

6.3.3. MISURA DELLE DEFORMAZIONI DEL TAVOLATO IN AREE DEFINITE

Le deformazioni del tavolato sono state monitorate con l'impiego di tre kit deformometrici, localizzati in zone scelte in quanto significative da un punto di vista dello stato di conservazione della parte pittorica (tavola 6.9). Tutti e tre i sensori sono risultati installati a cavallo di una connessione tra due tavole: l'inclinazione delle coppie di colonnine di sostegno dei kit deformometrici deriva perciò dall'imbarcamento delle singole tavole e dalla posizione di ancoraggio della base delle due colonnine. È stato possibile quantificare ritiri/rigonfiamenti e imbarcamento del supporto nelle zone monitorate. Nei grafici 6.4 e 6.5 si riportano le rilevazioni effettuate: la misura dell'allungamento della superficie di tavolato immediatamente al di sotto degli strati preparatori e la freccia di imbarcamento calcolata sulla superficie del retro; queste grandezze sono sempre legate all'umidità relativa dell'ambiente, di cui si riporta un grafico in fondo ad ciascun gruppo di grafici.

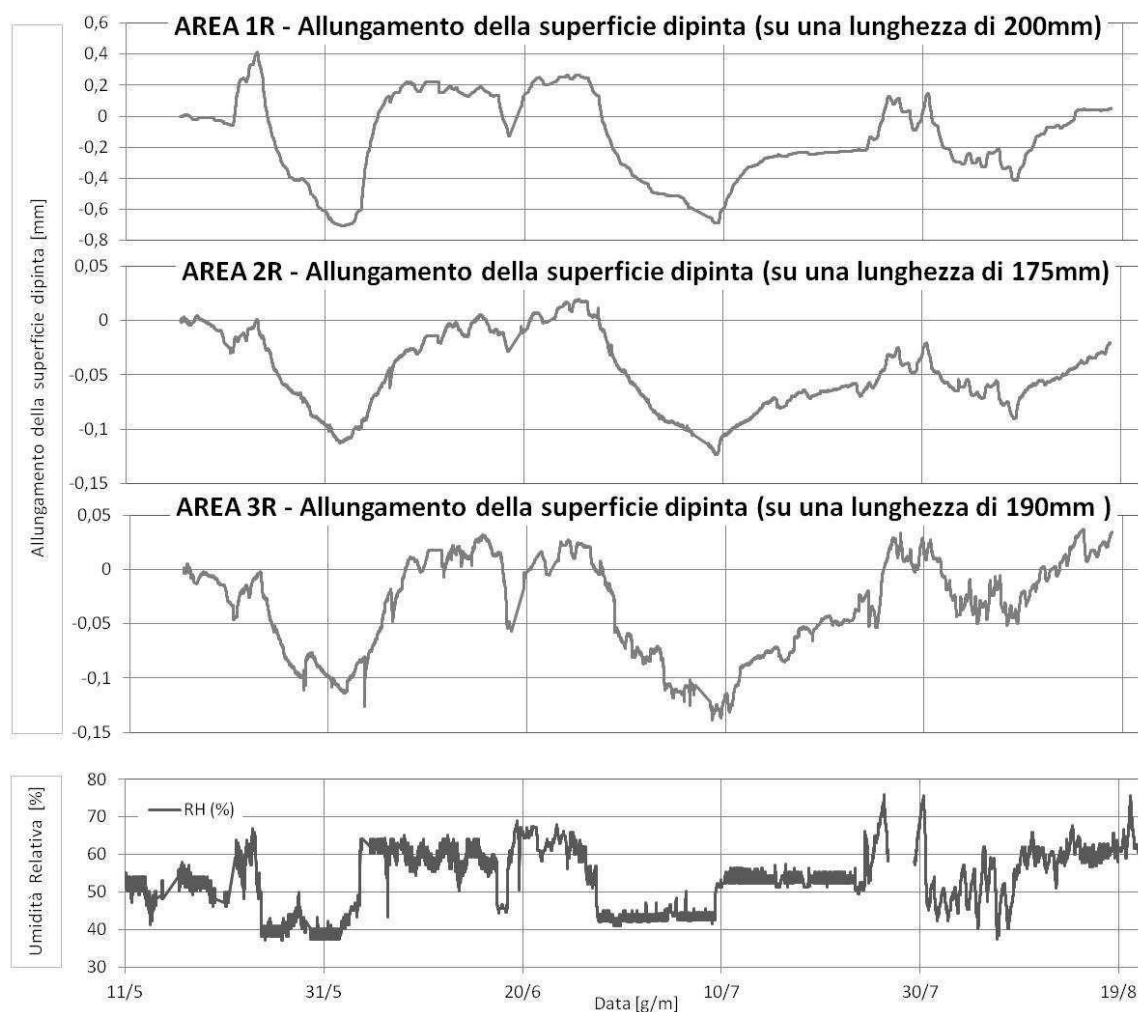


Grafico 6.4. Allungamento della superficie lignea immediatamente al di sotto degli strati preparatori, calcolato per tre aree di interesse.

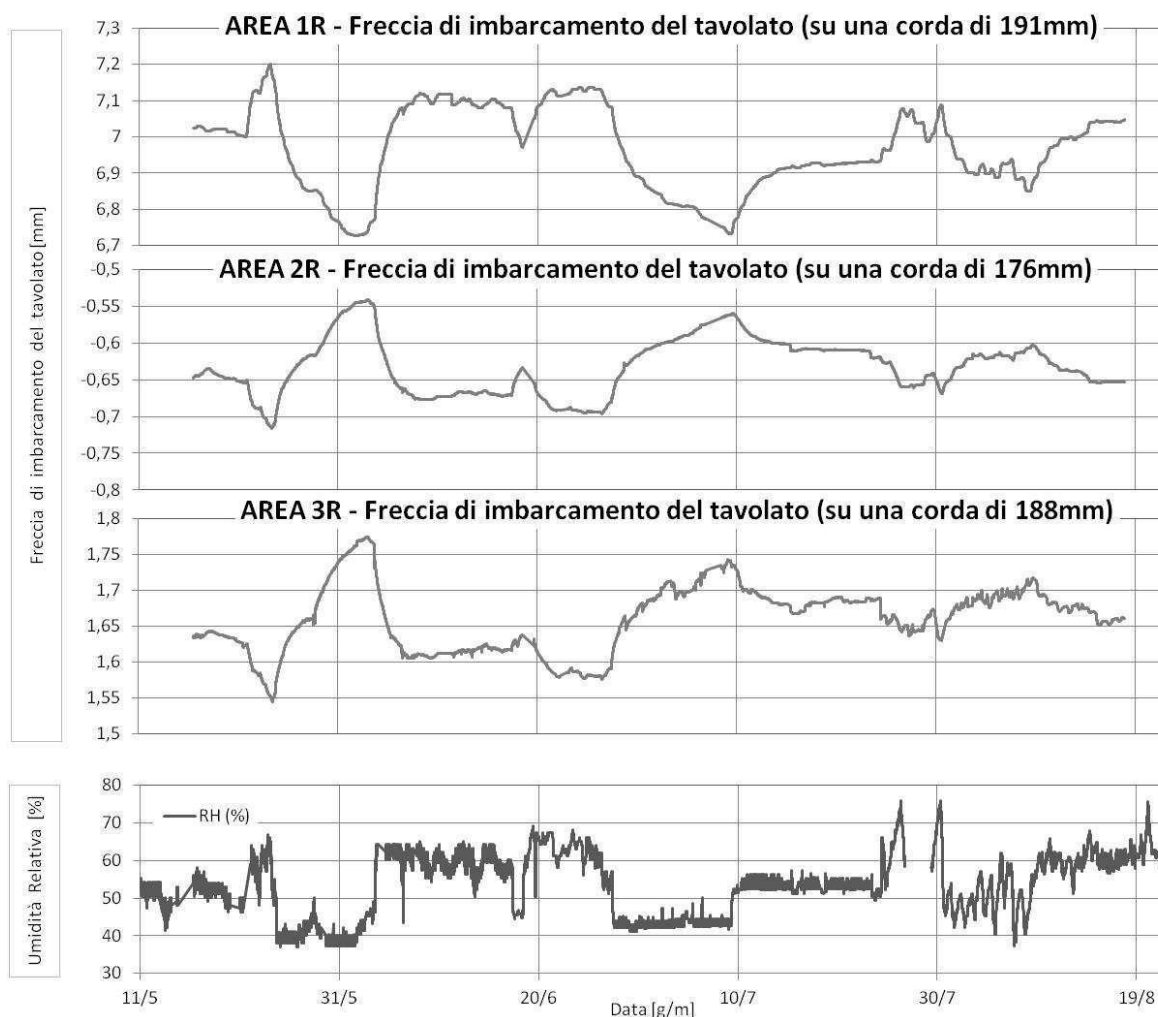


Grafico 6.5. Freccia di imbarcamento del tavolato, calcolata per tre aree di interesse.

