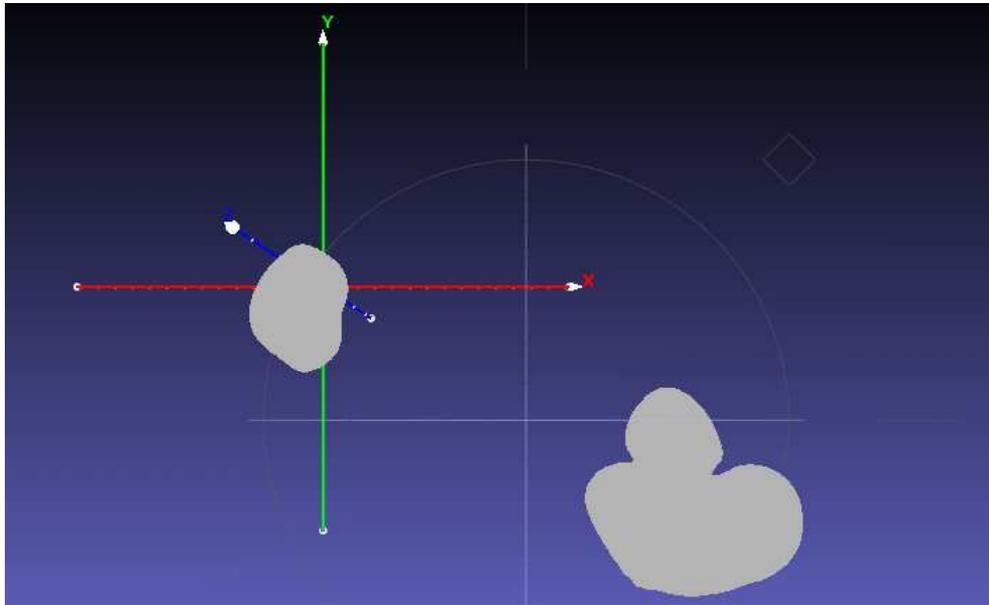


Fig 4.7 – Sezione orizzontale a 58 cm.



Fig 4.8 – David con indicazione della sezione orizzontale a 58 cm.

In seguito sono state effettuate altre sezioni orizzontali a diverse altezze al fine di valutare la variazione della loro forma con la quota. In figura 4.9 è riportata la sezione a 35 cm sempre rispetto alla base del basamento michelangiolesco, mentre in figura 4.10 è rappresentata quella a 79 cm.

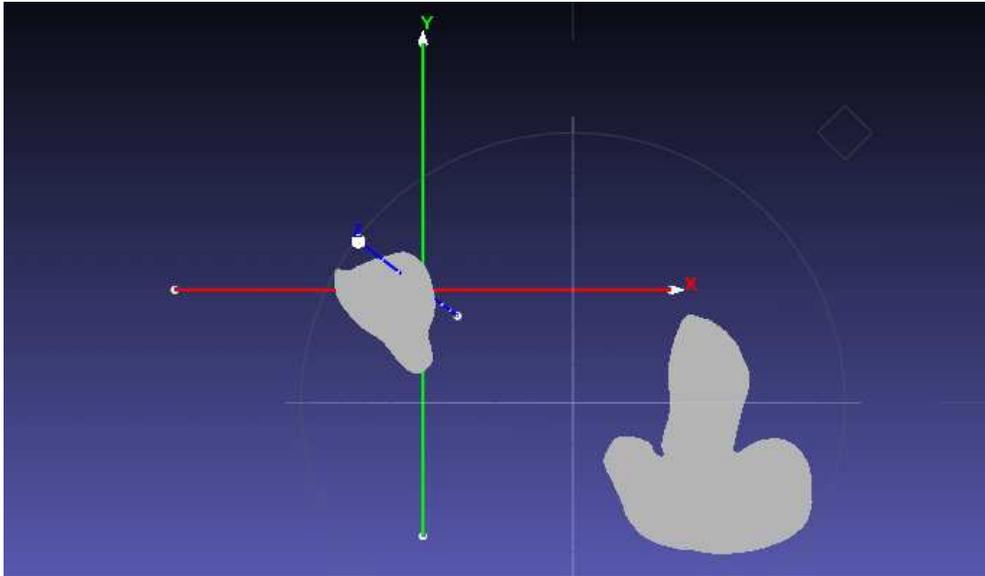


Fig 4.9 – Sezione a 35 cm.

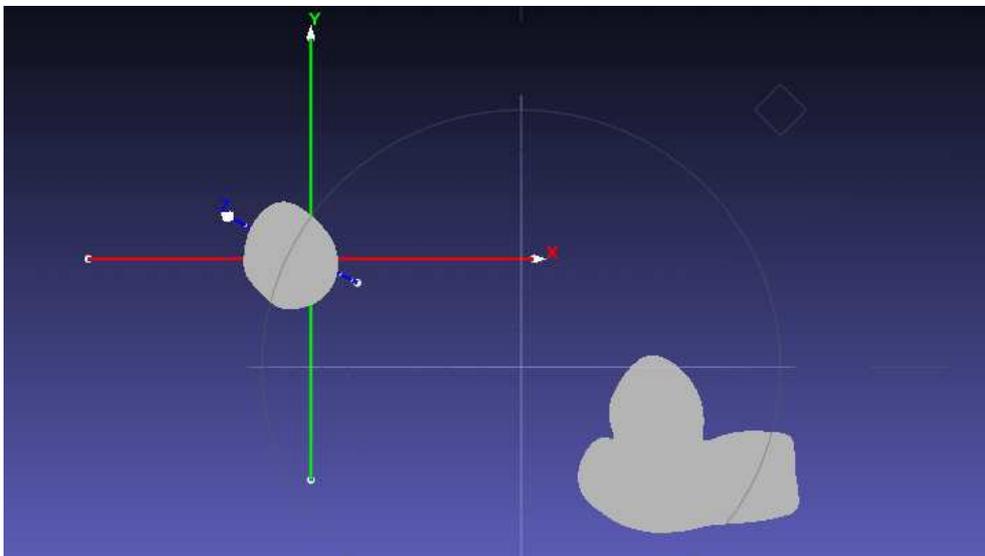


Fig 4.10 – Sezione a 79 cm.

In figura 4.11 è possibile osservare la sezione ottenuta all'altezza di 90 cm e nell'immagine successiva quella a 120 cm.



Fig 4.11 – Sezione a 90 cm.

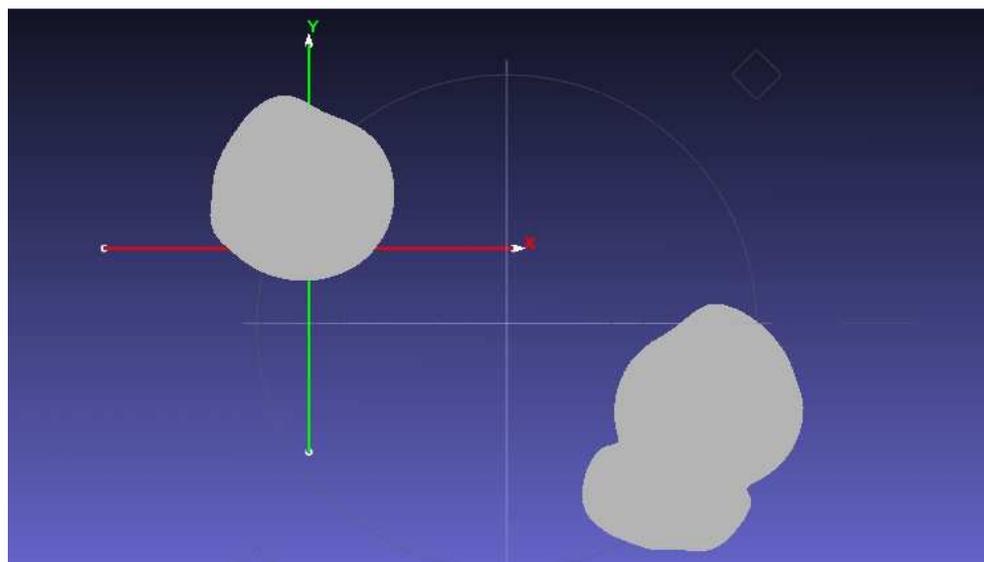


Fig 4.12 – Sezione a 120 cm.

In figura 4.13 è rappresentato il David con tutte le sezioni orizzontali appena descritte colorate in rosso. Si può notare che queste hanno interessato l'intera altezza del broncone che, come si è detto, è la parte maggiormente lesionata della statua.

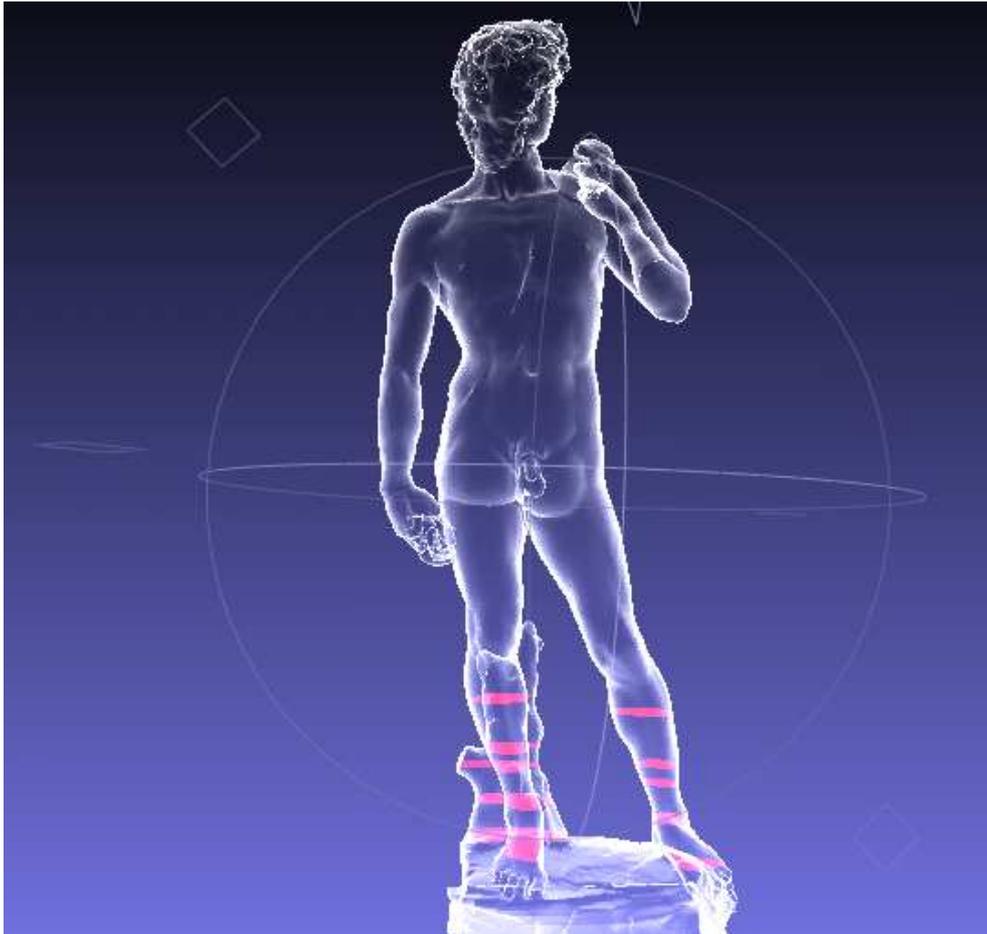


Fig 4.13 – David con visualizzate in rosso le sezioni orizzontali tracciate.

#### **4.4 – Determinazione dei baricentri, assi principali d'inerzia ed ellisse centrale d'inerzia**

Il software MeshLab permette, mediante il comando *Compute geometric measures*, di determinare il volume e le coordinate del baricentro della statua. I valori ottenuti grazie a MeshLab sono i seguenti:

- Volume mesh David pari a  $2409251840 \text{ mm}^3 = 2,41 \text{ m}^3$ ;
- Coordinate baricentro David:  
 $x = 834,22 \text{ mm}$ ,  $y = -291,09 \text{ mm}$ ,  $z = 2115,12 \text{ mm}$ .

La sezione in esame è stata successivamente trasferita su Autocad in modo da poter determinare alcune proprietà fondamentali della stessa. Data una figura piana trasformata in regione, infatti, il comando *PROPMASS* consente di determinarne il baricentro, i momenti principali d'inerzia e gli assi principali

d'inerzia. Utilizzando questo comando sono state ottenute le coordinate del baricentro della sezione pari a :

$$x = 749,97 \text{ mm} ; y = -469,62 \text{ mm}.$$

Nel nostro caso, la sezione è costituita da due figure separate, una che rappresenta la gamba sinistra, l'altra l'insieme della gamba destra e del broncone, per cui selezionando separatamente queste due figure è possibile determinare i loro baricentri. In figura 4.14 sono riportate in rosso le coordinate del baricentro dell'intera sezione, mentre in nero quelle delle due figure considerate separatamente.

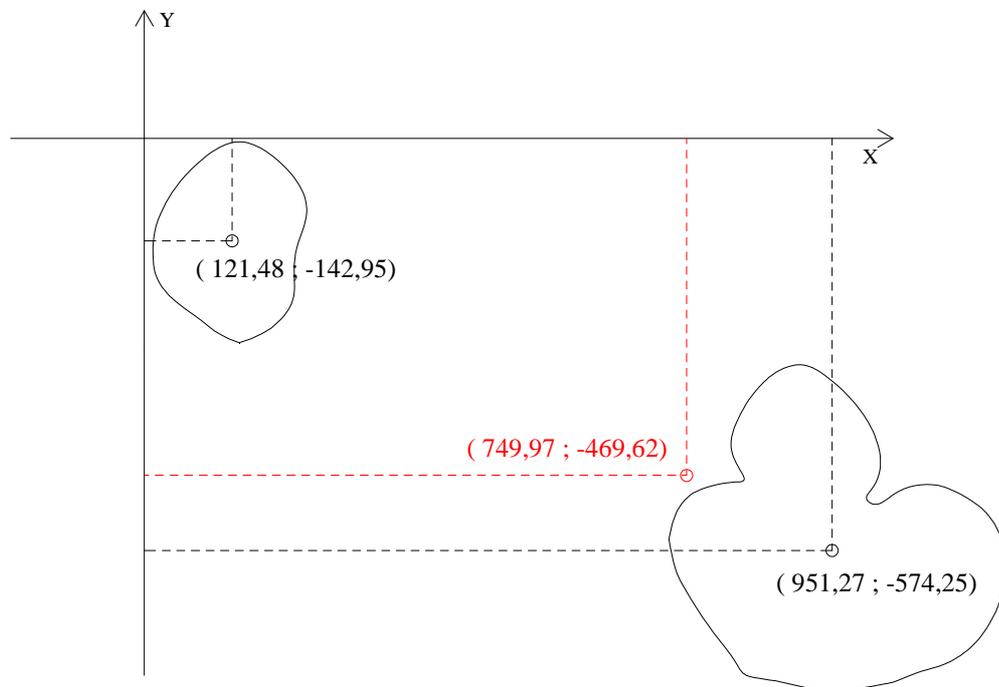


Fig 4.14 – Baricentri della sezione a 58 cm.

Ai fini dell'analisi dello stato tensionale, però, è necessario determinare il peso e il baricentro della parte della statua al di sopra della sezione a 58 cm. Si è allora schematizzata la parte al di sotto di questa sezione come un parallelepipedo di dimensioni 1390 x 950 x 500 mm, avente quindi un volume pari a 0,66 m<sup>3</sup>. Queste dimensioni sono state assunte maggiori di quelle reali per considerare anche le zone delle gambe e del broncone al di sotto della

sezione. Conoscendo questo valore è possibile calcolare il volume della parte superiore del David ( $V_D$ ) mediante la differenza:

$$V_D = V_T - V_B = 2,41 - 0,66 = 1,75 \text{ m}^3 \quad (6.1)$$

Dove:

$V_T$  = volume totale della statua;

$V_B$  = volume del basamento michelangiolesco.

Per determinare il peso specifico del marmo sono stati considerati due provini di dimensioni 5 x 5 x 20 cm che saranno successivamente utilizzati nelle prove ultrasoniche e meccaniche (fig 6.9 e 6.11). I pesi di questi provini sono i seguenti:

Peso provino A = 1360,15 g; peso provino B = 1356,59 g.

Note le dimensioni è stato possibile calcolare il loro volume pari a :

Volume provini A e B = 5 x 5 x 20 = 500 cm<sup>3</sup> = 0,0005 m<sup>3</sup>.

I pesi specifici dei due provini sono stati ottenuti dalle relazioni:

$$ps_{\text{provino A}} = \frac{\text{Peso}_{\text{provino A}}}{\text{Volume}_{\text{provino A}}} = \frac{1,362}{0,0005} = 2724 \text{ Kg/ m}^3 \quad (6.2)$$

$$ps_{\text{provino B}} = \frac{\text{Peso}_{\text{provino B}}}{\text{Volume}_{\text{provino B}}} = \frac{1,357}{0,0005} = 2714 \text{ Kg/ m}^3 \quad (6.3)$$

Nei calcoli di seguito riportati è stata assunta la media di questi due valori pari a 2719 kg/m<sup>3</sup>. Noto il peso specifico e i volumi  $V_T$ ,  $V_B$  e  $V_D$  è stato possibile determinare i pesi, in particolare  $P_T$  (peso totale del David),  $P_B$  (peso del basamento) e  $P_D$  (peso David al di sopra della sezione):

$$P_T = m_T = ps \cdot V_T = 2719 \cdot 2,41 = 6553 \text{ kg} \quad (6.4)$$

$$P_B = m_B = ps \cdot V_B = 2719 \cdot 0,66 = 1795 \text{ kg} \quad (6.5)$$

$$P_D = m_D = ps \cdot V_D = 2719 \cdot 1,75 = 4758 \text{ kg} \quad (6.6)$$

Successivamente sono state valutate le coordinate del baricentro del basamento tramite Autocad indicate con  $x_{GB}$  e  $y_{GB}$  e pari a:

$$x_{GB} = 651,02 \text{ mm} ; y_{GB} = -371,08 \text{ mm}.$$

Per determinare le coordinate del baricentro della parte della statua al di sopra della sezione, indicate con  $x_{GD}$  e  $y_{GD}$  si è fatto ricorso ai momenti statici  $S_{XD}$  e  $S_{YD}$ :

$$\begin{aligned} S_{XD} &= m_T \cdot y_{GT} - m_B \cdot y_{GB} = 6553 \cdot (-291,09) - 1795 \cdot (-371,08) = \\ &= -1241424 \text{ kg} \cdot \text{mm} \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} S_{YD} &= m_T \cdot x_{GT} - m_B \cdot x_{GB} = (6553 \cdot 834,22) - (1795 \cdot 651,02) = \\ &= 4298063 \text{ kg} \cdot \text{mm} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Noti i momenti statici è stato possibile determinare le coordinate  $x_{GD}$  e  $y_{GD}$  :

$$x_{GD} = \frac{S_{YD}}{m_D} = \frac{4298063}{4758} = 903,33 \text{ mm} \quad (6.9)$$

$$y_{GD} = \frac{S_{XD}}{m_D} = \frac{-1241424}{4758} = -260,91 \text{ mm} \quad (6.10)$$

In figura 4.15 sono riportati i baricentri determinati in queste pagine, in particolare in rosso quello della sezione, in blu quello totale del David, in verde quello del basamento e in viola quello della parte della statua al di sopra della sezione. Nella stessa immagine è possibile osservare in verde il rettangolo che rappresenta il basamento michelangiolesco.

Una volta determinati i baricentri, utilizzando il comando PROPMASS è stata valutata l'inclinazione degli assi principali  $\xi$  e  $\eta$  e i momenti principali d'inerzia  $I_\xi$  e  $I_\eta$  seguenti:

$$I_\xi = 1516435580,31 \text{ mm}^4 \text{ lungo } (0,8851; -0,4653);$$

$$I_\eta = 30738808831,39 \text{ mm}^4 \text{ lungo } (0,4653; 0,8851).$$

I numeri tra parentesi sono i *coseni direttori* degli assi principali d'inerzia.

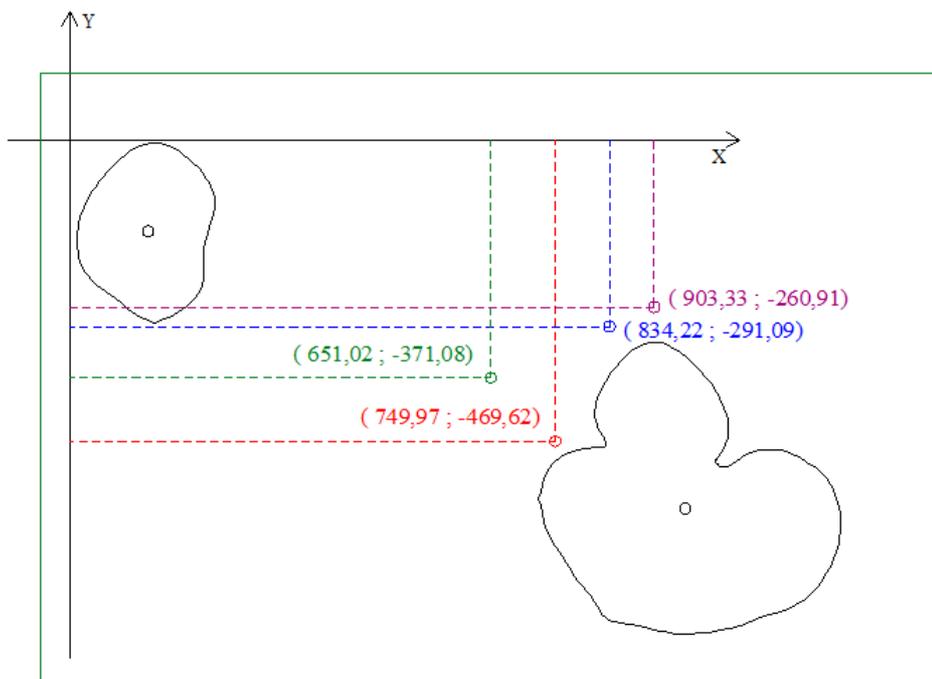


Fig 4.15 – Posizioni dei baricentri rispetto alla sezione considerata.

In figura 4.16 sono tracciati in viola gli assi principali d'inerzia per poter osservare la loro inclinazione rispetto al sistema di riferimento.

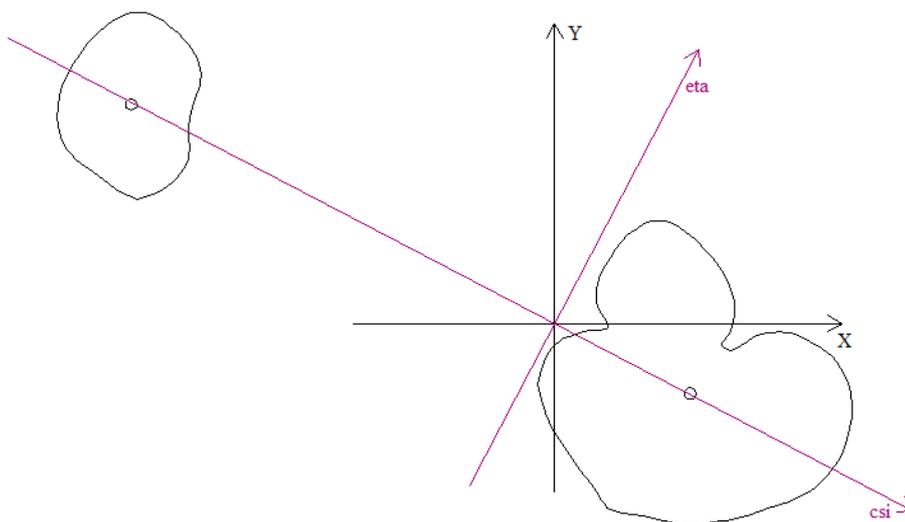


Fig 4.16 – Assi principali d'inerzia della sezione.

Noti i momenti  $I_\xi$  e  $I_\eta$  e determinata l'area della sezione (pari a 178907,1  $\text{mm}^2$ ) mediante il comando PROPMASS, sono stati calcolati i raggi dell'

ellisse centrale d'inerzia  $\rho_\xi$  e  $\rho_\eta$ . Questi ultimi sono stati calcolati utilizzando le relazioni seguenti:

$$\rho_\xi = \sqrt{\frac{I_\xi}{A}} = \sqrt{\frac{1516435580,31}{178907,1}} = 92,07 \text{ mm} \quad (6.11)$$

$$\rho_\eta = \sqrt{\frac{I_\eta}{A}} = \sqrt{\frac{30738808831,39}{178907,1}} = 131,08 \text{ mm} \quad (6.12)$$

In figura 4.17 è riportata in verde l'ellisse centrale d'inerzia disegnata in base ai valori dei raggi appena determinati.

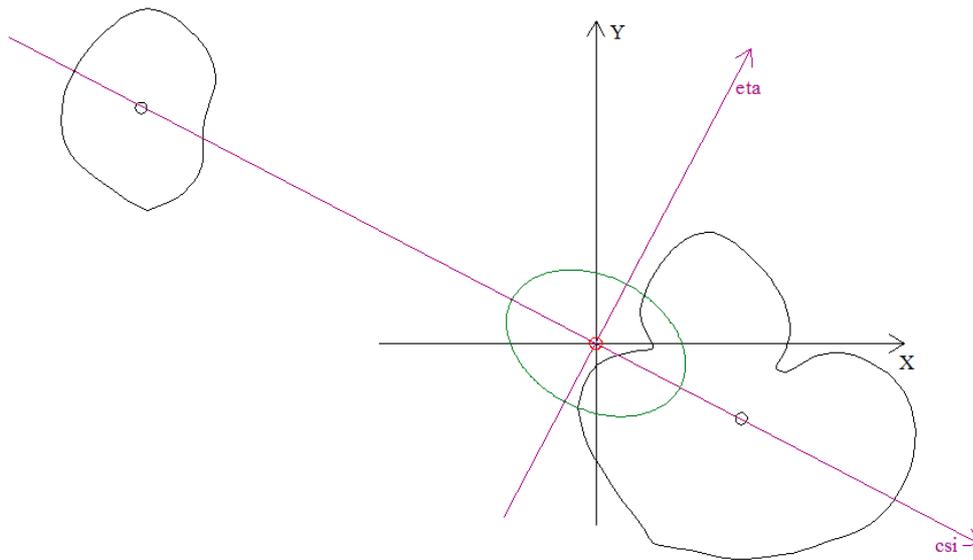


Fig 4.17 – Ellisse centrale d'inerzia della sezione.

#### 4.5 – Determinazione dello stato tensionale

La sezione è soggetta ad uno sforzo normale eccentrico applicato nel baricentro di coordinate  $x_{GD}$  e  $y_{GD}$ . In generale, considerando una coppia di assi  $x$  e  $y$ , questo tipo di sollecitazione dà luogo a due flessioni rette  $M_x$  e  $M_y$

e ad uno sforzo normale centrato N. Per il principio di sovrapposizione degli effetti si può scrivere:

$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y - \frac{M_y}{I_y} x \quad (6.13)$$

Nel nostro caso, prendendo in considerazione gli assi principali d'inerzia la formula precedente diviene:

$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M_\xi}{I_\xi} \eta - \frac{M_\eta}{I_\eta} \xi \quad (6.14)$$

Per prima cosa è necessario determinare la posizione e l'inclinazione dell'*asse neutro*. A questo fine basta porre la relazione precedente uguale a zero (6.15) e determinare il valore di  $\xi$  quando  $\eta$  è nullo e viceversa.

$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M_\xi}{I_\xi} \eta - \frac{M_\eta}{I_\eta} \xi = 0 \quad (6.15)$$

Per calcolare i momenti  $M_\xi$  e  $M_\eta$  è necessario valutare le coordinate del baricentro della parte di statua al di sopra della sezione, che è anche il centro di pressione, rispetto agli assi principali d'inerzia ( $\xi_c$ ,  $\eta_c$ ). Nel caso in esame si è ottenuto:

$$\xi_c = 38,63 \text{ mm} ; \eta_c = 256,1 \text{ mm.}$$

I momenti  $M_\xi$  e  $M_\eta$  sono stati determinati mediante le relazioni:

$$M_\xi = N \cdot \eta_c = 4758 \cdot 256,1 = 1218523,8 \text{ kg} \cdot \text{mm} \quad (6.16)$$

$$M_\eta = -N \cdot \xi_c = -4758 \cdot 38,63 = -183801,54 \text{ kg} \cdot \text{mm} \quad (6.17)$$

Sostituendo i valori numerici ottenuti, la relazione 6.15 allora diviene:

$$\frac{4758}{178907,1} + \frac{1218523,8}{151643558031} \eta - \frac{-183801,54}{30738808831} \xi = 0 \quad (6.18)$$

Svolgendo i calcoli la 6.18 si riduce alla relazione seguente:

$$0,027 + 0,0008 \eta + 0,00006 \xi = 0 \quad (6.19)$$

Ponendo  $\xi = 0$  si ottiene  $\eta = -33,75$  mm, mentre se  $\eta = 0$ , si ha  $\xi = 450$  mm. Riportando i due punti appena ottenuti lungo gli assi principali d'inerzia si ottengono l'inclinazione e la posizione dell'asse neutro. In figura 4.18 è riportata la sezione con gli elementi già determinati (assi principali ed ellisse centrale), in blu l'asse neutro e in rosso il centro di pressione.

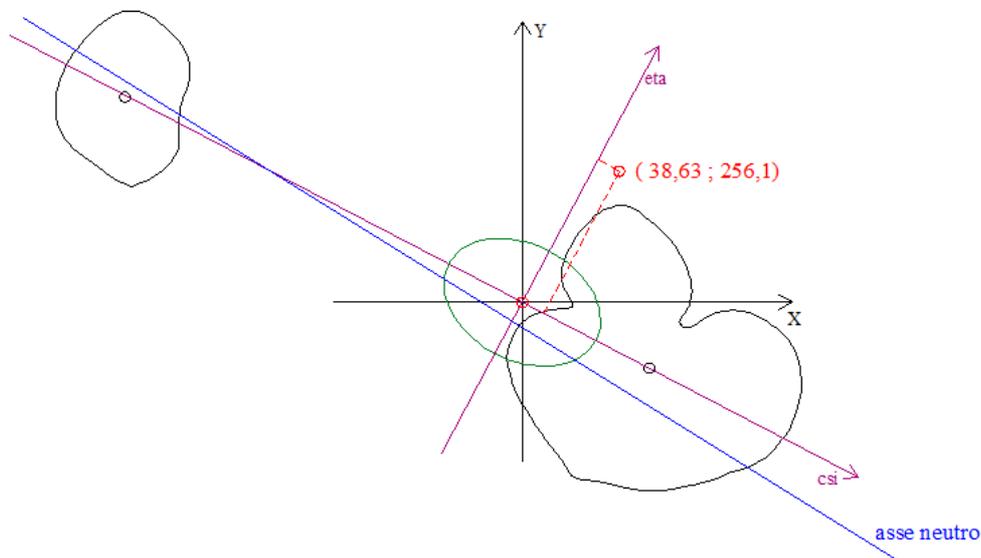


Fig 4.18 – Sezione con l'indicazione dell'asse neutro.

Noto l'asse neutro, sono state tracciate due rette ad esso parallele e tangenti superiormente ed inferiormente alla sezione. I punti di tangenza rappresentano gli estremi del diagramma della tensione e in questo caso sono i seguenti:

Punto di tangenza superiore  $\xi = 94,85$  mm;  $\eta = 213,63$  mm;

Punto di tangenza inferiore  $\xi = 201,22$  mm;  $\eta = -208,05$  mm.

