

6.3. MONITORAGGIO DEL COMPORTAMENTO DEL DIPINTO SU TAVOLA DOPO IL RESTAURO IN RISPOSTA ALLE VARIAZIONI DI UMIDITA'

Il tavolato della *Deposizione dalla Croce* è stato monitorato per due mesi in ambiente climatizzato e per un ulteriore mese in ambiente non climatizzato. Il clima a cui è stato sottoposto il tavolato è stato caratterizzato da importanti variazioni di umidità: in clima controllato sono stati impostati cicli di umidità relativa da 40% a 60% circa, di durata variabile (10-20 giorni), mentre in ambiente non controllato sono stati raggiunti massimi al di sopra del 70%. Tali valori di umidità relativa permettono di osservare dinamiche tavolato/traverse altamente significative.

Nell'impostazione dei cicli di umidità in ambiente controllato si è scelto di non portare il tavolato all'equilibrio, ma di cercare piuttosto il raggiungimento della massima deformazione, cui corrisponde il massimo sviluppo di forze. Si osserva pertanto una risposta del tavolato in fase transitoria: non si attendono mai i tempi necessari per un completo equilibramento. Questa scelta segue due importanti esigenze: 1) necessità di lavorare con tempi compatibili con le operazioni di restauro, quindi non più di due-tre mesi complessivi di monitoraggio (l'equilibramento di un tavolato di 30mm di spessore richiederebbe circa 6 mesi), 2) intenzione di simulare le reali dinamiche che avvengono in ambiente di conservazione, dove il tavolato non è mai portato all'equilibrio ad un determinato valore di umidità, ma è bensì sottoposto a continue oscillazioni climatiche, più o meno consistenti in funzione dell'ambiente, ma comunque sempre presenti.

È stata svolta una estesa campagna di misure, da un punto di vista sia deformativo che dinamometrico, volta a caratterizzare il comportamento del tavolato e della traversatura con molle al variare delle condizioni di umidità ambientali. Le misure effettuate sono:

- 1) misura delle forze localizzate in corrispondenza delle molle
- 2) misura delle deformazioni localizzate sulle molle
- 3) misura delle deformazioni delle traverse
- 4) misura delle deformazioni del tavolato
- 5) misura delle deformazioni della pittura

Le misure da 1 a 4 sono state effettuate con l'ausilio di trasduttori potenziometrici lineari collegati ad un sistema di acquisizione wireless che ha permesso l'osservazione degli eventi in tempo reale. Questa scelta è stata dettata da motivi di sicurezza: benché i valori impostati di temperatura e umidità siano stati adeguatamente valutati a priori e concordati insieme ai restauratori in funzione dello stato di conservazione del dipinto, è opportuno mantenere un controllo costante delle dinamiche dell'opera in corso di variazioni climatiche, onde evitare qualsiasi casuale malfunzionamento o non desiderata risposta del tavolato.

Tutti i parametri di monitoraggio sono stati dunque acquisiti tramite sistema wireless, in modo da poter essere costantemente accessibili da qualunque postazione internet.

Nei paragrafi che seguono si descrivono una per una le acquisizioni effettuate.

6.3.1. MISURA DELLE FORZE LOCALIZZATE IN CORRISPONDENZA DELLE MOLLE

Il sistema di monitoraggio delle forze descritto nel capitolo 5. è stato applicato sulle tre traverse del tavolato: le traverse superiore e inferiore sono state strumentate con tre elementi di rilevazione di cui due laterali e uno al centro; la traversa centrale invece è stata strumentata con elementi di rilevazione in numero corrispondente al numero delle molle. La scelta di differenziare il monitoraggio sulle tre traverse è stata effettuata per motivi di economia (e di limitatezza dei canali di acquisizione disponibili); d'altra parte tale selezione consente di esplorare diverse modalità di acquisizione di dati: i numerosi dati raccolti sulla traversa centrale descrivono in modo dettagliato e puntuale il comportamento del sistema tavolato-traversa, utilizzabili con raffinatezza per calibrare un modello matematico che ne rappresenti il comportamento; i dati più limitati invece che sono ricavati nelle traverse superiore e inferiore, forniscono l'indicazione di un comportamento generale dei due sistemi. Il monitoraggio delle tre traverse permette di stabilire le forze in gioco tra traverse e tavolato lungo le tre diverse linee di misura e di descrivere quindi una distribuzione delle tensioni lungo tutto il tavolato.