È interessante notare il tipo di relazione che si verifica tra le due grandezze calcolate nelle tre aree e l'umidità relativa:

- per quanto riguarda l'allungamento della superficie dipinta le tre aree rispondono in relazione diretta con le variazioni di RH: ad aumento di umidità relativa risponde un allungamento, mentre a diminuzione di umidità relativa risponde un accorciamento. Quindi la deformazione rilevata dai kit deformometrici deriva dall'orientamento degli anelli e/o dal semplice ritiro/rigonfiamento del legno;
- per la misura della freccia di imbarcamento è necessario fare una distinzione: in riferimento all'umidità le aree 3R e 2R sono in relazione inversa, mentre l'area 1R è in relazione diretta. Questo apparentemente diverso comportamento deriva dalla diversa inclinazione delle colonnine dei kit deformometrici, perpendicolari alle tavole su cui sono montate.

Rispetto alle due aree 2R e 3R, l'area 1R presenta dei valori di allungamento e di freccia notevolmente maggiori. La causa di questo è un dislivello che risiede nella presenza di un dislivello a cavallo del quale è stato installato il kit deformometrico: è possibile che l'inclinazione delle colonnine di alluminio viene accentuata da questo scalino.

Le aree di monitoraggio delle deformazioni del tavolato e della pittura della *Deposizione dalla Croce* di Anonimo Abruzzese XVI sec.