Sostituendo le coordinate di questi due punti nella relazione seguente si ottengono le tensioni massime agenti sulla sezione (6.21 e 6.22):

$$\sigma_z = 0,027 + 0,0008 \eta + 0,00006 \xi \quad (6.20)$$

$$\sigma_z = 0,027 + 0,0008 \cdot 213,63 + 0,00006 \cdot 94,85 = 2,04 \frac{N}{mm^2} \quad (6.21)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= 0,027 + 0,0008 \cdot (-208,05) + 0,00006 \cdot 201,22 = \\ &= -1,27 \frac{N}{mm^2} \end{aligned} \quad (6.22)$$

Visto che lo sforzo N è stato assunto positivo, la 6.21 fornisce la tensione massima di compressione mentre la 6.22 quella di trazione. La massima tensione di trazione è lontana dal valore limite di resistenza a trazione del materiale, pari a circa 3 – 4 N/mm<sup>2</sup> in base alle informazioni disponibili . In figura 4.19 è riportato in blu il diagramma tensionale ottenuto in cui si può notare che le zone maggiormente sollecitate si trovano nella parte destra della statua.

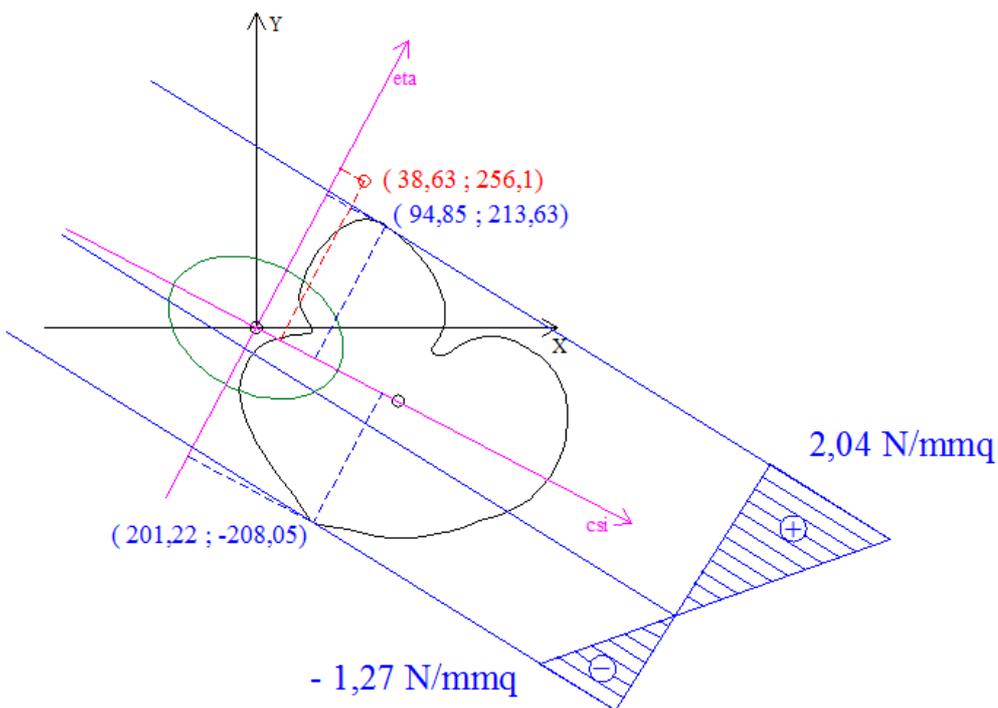


Fig 4.19 – Diagramma tensionale per la sezione in esame.

## **5- ULTRASUONI**

### **5.1 - Introduzione**

I suoni possono essere suddivisi in tre principali categorie:

- *Suoni percepiti dall'orecchio umano* con frequenze comprese tra 20 Hz e 20000 Hz;
- *Infrasuoni* con frequenze minori di 20 Hz;
- *Ultrasuoni* con frequenze maggiori di 20000 Hz.

Il presente capitolo tratterà in modo dettagliato lo studio degli ultrasuoni che, come si è visto, presentano una frequenza maggiore di quella del suono udibile dall'orecchio umano e che, avendo una lunghezza d'onda inferiore, vengono riflessi da superfici molto piccole, come ad esempio i difetti all'interno di un materiale. Questa è la proprietà che viene sfruttata per i test non distruttivi.

Dopo una parte introduttiva relativa alla propagazione delle onde nei mezzi solidi monodimensionali e tridimensionali, saranno descritte le principali tecniche per l'esecuzione di misure ad ultrasuoni e degli strumenti utilizzati. Saranno poi trattate le applicazioni su marmo, portando come esempio un progetto di un dispositivo sviluppato dall'Università di Atene.

Per la stesura del capitolo sono state utilizzate le seguenti fonti:

- [13] Pascale, 2008;
- [14] Menditto et al., 2008;
- [15] Viola, 2001;
- [16] Bozzi et al., 2003;
- [17] Prassianakis et al., 2000.

## 5.2 – Propagazione delle onde nei mezzi solidi

### 5.2.1 – Le onde

Una perturbazione che si propaga senza trasporto di materia prende il nome di **onda**. Per un'onda periodica, come quella di figura 5.1, possono essere definite alcune grandezze fondamentali:

- *Periodo T*: tempo che intercorre tra il verificarsi di due massimi successivi dell'ampiezza;
- *Ampiezza A*: massimo valore della grandezza rappresentativa dell'onda in un periodo;
- *Frequenza f*: numero di cicli compiuti dalla particella nell'unità di tempo.
- *Lunghezza d'onda  $\lambda$* : distanza tra due massimi successivi dell'ampiezza. Può essere espressa dalla relazione seguente, dove V è la velocità di propagazione dell'onda e T il periodo:

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (5.1)$$

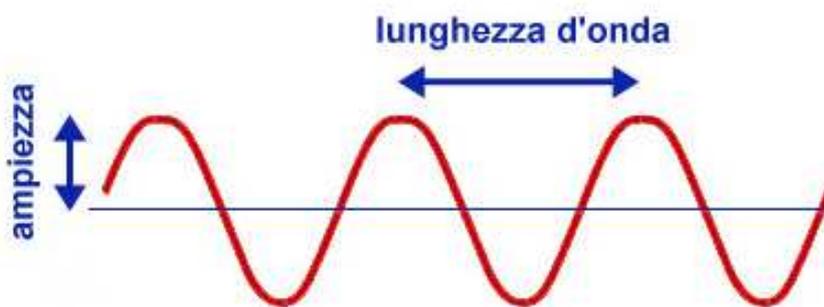


Fig 5.1 – Ampiezza e lunghezza d'onda di un'onda periodica.

Considerando le onde piane, si possono distinguere:

- Onde longitudinali (onde P);
- Onde trasversali (onde S).

Le onde longitudinali (fig 5.2) sono onde di compressione molto simili alle onde acustiche in quanto corrispondono a compressioni e rarefazioni del mezzo che attraversano. Le particelle da loro investite oscillano nella direzione di propagazione delle onde stesse.

Nel caso sismico, queste sono le onde più veloci e quindi le prime ad essere avvertite per cui sono dette anche *onde primarie* (onde P). Nell'intorno di un generico punto investito, a causa della deformazione del materiale si hanno dilatazioni lineari ma non scorrimenti angolari.

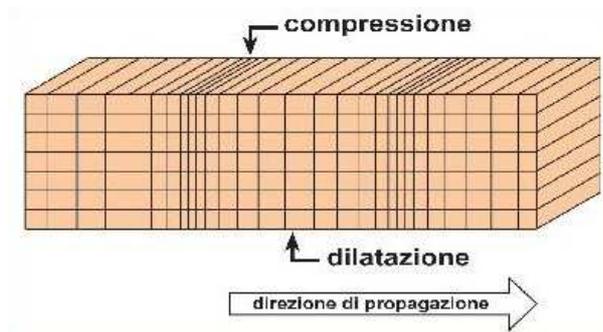


Fig 5.2 – Onda longitudinale (INGV).

Un esempio di onda longitudinale (fig 5.3) si può ottenere fissando una molla ad un estremo ed eccitandola lungo il suo asse all'altro estremo. Dalla figura si nota una zona in cui le spire sono fitte seguita da un'altra zona in cui invece le spire sono più rade. Le frecce rosse rappresentano la direzione di propagazione dell'onda mentre quelle gialle individuano le oscillazioni. Si può notare che le spire compiono solo oscillazioni rispetto alla loro posizione iniziale. Queste sono onde di compressione e rarefazione analoghe alle onde P.

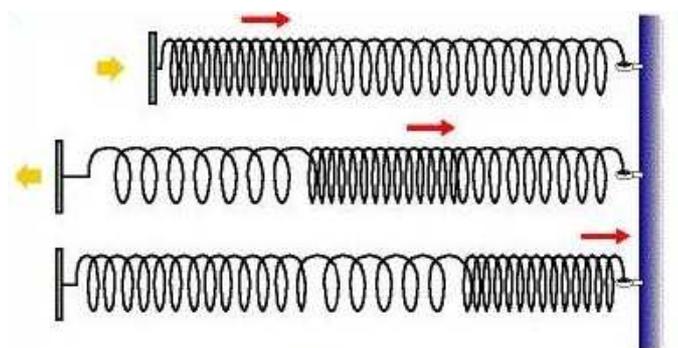


Fig 5.3 – Esempio di onda longitudinale.

Le onde trasversali (fig 5.4), invece, sono onde che determinano al loro passaggio un'oscillazione delle particelle in direzione ortogonale a quella di propagazione delle onde stesse. Sono caratterizzate da una velocità inferiore rispetto a quella delle onde P, per cui sono dette anche *onde secondarie* (onde S). Nell'intorno di un generico punto investito, a causa della deformazione del materiale, si hanno solo scorrimenti angolari e non dilatazioni lineari. Queste onde, inoltre, sono caratterizzate dal fatto di non potersi propagare nei mezzi fluidi.

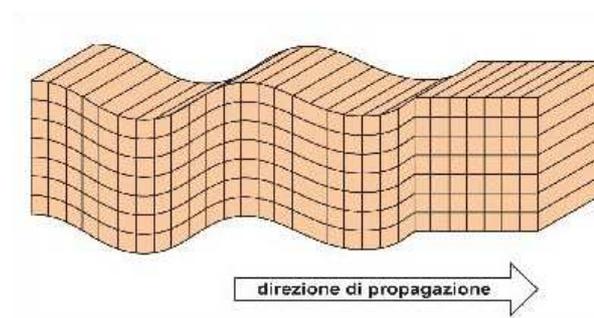


Fig 5.4 – Onda trasversale (INGV).

Un esempio di onda trasversale si può ottenere considerando una fune inizialmente tesa fissata ad un estremo che viene eccitata all'estremo libero in direzione ortogonale al suo asse. Questo è riprodotto nella figura 5.5 dove le frecce rosse rappresentano la direzione di propagazione dell'onda. Ogni elemento della fune compie oscillazioni in direzione ortogonale a quella di propagazione dell'onda nello stesso modo in cui le onde S si propagano in un solido.

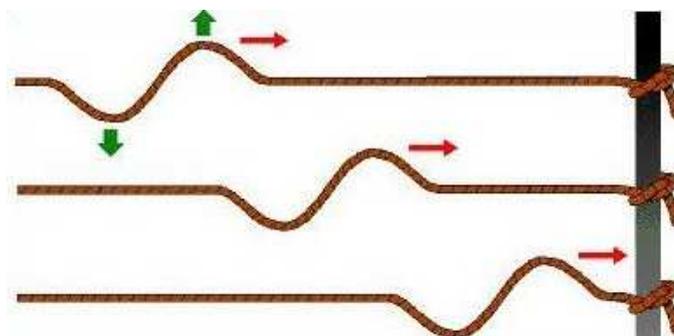


Fig 5.5 – Esempio di onda trasversale.

## 5.2.2 – Propagazione delle onde elastiche nei solidi monodimensionali

I solidi monodimensionali sono caratterizzati dal fatto di avere una dimensione notevolmente prevalente rispetto alle altre due.

L'ampiezza di un'onda (spostamento della particella) può essere espressa come funzione della distanza percorsa  $x$  e del tempo  $t$  nel modo seguente:

$$s = f(x, t) \quad (5.2)$$

Attraverso alcuni passaggi matematici (Viola, 2001) si può ottenere l'equazione dell'onda lineare (5.3):

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{1}{V} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0 \quad (5.3)$$

Si considera ora un'onda longitudinale che si propaga lungo una barra monodimensionale (fig 5.6). Si può notare che le particelle si muovono lungo la stessa direzione e si indica con  $u$  lo spostamento della particella. Successivamente si prende in considerazione un elemento di lunghezza infinitesima  $dx$  della barra soggetto ad una tensione  $\sigma$  sulla faccia sinistra e ad una tensione  $\sigma + d\sigma$  su quella destra. Dopo alcune considerazioni (Pascale, 2008) si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (5.4)$$

Dal confronto delle equazioni 5.3 e 5.4 si ottiene la relazione che consente di determinare la velocità  $V_P$  dell'onda longitudinale:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5.5)$$

in cui:

$E$  = modulo di Young del materiale;

$\rho$  = densità del materiale

In letteratura sono stati determinati i seguenti valori per il marmo bianco:

$$\rho = 2692 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 68596,2 \text{ N/mm}^2.$$

Dall'equazione 5.5, allora, si ottiene una velocità  $V_P$  pari a :

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 5063 \frac{m}{s}$$

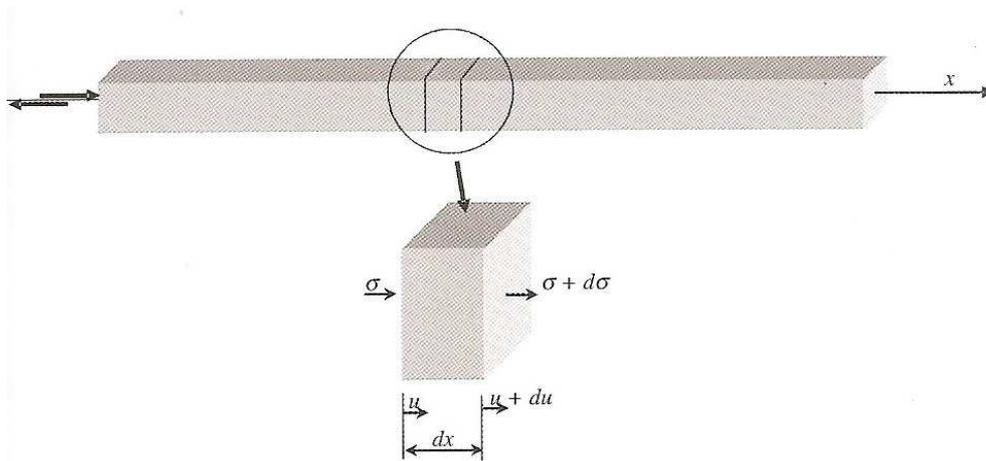


Fig 5.6 – Onda longitudinale che si propaga in un solido monodimensionale.

(Pascale, 2008)

Se si considera, invece, un'onda trasversale che si propaga in un solido monodimensionale, gli spostamenti  $w$  della generica particella avvengono in direzione ortogonale all'asse della barra (fig 5.7). Procedendo in modo analogo a quello precedente si ottiene l'equazione:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\rho}{G} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (5.6)$$

Dal confronto tra le equazioni 5.3 e 5.6 si ottiene la relazione che consente di determinare la velocità  $V_S$  dell'onda trasversale.

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5.7)$$

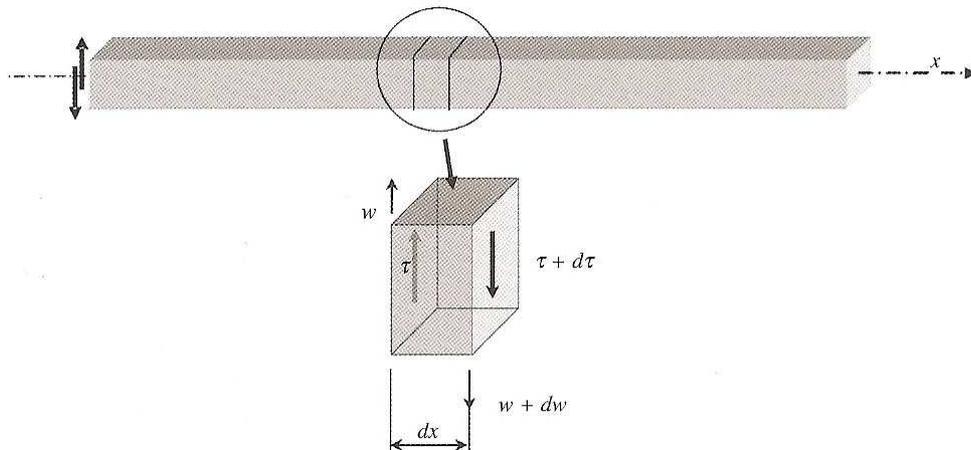


Fig 5.7 – Onde trasversale che si propaga in un solido monodimensionale.  
(Pascale, 2008)

### 5.2.3 – Propagazione delle onde elastiche nei solidi tridimensionali

Le espressioni che consentono di determinare rispettivamente la velocità delle onde longitudinali e trasversali in caso di solido tridimensionale sono le seguenti:

$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (5.8)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5.9)$$

Da queste formule si può notare che la velocità delle onde trasversali nel caso di solido tridimensionale è uguale a quella del solido monodimensionale, mentre la velocità delle onde longitudinali cambia per un termine funzione del coefficiente di Poisson  $\nu$ . Questa diversità è dovuta al fatto che, mentre in un solido snello le deformazioni trasversali si manifestano liberamente, in un solido tozzo, queste sono contrastate dal materiale che circonda l'elemento generico di volume.

#### 5.2.4 – Pressione, intensità e impedenza acustica

Si definisce *pressione acustica* la forza esercitata dall'onda su una superficie di area unitaria disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione. Questa grandezza viene quindi definita dalla relazione seguente:

$$P = \frac{F}{S} \quad (5.10)$$

indicato con:

F = forza esercitata dall'onda sulla superficie, in N;

S = area della superficie di incidenza dell'onda, in m<sup>2</sup>.

L'*impedenza acustica* è la misura della resistenza del materiale alla propagazione delle onde sonore e può essere espressa dalla relazione:

$$Z = \rho \cdot V_p \quad (5.11)$$

In cui:

$\rho$  = densità del materiale;

$V_p$  = velocità di propagazione delle onde P.

Si può quindi affermare che l'impedenza è una caratteristica propria del materiale. Il marmo bianco, ad esempio, è caratterizzato da una densità di 2692 kg/m<sup>3</sup> e da una  $V_p$  di 5063 m/s per cui l'impedenza è pari a  $13630 \cdot 10^3$  m<sup>3</sup>/s.

Dal rapporto tra la pressione acustica e l'impedenza si ottiene la velocità della particella:

$$v = \frac{p}{Z} \quad (5.12)$$

Con il termine *intensità acustica* si intende l'energia sonora che nell'unità di tempo (1 secondo) attraversa una superficie di area unitaria disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda.

L'intensità acustica è legata alla pressione acustica attraverso la seguente relazione:

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad (5.13)$$

## 5.3 – Propagazione degli ultrasuoni

### 5.3.1 – Propagazione degli ultrasuoni in un mezzo semi-infinito

Ai fini dello studio della propagazione degli ultrasuoni si considera una sorgente di vibrazione meccanica circolare con un diametro  $D$  applicata sulla superficie esterna di un solido semi-infinito. A partire dalla sorgente si assiste alla propagazione di onde che comportano l'insorgere di un processo vibratorio che interessa una zona del solido in esame. Se questa sorgente di vibrazione è puntiforme, viene detta *sorgente elementare di vibrazione* e le onde assumono una forma semisferica (fig 5.8).

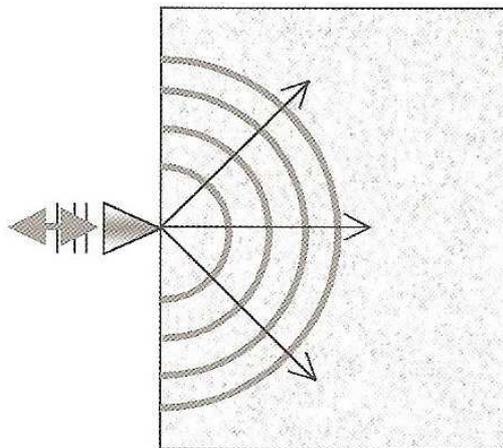


Fig 5.8 – Sorgente elementare di vibrazione.

(Pascale, 2008)

Nel caso, invece, di una sorgente di vibrazione non puntiforme, ad esempio un trasduttore, in prossimità della superficie di contatto con il materiale si sviluppano fronti d'onda che possono essere visti come involucri di onde sferiche a uguale raggio (fig 5.9). Una sorgente di questo tipo produce onde

che si mantengono piane fino ad una certa distanza interessando una zona detta *campo vicino o prossimo*. A una distanza maggiore queste onde divergono occupando un volume conico corrispondente ad una zona detta *campo lontano o remoto*. Il volume nel quale avviene la propagazione del moto ondoso prende il nome di *campo di irradiazione*.

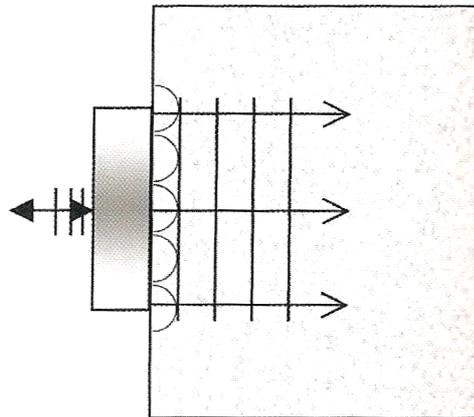


Fig 5.9 – Onde sviluppate da una sorgente di vibrazione non puntiforme. (Pascale, 2008)

Nella figura seguente (fig. 5.10) sono rappresentate le due zone, campo vicino e campo lontano che costituiscono il campo di irradiazione.

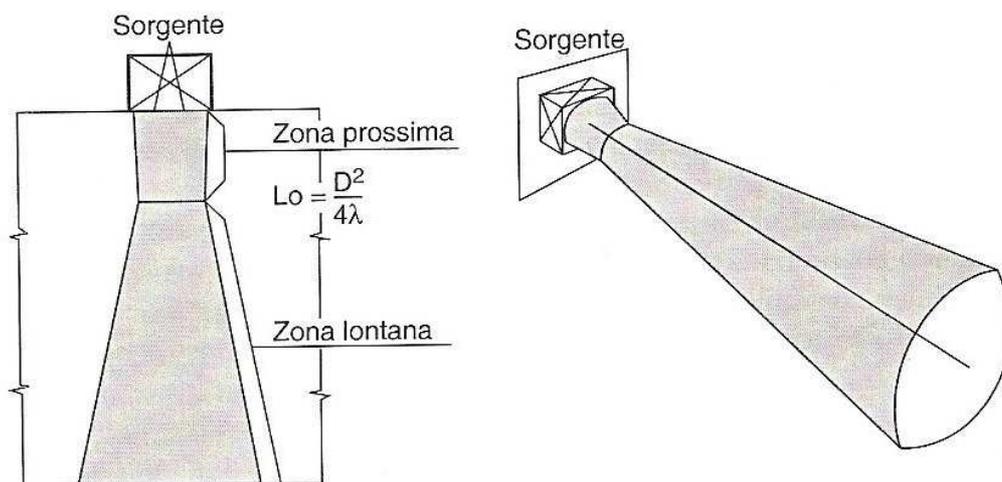


Fig 5.10 – Campo di irradiazione interessato dalla propagazione del fascio. (Menditto et al., 2008).

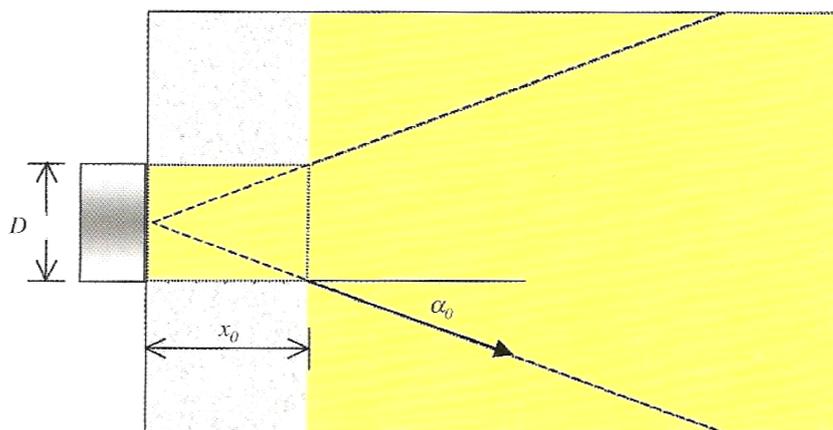


Fig 5.11 – Propagazione delle onde da una sorgente non puntiforme (Pascale, 2008).

In figura 5.11 sono indicate le grandezze:

- $x_0$  = lunghezza del campo vicino;
- $\alpha_0$  = apertura del cono o angolo di divergenza.

Note la lunghezza d'onda  $\lambda$  e il diametro  $D$  della sorgente,  $x_0$  e  $\alpha_0$  possono essere ottenuti attraverso le seguenti relazioni:

$$x_0 = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (5.14)$$

$$\text{sen}\alpha_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (5.15)$$

Si può quindi osservare che la forma del campo di irradiazione dipende dai due parametri  $\lambda$  e  $D$ . Sulla base di queste relazioni è possibile fare un confronto tra materiali metallici e materiali lapidei (fig 5.12). Il marmo, pur essendo un materiale lapideo, presenta caratteristiche intermedie a quelle descritte nella figura seguente che valgono per i materiali metallici e altri materiali lapidei come il calcestruzzo.

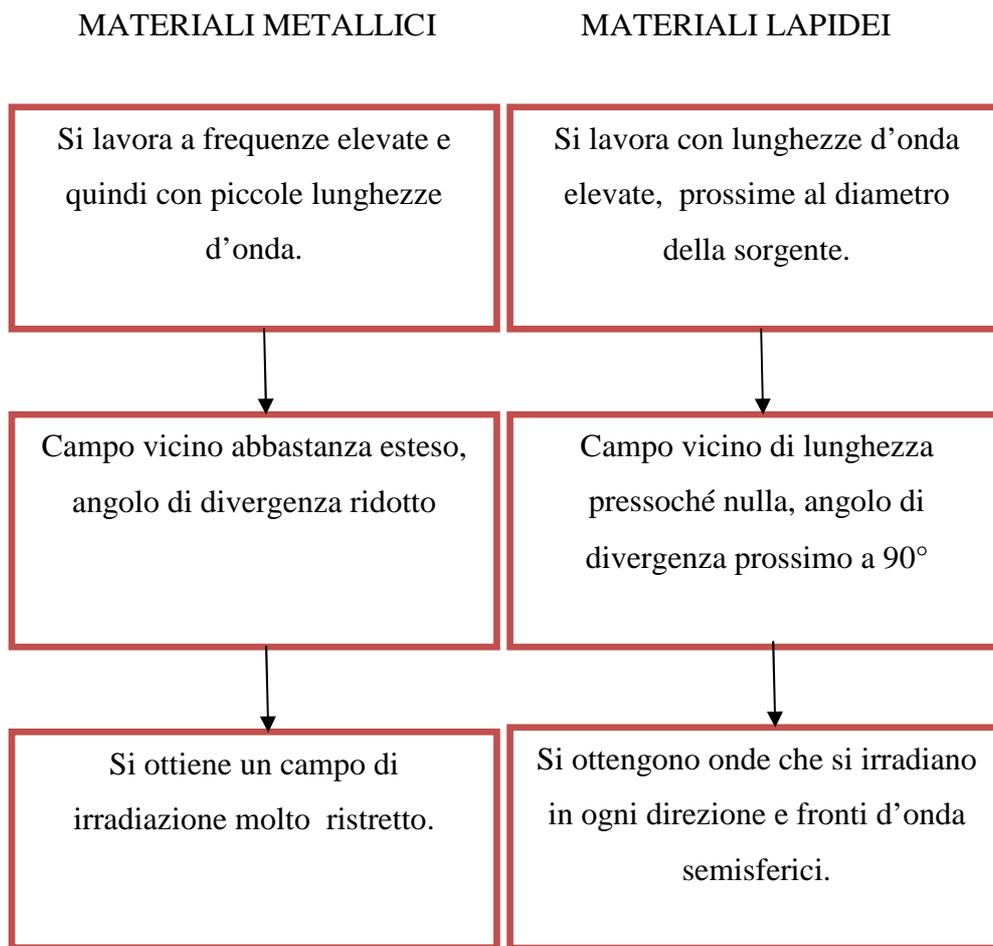


Fig 5.12 – Confronto tra materiali metallici e lapidei.

### 5.3.2 – Attenuazione

Con il termine *attenuazione* si indica la diminuzione di intensità delle onde ultrasoniche man mano che si allontanano dalla sorgente che le ha generate. I corpi solidi che presentano basse velocità di propagazione sono generalmente fortemente attenuati. Esistono due tipologie di attenuazione:

- Attenuazione geometrica;
- Attenuazione strutturale.

La prima si verifica a causa della divergenza (forma conica) del fascio nella zona lontana che comporta la diminuzione della quantità di energia ultrasonica incidente in una data area con il quadrato della distanza dalla sorgente. Un fascio ultrasonico, quindi, propagandosi in un mezzo si attenua progressivamente fino a estinguersi ad una distanza che è funzione della

frequenza del fascio, della sua ampiezza iniziale e della natura del mezzo. Per questo tipo di attenuazione vale la relazione seguente, in cui  $p_0$  è la pressione acustica alla sorgente e  $p$  è la pressione acustica a distanza  $x$  dalla sorgente.

$$p = p_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda} \frac{1}{x} \quad (5.16)$$

L'attenuazione strutturale è legata alla costituzione del materiale che viene attraversato e causa uno smorzamento dell'onda per effetto delle discontinuità e dei difetti del materiale stesso. La pressione acustica può essere espressa dalla relazione, con  $\gamma$  = coefficiente di attenuazione:

$$p = p_0 e^{-\gamma x} \quad (5.17)$$

Al fine di lavorare con cifre più pratiche, di solito si preferisce adottare come unità di misura dell'attenuazione il decibel (dB). In questo modo risulta:

$$A(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{p_0}{p} \quad (5.18)$$

Nei materiali lapidei esistono un gran numero di superfici riflettenti che determinano una forte attenuazione strutturale per diffusione. Al fine di evitare questo problema è fondamentale che la lunghezza d'onda sia maggiore della dimensione massima dei grani. L'utilizzo di lunghezze d'onda elevate, però comportano una diminuzione della precisione della misura ed un aumento della dimensione minima dei difetti rilevabili. Quest'ultima, infatti, è legata alla lunghezza d'onda, in quanto è impossibile valutare difetti di dimensioni minori della lunghezza d'onda stessa. Operando con lunghezze d'onda elevate quindi possono essere rilevati solo difetti di grandi dimensioni. Da quanto detto risulta chiaro che per avere una buona risoluzione sarebbe necessario lavorare con lunghezze d'onda piccole e frequenze elevate, cosa che però non è possibile nei materiali lapidei a causa dell'elevata attenuazione. Il marmo comunque presenta caratteristiche intermedie tra quelle dei materiali metallici e quelle degli altri materiali lapidei.

## 5.4 – Strumentazione e tecniche di misura ad ultrasuoni

Le indagini con ultrasuoni consentono di ottenere informazioni in tempo reale sulle caratteristiche dei materiali utilizzati e di individuare difetti localizzati o lesioni al loro interno. Esse si basano sull'esistenza di una relazione tra la velocità del suono in un mezzo elastico e le proprietà meccaniche del mezzo stesso: *modulo elastico*, *coefficiente di Poisson* e *densità*.

Una delle caratteristiche fondamentali di queste tecniche è quella di essere assolutamente non distruttive, in quanto non richiedono il prelievo di campioni da analizzare in laboratorio e non danneggiano i materiali oggetto di studio. Fanno parte infatti della categoria delle Prove non Distruttive (PnD).