Facendo riferimento alla tavola 6.4 per la localizzazione dei trasduttori, si riportano i fattori di calibrazione per ciascun punto di monitoraggio nella tabella 6.12.

Trasduttore su molla	Estensione del nucleo (mm)	Altezza della molla (mm)	Precarico della molla (N)
TM1	9,2842	11,4	12,15
TM2	9,5999	10,9	10,07
TM3	12,7398	8,7	22,42
TM4	9,3358	11,2	13,08
TM5	9,4012	11,5	11,84
TM6	9,4272	11,7	11,19
TM7	9,7244	11,2	13,04
TM8	9,3693	11,4	12,09
TM9	9,3911	11,6	11,43
TM10	9,6907	10,9	14,14
TM11	9,5353	11,2	13,08
TM12	9,6804	11,1	13,25
TM13	9,4918	11,2	12,92
TM14	9,5253	11,3	12,67
TM15	9,4857	11,2	12,9
TM16	9,6163	10,8	14,5
TM17	9,569	9,1	20,66
TM18	9,6407	9,3	20,18
TM19	9,3414	9,2	20,56

Tabella 6.12. Dati relativi alla lunghezza delle molle e all'estensione dei trasduttori riferiti al momento del montaggio.

Per convertire il segnale del trasduttore nella forza esercitata dalla molla è stata adottato il procedimento:

- prima del montaggio ciascuna molla è stata preventivamente tarata secondo una relazione di carico/deformazione: le molle cilindriche adottate presentano un andamento lineare per il range di forze osservato nel presente lavoro. Si ottiene pertanto un valore di termine noto (m) e coefficiente angolare (q) specifico per ciascuna molla;
- in fase di montaggio si acquisiscono i valori di estensione del nucleo del trasduttore (L_{trasd}) e si misura l'effettiva altezza della molla (L_{molla}). Questi due valori sono strettamente collegati: quanto più la molla si allunga, tanto più il nucleo del trasduttore si ritrae, e vice versa;
- grazie ai dati raccolti in fase di montaggio si hanno dei valori di partenza ai quali sommare le variazioni rilevate tramite il trasduttore: in questo modo si ottiene l'altezza della molla in ogni istante monitorato;
- nota l'altezza della molla, si risale con precisione al valore di forza corrispondente (F_{molla}), semplicemente applicando i fattori di conversione deducibili dalla taratura;

Pertanto le formule adottate per il calcolo della forza delle molle sono le seguenti:

$$L_{molla\ x}(t_i) = L_{molla\ x}(t_0) + L_{trasd\ x}(t_0) - L_{trasd\ x}(t_i) \quad [mm] \quad .6.1$$

$$F_{molla\ x}(t_i) = (L_{molla\ x}(t_i) * m_{molla\ x} + q_{molla\ x}) * 9,8 \quad [N] \quad .6.2$$