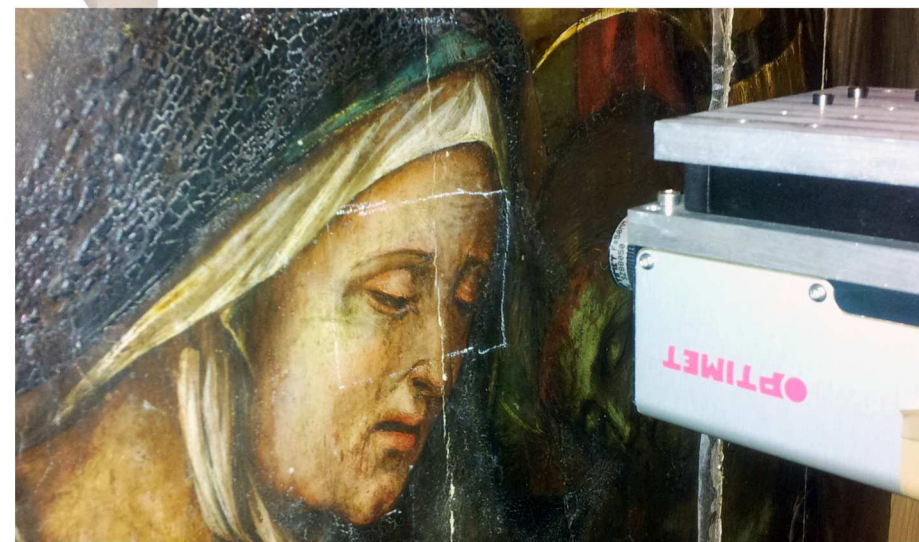
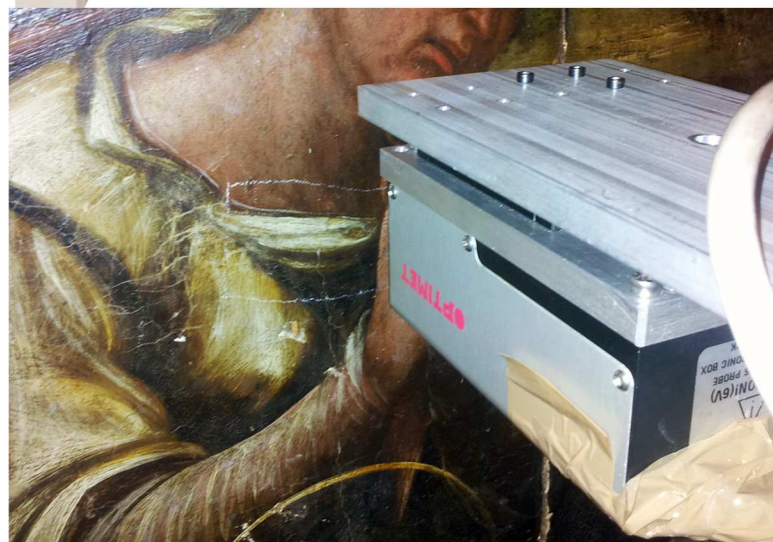
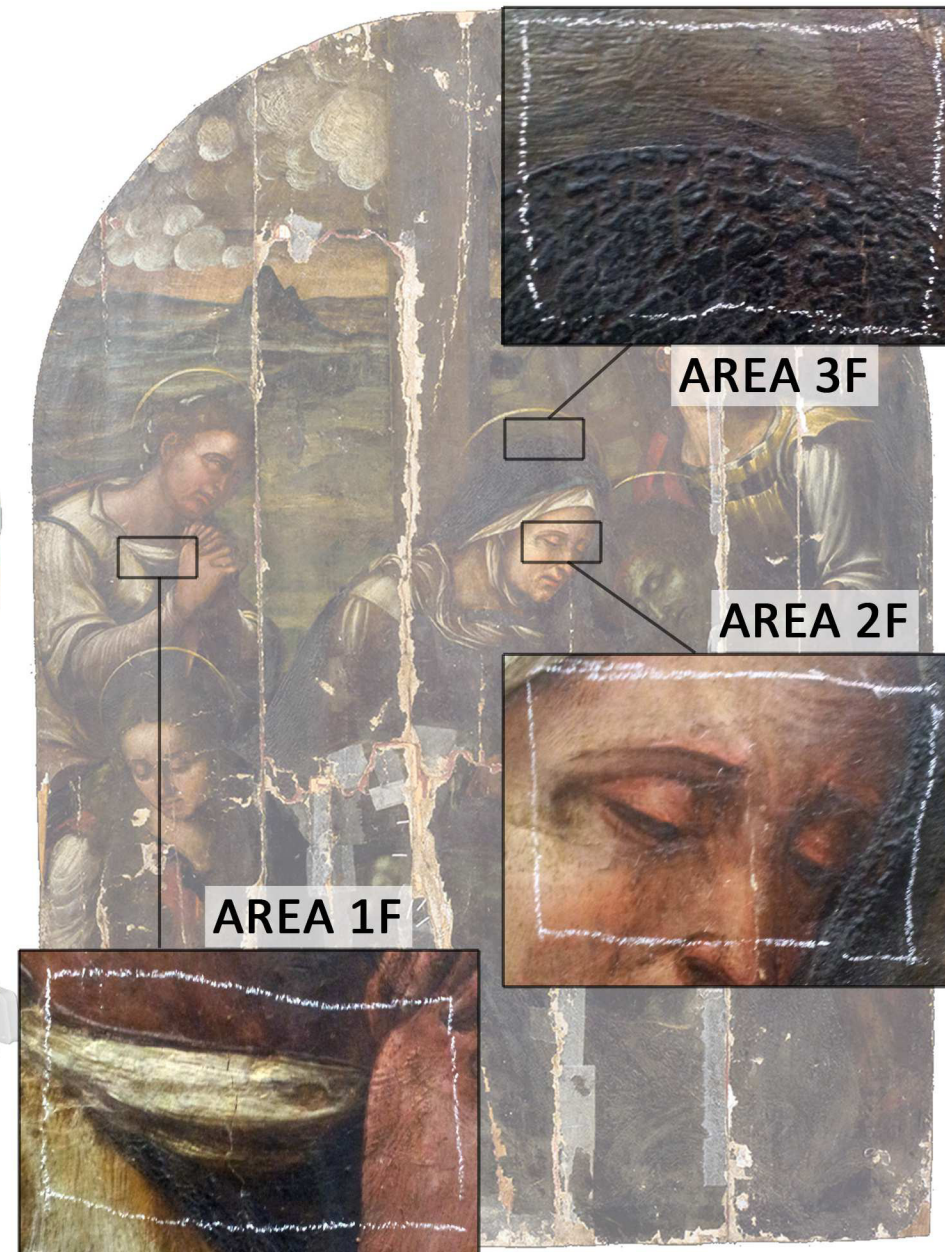


Immagine in alto a sinistra: Localizzazione dei kit deformometrici sul supporto.