### 5.4.1 - Strumentazione

Gli elementi fondamentali che costituiscono uno strumento per controlli ad ultrasuoni sono i seguenti:

- *Emettitore*;
- *Trasduttori (emittente e ricevente)*;
- *Ricevitore*;
- *Analizzatore*.

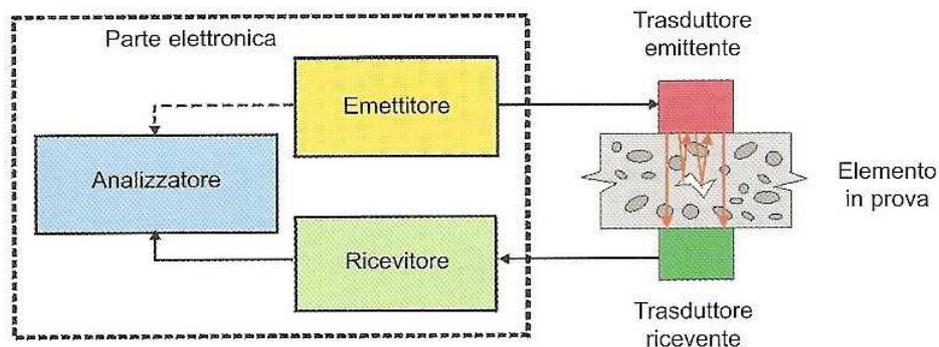


Fig 5.13 – Schema di uno strumento ad ultrasuoni (Pascale, 2008)

Nella figura precedente (5.13) è rappresentato lo schema generico di uno strumento utilizzato per il controllo ad ultrasuoni.

L' *emettitore* o *sezione trasmittente* ha la funzione di generare le vibrazioni ultrasonore che dovranno attraversare il materiale oggetto di studio.

I *trasduttori*, che spesso vengono chiamati *sonde*, consentono di trasformare le vibrazioni meccaniche, come ad esempio gli ultrasuoni, in segnali elettrici o viceversa. Questo si rende necessario in quanto la maggior parte degli strumenti utilizza sistemi elettronici sia per la sezione ricevente che per quella trasmittente. Esistono diversi tipi di trasduttori che possono essere classificati in base al fenomeno fisico da loro sfruttato. Tra questi quelli più utilizzati sono i *trasduttori piezoelettrici* e *ferroelettrici*, che sfruttano proprietà dell'organizzazione cristallina di alcuni materiali nei quali le deformazioni meccaniche sono legate allo spostamento di cariche elettriche nel materiale considerato. In figura 5.14 è rappresentata la sezione schematica di un trasduttore piezoelettrico per controlli non distruttivi.

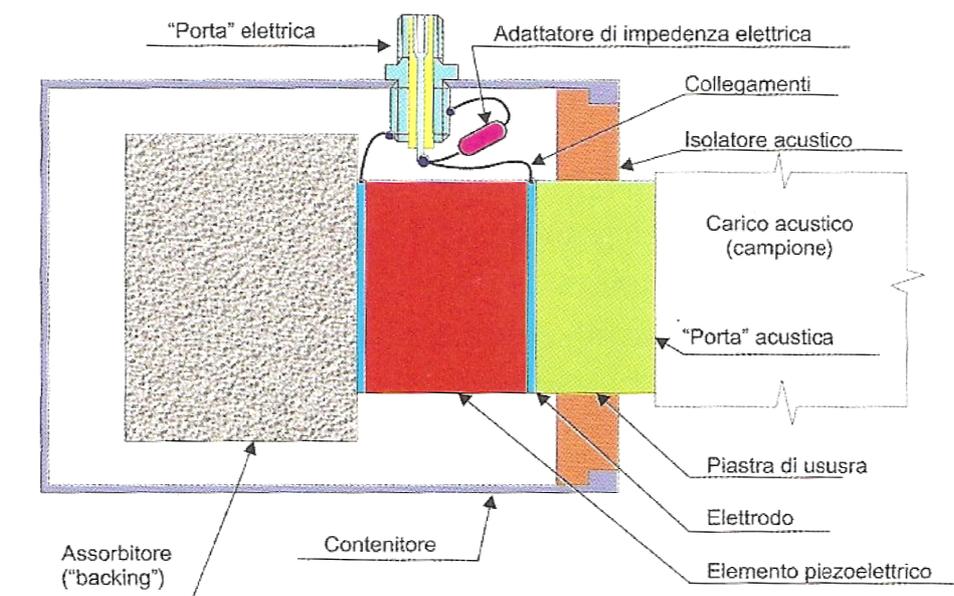


Fig 5.14 – Sezione di un trasduttore piezoelettrico (Pascale, 2008).

Questo tipo di trasduttore è costituito da tre componenti fondamentali: il *mezzo piezoelettrico*, un *retro-assorbitore* (backing) e un *adattatore di uscita*. Su due facce opposte dell'elemento piezoelettrico sono disposti degli elettrodi, spesso costituiti da un sottile strato di argento, i quali sono collegati ad un connettore elettrico detto *porta elettrica* attraverso fili detti *collegamenti*. Spesso è presente anche un *adattatore di impedenza elettrica*

utilizzato per migliorare l'adattamento di impedenza tra trasduttore e cavi di collegamento. I vari elementi del trasduttore, infine, sono racchiusi all'interno di un contenitore che lascia emergere solamente l'adattatore di uscita.

Il *ricevitore* presenta una parte elettronica costituita da diversi elementi circuitali che devono raccogliere il debole segnale ricavato ai capi del trasduttore piezoelettrico e amplificarlo in modo da portarlo ad un livello più facilmente trattabile dal sistema. Il sistema ha poi il compito di analizzare il segnale per ottenere le informazioni relative all'eventuale presenza di difetti.

In figura 5.15 è riportato lo schema a blocchi degli elementi costituenti un ricevitore ad ultrasuoni detti *catena di misura*. Si può notare che il trasduttore è connesso ad un *limitatore* seguito da un *preamplificatore di carica*. Questi sono collegati mediante un cavo coassiale allo strumento vero e proprio costituito da un *filtro* e da un *amplificatore di misura*.

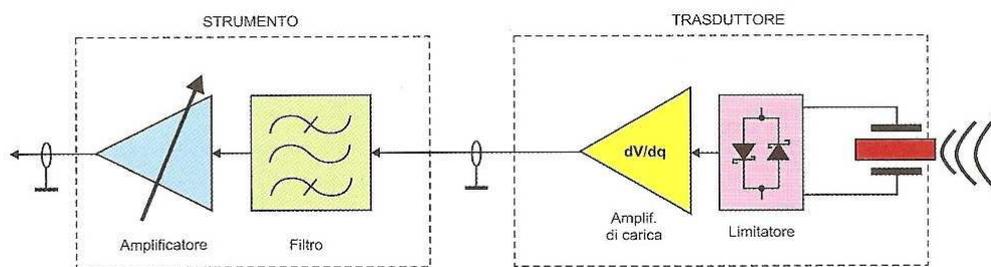


Fig 5.15 – Schema a blocchi della catena di ricezione e amplificazione del segnale (Pascale, 2008).

L'*analizzatore*, infine, rappresenta la parte di più alto livello di uno strumento per controlli ad ultrasuoni e deve codificare le informazioni ottenute in modo da consentire all'operatore di avvertire la presenza e la natura dei difetti eventualmente presenti.

#### 5.4.2 – Tecniche di prova per trasmissione e per riflessione

Le misure ad ultrasuoni possono essere effettuate mediante due tecniche:

- per *trasmissione* (o *trasparenza*);
- per *riflessione* (*tecnica eco*).

Nella tecnica per trasmissione vengono impiegati due trasduttori, posizionati uno di fronte all'altro sulle due superfici opposte del campione da esaminare: uno dei due trasduttori funge da emettitore, l'altro da ricevitore (fig 5.16). Gli impulsi generati dall'emettitore arrivano al ricevitore dopo aver attraversato una porzione del materiale considerato. Nella parte inferiore della figura 5.16 è rappresentato lo schermo di un oscilloscopio dove si può notare a sinistra l'impulso emesso e a destra il segnale ricevuto dopo essere stato riflesso dalla parete di fondo (*eco di fondo*).

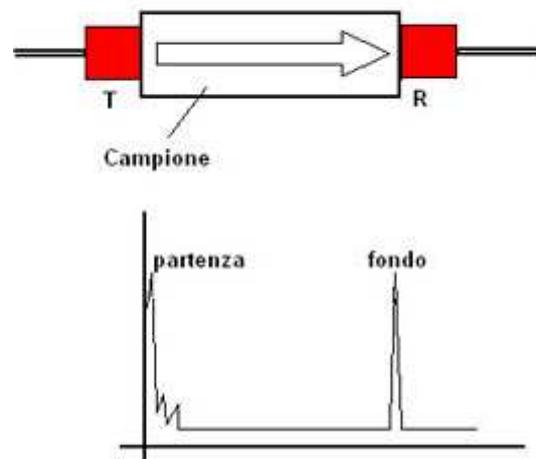


Fig 5.16 – Prova per trasmissione.

Questa tecnica può essere utilizzata per determinare sia il *tempo di volo*, cioè il tempo necessario all'impulso per percorrere la traiettoria considerata, sia l'attenuazione.

Nella tecnica per riflessione, invece, le sonde sono applicate sulla stessa superficie oppure più frequentemente esiste una sola sonda che svolge entrambe le funzioni. Il segnale emesso attraversa il materiale e viene riflesso quando incontra una superficie riflettente. Considerando la figura 5.17 si possono fare alcune considerazioni:

- Sonda nella posizione superiore: i due picchi sullo schermo dell'oscilloscopio rappresentano l'impulso emesso e l'eco di fondo, cioè l'impulso che viene ricevuto dopo essere stato riflesso dal fondo.
- Sonda nella posizione inferiore: l'impulso attraversando il materiale incontra un difetto. Si origina allora un picco intermedio tra gli altri

due, che rappresenta l'onda riflessa dal difetto. Si registra anche una diminuzione di ampiezza dell'eco di fondo rispetto al caso precedente.

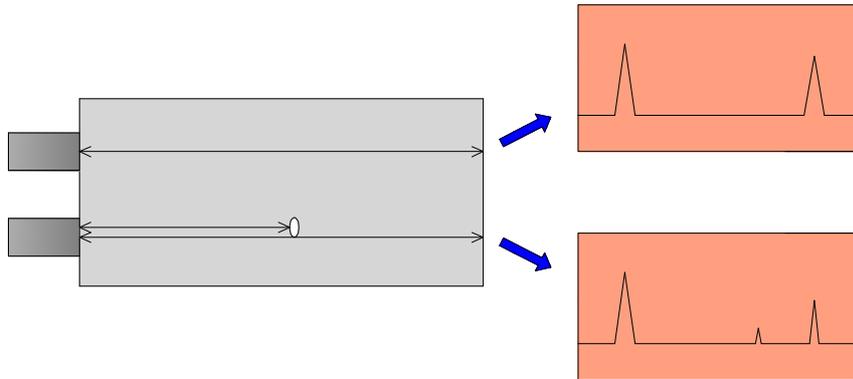


Fig 5.17 – Prova per riflessione.

Conoscendo la posizione dell'eco del difetto è possibile calcolarne la distanza dalla sonda. Nota poi la velocità delle onde, la distanza percorsa è pari al doppio della distanza del difetto dalla sonda.

#### 5.4.3 – Operazioni propedeutiche a quelle di misura

Prima di iniziare le misure è necessario registrare le condizioni ambientali, la temperatura e l'umidità. È di fondamentale importanza poi che le superfici sulle quali saranno applicate le sonde siano adeguatamente pulite e lisce. Per ottenere un corretto accoppiamento acustico dei trasduttori con la superficie si deve utilizzare un materiale che consenta di evitare la presenza di aria che causerebbe la riflessione di una grande quantità di energia. Nel caso in cui la superficie sia liscia e piana si può ricorrere ad un grasso abbastanza fluido come la vaselina o ad un gel. Nel caso invece di superfici rugose il materiale deve essere maggiormente viscoso ed allora si possono adoperare plastilina o stucco in pasta.

Una ulteriore operazione da compiere è la *calibrazione* del dispositivo di misura che può essere effettuata su un tempo nullo o su un tempo prestabilito. Nel primo caso le superfici attive dei due trasduttori vanno fatte direttamente combaciare (fig 5.18 a). Nel secondo invece le superfici vanno applicate alle

estremità di una *barra di calibrazione* per la quale è noto il tempo di transito (fig 5.18 b).

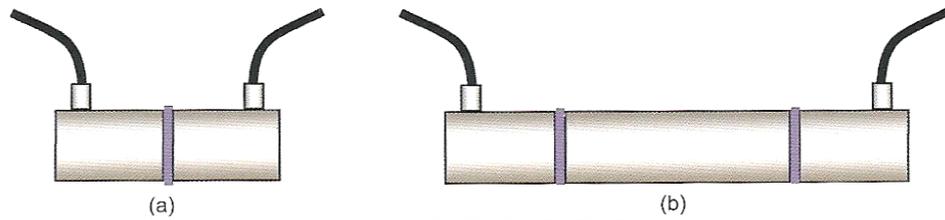


Fig 5.18 – Calibrazione con sonde a contatto (a) o con barra di calibrazione (b) (Pascale, 2008).

In entrambi i casi la calibrazione deve essere eseguita con lo stesso materiale di accoppiamento che sarà utilizzato nelle prove.

#### 5.4.4 – Esecuzione delle misure

I parametri significativi che possono essere misurati sono il *tempo di volo* o *tempo di transito*  $\Delta t$  e l'*attenuazione*  $A$ .

Il tempo di volo è il tempo intercorrente tra l'istante di partenza dell'impulso dalla sonda emittente e l'istante di arrivo a quella ricevente e può essere espresso dalla relazione:

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (5.19)$$

Questa misura deve essere verificata sullo schermo di un oscilloscopio (fig 5.19) sul quale vengono visualizzati l'onda di vibrazione ricevuta e possibilmente anche gli istanti di partenza e arresto del dispositivo nell'intervallo di tempo considerato.

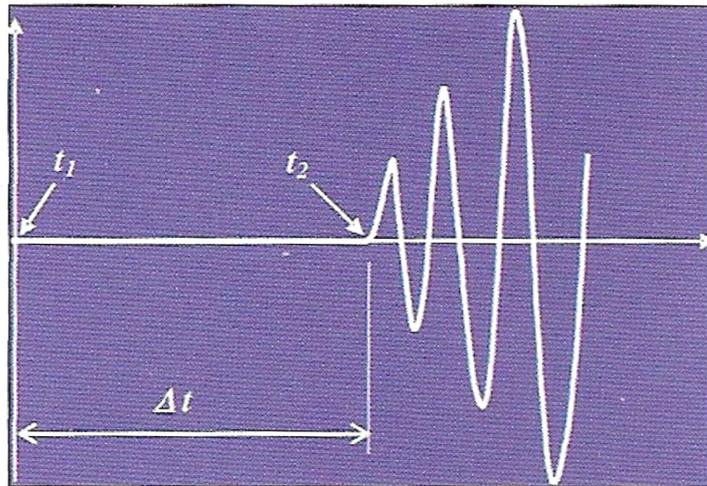


Fig 5.19 – Misura del tempo di volo (Pascale, 2008).

Nei materiali ad elevata attenuazione assume una notevole importanza il controllo visivo dell'impulso sullo schermo in quanto l'ampiezza del primo picco di tensione, che corrisponde al primo fronte d'onda, è molto limitata e potrebbe non essere rilevata da una strumentazione a soglia fissa.

Conoscendo il tempo di volo è possibile determinare la velocità di propagazione delle onde P attraverso la relazione seguente, in cui  $L$  è la distanza tra i centri dei trasduttori:

$$V_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (5.20)$$

La velocità determinata dalla relazione precedente viene detta *velocità apparente* di propagazione delle onde P in quanto l'effettiva lunghezza del percorso può non essere uguale alla distanza tra i centri delle sonda.

L'attenuazione  $A$  può essere determinata dal rapporto tra la pressione acustica nel punto di ricezione e quella nel punto di emissione. Dato che l'ampiezza del segnale sullo schermo è proporzionale alla pressione acustica, questa può essere utilizzata per il calcolo dell'attenuazione espressa in dB. È possibile determinare l'attenuazione in questo modo, però, solo su percorsi diretti, con sonde contrapposte sullo stesso asse.

## 5.5 – Applicazione delle tecniche ad ultrasuoni su marmo

Le tecniche non distruttive ad ultrasuoni possono essere utilizzate per la caratterizzazione dei difetti all'interno del marmo. Una loro possibile finalità è quella di individuare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei monumenti antichi e delle sculture, valutandone anche il loro grado di invecchiamento causato da agenti atmosferici e inquinanti.

Il Dipartimento di Meccanica dell'Università di Atene ha sviluppato un progetto di un dispositivo ad ultrasuoni per l'indagine non distruttiva dei monumenti in marmo. Il marmo, infatti, pur essendo un materiale di natura anisotropa e a struttura stratificata, può essere caratterizzato attraverso le tecniche ad ultrasuoni. Si possono esaminare campioni di marmo aventi uno spessore da pochi centimetri fino ad un metro. Il dispositivo oggetto dello studio è dimensionato in modo tale che le onde longitudinali e trasversali siano generate alla frequenza di 2 MHz. In questa esperienza sono stati utilizzati provini prismatici di marmo *pentelico*, il materiale con cui è stato realizzato il Partenone sull'Acropoli di Atene. In figura 5.20 sono mostrate le caratteristiche geometriche e i punti di misura dei provini analizzati.

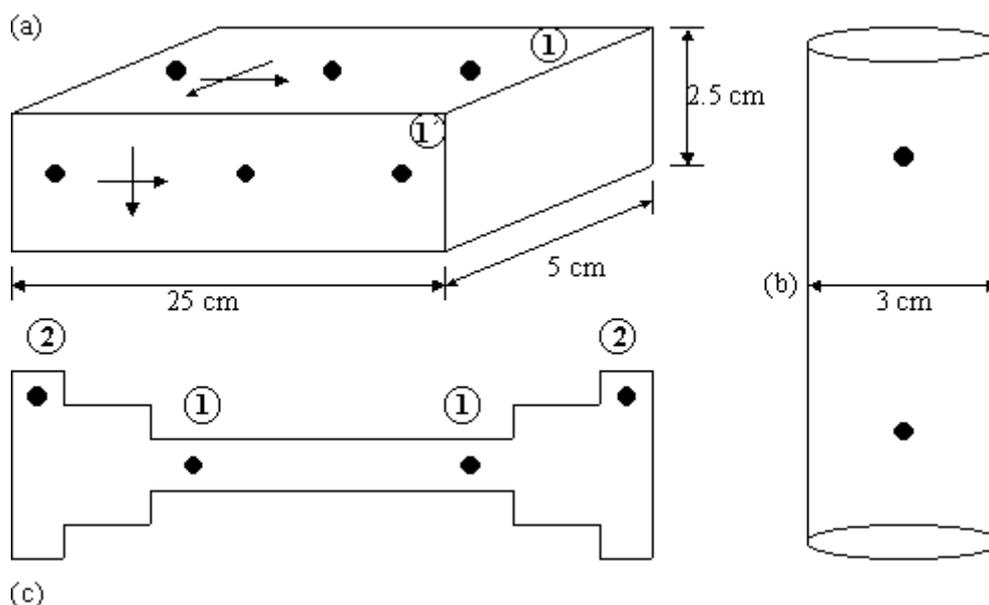


Fig 5.20 – Forma e dimensioni dei tre tipi di provini utilizzati.

Dalla figura 5.21 emerge che il marmo ha tre differenti direzioni di anisotropia delle quali una parallela agli strati del materiale, un'altra lungo la larghezza dell'elemento e la terza lungo lo spessore. Si potrebbe quindi affermare che si tratti di un materiale *ortotropo*. Dopo una serie di prove si è arrivati a concludere, però, che le proprietà meccaniche lungo le prime due direzioni di anisotropia sono molto simili tra loro. Il materiale, quindi, può essere considerato *trasversalmente isotropo*.

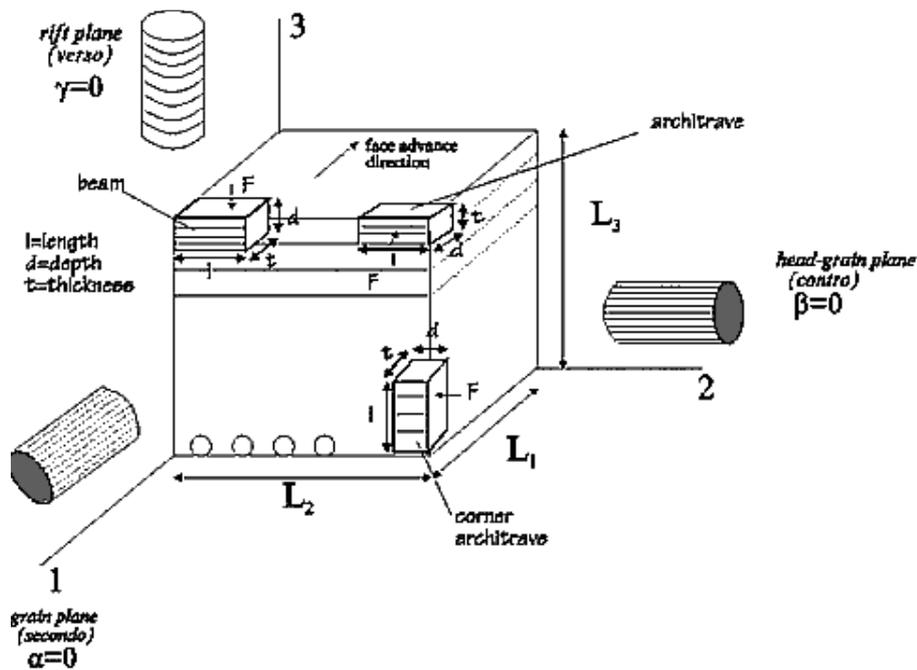


Fig 5.21 – Anisotropia del marmo pentelico.

Utilizzando i valori delle velocità  $c_l$  e  $c_t$  delle onde longitudinali e trasversali determinati attraverso le misure ad ultrasuoni e sapendo che la densità del marmo pentelico varia intorno al valore di  $2730 \text{ g/cm}^3$ , è possibile stimare i valori delle costanti elastiche  $E$  ( modulo di Young),  $G$  (modulo di elasticità tangenziale) e  $\nu$  (coefficiente di Poisson) attraverso le relazioni seguenti:

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \rho c_l^2 \quad (5.21)$$

$$G = \rho c_t^2 \quad (5.22)$$

$$\nu = \frac{(c_\lambda / c_t)^2 - 2}{2[(c_\lambda / c_t)^2 - 1]} \quad (5.23)$$

Nella figura 5.22 sono riportati i risultati dello studio effettuato su provini del terzo tipo (cfr fig 5.20 – c). Lo studio è stato eseguito attraverso prove distruttive, utilizzando uno strumento di carico INSTRON e non distruttive con l’ausilio dello strumento ad ultrasuoni USIP-11. Le misure indicate nella figura sono le seguenti:

1 : misura lungo la direzione parallela all’asse longitudinale del provino;

2 : misura lungo la direzione ortogonale alla base dei provini;

Average : valor medio delle due misure precedenti.

No	Measurement	Non-destructive testing					Destructive testing		
		$c_l$ (m/sec)	$c_t$ (m/sec)	E (GPa)	G (GPa)	$\nu$	E (GPa)	G (GPa)	$\nu$
0202	1	3025,7	3368,2	78,7	30,9	0,270	79,5	31,3	0,27
	2	6038,4	3429,3	80,9	32,1	0,260			
	Average			79,8	31,5	0,265			
1201	1	6000,3	3409,7	80,0	31,7	0,260	81,0	32,0	0,26
	2	6001,6	3412,5	80,2	31,8	0,260			
	Average			80,1	31,8	0,265			
1202	1	5764,7	3164,7	70,0	27,3	0,280	73,1	28,9	0,26
	2	5587	3166,1	69,0	27,4	0,260			
	Average			69,5	27,4	0,270			
1203	1	5920	3305,1	75,8	29,8	0,280	76,2	30,1	0,26
	2	5863,6	3324,6	76,1	30,2	0,260			
	Average			76,0	30,2	0,265			
1206	1	6273,1	3384,5	80,7	31,2	0,290	82,3	32,4	0,27
	2	5805,4	3187,1	71,0	27,7	0,280			
	Average			72,4	28,3	0,280			
1213	1	5920	3250	73,8	28,8	0,280	72,3	28,5	0,27
	2	5805,4	3187,1	71,0	27,7	0,280			
	Average			72,4	28,3	0,280			
1303	1	5934,8	3258,1	74,2	29,0	0,280	74,0	29,1	0,27
	2	5846,9	3170,7	70,8	27,5	0,290			
	Average			72,5	28,3	0,285			

Fig 5.22 – Confronto tra i valori delle costanti elastiche.

Per quanto riguarda il codice dei vari provini, il primo numero indica se la superficie è pulita artificialmente (1) oppure no (0), il secondo indica il diametro del provino in cm, mentre l’ultimo indica l’ordine del provino.

A titolo di esempio il codice 1206 indica il sesto provino con superficie pulita e diametro di due centimetri. È importante specificare, inoltre, che tutti i provini sono ottenuti dallo stesso blocco di marmo.

Dai risultati ottenuti emerge che i valori delle costanti elastiche E e G sono maggiori lungo le direzioni parallele agli strati del materiale, rispetto a quelle ottenute lungo le direzioni perpendicolari agli strati stessi. L'opposto può essere detto per quanto riguarda i valori del coefficiente di Poisson. I risultati ottenuti dal metodo ad ultrasuoni e dalle prove distruttive sono simili tra loro con una differenza massima dell'ordine del 10% o anche minore.

Quest'ultima osservazione è estremamente incoraggiante per gli sviluppi futuri delle applicazioni dei test non distruttivi ad ultrasuoni su strutture ed elementi di marmo.

## **6- PROVE AD ULTRASUONI**

### **6.1 – Introduzione**

In questo capitolo saranno presentate le prove da me effettuate presso il Laboratorio di Geingegneria e Risorse Naturali dell'Università di Bologna con la collaborazione del Dott. Geol. Fausto Peddis. Le prove sono state eseguite utilizzando uno strumento ad ultrasuoni della serie Epoch 1000 della Olympus (Fig 6.1) su provini di marmo al fine di determinare i parametri necessari alla loro caratterizzazione: tempo di volo e attenuazione. Una volta determinati i tempi di volo e conoscendo le dimensioni geometriche dei vari provini è stato possibile determinare le velocità di propagazione delle onde P all'interno dei materiali considerati.



Fig 6.1 – Strumento ad ultrasuoni Epoch 1000.

Sono stati utilizzati provini di marmi aventi differenti composizioni cristalline in modo tale da valutare come queste diverse caratteristiche influenzino la velocità delle onde e sull'attenuazione. Per lo stesso motivo sono state effettuate prove anche su altri materiali come graniti, gneiss, arenarie e calcari. Lo scopo finale di queste prove è quello di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti dallo strumento in esame per valutare la possibilità di una sua utilizzazione nell'ambito della diagnostica del David di Michelangelo.

## 6.2 - Caratteristiche e funzionamento dello strumento ad ultrasuoni.

Lo strumento della Serie Epoch 1000 della Olympus è un rilevatore di difetti ad ultrasuoni portatile che può essere agevolmente utilizzato grazie alla presenza di cinque pagine di menù ognuna delle quali strutturata in un certo numero di sottomenù. I pulsanti di questi sottomenù sono visualizzati verticalmente sul lato destro della schermata ( Fig 6.2).

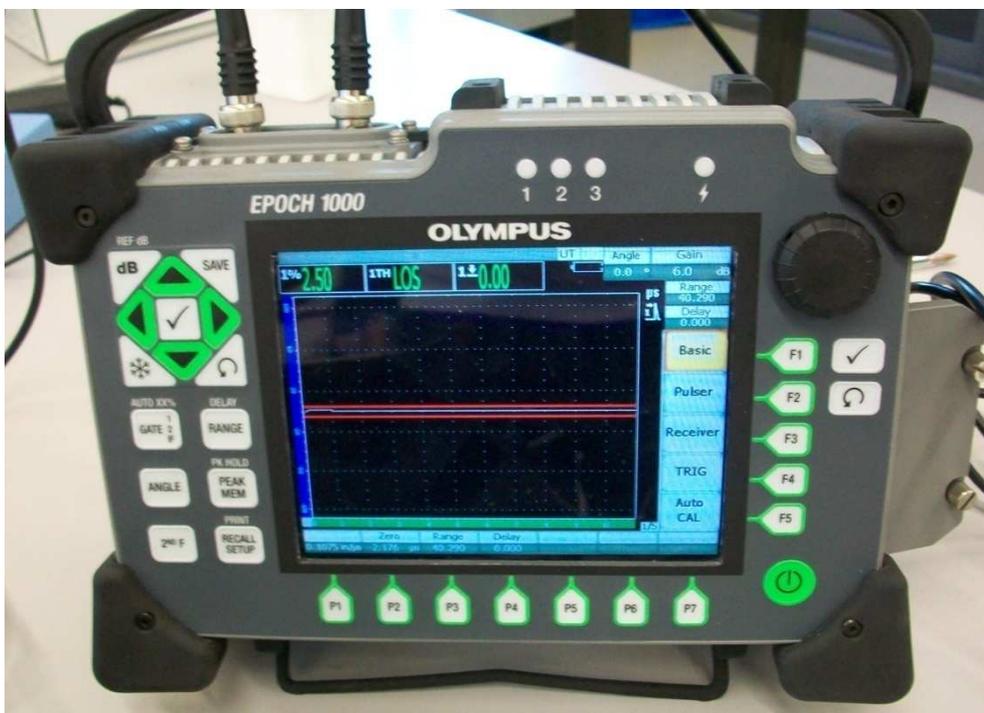


Fig 6.2 – Visualizzazione schermo Epoch 1000.

La prima pagina di menù, indicata con 1/5, presenta i seguenti sottomenù:

- DI BASE: che consente di modificare alcuni parametri fondamentali come la velocità di propagazione approssimativa per il materiale in esame e il ritardo dello schermo;
- PULSATORE: in cui è possibile modificare i valori della *frequenza di ripetizione degli impulsi* (PRF), la sua modalità di configurazione, la *tensione dell'impulso* (compresa tra 50 V e 475 V), lo *smorzamento*, la *modalità di controllo* e l'*energia d'impulso*. La PRF è la misura del numero di impulsi emessi verso il trasduttore attraverso il circuito elettronico e viene definita in base al metodo di controllo e alla forma dell'elemento da ispezionare. Lo smorzamento, invece, è la resistenza posta in parallelo alla sonda e serve a scaricare parte della tensione al fine di ridurre l'ampiezza dell'impulso. I due principali tipi di modalità di controllo sono l'*impulso eco* (E/I) in cui un unico trasduttore trasmette e riceve il segnale e la *trasmissione diretta* in cui due distinti trasduttori sono posizionati ai lati opposti del pezzo da ispezionare.
- RICEVITORE: per modificare le configurazioni dei *filtri* e dei *gruppi di filtri*. I filtri sono concepiti con lo scopo di migliorare il rapporto segnale-rumore filtrando il rumore di alta e bassa frequenza al di fuori dello spettro di frequenze utilizzato per l'ispezione. Il gruppo filtri può essere "Standard" con sette filtri digitali o "Avanzato" con trenta filtri digitali.
- AUTOCAL: che consente di calibrare lo scarto dello zero e la velocità durante la calibrazione dello strumento.