Per l'interpretazione dei dati ottenuti durante il monitoraggio delle forze è utile tenere presente la dinamica illustrata nella tavola 5.13 che descrive il meccanismo tra tavolato, traversa, molla e trasduttore nel momento in cui il tavolato si allontana o si avvicina alla traversa. In una semplificazione massima, si ipotizza un tavolato inizialmente piano, sottoposto ad un aumento di umidità: in una prima fase di equilibramento del legno (in deformazione transitoria) il retro tenderà a rigonfiare inducendo una concavità nella parte pittorica e la traversa elastica seguirà questo movimento rimanendo appoggiata al tavolato al centro e separandosene ai bordi, con forza in incremento dal centro ai bordi del tavolato, proporzionalmente alla compressione delle molle; allo stesso modo, nel caso di una diminuzione di umidità, la concavità sarà rivolta verso il retro e la traversa appoggerà sul tavolato ai bordi, distaccandosene al centro, dove le molle avranno estensione minore, esercitando quindi maggiore forza, rispetto ai lati. Qualora l'umidità variata si mantenesse costante nel tempo, il gradiente all'interno dello spessore del tavolato si azzererebbe e il tavolato tenderebbe a recuperare gran parte della deformazione, mantenendo una deformazione a regime, dipendente alla direzione degli anelli (e dalla deformazione permanente legata alla storia dell'opera). Si tenga presente che questa seconda fase, che descrive il risultato di un equilibramento, è difficilmente riscontrabile nei tavolati di opere conservate in ambienti museali, dal momento che il clima, benché controllato, è generalmente sottoposto alle inevitabili oscillazioni giornaliere e stagionali.

Nella tavola 6.5 si riporta il monitoraggio delle forze effettuato in clima controllato e in ambiente non controllato: la disposizione dei grafici ricalca la posizione nel tavolato delle molle monitorate, lungo le tre traverse e, per contestualizzare gli andamenti di ciascuna traversa, in corrispondenza di ogni linea di forze è riportato lo stesso grafico di

monitoraggio climatico. Per oscillazioni di umidità relativa di 25 punti percentuali (40-65%), le variazioni di forza medie registrate puntualmente sono di circa 5N. In generale si nota una scarsa attività nei punti localizzati in corrispondenza delle molle centrali: per tutte e tre le traverse, fatta eccezione per un picco registrato nella traversa superiore (intorno al 31/5), le molle centrali mantengono valori di forza di poco differenti dal precarico impostato, mentre via via che ci si sposta verso le estremità della traversa si registrano variazioni di forza maggiori. Per quanto riguarda le rilevazioni sulla traversa centrale, il comportamento dinamometrico delle zone laterali mostra consistenti differenze nell'entità delle forze relative alla parte destra, rispetto alla parte sinistra. Non è facile individuare con certezza una causa per questa rilevata diversità, ma è possibile ipotizzare che risieda in un diverso comportamento igroscopico delle due parti, attribuibile per esempio ad una diversa permeabilità dello strato pittorico o del supporto.