Immagine in alto al centro: Localizzazione delle aree scansionate con sonda conoscopica sulla superficie pittorica.

Immagine in alto a destra: Sovrapposizione della superficie pittorica specchiata sul tavolato e visualizzazione della coincidenza fronte-retro delle aree monitorate.

Immagini in basso: Due aree pittoriche scansionate con sonda conoscopica.

6.3.4. MISURA DELLE DEFORMAZIONI DELLA PITTURA

Le stesse aree di cui è stata fatta la rilevazione delle deformazioni nel tavolato, sono state osservate anche nella parte pittorica, di cui sono stati quantificati i movimenti di dilatazione tra due momenti climatici significativi. È stata adottata la metodologia di acquisizione ottica descritta nel capitolo 5 per effettuare un totale di 4 scansioni, nelle date 31 maggio (40%), 13giugno (60%), 25giugno (65%), 9luglio (40%). E sono state quantificate le deformazioni per comparazione di due immagini per volta, acquisite in due momenti diversi. Si elenca di seguito la procedura adottata per la quantificazione della dilatazione:

- tramite il programma di elaborazione di immagini Photoshop si aprono in uno stesso file due immagini della stessa area acquisite in due tempi diversi: si sovrappongono le due immagini una sull'altra;
- utilizzando come riferimenti le disomogeneità rilevate della superficie, si porta a combaciare tutta una estremità dell'immagine;
- si sposta l'attenzione sull'estremità opposta e si prende lo stesso riferimento chiaro sulla superficie di entrambe le immagini, segnandolo per ciascun layer con un marker sottile;
- la distanza in pixel tra i due marker quantifica la dilatazione della superficie pittorica in quella determinata area;
- la distanza in pixel tra l'estremità portata a combaciare e il marker di riferimento fornisce la dimensione della superficie di acquisizione.

Si tenga conto che 1 pixel coincide con la risoluzione del sistema di acquisizione utilizzato ed equivale a 50 μ m.

Su coppie di acquisizioni sono stati effettuati confronti lungo linee orizzontali (corrispondenti alla direzione trasversale, per il supporto ligneo) e verticali (corrispondenti alla direzione longitudinale per il supporto ligneo): sono state quantificate delle variazioni di dimensioni lungo le linee orizzontali, ma non sono state rilevate differenze lungo le linee verticali. Secondo le considerazioni effettuate nel paragrafo 5.3.3, nelle acquisizioni effettuate non si individua un contributo di movimento ($\geq 50\mu$ m) legato all'igroscopicità della preparazione pittorica.