La seconda pagina, 2/5, permette di modificare le impostazioni delle due porte utilizzate per il rilievo dei difetti e visualizzate nei colori rosso e blu. È possibile definire la posizione iniziale della porta, la sua larghezza e la posizione verticale della soglia. Ogni porta può essere utilizzata per effettuare la misura in tre differenti modalità: *bordo* in cui acquisisce la misura del primo punto che incrocia il segnale della porta, *picco* in cui determina la posizione del picco più elevato lungo la parte di schermata che corrisponde alla porta e *1° picco* che acquisisce l'ampiezza dell'indicazione del primo picco. Le prove che verranno di seguito descritte sono state effettuate

utilizzando la sola porta di colore rosso in modalità bordo. Lo strumento ha, inoltre, una terza porta denominata porta IF utilizzata unicamente in caso di prove ad immersione.

La pagina 3/5 del menù consente di modificare la configurazione dei colori (luminosità e combinazione dei colori), la configurazione delle misure (unità di misura, tipo di misura da effettuare e numero di decimali da considerare) e la configurazione dello strumento (lingua e segnali acustici dei tasti). Quest'ultima dà inoltre informazioni sulla temperatura interna dello strumento e sullo stato e autonomia della batteria.

La pagina 4/5 consente di variare le configurazioni di onde che non sono state considerate per le prove in esame, mentre la pagina 5/5 permette di creare files di taratura o di immagazzinamento dei dati. Una volta definito e salvato un file di calibrazione, è possibile richiamare le sue impostazioni attraverso il comando "RECALL SETUP" posto a sinistra dello schermo.

Lo strumento presenta, inoltre, altri comandi situati in alto a sinistra rispetto allo schermo. Tra questi è importante ricordare il tasto "dB" che consente di regolare il *guadagno* durante l'esecuzione delle misure. Il guadagno è una funzione utilizzata in elettronica che comporta un aumento di ampiezza del segnale e si esprime generalmente come rapporto, in dB, tra la tensione di uscita e quella di entrata. I valori del guadagno, *gain* in inglese, sono visualizzati nella schermata in alto a destra.

Allo strumento Epoch 1000 è stato collegato un *preamplificatore* (fig 6.3) che consente di fissare il guadagno dello strumento a 40 dB o 60 dB mediante una levetta posta al centro della facciata anteriore. Nella medesima facciata sono presenti due collegamenti, uno di *input* e l'altro di *output*. Il primo consente di collegare l'amplificatore alla sonda ricevente mentre il secondo consente il collegamento allo strumento ad ultrasuoni.

Durante le prove eseguite in laboratorio sono state utilizzate due sonde, una ricevente e l'altra trasmittente, aventi frequenza pari a 1 MHz (fig 6.4). È importante ricordare che la precisione nella misura del tempo di volo è fortemente legata alla frequenza dei trasduttori e quindi al periodo T.



Fig 6.3 – Preamplificatore.



Fig 6.4 – Sonde utilizzate nelle prove.

Adottando sonde con frequenza 1 MHz, il periodo risulta pari a :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1000000} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ s} \quad (6.1)$$

Gli strumenti utilizzati in questo tipo di prove consentono generalmente l'individuazione dell'istante di arrivo dell'onda con una precisione di circa 1/20 del periodo. L'errore nella misura del tempo di volo risulta quindi:

$$e = \frac{T}{20} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{20} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s} = 0,05 \mu\text{s} \quad (6.2)$$

Come si è detto nel paragrafo 4.4, al fine di ottenere un corretto accoppiamento dei trasduttori con la superficie dell'elemento da analizzare è necessario evitare la presenza di aria che causerebbe la riflessione di una notevole quantità di energia. Nelle prove con lo strumento Epoch 1000 sono stati utilizzati due diversi materiali che consentono di ottenere questo effetto. Nel caso in cui il materiale non abbia una elevata impedenza acustica è possibile adottare delle apposite membrane di silicone fissate alla sonda per mezzo di anelli rigidi (fig 6.5).



Fig 6.5 – Sonde con membrana.

In alternativa è possibile utilizzare un gel eco-elettro conduttore, solubile in acqua, generalmente in uso in ambito medico nelle ecografie (fig 6.6). Questo gel, pur essendo a base di acqua, lascia aloni residui che potrebbero comprometterne l'utilizzo nell'ambito della diagnostica dei beni di interesse storico-artistico tra i quali ovviamente è da annoverare il David di Michelangelo.



Fig 6.6 – Gel eco-elettro conduttore.

Al fine di ottenere risultati attendibili dalle prove, per prima cosa è stato necessario effettuare una precisa calibrazione dello strumento. Questa è stata eseguita mediante due blocchi di calibratura di spessori noti, dei quali uno maggiore e l'altro minore di quello dell'elemento da analizzare. È importante, inoltre, che questi due blocchi siano dello stesso materiale del provino oggetto di studio.

### **6.3 – Prove su campioni di marmo**

Lo strumento Epoch 1000 è stato utilizzato per effettuare prove ad ultrasuoni su sei provini di marmo bianco, quattro prismatici e due cilindrici, provenienti dalla cava Canalgrande, nella zona di Carrara, messi a disposizione dalla ditta B.L.C. di Carrara. Tutti i provini erano stati ricavati dallo stesso blocco di marmo.

I provini prismatici sono individuati dalle sigle A, B, M1 e M2, mentre quelli cilindrici dalle sigle C1 e C2. In seguito è stato analizzato un campione

di marmo di Lasa caratterizzato da cristalli di dimensioni maggiori. Le prove sono state realizzate per trasmissione applicando le due sonde, una di fronte all'altra, su due facce opposte del provino da analizzare ( fig 6.7 ).

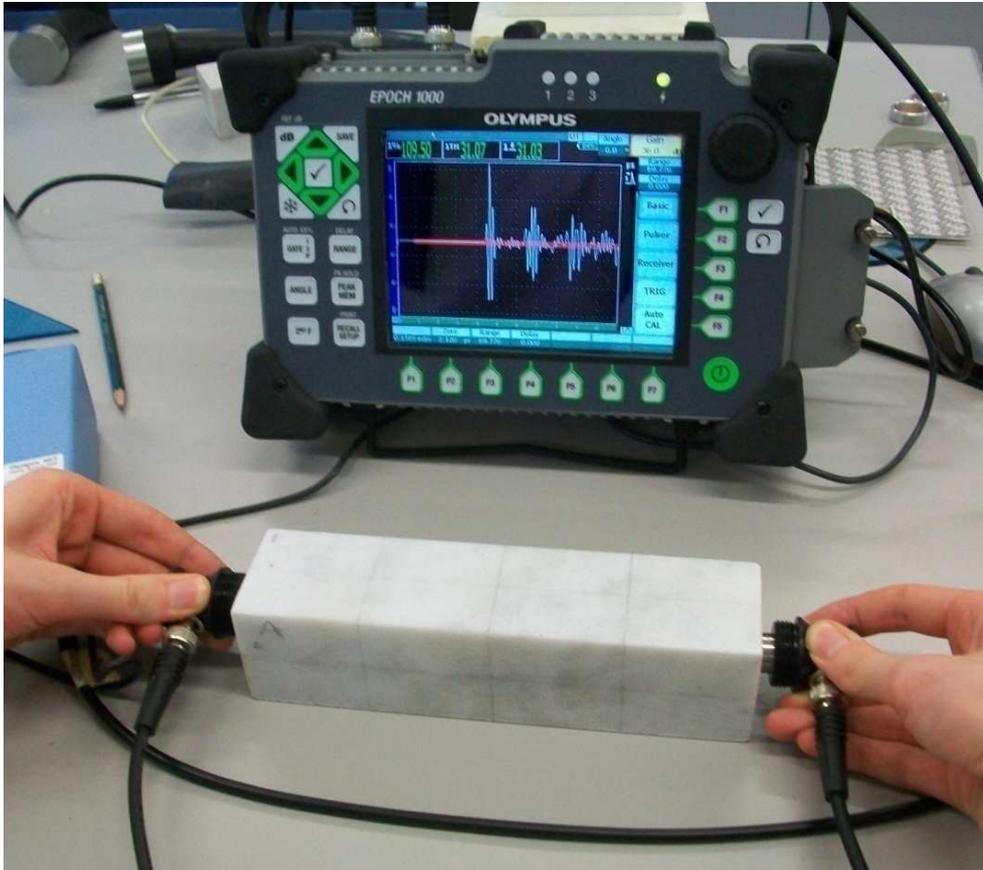


Fig 6.7 – Prova ad ultrasuoni con Epoch 1000.

### 6.3.1 - Provini A e B

Il primo provino ad essere analizzato è stato il provino A avente dimensioni 20 x 5 x 5 cm. Al fine di effettuare misure a distanze ben definite è stata disegnata una griglia che mettesse in evidenza i punti da analizzare. In figura 6.8 è possibile osservare in colore rosso le linee costituenti la griglia mentre in verde sono evidenziati i punti di misura. Sono state eseguite:

- una misura lungo la direzione y;
- tre misure lungo la direzione x, distanti tra loro 5 cm;
- tre misure lungo la direzione z, distanti tra loro 5 cm.

In figura 6.9 è riportata una fotografia del provino oggetto di studio dopo aver tracciato la griglia necessaria per le operazioni di misura.

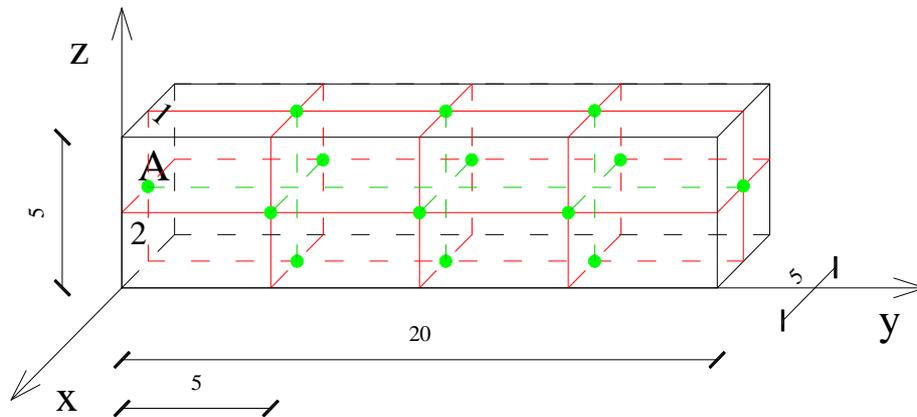


Fig 6.8 – Dimensioni e punti di misura del provino A.

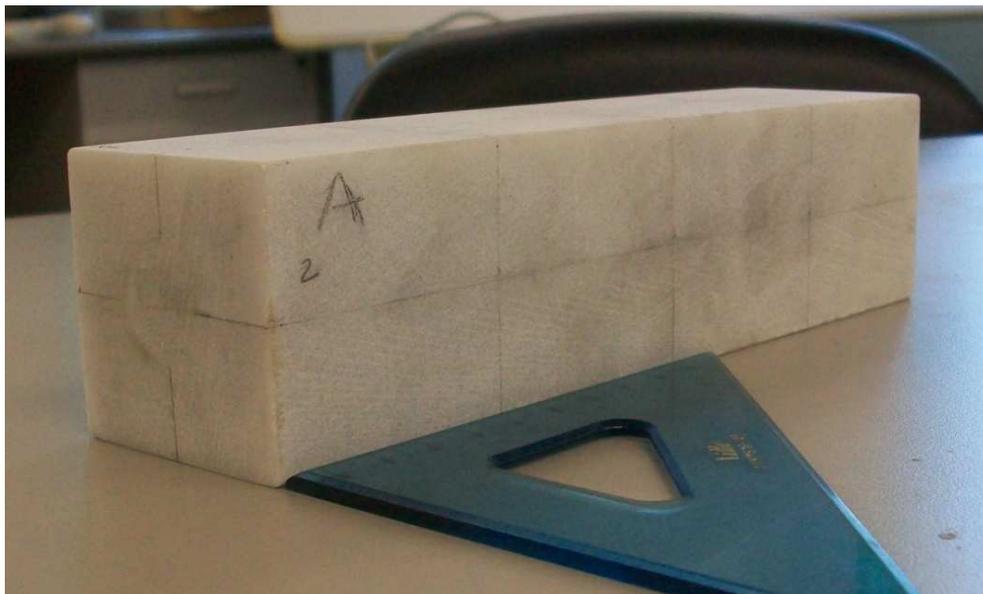


Fig 6.9 – Provino A.

I parametri valutati nei vari punti sono il tempo di volo ( $\Delta t$ ) e l'attenuazione (A). Il primo può essere letto direttamente dallo strumento, nella parte alta della schermata, facendo però attenzione a stabilire come unità di misura i  $\mu s$ . Per la misura dell'attenuazione, invece, è necessario fare riferimento al guadagno. Inizialmente si sono considerate le due sonde a contatto fra loro e si è agito sul guadagno fino a portare l'ampiezza del primo picco ad un valore

prefissato, nel nostro caso l'80% dell'altezza dello schermo. Successivamente le sonde sono state applicate al provino da analizzare e si è agito nuovamente sul guadagno per ottenere la stessa ampiezza del primo picco del caso precedente. Eseguendo la differenza dei due valori così ottenuti, si è ottenuta una stima dell'attenuazione. Il guadagno, nel caso di sonde a contatto, corrispondente ad una ampiezza pari all'80% dell'altezza dello schermo risulta di 5,1 dB. In tabella 6.1 sono riportati i risultati ottenuti per il provino, in cui i valori dell'attenuazione A sono ottenuti dalla relazione:

$$A = G_{sp} - G_{sc} = G_{sp} - 5,1 \text{ dB} \quad (6.3)$$

In cui:

$G_{sp}$  = guadagno nel caso di sonde applicate al provino;

$G_{sc}$  = guadagno nel caso di sonde a contatto.

I numeri tra parentesi vicino alle direzioni, in tabella 6.1, individuano le facce del provino ortogonali a tali direzioni. Ad esempio z(1) indica che la faccia 1 del campione è ortogonale alla direzione z.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu\text{s}$ )	Guadagno (dB)	Attenuazione (dB)
<b>y</b>	31,2	9,9	4,8
<b>z (1)</b>	6,9	7,5	2,4
	6,5	7,7	2,6
	6,5	7,5	2,4
<b>x (2)</b>	6,9	8,7	3,6
	6,9	7,7	2,6
	6,8	7,4	2,3

Tab 6.1 – Valori ottenuti per il provino A.

Una volta rilevati i valori del tempo di volo e dell'attenuazione, si è proceduto alla loro elaborazione grazie alla conoscenza delle dimensioni del provino. In tabella 6.2 sono riportati i valori della lunghezza, della velocità di propagazione delle onde P e dell'attenuazione per metro lineare relative al

provino A. La velocità delle onde P è stata ottenuta attraverso la nota relazione:

$$V_p = \frac{L}{\Delta t} \quad (6.4)$$

Direzione	Lunghezza ( cm )	Velocità onde ( m/s )	Attenuazione/metro ( dB/m )
y	20	6410	24
z (1)	5	7246	48
	5	7692	52
	5	7692	48
x (2)	5	7246	72
	5	7246	52
	5	7353	46

Tab 6.2 – Elaborazione dei risultati per il provino A.

In ultimo sono state determinate le medie dei valori di  $\Delta t$ , di  $V_p$  e dell'attenuazione per unità di lunghezza (A/m) misurati lungo le direzioni x e z (tab 6.3).

Direzione	Tempo di volo ( $\mu s$ )	Velocità onde ( m/s )	Attenuazione/metro ( dB/m )
y	31,2	6410	24
z (1)	6,5	7543	49,3
x (2)	6,9	7282	56,7

Tab 6.3 – Medie dei valori ottenuti per il provino A.

Per il provino A sono stati ottenuti valori di  $V_p$  molto elevati soprattutto nella direzione z, dove si è arrivati a un valor medio di 7543 m/s e nella direzione x dove si è raggiunta una velocità media di 7282 m/s. Questi valori mettono in luce la notevole compattezza del materiale che risulta, quindi, privo di difetti interni.

Successivamente si è passati ad analizzare il provino B avente le stesse dimensioni del provino appena studiato.

In figura 6.10 è riportata una vista del provino B e della griglia tracciata per l'individuazione delle direzioni e dei punti di misura.

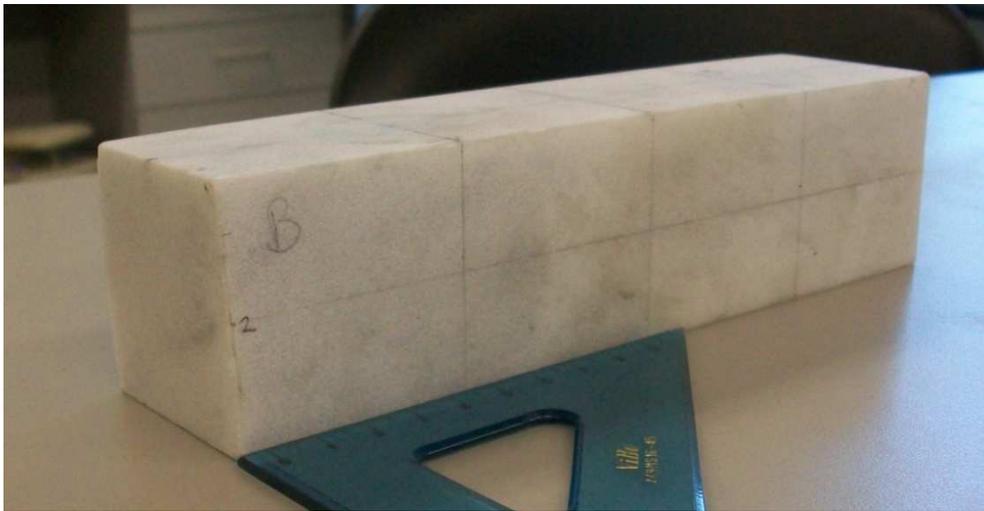


Fig 6.10 – Provino B.

Con le stesse modalità viste per il provino A sono stati determinati i valori dei tempi di volo e delle attenuazioni nei punti considerati. In tabella 6.4 sono riportati tali valori.

<b>Direzione</b>	<b>Tempo di volo (<math>\mu</math>s)</b>	<b>Guadagno (dB)</b>	<b>Attenuazione (dB)</b>
<b>y</b>	30,9	12	6,9
<b>z (1)</b>	6,8	7,8	2,7
	6,7	7,8	2,7
	6,7	9,2	4,1
<b>x (2)</b>	6,4	7,4	2,3
	6,4	7,4	2,3
	6,4	7,4	2,3

Tab 6.4 –Valori ottenuti per il provino B.

In seguito utilizzando la formula 6.4 sono stati calcolati i valori della velocità delle onde P nei punti di misura e conoscendo le dimensioni del campione sono stati valutati i valori dell'attenuazione per metro di lunghezza (tab 6.5).

<b>Direzione</b>	<b>Lunghezza ( cm )</b>	<b>Velocità onde ( m/s )</b>	<b>Attenuazione/metro ( dB/m )</b>
<b>y</b>	20	6472	34,5
<b>z (1)</b>	5	7353	54
	5	7463	54
	5	7463	82
<b>x (2)</b>	5	7813	46
	5	7813	46
	5	7813	46

Tab 6.5 – Elaborazione dei risultati per il provino B.

Una volta ottenuti tali valori si è proceduto a calcolare le medie di  $\Delta t$ , di  $V_p$  e di A/m lungo le direzioni x e z (tab 6.6).

<b>Direzione</b>	<b>Tempo di volo ( <math>\mu</math>s )</b>	<b>Velocità onde ( m/s )</b>	<b>Attenuazione/metro ( dB/m )</b>
<b>y</b>	30,9	6472	34,5
<b>z (1)</b>	6,7	7426	63,3
<b>x (2)</b>	6,9	7813	46

Tab 6.6 – Medie dei valori ottenuti per il provino B.

Confrontando i valori medi ottenuti per i due provini è possibile osservare che i tempi di volo e le velocità delle onde P sono paragonabili tra loro e anche le attenuazioni non sono molto diverse. Questi risultati permettono di dire che i due provini presentano una composizione cristallina molto simile e, dati gli elevati valori delle velocità, non hanno difetti significativi al loro interno. È interessante notare che la velocità delle onde rilevata lungo le direzioni x e z è stata in media pari a 7516 m/s, mentre quella ottenuta lungo la direzione y è stata in media di 6441 m/s. Questi risultati evidenziano, quindi, che per uno stesso materiale, al diminuire della lunghezza del percorso, si assiste ad un aumento della velocità delle onde.

### 6.3.2 – Provini M1 e M2

I provini M1 e M2, avendo entrambi dimensioni 50 x 15 x 15 cm, hanno richiesto un numero maggiore di punti di misura rispetto a quelli precedentemente analizzati. Sul campione M1, infatti, sono state eseguite:

- cinque misure in direzione y, individuate dalle sigle 0, a, b, c, d, di cui la prima si trova al centro della faccia e le altre quattro a distanza 3,75 cm da essa;
- quattro misure in direzione x, distanti tra loro 10 cm;
- quattro misure in direzione z, distanti tra loro 10 cm.

Anche in questo caso è stata tracciata una griglia sul provino rappresentata in figura 6.11 da una linea di colore rosso. Nella stessa figura i punti e le direzioni di misura sono disegnati in colore verde.

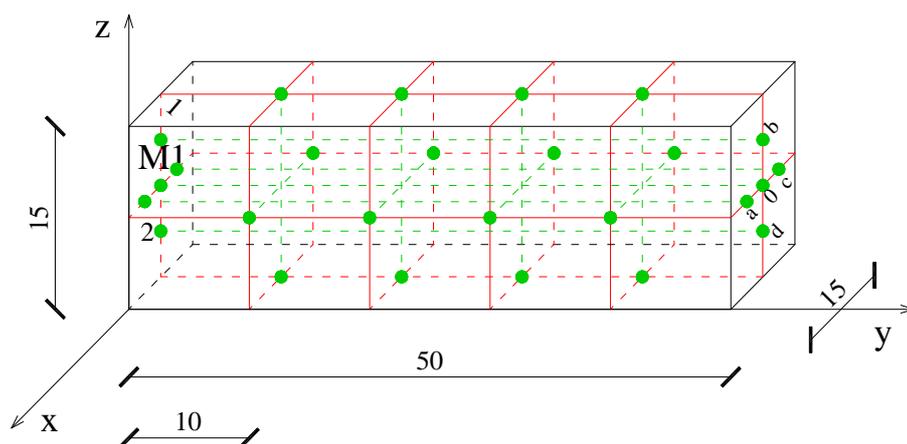


Fig 6.11 – Dimensioni e punti di misura del provino M1.

Nelle figure 6.12 e 6.13 è possibile osservare il provino M1 e la griglia tracciata su di esso. In figura 6.14 è rappresentata la faccia ortogonale alla direzione y del provino stesso in cui sono indicati i punti di misura considerati.



Fig 6.12 – Vista generale del provino M1.



Fig 6.13 – Vista frontale del provino M1.

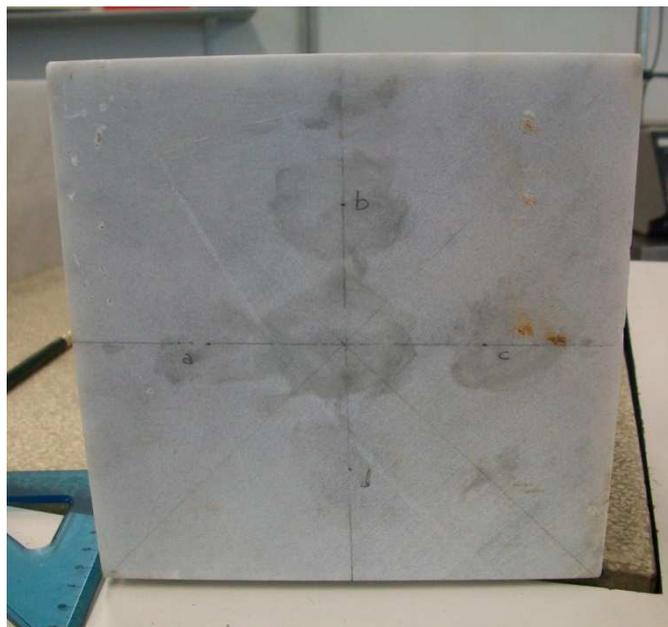


Fig 6.14 – Faccia ortogonale alla direzione y del provino M1.

Per questo provino e per quelli successivi sono state effettuate prove sia con l'utilizzo delle membrane al silicone che con il gel eco-elettro conduttore. In questo modo si sono voluti confrontare i valori ottenuti per verificare la possibilità di utilizzo delle membrane nella diagnostica del David di Michelangelo. Il gel, infatti, lasciando aloni residui non potrà essere utilizzato sul marmo della statua mentre le membrane, non causando questo problema, potrebbero essere una valida alternativa. Sono stati rilevati i valori dei tempi di volo e delle attenuazioni che sono riportati in tabella 6.7.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu\text{s}$ )		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)		
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana	
<b>0</b> <b>y</b>	<b>a</b>	77,8	78,6	23,2	28,1	18,1	23,0
	<b>b</b>	78,9	78,9	26,9	32,4	21,8	27,3
	<b>c</b>	77,9	78,7	23,3	24,9	18,2	19,8
	<b>d</b>	78,0	78,7	28,8	29,5	23,7	24,4
	<b>e</b>	78,1	78,7	34,4	33,5	29,3	28,4
<b>z (1)</b>		22,2	23,0	12,2	15,9	7,1	10,8
		22,2	23,0	12,8	14,6	7,7	9,5
		22,0	22,9	14,3	14,1	9,2	9,0
		21,8	22,7	14,2	14,3	9,1	9,2
<b>x (2)</b>		22,8	23,6	13,3	16,8	8,2	11,7
		22,7	23,5	17,7	17,7	12,6	12,6
		22,6	23,4	16,1	21,2	11,0	16,1
		22,5	23,3	20,5	16,4	15,4	11,3

Tab 6.7 – Valori ottenuti per il provino M1.

Questi sono stati in seguito elaborati al fine di determinare le velocità delle onde P e l'attenuazione per unità di lunghezza (tab 6.8), come già avvenuto per i provini precedentemente studiati. In queste tabelle sono riportati i valori ottenuti sia con il gel che con la membrana al silicone.

Si è infine proceduto a calcolare i valori medi di  $\Delta t$ ,  $V_p$  e  $A/m$  lungo le tre direzioni che sono mostrati in tabella 6.9.

Direzione	Lunghezza ( cm )	Velocità onde ( dB )		Attenuazione/metro ( dB/m )	
		Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>0</b> <b>y</b>	50	6427	6361	36,2	46,0
	50	6337	6337	43,6	54,6
	50	6418	6353	36,4	39,6
	50	6410	6353	47,4	48,8
	50	6402	6353	58,6	56,8
<b>z (1)</b>	15	6757	6522	47,3	72,0
	15	6757	6522	51,3	63,3
	15	6818	6550	61,3	60,0
	15	6881	6608	60,7	61,3
<b>x (2)</b>	15	6579	6356	54,7	78,0
	15	6608	6383	84,0	84,0
	15	6637	6410	73,3	107,3
	15	6667	6438	102,7	75,3

Tab 6.8 – Elaborazione dei risultati per il provino M1.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu$ s )		Velocità onde ( m/s )		Attenuazione/metro ( dB/m )	
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>y</b>	78,1	78,7	6399	6351	44,4	49,2
<b>z (1)</b>	22,1	22,9	6803	6551	55,2	64,2
<b>x (2)</b>	22,7	23,5	6623	6397	78,7	86,2

Tab 6.9 – Medie valori ottenuti per il provino M1.

L'analisi del provino M1 ha portato ad ottenere valori medi delle velocità delle onde maggiori con l'utilizzo del gel (6400-6800 m/s) rispetto a quelli determinati con la membrana (6350-6550 m/s). Questi valori sono caratteristici di un materiale privo al suo interno di difetti importanti. I risultati in termini di attenuazione, invece, sono maggiori impiegando la membrana rispetto a quelli ottenuti con il gel.

Il provino M2, avendo le stesse dimensioni del provino M1, ha richiesto un numero di punti di misura analogo al precedente.

In figura 6.15 è possibile osservare il provino in esame dopo aver disegnato la griglia e individuato i punti per le operazioni di misura.



Fig 6.15 – Vista generale provino M2.

Seguendo le stesse procedure viste per gli altri campioni già trattati, sono state effettuate prove per trasmissione che hanno consentito di ottenere i risultati riportati in tabella 6.10.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu$ s)		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)		
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana	
<b>0</b> <b>y</b>	<b>a</b>	77,8	78,6	23,0	32,0	17,9	26,9
	<b>b</b>	78,1	79,0	24,9	32,0	19,8	26,9
	<b>c</b>	77,5	78,4	26,6	35,4	21,5	30,0
	<b>d</b>	77,9	78,7	26,5	31,2	21,4	26,1
	<b>d</b>	78,3	79,1	22,7	33,9	17,6	28,8
<b>z (1)</b>		22,3	23,3	12,3	15,8	7,2	10,7
		22,3	23,3	13,1	14,1	8,0	9,0
		22,7	23,7	12,4	17,4	7,3	12,3
		22,5	23,3	21,9	25,2	16,8	20,1
<b>x (2)</b>		22,1	23,0	13,5	16,0	8,4	10,9
		22,0	23,0	16,2	14,4	11,1	9,3
		22,1	23,0	13,4	13,6	8,3	8,5
		22,0	22,9	13,9	15,1	8,8	10,0

Tab 6.10 – Valori ottenuti per il provino M2.

Questi valori sono stati in seguito elaborati per ottenere le velocità  $V_p$  e le attenuazioni A/m nelle posizioni considerate (tab 6.11).

Direzione	Lunghezza ( cm )	Velocità onde ( dB )		Attenuazione/metro ( dB/m )		
		Gel	Membrana	Gel	Membrana	
<b>y</b>	<b>0</b>	50	6427	6361	35,8	53,8
	<b>a</b>	50	6403	6329	39,6	53,8
	<b>b</b>	50	6452	6378	43,0	60,0
	<b>c</b>	50	6418	6353	42,8	52,2
	<b>d</b>	50	6386	6321	35,2	57,6
<b>z (1)</b>	15	6726	6438	6438	48,0	71,3
	15	6726	6438	6438	53,3	60,0
	15	6608	6329	6329	48,7	82,0
	15	6667	6438	6438	112,0	134,0
<b>x (2)</b>	15	6787	6522	6522	56,0	72,7
	15	6818	6522	6522	74,0	62,0
	15	6787	6522	6522	55,3	56,7
	15	6818	6550	6550	58,7	66,7

Tab 6.11 – Elaborazione dei risultati per il provino M2.

Infine, i valori medi di  $\Delta t$ ,  $V_p$  e A/m lungo le tre direzioni sono riportati in tabella 6.12.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu s$ )		Velocità onde ( m/s )		Attenuazione/metro ( dB/m )	
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>y</b>	77,9	78,8	6417	6348	39,3	55,5
<b>z (1)</b>	22,5	23,4	6684	6411	65,5	86,8
<b>x (2)</b>	22,1	23,0	6806	6529	61,0	64,5

Tab 6.12 – Medie dei valori ottenuti per il provino M2.

Sulla base dei risultati ottenuti si può concludere che, come i provini A e B, anche i campioni appena studiati presentano caratteristiche simili in quanto i valori medi delle grandezze analizzate sono paragonabili tra loro. I

tempi di volo rilevati utilizzando la membrana sono superiori rispetto a quelli misurati con il gel e le cause di questa differenza dovranno essere oggetto di un futuro studio.

### 6.3.3 – Provini C1e C2

I provini C1 e C2 sono cilindri di marmo aventi lunghezza di 50 cm e raggio di base pari a 10 cm. Date le loro dimensioni sono state eseguite misure in diversi punti ed è stato necessario utilizzare il gel eco-elettro conduttore, adatto per materiali compatti ma con il difetto di lasciare aloni residui al termine delle operazioni. In particolare sul provino C1 sono state effettuate:

- cinque misure in direzione y individuate dalle sigle 0, a, b, c, d, delle quali la prima al centro della faccia base e le altre ad una distanza di 5 cm da essa;
- quattro misure in direzione x, distanti fra loro 10 cm;
- quattro misure in direzione z, distanti fra loro 10 cm.