A titolo esemplificativo, nelle tavole 6.6 e 6.7 si concentra l'attenzione su due periodi consecutivi di monitoraggio, effettuato in ambiente controllato. Nella tavola 6.6 si mette in evidenza la risposta dinamometrica del sistema traverse-tavolato in seguito ad una diminuzione di umidità relativa da 65% a 40% circa: si osserva una risposta coerente della distribuzione delle forze che è descritta da un generale aumento del carico, generalmente più accentuato alle estremità delle traverse. L'iniziale diminuzione della forza registrata ai lati e il suo successivo incremento è la manifestazione di un comportamento causato dalla quasi istantanea formazione di un gradiente e dalla sua conseguente evoluzione: il primo repentino fenomeno di diminuzione della forza, manifesta l'iniziale aumento di curvatura del tavolato, corrispondente alla formazione di un gradiente massimo lungo lo spessore; il successivo aumento della forza che si registra in tempi più dilatati è l'effetto dello spianamento del tavolato in seguito alla diminuzione del gradiente di umidità che in situazione di stabilità climatica prolungata tenderebbe progressivamente ad annullarsi in corrispondenza di un equilibrio. La dinamica di questa sequenza è comunemente definita *flying wood* ed è costituita dunque da un'iniziale rapido aumento di curvatura del tavolato e conseguente avvicinamento alla traversa nelle zone laterali, cui segue un progressivo e più lento spianamento del supporto che lateralmente si allontana dalla traversa, la quale peraltro è (in parte) costretta a seguirlo. L'umidità relativa è mantenuta al valore medio di 40% per circa 8 giorni: si tratta di un tempo esiguo, durante il quale si può osservare la sola fase iniziale del processo di equilibrio, caratterizzata dalla diffusione di umidità esclusivamente negli strati più superficiali del supporto ligneo. Nella tavola 6.7 si osserva la risposta del sistema in conseguenza al successivo aumento di umidità relativa da 40 a 65%: si registra un breve plateau, di durata equivalente alla rampa di aumento di umidità (evidente nelle acquisizioni della traversa superiore e della parte destra della traversa centrale), cui segue una graduale diminuzione di forza che in breve tempo si stabilizza a valore circa costante. In questo caso la dinamica legata al gradiente di umidità lungo lo spessore del tavolato è influenzata dall'input ambientale precedentemente fornito: l'innalzamento di umidità (input 1) ha innescato il lento meccanismo di diffusione di umidità dal retro verso il fronte che per motivi di tempistica ha interessato i soli strati superficiali; in conseguenza al successivo abbassamento di umidità (input 2) nel tavolato è indotto un desorbimento a partire dagli strati superficiali: il gradiente prodotto dall'input 1 in 8 giorni sembra essere azzerato in altrettanto tempo dal conseguente input 2. La diminuzione di forze registrata in modo piuttosto diffuso sulle tre traverse corrisponde ad un aumento della curvatura del tavolato e ad un suo avvicinamento alla traversa.