La griglia tracciata sul provino per individuare le posizioni in cui fare le misurazioni è rappresentata in figura 6.16 da una linea di colore rosso mentre i punti e le direzioni di misura in colore verde. In figura 6.17 è riportata una fotografia del provino dopo aver eseguito le prove, in cui sono ben visibili gli aloni lasciati dal gel.

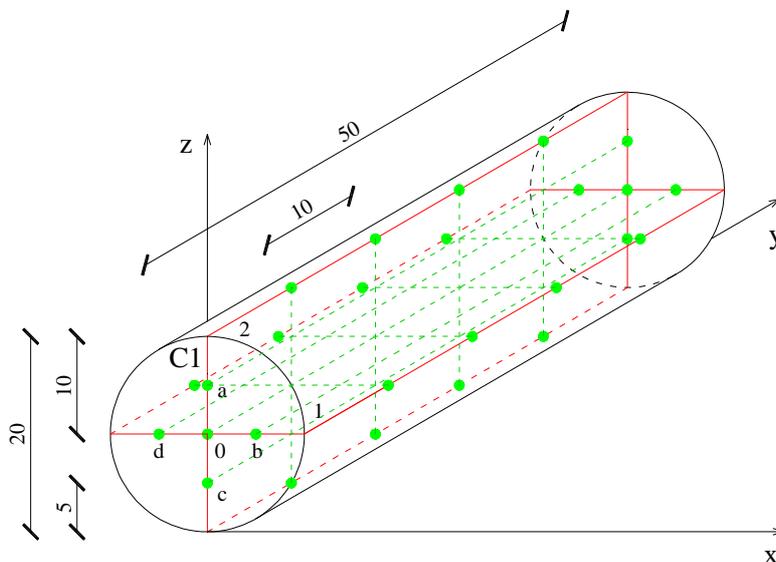


Fig 6.16 – Dimensioni e punti di misura provino C1.



Fig 6.17 – Provino C1.

Sono stati determinati i tempi di volo e le attenuazioni (tab 6.13), che sono stati utilizzati per ottenere la velocità di propagazione delle onde P e l'attenuazione per unità di lunghezza (tab 6.14).

Direzione	Tempo di volo ( $\mu\text{s}$ )		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)		
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana	
<b>0</b> <b>y</b>	<b>a</b>	76,9	77,5	23,2	21,0	18,1	15,9
	<b>b</b>	76,5	77,2	28,4	25,0	23,3	19,9
	<b>c</b>	76,7	77,3	21,6	21,1	16,5	16,0
	<b>d</b>	77,1	77,5	21,9	22,8	16,8	17,7
	<b>d</b>	76,8	77,8	24,8	25,1	19,7	20,0
<b>z (1)</b>		29,9	30,4	21,2	18,2	16,1	13,1
		30,0	30,5	25,7	17,4	20,6	12,3
		29,9	30,6	24,6	16,5	19,5	11,4
		30,0	30,6	21,0	22,9	15,9	17,8
<b>x (2)</b>		29,7	30,4	26,4	18,8	21,3	13,7
		29,9	30,5	34,0	22,2	28,9	17,1
		29,8	30,4	25,1	20,7	20,0	15,6
		29,9	30,6	27,1	18,1	22,0	13,0

Tab 6.13 – Valori ottenuti per il provino C1.

Direzione	Lunghezza ( cm )	Velocità onde ( dB )		Attenuazione/metro ( dB/m )	
		Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>0</b> <b>y</b>	50	6502	6452	36,2	31,8
	50	6536	6477	46,6	39,8
	50	6519	6468	33,0	32,0
	50	6485	6452	33,6	35,4
	50	6510	6427	39,4	40,0
<b>z (1)</b>	20	6689	6579	80,5	65,5
	20	6667	6557	103,0	61,5
	20	6689	6536	97,5	57,0
	20	6667	6536	79,5	89,0
<b>x (2)</b>	20	6734	6579	106,5	68,5
	20	6689	6557	144,5	85,5
	20	6711	6579	100,0	78,0
	20	6689	6536	110,0	65,0

Tab 6.14 – Elaborazione dei risultati per il provino C1.

Sono stati, infine, calcolati i valori medi delle grandezze ottenute, che sono riportati in tabella 6.15.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu$ s )		Velocità onde ( m/s )		Attenuazione/metro ( dB/m )	
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>y</b>	76,8	77,5	6510	6455	37,8	35,8
<b>z (1)</b>	29,9	30,5	6678	6552	90,1	68,3
<b>x (2)</b>	29,8	30,5	6706	6563	115,3	74,3

Tab 6.15 – Medie dei valori ottenuti per il provino C1.

Analizzando la tabella si può osservare che le velocità medie delle onde nelle tre direzioni sono comprese tra 6500 e 6700 m/s utilizzando il gel e tra 6450 e 6560 utilizzando la membrana. Il materiale in esame si presenta, quindi, molto compatto. I tempi di volo sono maggiori nelle prove con la membrana al silicone rispetto a quelle con il gel, come già avvenuto per i precedenti provini. I valori dell'attenuazione, invece, sono inferiori

utilizzando la membrana rispetto a quelli ottenuti con il gel, in contrasto con quanto visto in precedenza.

Successivamente si è considerato il provino C2 osservabile nella fotografia di figura 6.18 dopo aver eseguito le prove, in cui sono ben visibili gli aloni lasciati dal gel eco-elettro conduttore.



Fig 6.18 – Provino C2.

I valori dei tempi di volo e delle attenuazioni nelle tre direzioni, ottenuti dalle prove, sono riportati in tabella 6.16, mentre le velocità delle onde e le attenuazioni per metro sono inserite in tabella 6.17.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu\text{s}$ )		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)		
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana	
<b>0</b> <b>y</b>	<b>a</b>	77,1	77,5	26,7	34,8	21,6	29,7
	<b>b</b>	77,2	77,8	29,0	32,0	23,9	26,9
	<b>c</b>	77,4	77,9	24,3	29,7	19,2	24,6
	<b>d</b>	76,9	77,6	23,9	24,7	18,8	19,6
	<b>d</b>	77,2	77,9	23,3	32,0	18,2	26,9
<b>z (1)</b>		30,2	30,9	18,2	18,4	13,1	13,3
		30,2	30,9	18,2	17,8	13,1	12,7
		30,1	30,8	17,0	20,9	11,9	15,8
		30,1	30,8	19,5	19,9	14,4	14,8
<b>x (2)</b>		29,8	30,6	27,5	20,5	22,4	15,4
		29,8	30,6	28,7	20,1	23,6	15,0
		29,7	30,5	26,2	18,4	21,1	13,3
		29,7	30,5	31,5	22,8	26,4	17,7

Tab 6.16 – Valori ottenuti per il provino C2.

Direzione	Lunghezza (cm)	Velocità onde (dB)		Attenuazione/metro (dB/m)		
		Gel	Membrana	Gel	Membrana	
<b>0</b> <b>y</b>	<b>a</b>	50	6485	6452	43,2	59,4
	<b>b</b>	50	6477	6427	47,8	53,8
	<b>c</b>	50	6460	6418	38,4	49,2
	<b>d</b>	50	6502	6443	37,6	39,2
	<b>d</b>	50	6477	6418	36,4	53,8
<b>z (1)</b>		20	6623	6472	65,5	66,5
		20	6623	6472	65,5	63,5
		20	6645	6494	59,5	79,0
		20	6645	6494	72,0	74,0
<b>x (2)</b>		20	6711	6536	112,0	77,0
		20	6711	6536	118,0	75,0
		20	6734	6557	105,5	66,5
		20	6734	6557	132,0	88,5

Tab 6.17 – Elaborazione dei risultati per il provino C2.

Si è infine proceduto a determinare i valori medi dei tempi di volo  $\Delta t$ , delle velocità  $V_p$  e delle attenuazioni  $A/m$  (tab 6.18).

Direzione	Tempo di volo ( $\mu\text{s}$ )		Velocità onde (m/s)		Attenuazione/metro (dB/m)	
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
y	77,2	77,7	6480	6432	40,7	51,1
z (1)	30,2	30,9	6634	6483	65,6	70,8
x (2)	29,8	30,6	6723	6547	116,9	76,8

Tab 6.18 – Medie dei valori ottenuti per il provino C2.

I valori delle velocità  $V_p$  ottenuti per il provino C2 sono molto simili a quelli del provino C1 e anche le attenuazioni sono caratterizzate da una stretta analogia. Come per i precedenti campioni sono stati rilevati tempi di volo maggiori utilizzando la membrana, rispetto a quelli misurati impiegando il gel. Lungo le direzioni y e z i valori dell'attenuazione sono più elevati nelle prove con la membrana, mentre lungo la direzione x vale il contrario di quanto appena affermato. Lungo quest'ultima direzione sembrano più realistiche le attenuazioni rilevate con la membrana, in quanto quelle misurate con il gel risultano essere eccessivamente elevate.

### 6.3.4 – Provino di marmo di Lasa

Il marmo di Lasa viene estratto dalle cave nel comune di Lasa, in Val Venosta situata nella Provincia Autonoma di Bolzano ed è stato utilizzato, ad esempio, per scolpire la statua di Walther von der Vogelweide nella piazza principale della città di Bolzano. Il materiale in esame è costituito da cristalli di dimensioni maggiori rispetto a quelli dei marmi provenienti dalla cava Canalgrande situata nella zona di Carrara. Questa caratteristica rende particolarmente interessante l'esecuzione di prove ad ultrasuoni per verificare come le dimensioni dei cristalli influenzino la velocità delle onde e l'attenuazione. Il provino considerato è un prisma di dimensioni 11 x 15 x 20 cm che si può osservare in figura 6.20. Sono state effettuate misure al centro di ogni faccia del provino, nelle tre direzioni x, y e z. I punti e le direzioni di misura sono riportati in figura 6.19 in colore verde.

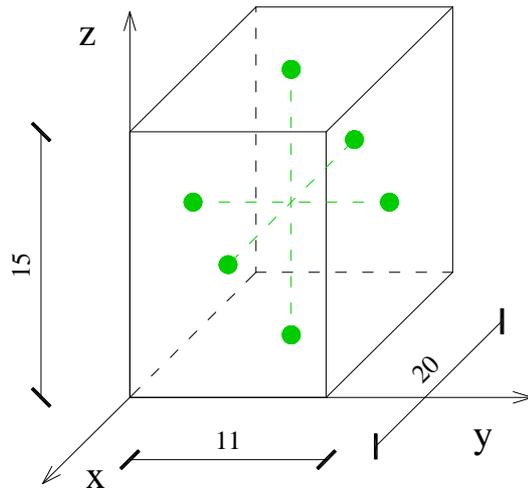


Fig 6.19 – Dimensioni e punti di misura del provino di marmo di Lasa.

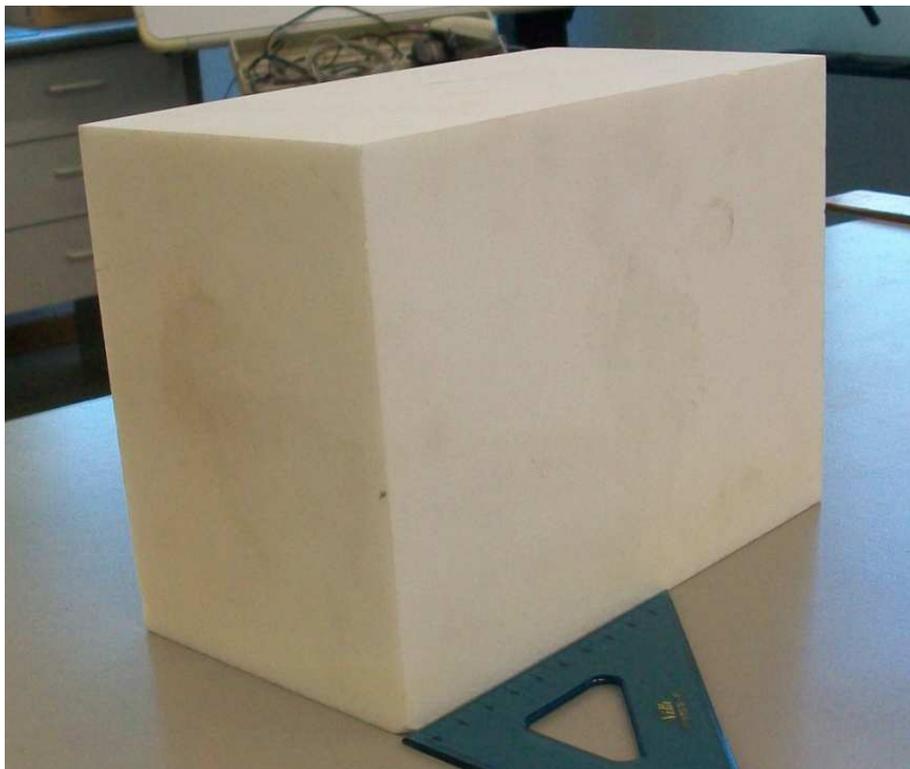


Fig 6.20 – Provino di marmo di Lasa.

Con le stesse modalità viste per i precedenti provini e considerando sempre un guadagno, nel caso di sonde a contatto, pari a 5,1 dB, le prove ad ultrasuoni hanno fornito i risultati riportati in tabella 6.19. Conoscendo le dimensioni del provino e utilizzando la formula 6.4 sono state calcolate le

velocità delle onde P riportate in tabella 6.20 insieme alle attenuazioni per unità di lunghezza.

Direzione	Tempo di volo ( $\mu\text{s}$ )		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)	
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
x	37,8	38,5	23,7	36,5	18,6	31,4
y	25,9	25,9	25,5	25,5	20,4	20,4
z	34,1	34,8	31,8	35,8	26,7	30,7

Tab 6.19 – Valori ottenuti per il provino di marmo di Lasa.

Direzione	Lunghezza (cm)	Velocità onde (m/s)		Attenuazione/metro (dB/m)	
		Gel	Membrana	Gel	Membrana
x	20	5291	5195	93,0	157,0
y	11	4247	4247	185,5	185,5
z	15	4399	4310	178,0	204,7

Tab 6.20 – Elaborazione dei risultati per il provino di marmo di Lasa.

Si può notare immediatamente che le velocità delle onde P sono decisamente inferiori rispetto a quelle ottenute dai precedenti provini. In media, infatti, per il marmo di Lasa è stata rilevata una velocità delle onde di circa 4615 m/s contro i 6749 m/s misurati per i provini di marmo della cava Canalgrande. Per quanto riguarda le attenuazioni, invece, si sono riscontrati valori pari in media a 167 dB/m, quasi il triplo di quelli ottenuti dai precedenti provini che erano di circa 60 dB/m. Sulla base di tali risultati è possibile concludere che la composizione cristallina influenza i parametri dei marmi, in quanto all'aumentare delle dimensioni dei cristalli si assiste ad una graduale diminuzione della velocità delle onde P e ad un aumento dei valori dell'attenuazione. I tempi di volo rilevati con la membrana, inoltre, sono

superiori a quelli ottenuti con il gel, in analogia con quanto visto per gli altri provini di marmo. Questo vale anche per i valori dell'attenuazione

## **6.4 - Prove su campioni di rocce di diversa natura**

Al fine di effettuare un confronto tra i parametri rilevati mediante prove ad ultrasuoni, sono stati utilizzati provini costituiti da rocce di diverso tipo, in dotazione presso il Laboratorio di Geoingegneria e Risorse Naturali dell'Università di Bologna. Questi provini sono stati suddivisi in base ai differenti processi di formazione delle rocce che li compongono, per cui si sono considerati inizialmente due campioni di gneiss che, come il marmo, è una roccia metamorfica. In seguito si sono analizzati un provino di porfido e uno di granito, entrambi esempi di rocce magmatiche. Infine si sono presi in esame campioni di rocce sedimentarie, in particolare uno di arenaria, uno di calcare tipo Trani, uno di pietra d'Istria ed uno di pietra leccese.

### **6.4.1 – Rocce metamorfiche : gneiss**

I primi campioni ad essere analizzati sono stati due cilindri di *gneiss*. Lo gneiss è una roccia metamorfica a tessitura scistosa composta prevalentemente da quarzo, feldspati e miche e avente una struttura blastica a grana grossolana. Una roccia si definisce metamorfica quando ha subito una trasformazione rispetto alla struttura originaria, la quale che può interessare sia il tipo di minerali di cui la roccia è composta, sia la loro forma e disposizione all'interno della roccia stessa. Il primo campione, denominato SER1 presenta l'asse di carico (lungo la direzione *y*) ortogonale alla stratificazione, mentre il secondo, denominato SER2, ha l'asse di carico parallelo alla stratificazione. I due provini, inoltre, si differenziano anche per la loro lunghezza, in quanto il primo è lungo 9,5 cm, mentre il secondo 10 cm. Entrambi, però, presentano un raggio di base di 2,5 cm. La prova ad ultrasuoni è stata effettuata lungo la direzione *y*, appoggiando, quindi, le sonde, al centro delle due basi. In figura 6.21 sono rappresentati i due provini con l'indicazione delle direzioni e dei punti di misura in colore verde. In

figura 6.22 è riportata una fotografia che consente di osservare il diverso orientamento della stratificazione presente nei due campioni.

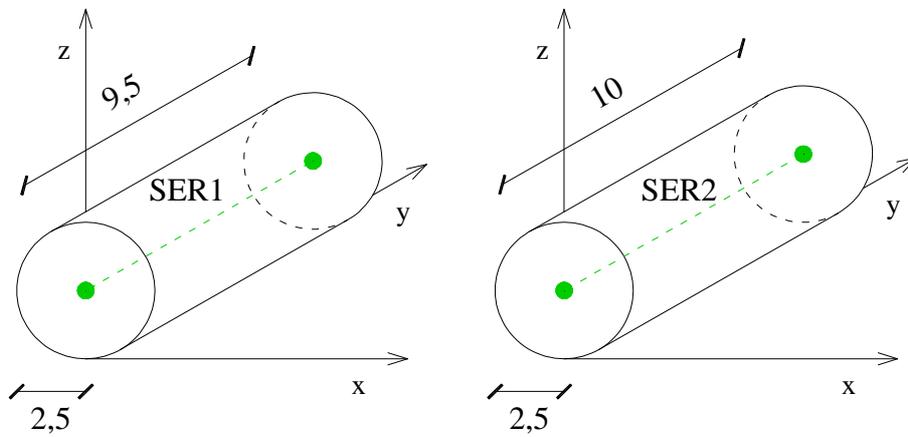


Fig 6.21 – Dimensioni e punti di misura provini di gneiss.



Fig 6.22 – Provini di gneiss.

Secondo le modalità viste per i provini di marmo, le prove ad ultrasuoni sono state effettuate utilizzando lo strumento Epoch 1000 che consente di misurare direttamente i tempi di volo. Determinati i guadagni e utilizzando la formula

6.3 è stato possibile determinare l'attenuazione lungo la direzione considerata. In tabella 6.21 sono riportati i risultati delle prove eseguite.

Provino	Tempo di volo ( $\mu\text{s}$ )		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)	
	Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>SER1</b>	37,1	38,7	42,2	42,3	37,1	37,2
<b>SER2</b>	29,2	29,7	36,7	44,1	31,6	39,0

Tab 6.21 – Valori ottenuti per i provini di gneiss.

Conoscendo le dimensioni dei provini sono state determinate le attenuazioni A/m e mediante la formula 6.4, sono state calcolate le velocità delle onde P (tab 6.22).

Provino	Lunghezza (cm)	Velocità onde (m/s)		Attenuazione/metro (dB/m)	
		Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>SER1</b>	9,5	2561	2455	390,5	391,6
<b>SER2</b>	10	3425	3367	316,0	390,0

Tab 6.22 – Elaborazione dei risultati per i provini di gneiss.

Dai valori della tabella 6.22 emerge che le velocità delle onde P sono state in media pari a 2500 m/s per il primo provino e di 3400 m/s per il secondo, mentre le attenuazioni medie sono state rispettivamente di 391 dB/m e 350 dB/m. La velocità delle onde  $V_p$  quindi è maggiore lungo la direzione parallela alla stratificazione, mentre l'attenuazione assume valori più elevati lungo la direzione ortogonale alla stratificazione stessa. Questi risultati sono coerenti con quanto ci si aspettava dal punto di vista teorico, in quanto le onde incontrano meno ostacoli viaggiando parallelamente alla stratificazione. Di conseguenza queste onde assumono una velocità maggiore e sono soggette ad una minore attenuazione rispetto alle onde dirette ortogonalmente agli strati. I

tempi di volo e le attenuazioni rilevati durante le prove con la membrana, inoltre, sono maggiori di quelli ottenuti dalle prove con gel.

In seguito è stata effettuata un'analisi petrografica su questo materiale utilizzando un *microscopio polarizzatore* in modo da poter osservare le microstrutture presenti. Il microscopio polarizzatore si distingue da quello ottico per la presenza di:

- un *polarizzatore* che è un filtro posto tra sorgente luminosa e tavolino portaoggetti che converte la luce da parallela a polarizzata;
- un *analizzatore* cioè un filtro posto tra obiettivo e oculare la cui attivazione in contemporanea con il filtro polarizzatore porta alla cosiddetta condizione di *estinzione*, ovvero all'annullamento del raggio luminoso incidente.

A seconda di come vengono usati polarizzatore e analizzatore si possono avere due diversi metodi di analisi:

- osservazione con solo polarizzatore (*osservazione a nicols paralleli*);
- osservazione con polarizzatore e analizzatore inseriti contemporaneamente (*osservazione a nicols incrociati*).

In figura 6.23 sono riportate due immagini in microscopia di un provino di gneiss di cui la prima è ottenuta utilizzando solo il polarizzatore, mentre la seconda deriva da un'osservazione a nicols incrociati. La lunghezza del metro in basso a destra di ogni figura è 100 micron.

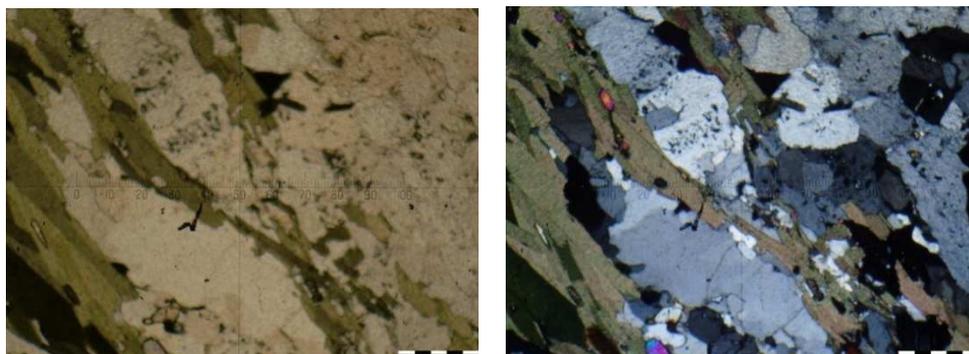


Fig 6.23 – Immagini in microscopia a luce trasmessa al solo polarizzatore (a sinistra) e a nicols incrociati (a destra) di un provino di gneiss.

La funzione dei nicols incrociati è quella di utilizzare il fenomeno del *pleocroismo* dei minerali. Con il passaggio della luce in condizioni di

estinzione, eliminando quindi la luce incidente, ogni cristallo ha infatti un suo colore particolare che ne permette l'identificazione. Analizzando l'immagine a destra di figura 6.27 in cui è ben evidente la direzione di orientazione, si possono notare in marrone le miche mentre gli altri elementi sono cristalli di quarzo e feldspati. Nell'immagine di sinistra questi ultimi non sono distinguibili mentre con i nicols incrociati è possibile osservare ogni singolo cristallo.

#### 6.4.2 – Rocce magmatiche : porfido e granito rosa di Baveno

I due esempi di rocce magmatiche che sono stati presi in esame sono il *porfido* e il *granito rosa di Baveno*. Il *porfido* è una roccia magmatica che si forma quando il magma, arrivato in superficie e trasformatosi in lava, subisce un processo di raffreddamento molto rapido a causa del repentino abbassamento delle temperature. Il *porfido* presenta una struttura *porfirica*, costituita da una massa microcristallina o vetrosa in cui sono immersi grossi cristalli detti *fenocristalli* che la lava non è riuscita a fondere. La composizione mineralogica è data quarzo, ortoclasio, plagioclasio e biotite. Il provino utilizzato ha forma cilindrica e presenta una lunghezza di 10 cm e un raggio di base di 2,5 cm. La prova ad ultrasuoni è stata effettuata lungo la direzione *y* e i punti e le direzioni di misura sono rappresentati in figura 6.24.

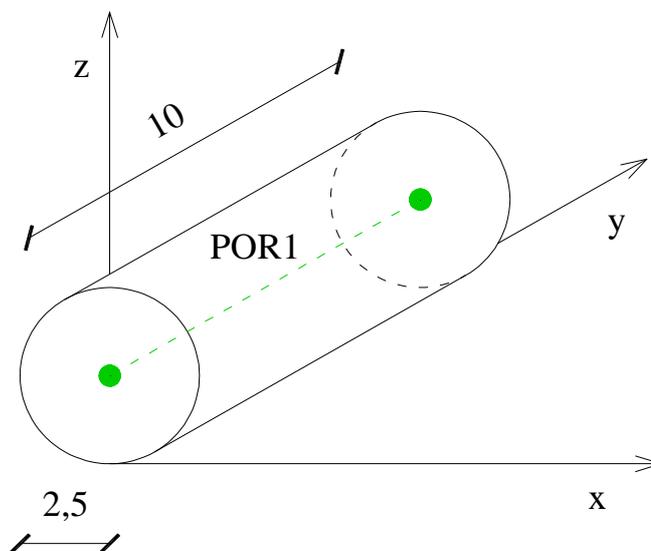


Fig 6.24 – Dimensioni e punti di misura del provino di porfido.

Il provino analizzato, inoltre, è identificato dalla sigla POR1 e può essere osservato in figura 6.25.



Fig 6.25 – Provino di porfido.

Anche per questo materiale è stata effettuata un'analisi petrografica con le stesse modalità viste per i precedenti provini. In figura 6.26 sono riportate due immagini di cui quella di sinistra è stata ottenuta mediante un'osservazione con solo polarizzatore mentre quella di destra mediante un'osservazione a nicols incrociati. In quest'ultima è possibile notare in alto e a sinistra alcuni cristalli grossi bianchi o neri che sono i fenocristalli del materiale.

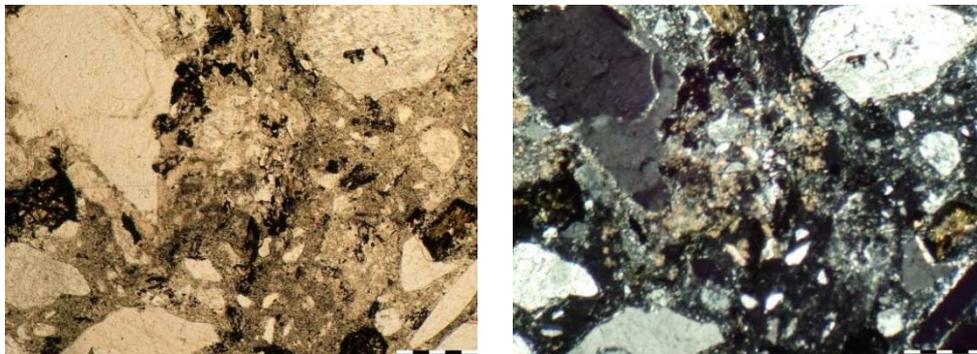


Fig 6.26 – Immagini in microscopia a luce trasmessa al solo polarizzatore (a sinistra) e a nicols incrociati (a destra) di un provino di porfido.

Il granito, invece, è una roccia magmatica intrusiva, formatasi, cioè, in profondità, a seguito di un processo di raffreddamento lento e graduale. Questo porta alla formazione di strutture cristalline ben definite e consente alle particelle che costituiscono i minerali di assumere una disposizione ordinata. Il granito è formato prevalentemente da quarzo, feldspati, plagioclasio e miche. La varietà rosa di Baveno viene estratta dalle cave nel comune di Baveno, situato sulle sponde del lago Maggiore. Il suo colore deriva dalla presenza dell'ortoclasio rosa unitamente all'oligoclasio bianco, al quarzo incolore e alla mica biotite nera. Il provino, avente forma prismatica di dimensioni 10 x 14,9 x 15 cm, è stato analizzato lungo le direzioni x e y, ortogonali rispettivamente alle facce B e A del campione. Nella figura seguente (6.27), in cui è rappresentato il campione, i punti e le direzioni di misura sono disegnati in colore verde. In figura 6.28, invece, è riportata una fotografia del campione oggetto di studio.

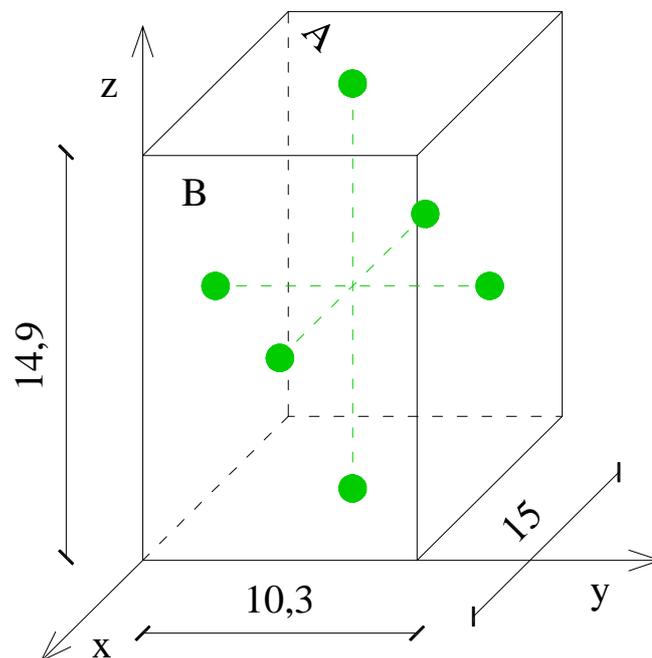


Fig 6.27 – Dimensioni e punti di misura del provino di granito rosa di Baveno.

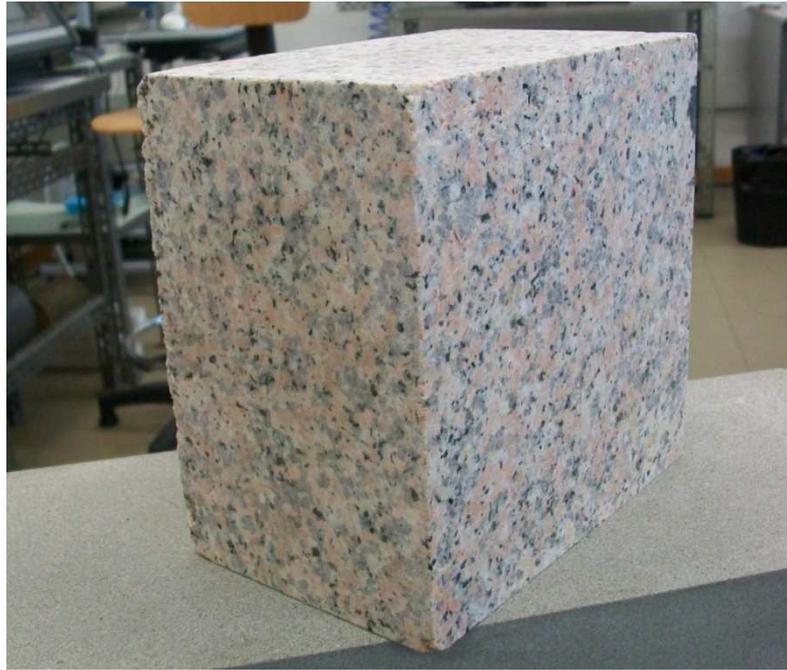


Fig 6.28 – Provino di granito rosa di Baveno.

In figura 6.29 sono riportate due immagini ottenute con il microscopio polarizzatore di cui quella di sinistra è il risultato di un'osservazione al solo polarizzatore mentre quella di destra di un'osservazione a nicols incrociati. Al centro dell'immagine di destra è possibile vedere, colorato in grigio, un feldspato, mentre la parte brillante in alto a destra è un cristallo di quarzo con molte fessure rappresentate da zone di colore scuro. Le fratture intracristalline sono responsabili di un aumento dei valori dell'attenuazione rilevati.

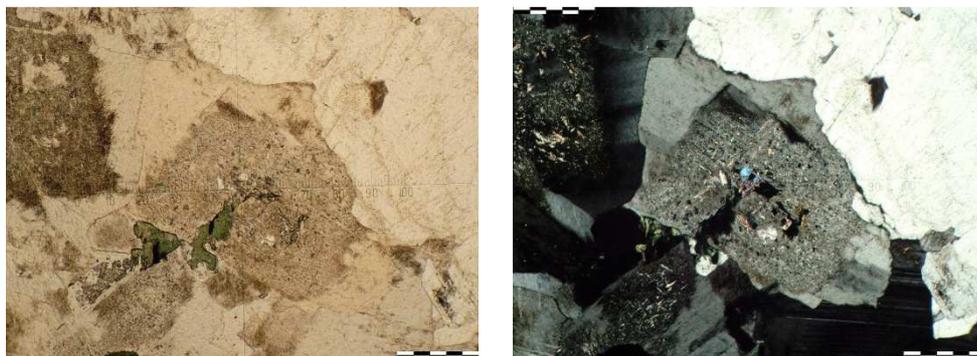


Fig 6.29 – Immagini in microscopia a luce trasmessa al solo polarizzatore (a sinistra) e a nicols incrociati (a destra) di un provino di granito.

Le prove ad ultrasuoni, eseguite secondo le modalità viste per gli altri provini, hanno fornito i risultati riportati in tabella 6.23.

Provino	Direzione	Tempo di volo ( $\mu$ s)		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)	
		Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>Porfido</b>	<b>y</b>	21,0	21,8	28,6	38,5	23,5	33,4
<b>Granito</b>	<b>x</b>	35,8	38,0	45,5	59,4	40,4	54,3
	<b>y</b>	26,0	29,0	55,1	59,2	50,0	54,1
	<b>z</b>	37,0	41,0	55,0	63,5	49,9	58,4

Tab 6.23 – Valori ottenuti per i provini di rocce magmatiche.

Una volta misurati i tempi di volo, conoscendo le dimensioni dei provini, sono state determinate le velocità delle onde P e le attenuazioni per unità di lunghezza (tab 6.24).

Provino	Direzione	Lunghezza (cm)	Velocità onde (m/s)		Attenuazione/metro (dB/m)	
			Gel	Membrana	Gel	Membrana
<b>Porfido</b>	<b>y</b>	10	4762	4587	235	334
<b>Granito</b>	<b>x</b>	15	4190	3947	269,3	362
	<b>y</b>	10,3	3962	3552	485,4	525,2
	<b>z</b>	14,9	4027	3634	334,9	391,9

Tab 6.24 – Elaborazione dei risultati per i provini di rocce magmatiche.

Analizzando i valori della tabella 6.24 è possibile osservare che la velocità delle onde rilevata è mediamente di 4670 m/s per il porfido e di 3880 m/s per il granito, mentre le attenuazioni medie sono rispettivamente di 285 dB/m e 394 dB/m. La velocità di propagazione delle onde è, quindi, maggiore nel porfido, mentre l'attenuazione è più accentuata nel granito. Questo è coerente con ciò che ci si aspettava, in quanto la diversa dimensione dei cristalli dei due materiali influenza le loro proprietà. Il granito, infatti, è costituito da cristalli di dimensioni maggiori di quelli del porfido e questo comporta una

minore velocità di propagazione delle onde al suo interno ed una maggiore attenuazione. Le prove con membrana di silicone, inoltre hanno determinato tempi di volo e attenuazioni più elevate rispetto a quelle effettuate con il gel eco-elettro conduttore.

### 6.4.3 – Rocce sedimentarie: arenarie e calcari

In ultimo sono stati analizzati quattro provini di rocce sedimentarie, in particolare uno di arenaria, , uno di pietra leccese, uno di pietra d'Istria e uno di calcare.

L'*arenaria* è una roccia sedimentaria clastica costituita per il 50% da granuli di dimensioni comprese tra 63  $\mu\text{m}$  e 2 mm e per il resto da una matrice costituita da carbonato di calcio che funge da cemento. In figura 6.30 sono riportate due immagini di cui quella di sinistra è stata ottenuta mediante un'osservazione con solo polarizzatore mentre quella di destra mediante un'osservazione a nicols incrociati. Gli elementi chiari presenti nella figura di destra sono cristalli di quarzo, mentre le zone colorate di marrone rappresentano la matrice di carbonato di calcio.

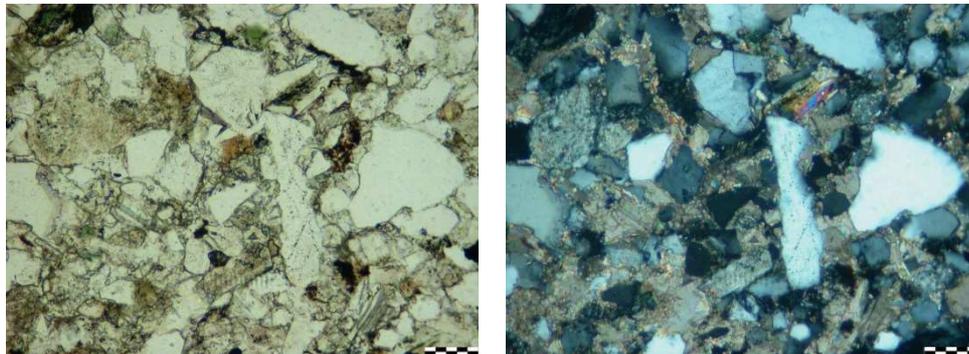


Fig 6.30 – Immagini in microscopia a luce trasmessa al solo polarizzatore (a sinistra) e a nicols incrociati (a destra) di un provino di arenaria.

Il campione studiato (fig 6.32) è un parallelepipedo di dimensioni 14,7 x 14,7 x 37,5 cm in cui le direzioni x e y sono parallele alla stratificazione, mentre la direzione z è ortogonale alla stessa. Sono state effettuate misurazioni lungo le tre direzioni posizionando le sonde al centro delle facce

piane del provino. I punti e le direzioni di misura sono rappresentati in figura 6.36 mediante cerchi di colore verde.

La *pietra leccese* è una roccia calcarea che risale al Miocene (periodo dell'era del Terziario durato da 23 a 17 milioni di anni fa). È caratterizzata dalla presenza di numerosi frammenti di fossili rappresentati soprattutto da specie planctoniche e all'esame petrografico risulta costituita da un impasto granulare (microfossili, frammenti di fossili) inglobato nel cemento calcidico. Questo può essere osservato nelle immagini in microscopia di figura 6.35. Nell'immagine di sinistra, ottenuta da un'osservazione al solo polarizzatore, si possono notare molte zone bianche che rappresentano i vuoti esistenti nel materiale e quindi la porosità della pietra. Questa elevata porosità comporta un aumento dei valori dell'attenuazione e una diminuzione della velocità delle onde.

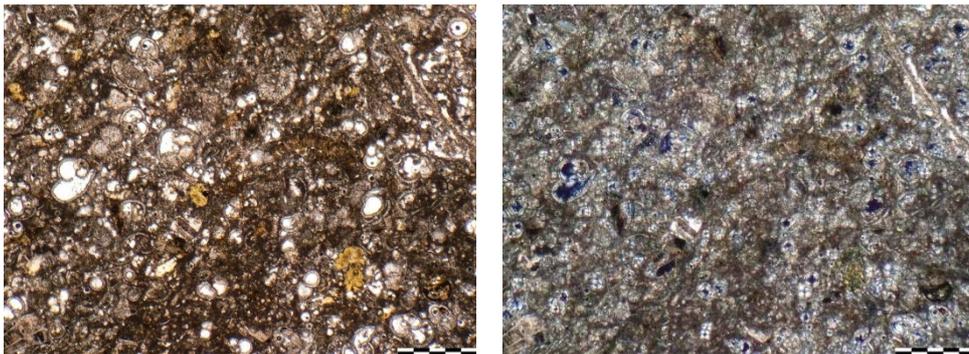


Fig 6.35 – Immagini in microscopia a luce trasmessa al solo polarizzatore (a sinistra) e a nicols incrociati (a destra) della pietra leccese.

Il provino studiato (fig 6.34) è un prisma di dimensioni 14,5 x 23,7 x 15,3 cm e le prove hanno riguardato tutte e tre le direzioni riportate in figura 6.33.

La *pietra d'Istria* è una roccia sedimentaria calcarea di colore dal bianco latte all'avorio, al cui interno è possibile riconoscere diverse tipologie classificative. Questa pietra è stata utilizzata per la costruzione dei più bei palazzi e ponti della città di Venezia. Il campione analizzato è un cubo di lato 7 cm osservabile in figura 6.36. Sono state effettuate prove ad ultrasuoni lungo le tre direzioni riportate in figura 6.35, disponendo le sonde al centro delle facce.

L'ultimo campione preso in esame è stato un prisma di *calcare tipo Trani*, compatto con molte fratture ricementate avente dimensioni 9,5 x 30 x 20 cm ( fig 6.38). Anche in questo caso sono state effettuate misure lungo le tre direzioni e in figura 6.37 è possibile osservare i punti e le direzioni di misura.

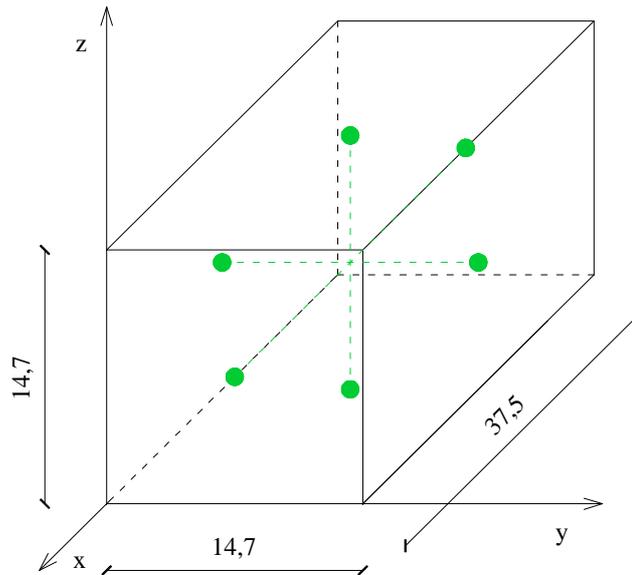


Fig 6.31 – Dimensioni e punti di misura del provino di arenaria.



Fig 6.32 – Provino di arenaria.

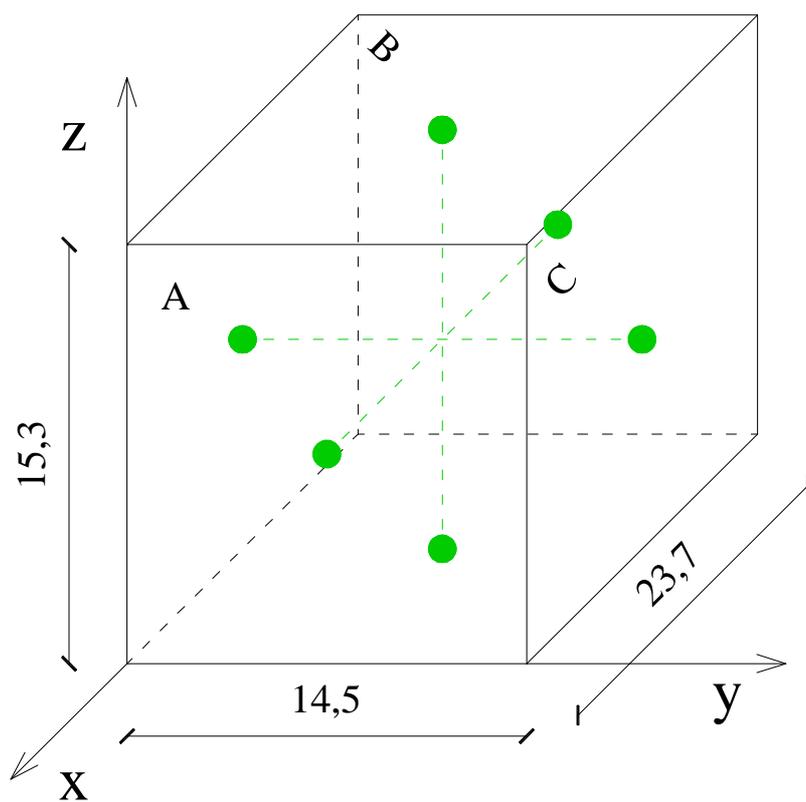


Fig 6.33 – Dimensioni e punti di misura del provino di pietra leccese.

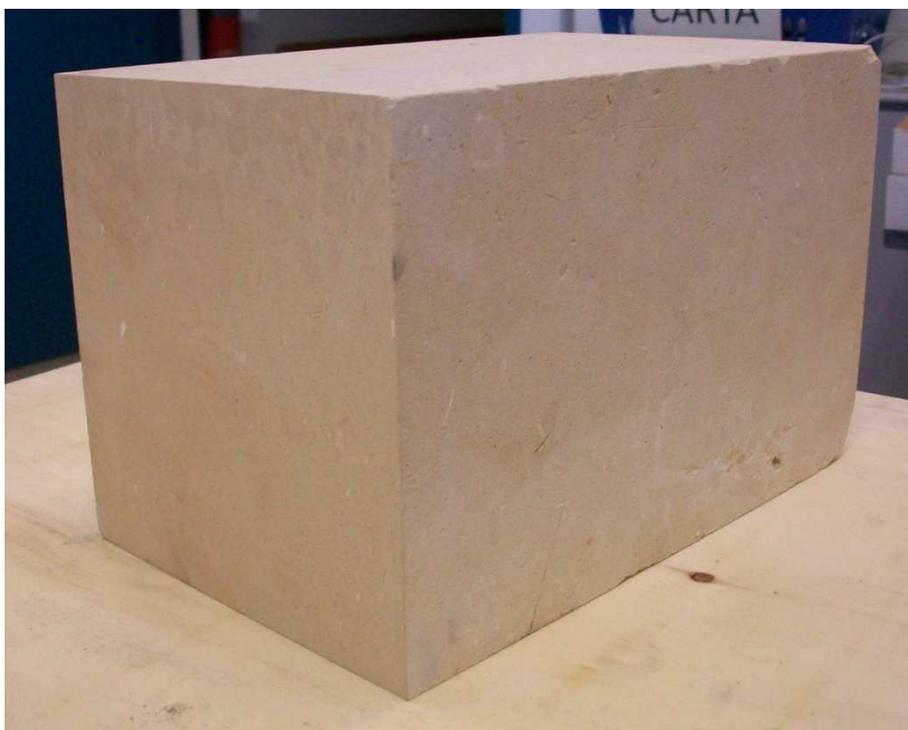


Fig 6.34 – Provino di pietra leccese.

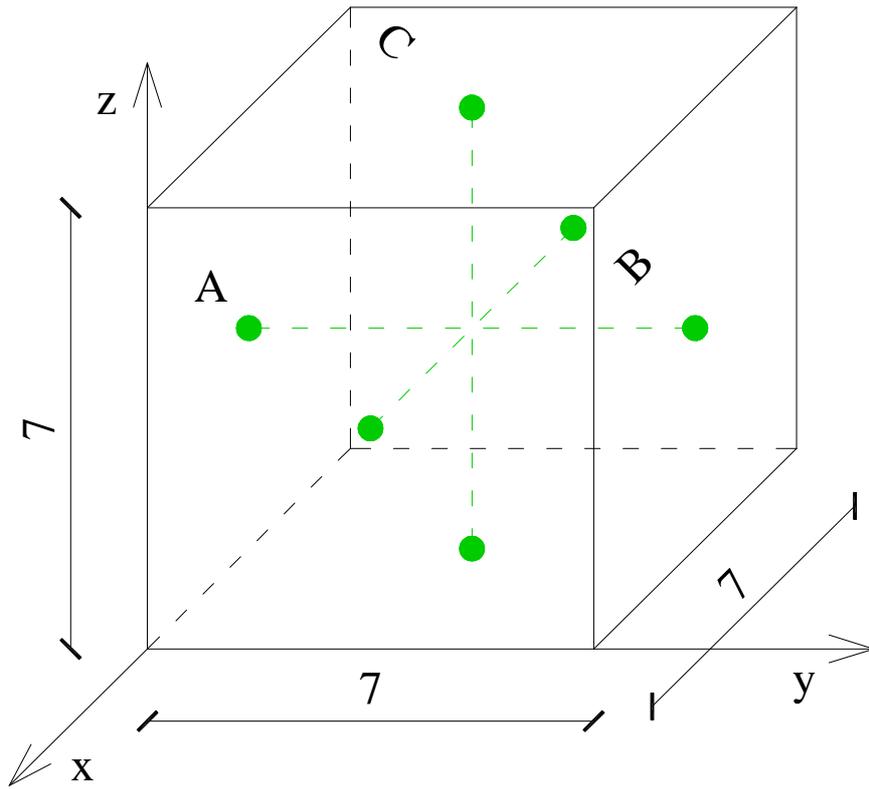


Fig 6.35 – Dimensioni e punti di misura del provino di pietra d'Istria.

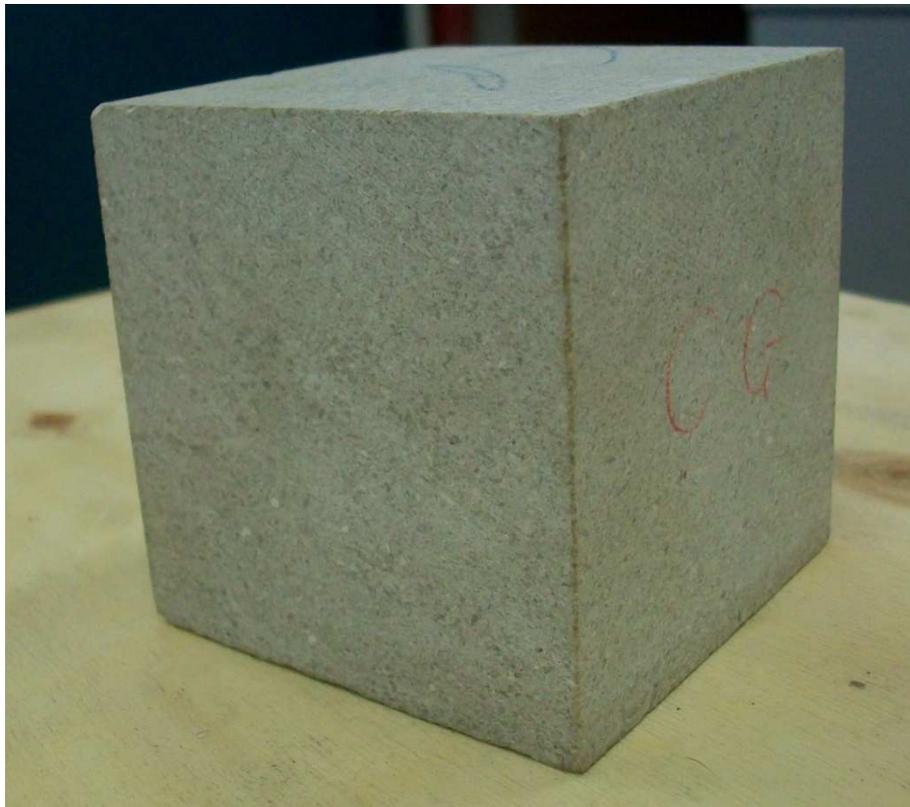


Fig 6.36 – Provino di pietra d'Istria.

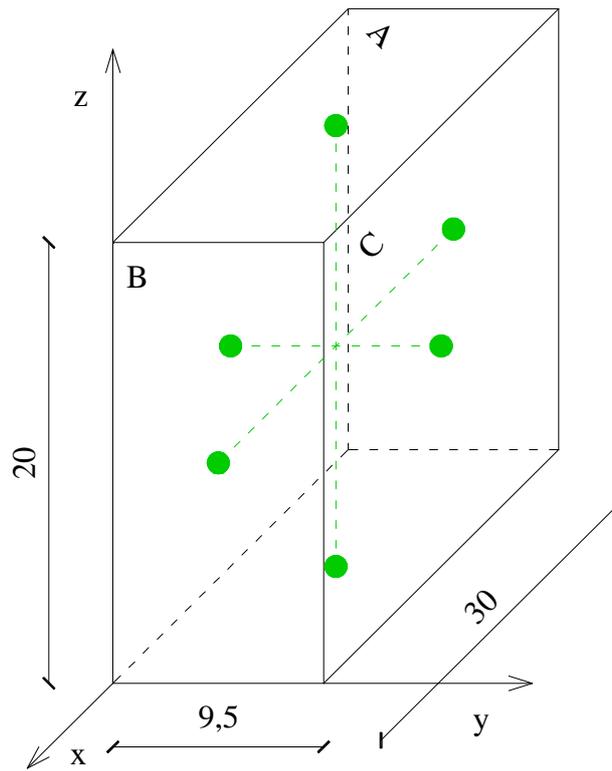


Fig 6.37 – Dimensioni e punti di misura del provino di calcare.

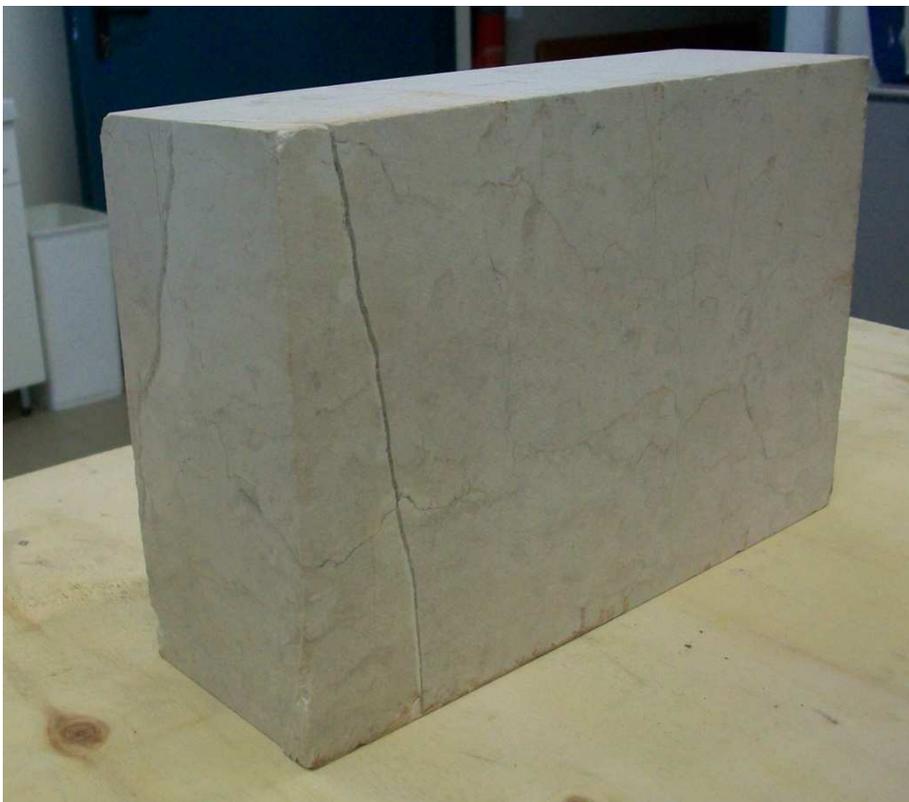


Fig 6.38 – Provino di calcare.

Con le stesse modalità viste per gli altri tipi di rocce sono stati determinati i tempi di volo e le attenuazioni lungo le direzioni considerate. I risultati delle prove ad ultrasuoni sono riportati in tabella 6.25.

Provino	Direzione	Tempo di volo ( $\mu$ s)		Guadagno (dB)		Attenuazione (dB)	
		Gel	Membrana	Gel	Membrana	Gel	Membrana
Arenaria	x	/	/	/	/	/	/
	y	35,6	37,3	29,4	29,4	24,3	24,3
	z	47,7	49,1	36,8	36,8	31,7	31,7
Pietra leccese	x	67,5	68,4	57,7	33,0	52,6	27,9
	y	43,0	43,9	53,2	26,7	48,1	21,6
	z	46,2	46,7	45,0	39,7	39,9	34,6
Pietra d'Istria	x	10,5	11,3	7,8	9,5	2,7	4,4
	y	10,5	11,3	7,5	9,5	2,4	4,4
	z	10,5	11,2	7,8	8,5	2,7	3,4
Calcere	x	47,1	48,0	24,6	35,2	19,5	30,1
	y	14,9	15,8	16,9	23,4	11,8	18,3
	z	30,8	31,6	19,9	30,6	14,8	25,5

Tab 6.25 – Valori ottenuti per i provini di rocce sedimentarie.

Analizzando la tabella si può notare che non sono stati rilevati valori per il campione di arenaria lungo la direzione x. A causa della porosità del materiale, infatti, il segnale si perde e si confonde con il rumore di fondo. In questo caso sarebbe necessario utilizzare sonde aventi una frequenza minore. Note le dimensioni dei vari campioni e utilizzando la formula 6.4 sono state ottenute le velocità di propagazione delle onde P. Successivamente i valori delle attenuazioni sono stati divisi per la dimensione del provino corrispondente ottenendo così una stima dell'attenuazione per unità di lunghezza (tab 6.26).

Provino	Direzione	Lunghezza ( cm )	Velocità onde (m/s)		Attenuazione/metro (dB/m)	
			Gel	Membrana	Gel	Membrana
Arenaria	x	37,5	/	/	/	/
	y	14,7	4129	3941	165,3	165,3
	z	14,7	3082	2994	215,6	215,6
Pietra leccese	x	23,7	3511	3465	221,9	117,7
	y	14,5	3372	3303	331,7	149,0
	z	15,3	3312	3276	260,8	226,1
Pietra d'Istria	x	7	6667	6195	38,6	62,9
	y	7	6667	6195	34,3	62,9
	z	7	6667	6250	38,6	48,6
Calcere	x	30	6369	6250	65,0	100,3
	y	9,5	6378	6013	124,2	192,6
	z	20	6494	6329	74,0	127,5

Tab 6.26 – Elaborazione dei risultati per i provini di rocce sedimentarie.

Per il campione di arenaria è interessante osservare che la velocità media delle onde lungo la direzione y è pari a circa 4035 m/s e quella in direzione z è di 3038 m/s, mentre i valori medi delle attenuazioni sono rispettivamente di 165,3 m/s e 215,6 m/s. La velocità delle onde, quindi, è maggiore lungo la direzione parallela alla stratificazione, rispetto a quella ottenuta lungo la direzione z ortogonale alla stratificazione stessa. L'attenuazione è, invece, maggiore lungo la direzione z in quanto le onde incontrano più ostacoli viaggiando ortogonalmente alla stratificazione. Questi risultati sono in sintonia con quelli ottenuti per i due provini di gneiss analizzati nel paragrafo 6.4.1 e tagliati uno parallelamente e l'altro ortogonalmente alla stratificazione. Le velocità delle onde per la pietra d'Istria e per il calcare sono circa il doppio di quelle relative alla pietra leccese e all'arenaria. La attenuazioni, invece,

presentano i valori più elevati per la pietra leccese caratterizzata da una notevole porosità (circa 218 dB/m).

Le prove effettuate con la membrana hanno determinato tempi di volo superiori a quelle realizzate con il gel mentre per le attenuazioni bisogna fare alcune distinzioni. Per quanto riguarda la pietra d'Istria e il calcare, infatti, sono stati ottenuti valori maggiori utilizzando la membrana rispetto a quelli determinati con il gel, mentre per la pietra leccese vale il contrario di quanto appena affermato.

Al termine delle prove ultrasoniche è possibile fare alcune considerazioni sugli elementi che influenzano i valori della velocità delle onde e dell'attenuazione. Questi sono riassunti nell'elenco seguente:

- composizione granulometrica: è importante che la lunghezza d'onda sia superiore alla dimensione massima dei grani;
- direzione della stratificazione: la velocità delle onde è maggiore parallelamente alla stratificazione, mentre l'attenuazione è maggiore ortogonalmente alla stessa;
- porosità e presenza di fratture intracristalline del materiale: potrebbero portare ad una diminuzione della velocità delle onde e sicuramente ad un aumento dell'attenuazione;
- lunghezza del percorso: in provini dello stesso materiale le velocità delle onde sono generalmente maggiori su percorsi brevi rispetto ai valori ottenuti su percorsi più lunghi;
- tipo di accoppiamento sonda-provino: effettuando misure con la membrana al silicone sono stati rilevati spesso valori maggiori sia della velocità delle onde che dell'attenuazione rispetto a quelli ottenuti dalle prove con il gel eco-elettro conduttore.

## **7- PROVE MECCANICHE SUI CAMPIONI DI MARMO**

### **7.1 – Introduzione**

Questo ultimo capitolo tratta le prove meccaniche effettuate presso il laboratorio LISG dell'Università di Bologna sui campioni di marmo di dimensioni 5 x 5 x 20 cm, già utilizzati nelle prove ad ultrasuoni descritte nel capitolo precedente. Le prime prove ad essere eseguite sono state quelle di modulo che hanno richiesto preventivamente l'incollaggio di 4 estensimetri elettrici su ognuno dei due provini, 2 disposti longitudinalmente e 2 trasversalmente. I primi consentono di determinare il modulo elastico, mentre quelli trasversali il coefficiente di Poisson del materiale.

Successivamente sugli stessi provini sono state realizzate prove di flessione e infine sui cubetti 5 x 5 x 5 cm ricavati dai monconi sono state effettuate prove di compressione.

### **7.2 – Determinazione delle costanti elastiche**

#### **7.2.1 – Incollaggio degli estensimetri**

Gli *estensimetri* o *strain gauges* sono strumenti che hanno la funzione di misurare la deformazione locale della superficie del corpo sul quale sono applicati. In base al loro principio di funzionamento possono essere classificati in:

- estensimetri elettrici;
- estensimetri meccanici;
- estensimetri acustici;
- estensimetri pneumatici;
- estensimetri ottici.

Gli estensimetri utilizzati in queste prove appartengono alla prima categoria e quindi si basano sull'*effetto piezoresistivo* del materiale conduttore utilizzato,

ovvero sulla variazione di resistenza che questo materiale subisce quando si deforma. È importante osservare che, con l'avvento degli estensimetri elettrici, gli altri tipi hanno perso la loro iniziale importanza e alcuni sono caduti completamente in disuso. Gli estensimetri elettrici più comuni sono quelli metallici costituiti da un filo di lega speciale, generalmente manganina (lega trivalente composta da: 84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) o costantina (lega binaria composta da: 60% Cu, 40% Ni) di resistenza elettrica nota e di diametro molto piccolo (da 0,01 a 0,03mm). Questo filo è disposto a serpentina su un supporto di carta o resina sintetica al quale aderisce. Il supporto viene a sua volta incollato con un adesivo adeguatamente scelto nella zona della superficie del corpo in cui si desidera misurare la deformazione. In figura 7.1 sono rappresentati i componenti fondamentali di un estensimetro elettrico. La lunghezza del film metallico lungo la direzione principale (*gauge length*) è detta *base* dell'estensimetro e non va confusa con l'ingombro longitudinale dell'estensimetro stesso (*backing length*). Questo, infatti, è sempre maggiore della base a causa delle dimensioni più elevate del supporto e della presenza dei terminali della resistenza.