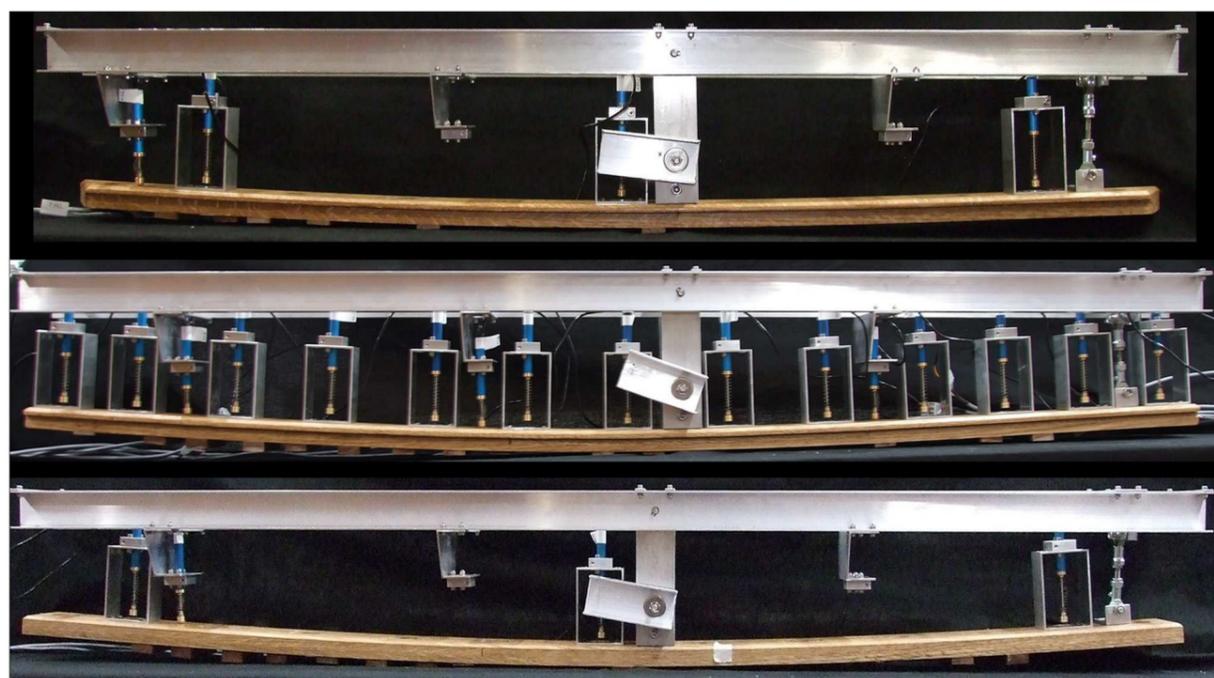
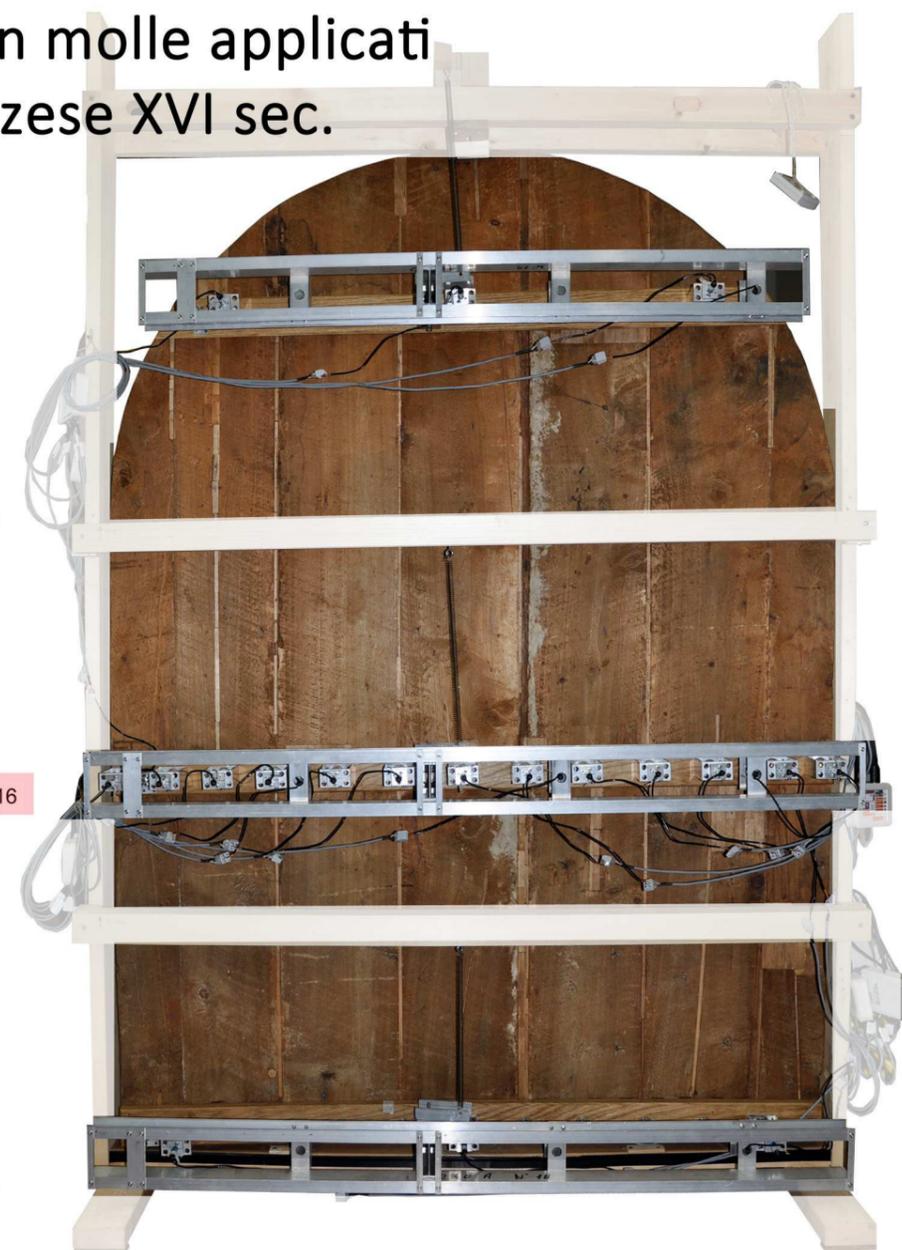
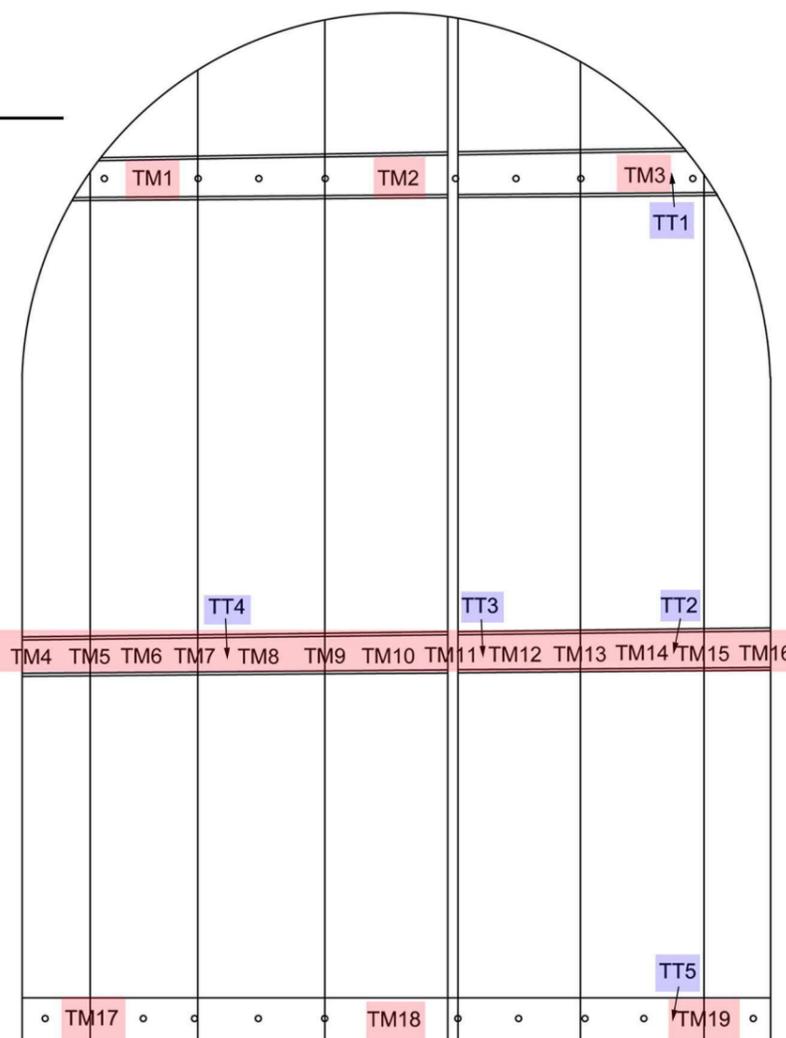
Gli strumenti di monitoraggio della traversatura con molle applicati sulla *Deposizione dalla Croce* di Anonimo Abruzzese XVI sec.