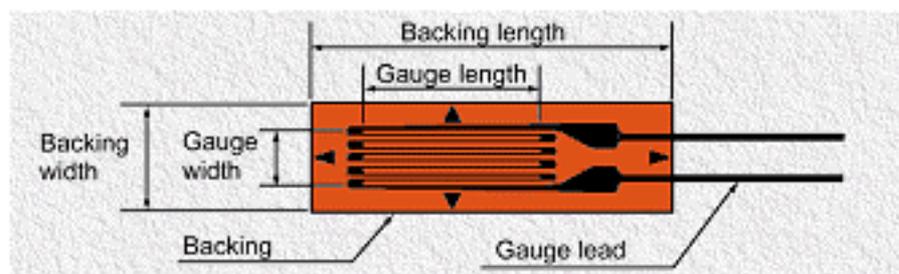


Fig 7.1 – Componenti fondamentali di un estensimetro.

In queste prove di modulo sono stati utilizzati estensimetri di lunghezza 10 mm incollati ai due provini di marmo con l'adesivo M-Bond 200, lo stesso impiegato nell'applicazione dei sensori sulla statua del David. Sono stati posizionati 4 estensimetri per ogni provino, due in direzione longitudinale e due in quella trasversale. Nelle figure 7.2 e 7.3 è possibile osservare i provini A e B al termine delle procedure di incollaggio degli estensimetri.



Fig 7.2 – Provino A con estensimetri.



Fig 7.3 – Provino B con estensimetri.

In figura 7.4 è rappresentato un campione un estensimetro applicato in direzione trasversale sulla faccia superiore e uno incollato in direzione longitudinale su quella inferiore. In figura 7.5 è presente un ingrandimento di un estensimetro trasversale e della terminazione avente la funzione di proteggerlo da eventuali strappi e di collegarlo con i cavi necessari all'esecuzione delle prove, mentre nella figura successiva è presente un particolare di un estensimetro longitudinale. In seguito si è proceduto al collegamento dei cavi del sistema di acquisizione e dei fili conduttori

dell'estensimetro alla terminazione mediante stagnatura. Questa è stata effettuata utilizzando un filo di stagno come quello riportato in figura 7.7.



Fig 7.4 – Estensimetri trasversali e longitudinali applicati su un provino.

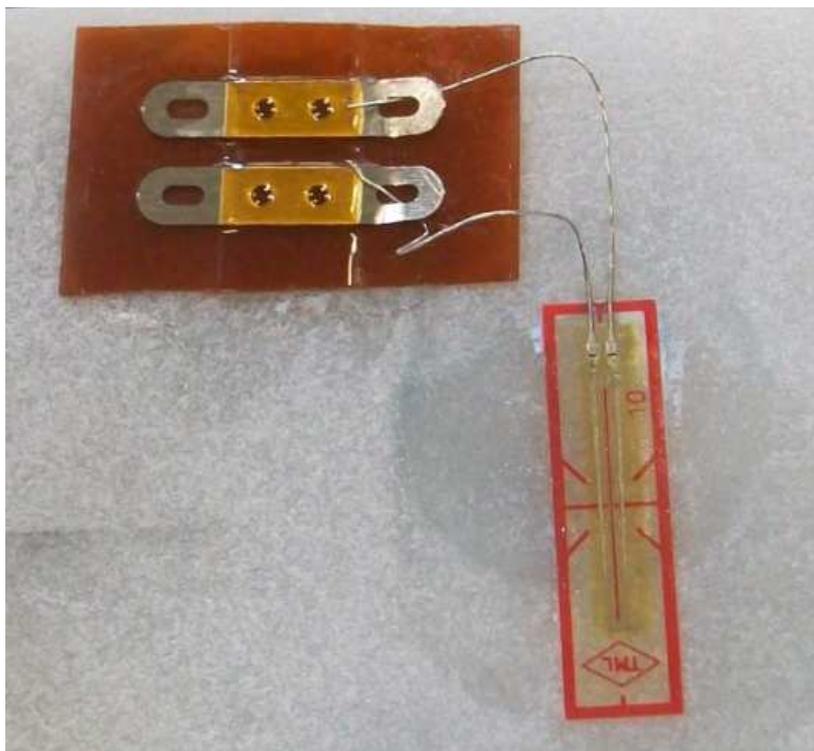


Fig 7.5 – Particolare estensimetro trasversale.

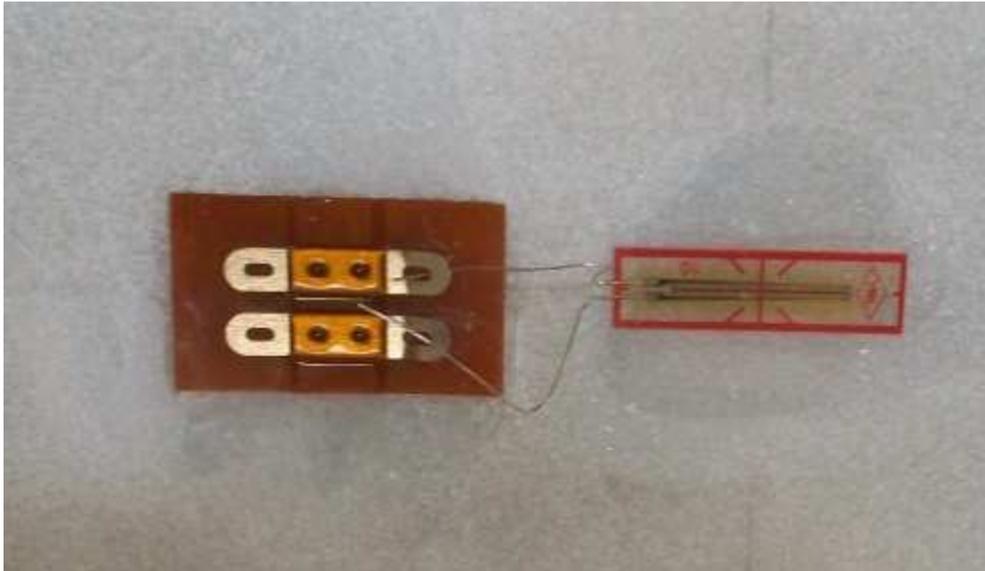


Fig 7.6 – Particolare estensimetro longitudinale.



Fig 7.7 – Filo di stagno utilizzato per la stagnatura.

In figura 7.8 è possibile osservare un estensimetro al termine delle operazioni di stagnatura e quindi già collegato al sistema di acquisizione.

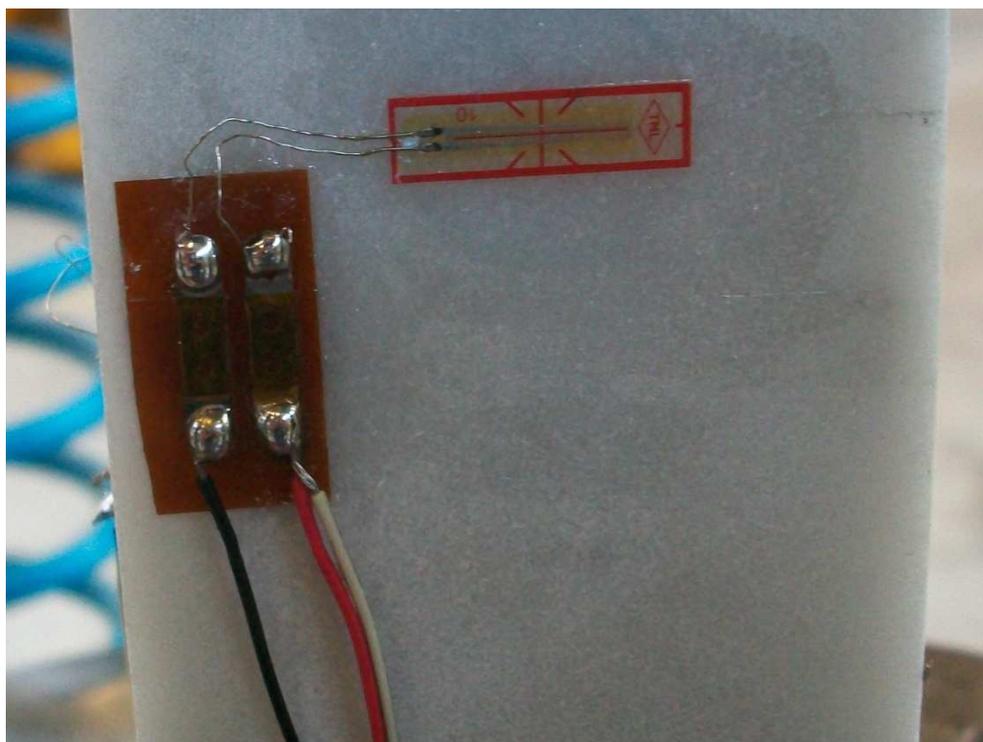


Fig 7.8 – Estensimetro collegato al sistema di acquisizione.

### 7.2.2 – Esecuzione delle prove ed elaborazione dei risultati

Secondo la normativa europea UNI EN 14580 per la determinazione delle costanti elastiche è necessario effettuare tre cicli di carico-scarico che possono essere osservati nel diagramma tensione-tempo di figura 7.9. In questo grafico lungo l'asse x è riportato il tempo in secondi e lungo l'asse y la tensione espressa come percentuale del valor medio della resistenza a compressione.

Prima di iniziare le prove è necessario fissare le tensioni  $\sigma_u$  e  $\sigma_o$  definite rispettivamente tensione di base e tensione superiore. La tensione  $\sigma_u$  secondo la normativa è approssimativamente il 2% del valor medio della resistenza a compressione, mentre la  $\sigma_o$  è circa il 33% della stessa. Ipotizzando una resistenza a compressione di  $75 \text{ N/mm}^2$  queste tensioni diventano:

$$\sigma_u = 2\% \cdot 75 = 1,5 \text{ N/mm}^2 \quad (7.1)$$

$$\sigma_o = 33\% \cdot 75 = 25 \text{ N/mm}^2 \quad (7.2)$$

Le prove di modulo saranno quindi effettuate con tensioni comprese tra 1,5 N/mm<sup>2</sup> e 25 N/mm<sup>2</sup>.

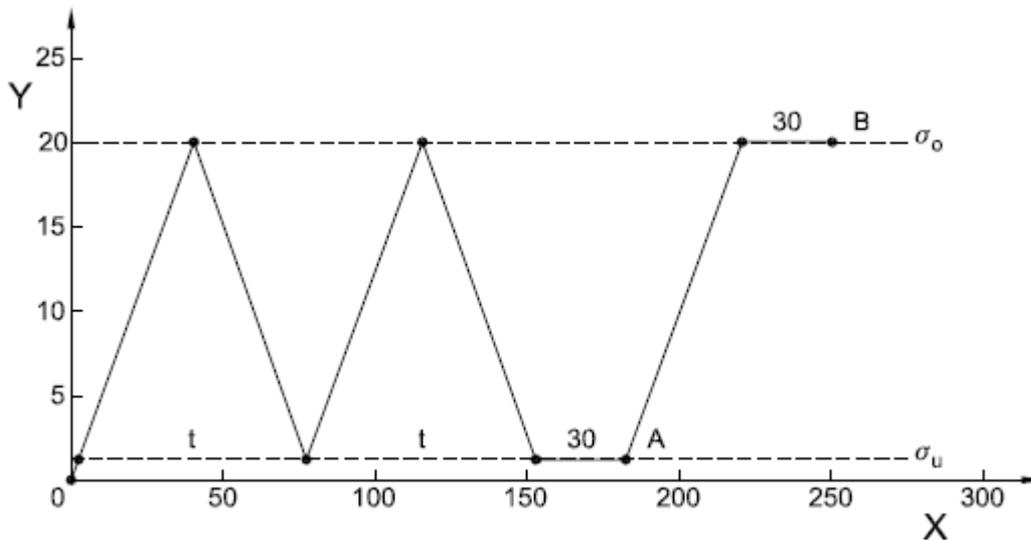


Fig 7.9 – Diagramma tensione-tempo secondo normativa UNI EN 14580.

In figura 7.9 la lettera A indica il punto di misura della tensione  $\sigma_u$  e della deformazione corrispondente  $\varepsilon_u$  prima del terzo ciclo di carico, mentre la lettera B indica il punto di misura della tensione  $\sigma_o$  e della deformazione  $\varepsilon_o$  durante il terzo ciclo di carico.

La normativa prescrive un passo di carico di  $0,5 \pm 0,2$  MPa/s per cui la velocità di carico, ottenuta moltiplicando questo valore per l'area della sezione ( $50 \times 50$  mm), è pari a 1250 N/s. Un altro valore importante da fissare per l'esecuzione delle prove è l'intervallo di carico previsto. Questo può essere ottenuto moltiplicando le tensioni  $\sigma_u$  e  $\sigma_o$  per l'area della sezione. In questo caso è stato determinato un intervallo di carico compreso tra 3750 N e 62500 N. Al termine della prova il modulo elastico E e il coefficiente di Poisson  $\nu$  sono stati calcolati mediante le relazioni seguenti:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u} \quad (7.3)$$

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_{trasv}}{\Delta\varepsilon_{long}} = \frac{\varepsilon_o \text{ trasv} - \varepsilon_u \text{ trasv}}{\varepsilon_o \text{ long} - \varepsilon_u \text{ long}} \quad (7.4)$$

In figura 7.10 è possibile osservare il provino A posizionato al centro del piatto di base della macchina di prova, mentre in quella successiva è riportata la strumentazione elettronica necessaria ad effettuare la prova stessa.



Fig 7.10 – Provino A durante l'esecuzione della prova.



Fig 7.11 – Strumentazione elettronica necessaria all'esecuzione della prova.

Al termine della prova di modulo relativa al provino A sono stati determinati i grafici di figure 7.12 e 7.13. Il primo rappresenta l'andamento della tensione nel tempo ed è importante osservare che questo segue perfettamente l'andamento di figura 7.9 previsto dalla normativa UNI EN 14580.

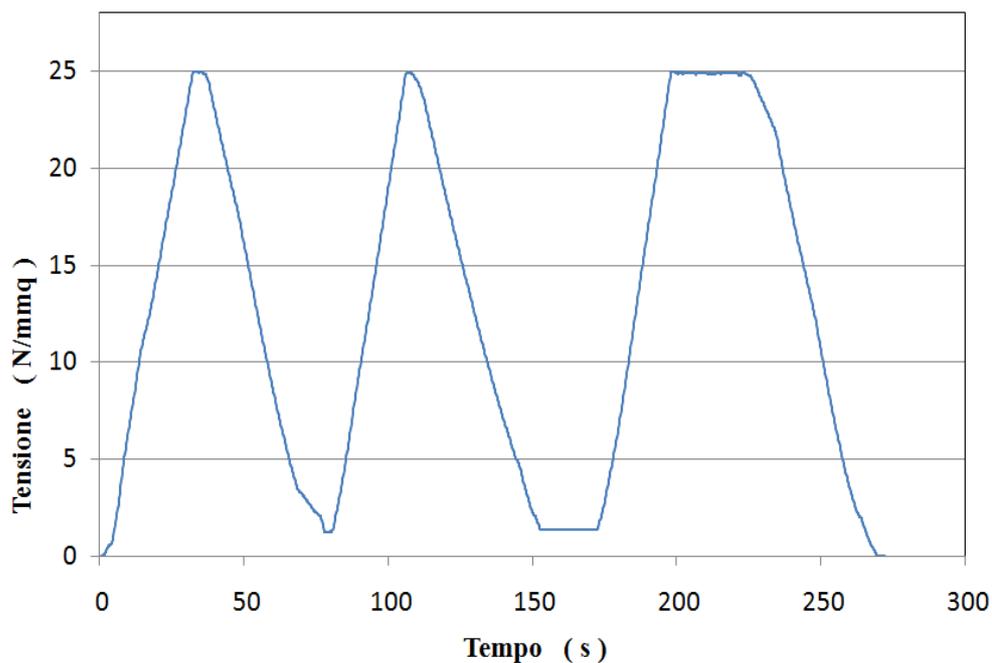


Fig 7.12– Diagramma tensione-tempo provino A.

Il grafico di figura 7.13 riporta l'andamento delle deformazioni rilevate in  $\mu\epsilon$ , in funzione delle tensioni in  $N/mm^2$ . Le linee blu esprimono le deformazioni longitudinali al variare delle tensioni, mentre le linee rosse quelle trasversali. Ai fini del calcolo delle costanti elastiche la parte di diagramma di interesse è quella compresa tra i punti A e B (cfr fig 7.9), per cui in figura 7.13 è rappresentato il grafico tensione-deformazione relativo unicamente a questo tratto. I valori di tensione e di deformazione ottenuti sono i seguenti:

- Punto A:  $\sigma_u = 1,37 N/mm^2$  ;  $\epsilon_{u \text{ long}} = -24,10 \mu\epsilon$ ;  $\epsilon_{u \text{ trasv}} = 6,70 \mu\epsilon$ ;
- Punto B:  $\sigma_o = 24,87 N/mm^2$  ;  $\epsilon_{o \text{ long}} = -313,16 \mu\epsilon$ ;  $\epsilon_{o \text{ trasv}} = 104,62 \mu\epsilon$ .

Assumendo le deformazioni longitudinali positive e applicando le relazioni 7.3 e 7.4 sono stati determinati il modulo elastico E e il coefficiente di Poisson  $\nu$  pari a :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{24,87 - 1,37}{0,000313 - 0,000024} = 81315 \text{ N/mm}^2 \quad (7.5)$$

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_{trasv}}{\Delta\varepsilon_{long}} = \frac{0,000105 - 0,0000067}{0,000313 - 0,000024} = 0,34 \quad (7.6)$$

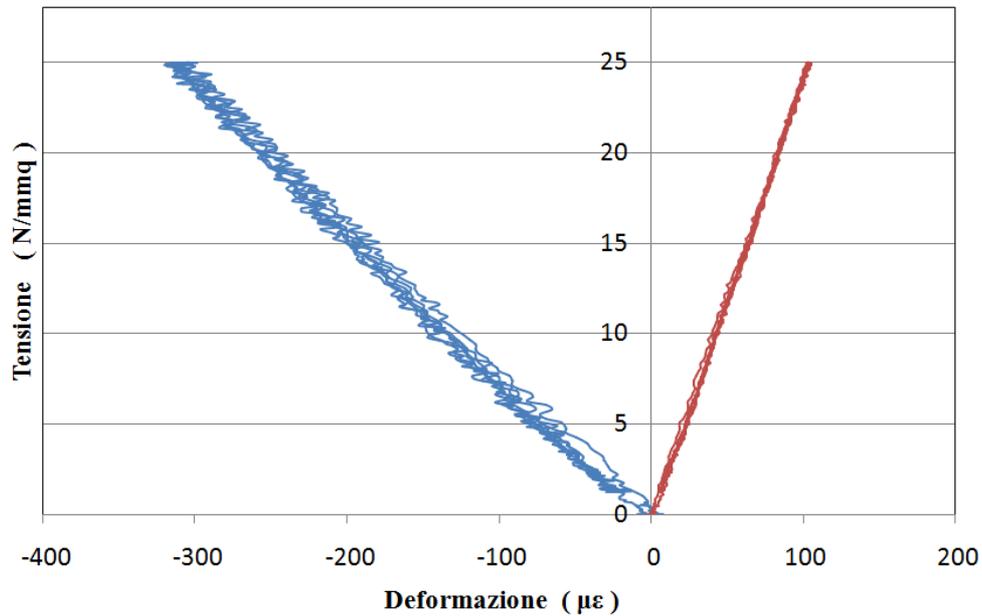


Fig 7.13 – Diagramma tensione-deformazione provino A  
(blu = def. longitudinali, rosso = def. trasversali).

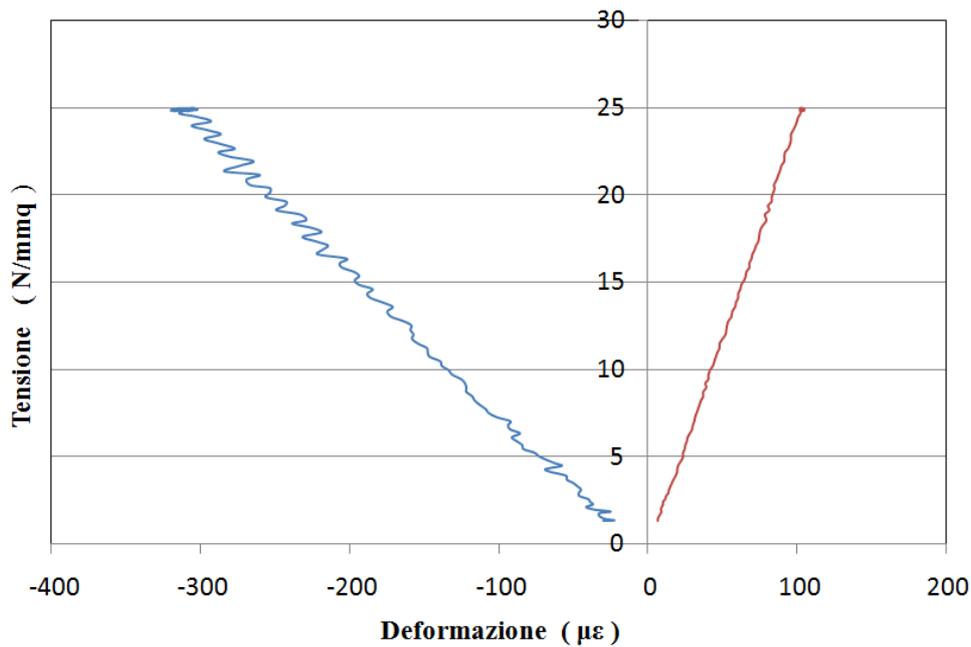


Fig 7.14 – Diagramma tensione-deformazione provino A relativo  
al tratto AB.

Con le stesse procedure operative è stata effettuata una prova di modulo anche per il provino B. In figura 7.15 è riportato il grafico tensione-tempo ottenuto, mentre in quella successiva l'andamento delle deformazioni in funzione delle tensioni. Anche in questo caso le linee blu rappresentano le deformazioni longitudinali e le rosse quelle trasversali.

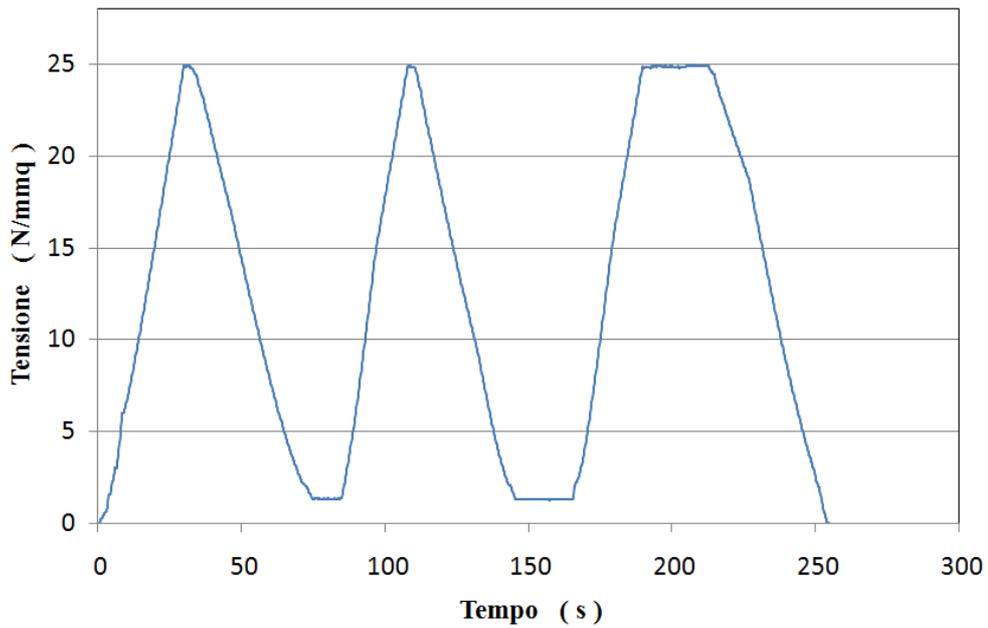


Fig 7.15 – Diagramma tensione-tempo provino B.

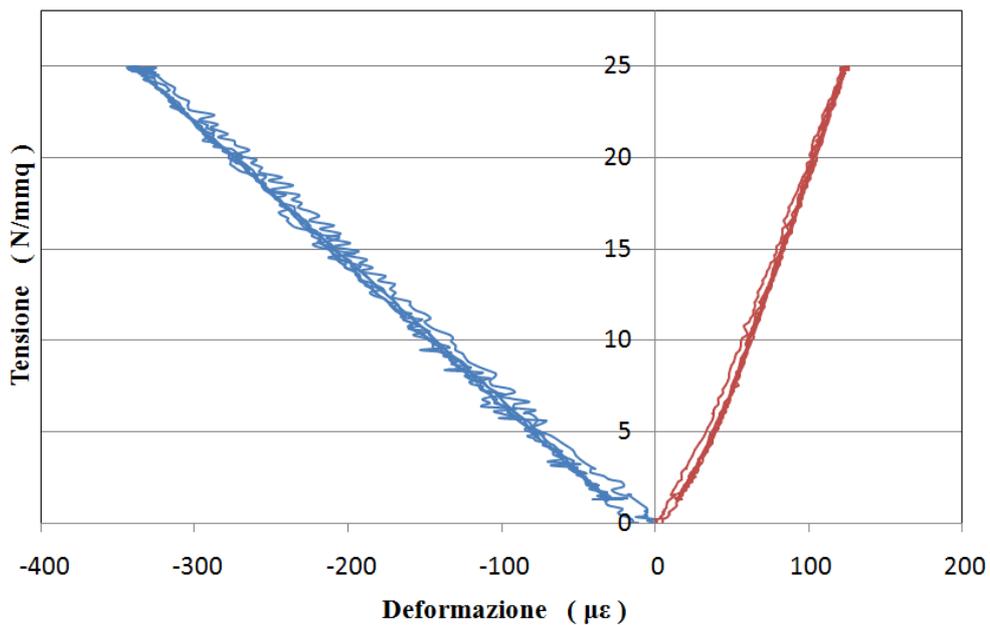


Fig 7.16 – Diagramma tensione-deformazione provino B  
(blu = def. longitudinali, rosso = def. trasversali).

La parte di diagramma di interesse per la determinazione di E e  $\nu$  è quella compresa tra i punti A e B (cfr fig 7.9), per cui in figura 7.17 è rappresentato il grafico tensione-deformazione relativo unicamente a questo tratto.

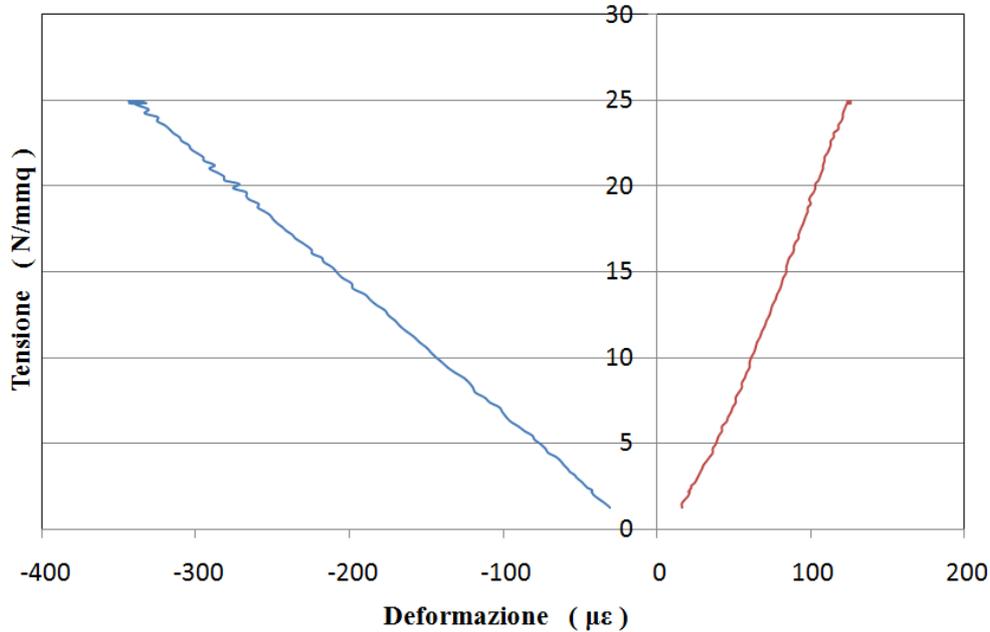


Fig 7.17 – Diagramma tensione-deformazione provino B relativo al tratto AB.

I valori di tensione e di deformazione ottenuti sono i seguenti:

- Punto A:  $\sigma_u = 1,30 \text{ N/mm}^2$ ;  $\epsilon_{u \text{ long}} = -30,41 \text{ } \mu\epsilon$ ;  $\epsilon_{u \text{ trasv}} = 15,20 \text{ } \mu\epsilon$ ;
- Punto B:  $\sigma_o = 24,91 \text{ N/mm}^2$ ;  $\epsilon_{o \text{ long}} = -339,37 \text{ } \mu\epsilon$ ;  $\epsilon_{o \text{ trasv}} = 124,43 \text{ } \mu\epsilon$ .

Assumendo anche in questo caso le deformazioni longitudinali positive e applicando le relazioni 7.3 e 7.4 sono stati determinati il modulo elastico E e il coefficiente di Poisson  $\nu$  pari a :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{24,91 - 1,30}{0,00034 - 0,000030} = 76161 \text{ N/mm}^2 \quad (7.7)$$

$$\nu = \frac{\Delta\epsilon_{\text{trasv}}}{\Delta\epsilon_{\text{long}}} = \frac{0,00012 - 0,000015}{0,00034 - 0,000030} = 0,34 \quad (7.8)$$

Eseguito la media dei valori di E e  $\nu$  relativi alle due prove si ottengono:

$$E = 78738 \text{ N/mm}^2 ; \nu = 0,34.$$

### 7.3 – Prove di flessione

Le prove di flessione sui due provini di marmo di dimensioni 5 x 5 x 20 cm sono state effettuate secondo la metodologia prevista dalla norma europea UNI EN 12372. Questa norma impone che la tensione venga aumentata uniformemente con una velocità di  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s fino alla rottura del campione. La velocità di incremento del carico può essere determinata in N/s dalla relazione seguente:

$$V = \frac{2abh^2}{3l} \quad (7.9)$$

In cui:

b,h = dimensioni provino da testare in mm;

a = velocità di incremento della tensione in MPa/s;

l = luce libera del provino in mm.

Nel nostro caso le dimensioni b e h sono pari a 50 mm e avendo provini lunghi 200 mm si è stabilita una luce libera di 160 mm, inferiore a quella prevista dalla norma. La velocità di incremento del carico allora diviene:

$$V = \frac{2abh^2}{3l} = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 50 \cdot 50^2}{3 \cdot 160} = 130 \text{ N/s} \quad (7.10)$$

La tensione di rottura a flessione  $R_{tf}$  in  $\text{N/mm}^2$  può essere determinata dalla formula 7.11, dove F è il carico di rottura a flessione in N:

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (7.11)$$

In figura 7.18 è possibile osservare il provino A posizionato sui due appoggi della macchina di prova in modo che il carico venga applicato in mezzzeria. Durante l'esecuzione della prova è stato mantenuto collegato alla strumentazione soltanto l'estensimetro longitudinale posto all'intradosso del provino. Questo ha consentito di valutare le deformazioni durante le fasi della prova stessa.



Fig 7.18 – Provino A durante l'esecuzione della prova di flessione.

In figura 7.19 è riportata una fotografia della fessura venutasi a creare nella mezzeria del provino analizzato al termine della prova.

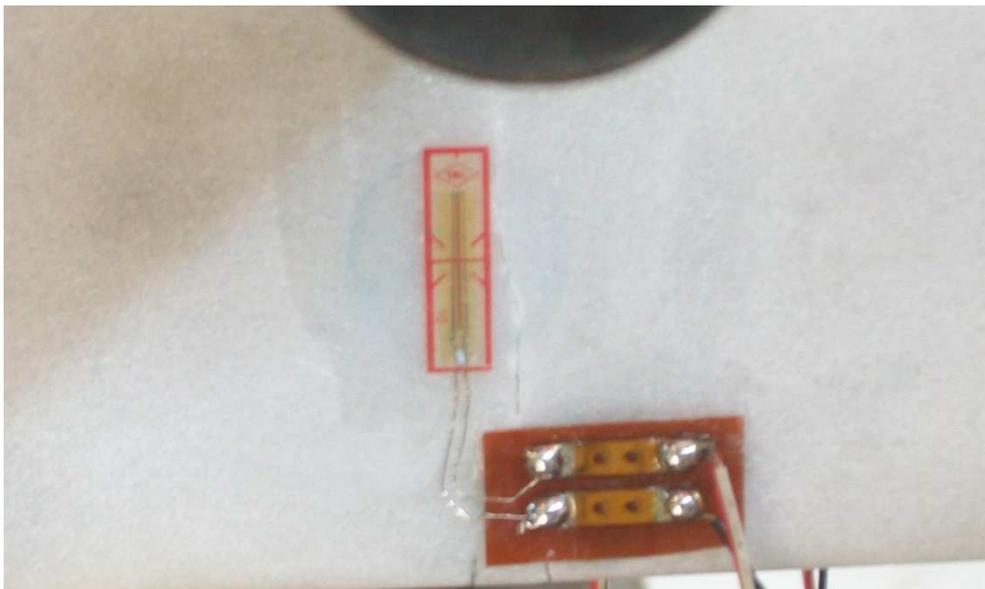


Fig 7.19 – Fessura nel provino A al termine della prova.

Nella fotografia di figura 7.20 è rappresentato il provino A rotto a seguito della prova di flessione.



Fig 7.20 – Provino A rotto al termine della prova di flessione.

Nel grafico seguente ( fig 7.21) è riportato l'andamento delle deformazioni in  $\mu\epsilon$  in funzione del carico applicato in N. Il carico, come si è detto, è stato aumentato fino a portare a rottura il provino e nel caso in esame la rottura si è avuta in corrispondenza di un carico pari a 9373,9 N. Questo ha comportato una deformazione longitudinale di 616,12  $\mu\epsilon$ .

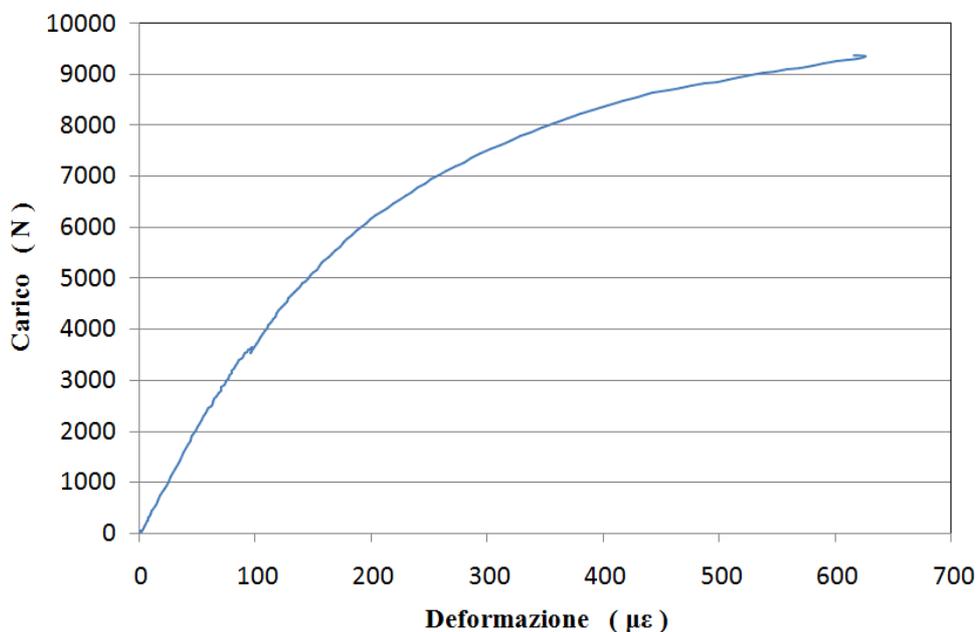


Fig 7.21 – Diagramma carico-deformazione per il provino A.

Come si può vedere in figura 7.21, il comportamento del materiale non è stato lineare fino a rottura ma è risultato abbastanza duttile in particolare a partire

da un carico di circa 3500 N. Noto il valore del carico massimo e applicando la relazione 7.11 è stata determinata la tensione di rottura a flessione per il provino A pari a :

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2} = \frac{3 \cdot 9373,9 \cdot 160}{2 \cdot 50 \cdot 50^2} = 18,0 \frac{N}{mm^2} \quad (7.12)$$

Successivamente è stata effettuata una prova di flessione con le stesse modalità anche per il provino B. In figura 7.22 è possibile osservare questo provino durante l'esecuzione della prova.

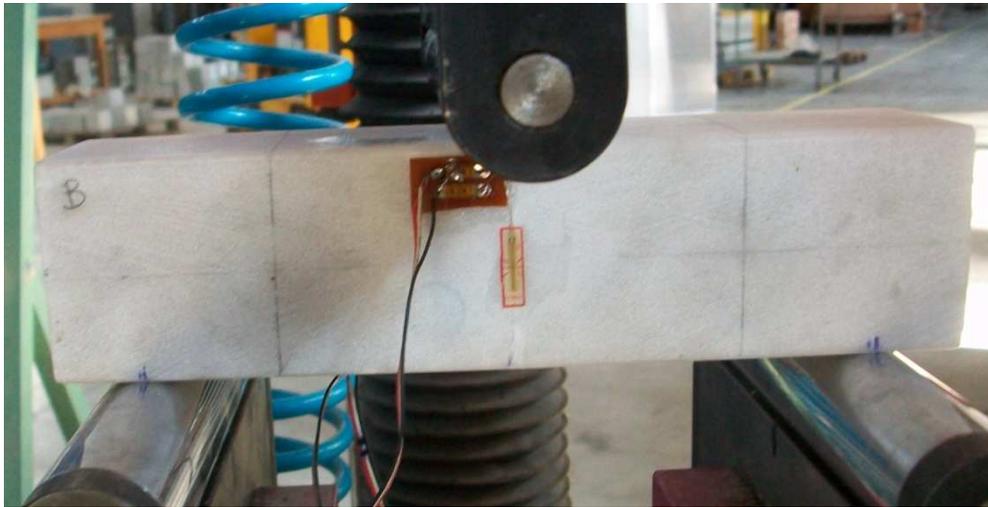


Fig 7.22 – Provino B durante l'esecuzione della prova di flessione.

Anche questo provino è stato portato a rottura e al termine della prova il carico massimo raggiunto è stato pari a 9260,7 N corrispondente ad una deformazione di 642,13  $\mu\epsilon$ . Noto il carico è stata calcolata la tensione di rottura a flessione secondo la relazione 7.11.

$$R_{tf} = \frac{3Fl}{2bh^2} = \frac{3 \cdot 9260,7 \cdot 160}{2 \cdot 50 \cdot 50^2} = 17,8 \frac{N}{mm^2} \quad (7.13)$$

In figura 7.23 è rappresentato l'andamento delle deformazioni in funzione del carico applicato in cui si può notare che il comportamento non è stato lineare fino a rottura, come avvenuto per la prova sul provino A.

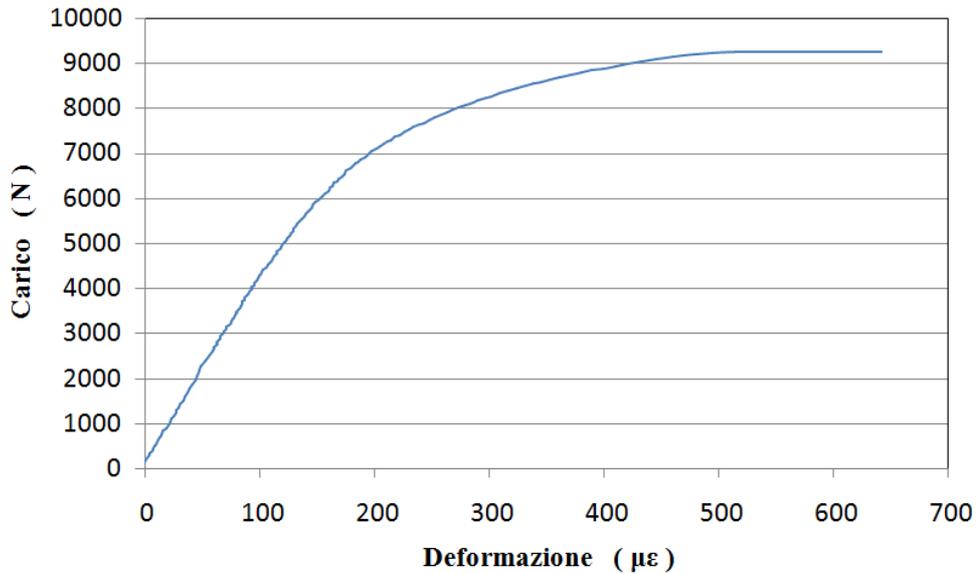


Fig 7.23 – Diagramma carico-deformazione per il provino B.

Eseguendo la media delle tensioni ottenute per i due provini dalle relazioni 7.12 e 7.13 si ottiene una stima della tensione di rottura a flessione per il marmo in esame, pari a  $17,9 \text{ N/mm}^2$ .

#### 7.4 – Prove di compressione

Una volta concluse le prove di flessione, a partire dai quattro monconi ottenuti a causa della rottura dei provini, sono stati ricavati quattro cubetti di lato circa 5 cm sui quali sono state effettuate le prove di compressione. Questi cubetti possono essere osservati in figura 7.24 e sono identificati dalle sigle A1 se sono stati ottenuti dal provino A oppure B se, invece, provengono dal provino B. Le prove sono state eseguite facendo riferimento alla normativa europea UNI EN 1926 riguardante la determinazione della resistenza a compressione uniassiale su pietre naturali. Secondo queste norme la resistenza a compressione può essere calcolata attraverso la relazione seguente:

$$R = \frac{F}{A} \quad (7.14)$$

Dove:

F = carico di rottura del provino in N;

A = area della sezione del provino in  $\text{mm}^2$ .



Fig 7.24 – Cubetti su cui sono state effettuate le prove di compressione.

La fotografia di figura 7.25 rappresenta una fase della prova di compressione su un cubetto e quella seguente presenta un ingrandimento in cui si può notare il cubetto stesso tra i due piatti della macchina.

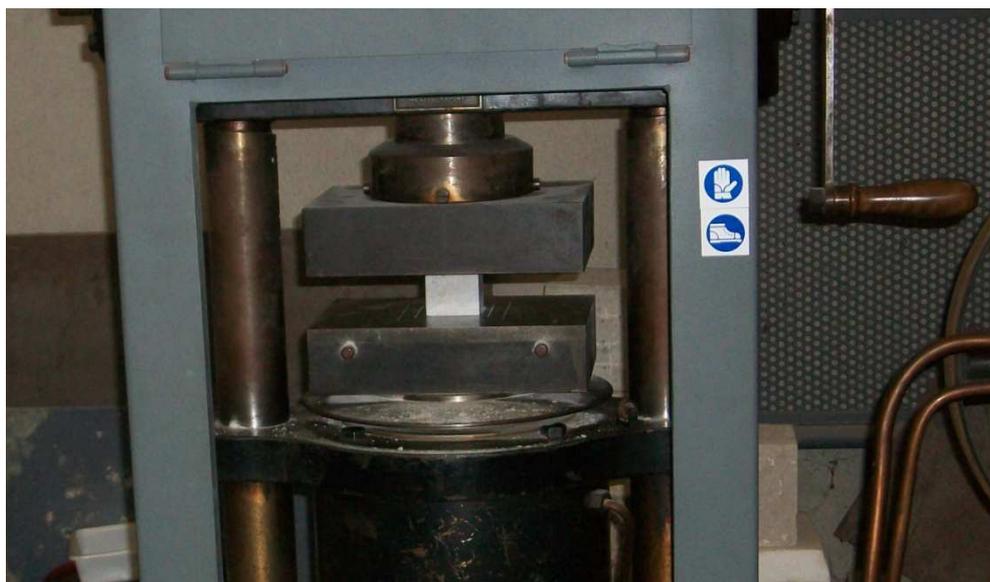


Fig 7.25 – Fase di esecuzione della prova di compressione.



Fig 7.26 – Particolare di cubetto durante la prova di compressione.

Nel corso della prova il carico è stato aumentato progressivamente fino a portare a rottura il cubetto di marmo. È importante osservare che questi campioni sono stati disposti nella macchina di prova con la faccia recante la sigla di identificazione a contatto con il piatto superiore della macchina stessa. I provini identificati dalla lettera B presentano dimensioni pari a 4,96 x 5,10 x 5,04 cm il primo e 5,11 x 4,93 x 5,03 cm il secondo. Per il primo di questi il carico di compressione ottenuto è stato pari a 258000 N e applicando la relazione 7.14 è stata calcolata la resistenza a compressione di:

$$R = \frac{F}{A} = \frac{258000}{49,6 \cdot 51,0} = 101,99 \frac{N}{mm^2} \quad (7.15)$$

La prova sul secondo cubetto ha determinato un carico di compressione di 249500 N per cui applicando anche in questo caso la relazione 7.14 è stato possibile valutare la resistenza a compressione:

$$R = \frac{F}{A} = \frac{249500}{51,1 \cdot 49,3} = 99,04 \frac{N}{mm^2} \quad (7.16)$$

La 7.27 riporta i due cubetti appena descritti al termine della prova di compressione e consente di osservare le superfici di rottura dei provini stessi.



Fig 7.27 – Cubetti B al termine della prova di compressione.

Successivamente si è passati ad analizzare i cubetti A1, il primo dei quali presenta dimensioni 5,04 x 5,05 x 4,95 mm. Eseguendo la prova con le stesse modalità dei campioni già studiati, si è ottenuto un carico di compressione pari a 252800 N. Questo corrisponde ad una resistenza a compressione R calcolata dalla relazione seguente:

$$R = \frac{F}{A} = \frac{252800}{50,4 \cdot 50,5} = 99,32 \frac{N}{mm^2} \quad (7.17)$$

A seguito della prova sull'ultimo cubetto, avente dimensioni 5,06 x 5,05 x 4,97 cm è stato valutato un carico F pari a 251200 N cui corrisponde una resistenza a compressione di:

$$R = \frac{F}{A} = \frac{251200}{50,6 \cdot 50,5} = 98,31 \frac{N}{mm^2} \quad (7.18)$$

In figura 7.28 sono rappresentati i due provini A1 portati a rottura a seguito della prova di compressione.

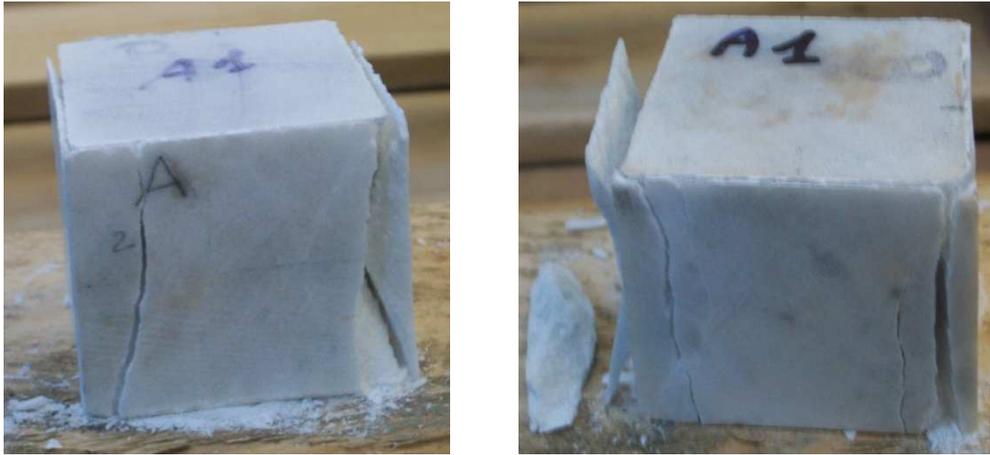


Fig 7.28 – Cubetti A1 al termine della prova di compressione.

Eseguendo la media delle resistenze a compressione ottenute dai quattro cubetti si determina un valore di  $R$  pari a  $99,65 \text{ N/mm}^2$  che può essere considerato rappresentativo per il tipo di marmo in esame.

In base ai risultati delle prove meccaniche, le proprietà del tipo di marmo analizzato sono le seguenti:

- modulo elastico =  $78738 \text{ N/mm}^2$ ;
- coefficiente di Poisson = 0,34;
- tensione di rottura a flessione =  $17,9 \text{ N/mm}^2$ ;
- resistenza a compressione =  $99,65 \text{ N/mm}^2$ .

## **CONCLUSIONI**

Al termine di questo lavoro è possibile affermare che i sensori Fiber Bragg Grating possono essere efficacemente utilizzati nel monitoraggio dello stato fessurativo presente sul David di Michelangelo. Le loro piccole dimensioni unite alla loro alta affidabilità consentono infatti di poter studiare con precisione lo stato di salute dell'opera senza alterarne l'aspetto estetico.

Sono stati applicati tre sensori sul broncone di cui uno sulla fessura più evidente, uno sul marmo non fessurato e il terzo libero nella parte superiore del broncone stesso. Quest'ultimo sensore, fungendo da rilevatore di temperatura, ha la funzione di depurare la misura della deformazione dalla quota dovuta alla variazione di temperatura. Oltre ai sensori è stato utilizzato il dispositivo Smartbrick che consente di acquisire dati sull'andamento dei parametri strutturali ed ambientali e in caso di comportamenti anomali permette di inviare messaggi di avvertimento via sms o posta elettronica. All'aumentare della temperatura è stato misurato un aumento della deformazione rilevata dalla fibra sul marmo non fessurato e una diminuzione di quella rilevata dalla fibra sulla fessura. Un aumento della temperatura, infatti, comporta una dilatazione del materiale e quindi un aumento della deformazione rilevata dalla fibra sul marmo. La fibra sulla fessura, invece, ha rilevato una diminuzione della deformazione a causa della dilatazione del materiale che andando ad interessare la fessura ha determinato una diminuzione della sua apertura. Probabilmente su questo comportamento incide anche il fatto che l'incremento di temperatura misurato non è uniforme all'interno del marmo che costituisce il David. La variazione di apertura della fessura è risultata compresa tra  $-0,1$  e  $0,15 \mu\text{m}$ .

Il tracciamento della sezione orizzontale nelle vicinanze di questa fessura tramite il software MeshLab ha permesso di valutare lo stato tensionale agente. Utilizzando le regole della geometria delle masse e la teoria dello sforzo normale eccentrico è stato possibile determinare le tensioni massime di compressione e di trazione della sezione pari a  $2,04 \text{ N/mm}^2$  e  $1,27 \text{ N/mm}^2$  rispettivamente. Quest'ultima è decisamente inferiore alla resistenza a trazione del materiale, pari a circa  $3-4 \text{ N/mm}^2$ .

Successivamente sono state effettuate prove ad ultrasuoni su alcuni campioni di marmo e di rocce di varia natura mediante lo strumento Epoch 1000 al fine di valutare la sua possibilità di utilizzo nella diagnostica del David di Michelangelo. Sulla base dei risultati ottenuti si può affermare che questo strumento, oltre ad essere facilmente utilizzabile, consente di eseguire misure precise dei valori dei tempi di volo e delle attenuazioni su campioni di rocce aventi differenti composizioni cristalline. La presenza di aria al contatto sonda-provino può causare la riflessione di una notevole quantità di energia per cui sono stati utilizzati due diversi metodi per la sua eliminazione. Il primo è stato l'impiego di un gel eco-elettro conduttore che però ha l'inconveniente di lasciare aloni residui sul materiale trattato, pregiudicandone quindi l'adozione nella diagnostica dei beni culturali. Il secondo metodo consiste nell'utilizzo di membrane al silicone fissate alle sonde, le quali non comportano i problemi visti per il gel. Dal confronto dei valori ottenuti con i due materiali però è emerso che le prove con le membrane hanno determinato spesso tempi di volo e attenuazioni leggermente superiori a quelli ottenuti con il gel e la causa di questa differenza potrà essere oggetto di un futuro studio.

Dalle prove ad ultrasuoni sui sei campioni di marmo bianco provenienti dalla cava Canalgrande nella zona di Carrara sono emersi valori delle velocità delle onde P elevati, pari in media a 6749 m/s e attenuazioni in media di 60 dB/m. Il materiale risulta quindi privo di difetti significativi al suo interno. Per i provini A e B di dimensioni 20 x 5 x 5 cm sono state ottenute velocità delle onde molto più elevate nelle prove effettuate sui lati più corti dei provini stessi. Questo mette in evidenza l'influenza della lunghezza del percorso sulla velocità delle onde.

In seguito è stato preso in esame un campione di marmo di Lasa che, pur apparendo simile a quello precedente, è costituito da cristalli di dimensioni maggiori di quelli del marmo precedente. I valori medi delle velocità delle onde e delle attenuazioni sono stati rispettivamente di 4615 m/s e 167 dB/m. Si può quindi concludere che la composizione cristallina influenza i parametri dei marmi in quanto all'aumentare delle dimensioni dei cristalli si assiste ad una diminuzione della velocità delle onde e ad un aumento dell'attenuazione.

Le prove ultrasoniche hanno avuto per oggetto anche campioni di rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche per valutare come le loro diverse caratteristiche influenzino i parametri rilevati. Sono stati analizzati due provini di gneiss di cui il primo presenta l'asse di carico ortogonale alla stratificazione, mentre nel secondo questo è parallelo alla stratificazione stessa. Le velocità delle onde ottenute sono state minori per il primo provino mentre per le attenuazioni è avvenuto il contrario. Le onde, infatti, viaggiano ad una velocità maggiore e sono meno attenuate lungo la direzione parallela alla stratificazione in quanto incontrano meno ostacoli lungo il loro percorso.

Le rocce magmatiche esaminate sono state il porfido e il granito rosa di Baveno. Le velocità delle onde P rilevate sono state maggiori per il primo campione, mentre le attenuazioni più elevate sono state riscontrate per il secondo. Il granito, infatti, presenta una struttura cristallina ben definita con cristalli mediamente di dimensioni maggiori di quelli del porfido per cui le onde viaggiano più lentamente al suo interno e risultano maggiormente attenuate.

Per quanto riguarda le rocce sedimentarie i risultati più interessanti sono stati registrati per i campioni di arenaria e di pietra leccese. Il primo presenta due direzioni parallele alla stratificazione mentre la direzione z è ortogonale alla stessa. A causa della porosità del materiale non è stato possibile effettuare misurazioni lungo il lato più lungo del provino in quanto il segnale si perde confondendosi con il rumore di fondo. In questo caso quindi sarebbe necessario utilizzare sonde di frequenza minore. Lungo la direzione ortogonale alla stratificazione sono state misurate velocità delle onde minori e attenuazioni maggiori rispetto a quella parallela alla stratificazione, in analogia con quanto già osservato per i provini di gneiss. Il provino di pietra leccese, come si è visto dall'esame petrografico effettuato, è caratterizzato da una notevole porosità e questo ha determinato bassi valori di velocità delle onde e valori molto elevati dell'attenuazione.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle prove ultrasoniche è emerso che gli elementi che influenzano maggiormente la velocità delle onde e l'attenuazione sono la composizione cristallina, la porosità del materiale, la direzione di stratificazione, la presenza di fratture intracristalline, la lunghezza del percorso e il tipo di accoppiamento sonda-provino.

Su due provini di marmo di Carrara già analizzati ad ultrasuoni sono state realizzate alcune prove meccaniche per definire in modo completo le proprietà del materiale. Sono state eseguite prove per la determinazione delle costanti elastiche, utilizzando estensimetri elettrici opportunamente posizionati, che hanno determinato valori medi del modulo elastico e del coefficiente di Poisson pari rispettivamente a  $78738 \text{ N/mm}^2$  e  $0,34$ . Successivamente sono state effettuate prove di flessione che hanno consentito di determinare una tensione media di rottura a flessione pari a  $17,9 \text{ N/mm}^2$  e infine sui quattro monconi ottenuti a seguito della rottura dei provini sono state svolte prove di compressione che hanno determinato un valore medio della resistenza a compressione di  $99,65 \text{ N/mm}^2$ .

## RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo lavoro desidero ricordare le persone che hanno contribuito alla sua realizzazione e che mi sono state vicine durante il mio percorso universitario e personale. Il raggiungimento della laurea, infatti, non è solo un mio merito, ma anche di tutti coloro che, a vario titolo, lo hanno reso possibile. In particolare voglio ringraziare:

- *Prof. Giovanni Pascale* per avermi consentito di svolgere la tesi su un argomento così affascinante e per essere stato sempre disponibile a ogni mia richiesta di chiarimento e di spiegazioni;
- *Ing. Filippo Bastianini* per il suo aiuto che mi ha permesso di comprendere il funzionamento del dispositivo Smartbrick, da lui ideato e per la sua disponibilità nel rispondere ad ogni mia domanda;
- *Geol. Fausto Peddis* per il suo indispensabile aiuto nella realizzazione delle prove ad ultrasuoni con lo strumento Epoch 1000;
- *P.I. Roberto Carli e il personale del laboratorio LISG* con i quali ho potuto imparare le tecniche di monitoraggio dei dati e le metodologie di esecuzione delle varie prove;
- *Arch. Camilla Colla* per avermi gentilmente fornito il rilievo del basamento del David da lei effettuato;
- *Dott.ssa Franca Falletti*, direttrice della Galleria dell'Accademia, per le utili informazioni e il supporto fornito durante le operazioni svolte a Firenze;
- *Dott. Roberto Scopigno, Dott. Paolo Cignoni e Dott. Guido Ranzuglia* del CNR di Pisa per avermi spiegato i principi di funzionamento del software MeshLab utilizzato per tracciare le sezioni orizzontali della statua;
- *Ditta B.L.C.* di Carrara per averci fornito i provini di marmo bianco utilizzati nelle prove ultrasoniche e meccaniche;
- *I miei genitori* che mi hanno consentito di affrontare il cammino universitario in modo sereno assecondando sempre i miei interessi e le mie aspirazioni;

- *I miei amici*, sia quelli che conosco da sempre che quelli arrivati più tardi, con i quali in questi anni ho condiviso momenti davvero speciali;
- *I miei compagni di università* che non mi hanno mai fatto mancare il loro aiuto e la loro collaborazione in questi anni di studio e che sono diventati amici importanti anche al di fuori dell'università;

La foto seguente mi ritrae accanto al Prof Pascale e ad alcuni collaboratori che mi hanno accompagnato in questo lavoro conclusivo del mio percorso universitario.



Da sinistra: P.I. Roberto Carli, Ing Filippo Bastianini, il sottoscritto e il Prof Giovanni Pascale.

Infine desidero ricordare le *mie nonne Lina e Oriele* che purtroppo non ci sono più ma che oggi sento particolarmente vicine...

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] A. Paolucci, G.M. Radke, F. Falletti "**Michelangelo, il David** ", Giunti editore, 2004;
- [2] A. Borri, "**La stabilità delle grandi statue: il David di Michelangelo**", Collana Centro Studi Sisto Mastrodicasa, 2005;
- [3] S. Bracci, F. Falletti, M. Matteini, R. Scopigno, "**Exploring David, diagnostic state of conservation**", Giunti editore, 2004;
- [4] G. Vannucci, P. Gasperini, M. Boccaletti, F. Loddo, "**Zonazione sismica di dettaglio dell'area urbana di Firenze e valutazione del rischio per i beni artistici e culturali**" Atti del 20° convegno nazionale GNGTS - Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, 2001;
- [5] G. Vannucchi, " **Pericolosità sismica ed effetti locali nell'area fiorentina**", Atti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, 1991;
- [6] L. Zanolì, "**Applicazione di sensori a fibra ottica per il monitoraggio di stati fessurativi: il caso del David di Michelangelo**", tesi di laurea specialistica, Università di Bologna, 2010;
- [7] G. Tonioni, "**Studio e sviluppo di un sistema di interrogazione di Fiber Bragg Grating Sensors implementato tramite Array Waveguide Gratings**", tesi di laurea specialistica, Università di Pisa, 2009;
- [8] A. Kersey, M. Davis, H Patrick, M. LeBlanc, K. Koo, C.Askins, M. Putnam, E. Friebele, "**Fiber Grating sensors**", Journal of Lightwave Technology, 1997 ;

- [9] W. Moerman, L. Taerwe, W. De Waele, J. Degrieck, R. Baets, "**Remote monitoring of concrete elements by means of Bragg Gratings**", 1999;
- [10] B. Culshaw, E. L. Moore, Z. Zhipeng, "**Advances in Optical Fiber Sensors**", Selected Papers from the International Conference on Optical Fiber Sensors, Wuhan, China, 1991;
- [11] J. Dakin, B. Culshaw, "**Optical Fiber Sensors: principles and components**", Artech House Boston and London, 1988;
- [12] F. Ansari, "**Fiber Optic Sensors for construction materials and bridges**", Proceedings of the International Workshop on Fiber Optic Sensors for construction materials and bridges, 1998;
- [13] G. Pascale, "**Diagnostica a ultrasuoni per l'edilizia**", Dario Flaccovio Editore, 2008;
- [14] G. Menditto, S. Menditto, "**Indagini semidistruttive e non distruttive nell'ingegneria civile: disciplina tecnica, applicativa e normativa**", Pitagora Editrice, 2008;
- [15] E. Viola, "**Fondamenti di dinamica e vibrazione delle strutture**", Pitagora Editrice, 2001;
- [16] E. Bozzi, M. Chimenti, O. Salvetti, A. Zucchelli, "**Rassegna sulle tecniche non distruttive per la caratterizzazione dei difetti all'interno di materiali lapidei**", Rapporto tecnico Progetto SP1a, 2003;
- [17] I.N. Prassianakis, S.K. Kourkoulis, I. Vardoulakis, "**Marble monuments examination using the NDT method of ultrasounds**", 15th WCNDT, Roma, 2000;

- [18] A. M. Ferrero, M. Migliazza, A. Spagnoli, **"Un modello teorico per lo studio del fenomeno di imbarcamento in rivestimenti di marmo soggetti a cicli termici"**, Convegno Nazionale IGF XX, Torino, 2009;
- [19] E. Viola, **"Lezioni di Scienza delle costruzioni"**, Pitagora Editrice, 2003;
- [20] E. Viola, **"Esercitazioni di Scienza delle costruzioni 1 e 2"**, Pitagora Editrice, 1993;
- [21] **Norma UNI EN 14580 – Metodi di prova per pietre naturali: determinazione del modulo elastico statico**, 2005;
- [22] **Norma UNI EN 12372 – Metodi di prova per pietre naturali: determinazione della resistenza a flessione sotto carico concentrato**, 2007;
- [23] **Norma UNI EN 1926 – Metodi di prova per pietre naturali: determinazione della resistenza a compressione uniassiale**, 2007.

## **RIFERIMENTI INTERNET**

- <http://www.uffizi.firenze.it/musei/accademia> – Sito della Galleria dell'Accademia di Firenze;
- <http://www.ingv.it> – Sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia;
- <http://emidius.mi.ingv.it> – Sito del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia;
- <http://www.icvbc.cnr.it> – Sito dell'Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali, Consiglio Nazionale delle Ricerche;
- <http://www.sestosensor.com> – Sito del gruppo SestoSensor che ha sviluppato il dispositivo Smartbrick;
- <http://maps.google.it>.