Accanto, al centro: La localizzazione dei trasduttori dedicati al monitoraggio delle molle (in rosso) e dei trasduttori dedicati al monitoraggio delle traverse (in blu)

Accanto, a destra: Il tavolato della *Deposizione dalla Croce* strumentato con gli apparecchi di monitoraggio del sistema di traversatura elastico.

Sotto, a sinistra: Le tre traverse strumentate con gli apparecchi di monitoraggio, prima del montaggio sul tavolato, ordinate dall'alto al basso come sul tavolato.

Sotto, a destra: La traversa centrale (vista dall'alto) strumentata con gli apparecchi di monitoraggio e montata sul tavolato.



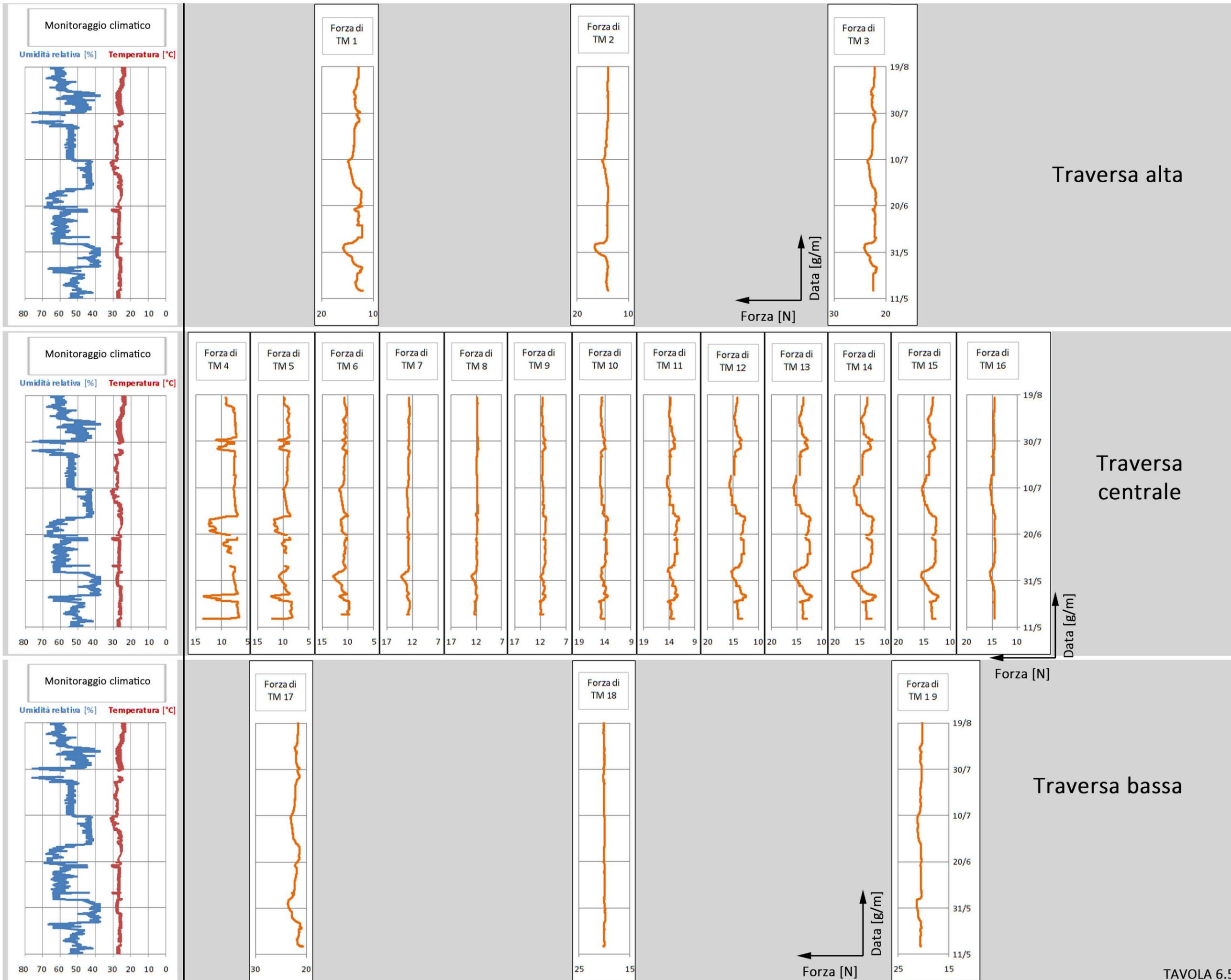


TAVOLA 6.5