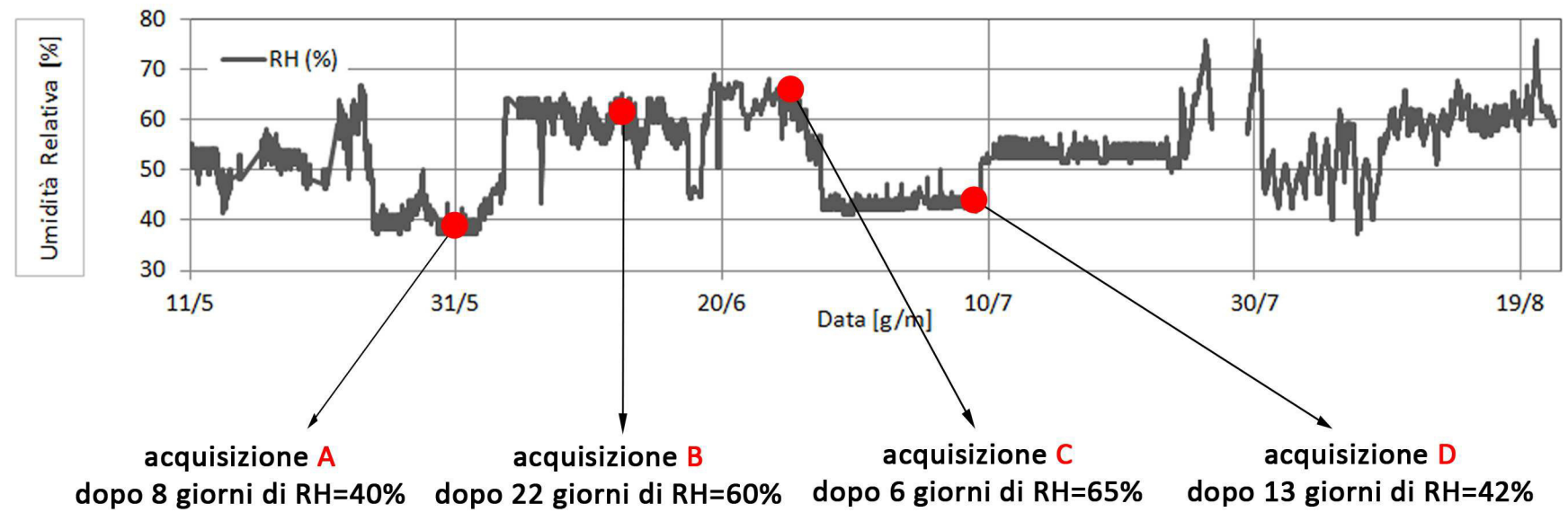
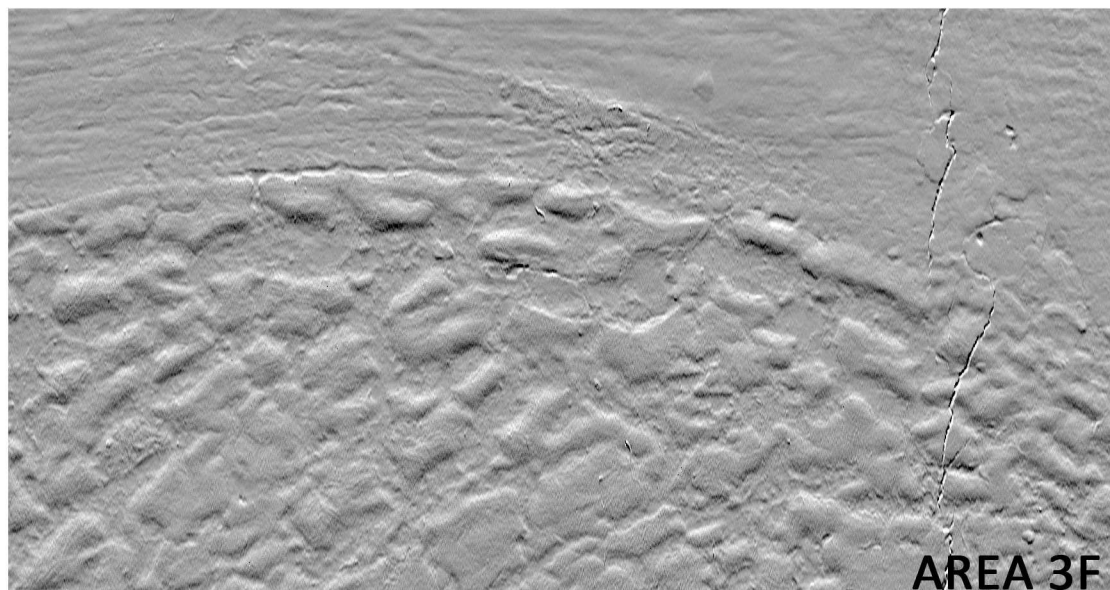
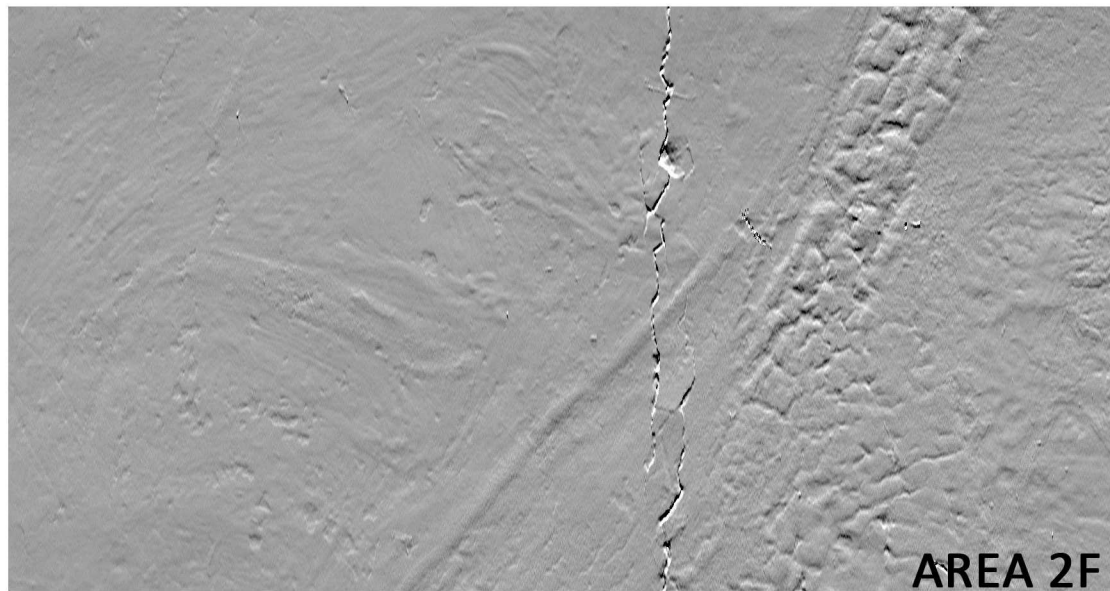
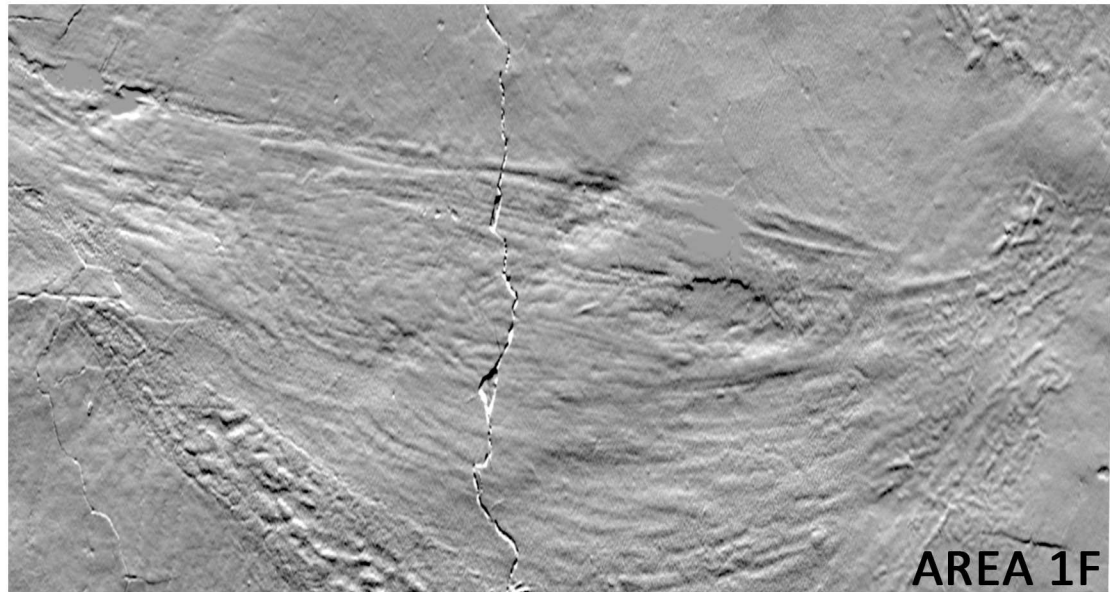
Nella tavola 6.10 si riporta a titolo esemplificativo una immagine acquisita per ciascuna area monitorata e una tabella riassuntiva delle deformazioni (in direzione trasversale) calcolate da acquisizioni effettuate in quattro momenti climaticamente significativi, individuati con le lettere A, B, C e D. Il segno + o - riportato in tabella sta ad indicare se si calcola una contrazione o una dilatazione, definite dal confronto di due immagini in sequenza temporale: si ha una contrazione qualora la prima immagine risulti più larga della seconda, viceversa si ha una dilatazione qualora l'immagine più larga sia la seconda. Confrontando i risultati in tabella con i valori di umidità relativa dei momenti in cui sono state fatte le acquisizioni, si trova sempre corrispondenza tra i ritiri/rigonfiamenti del supporto e i movimenti di contrazione/dilatazione della parte pittorica.

Le tipologie di movimento rilevato sono due e sono classificabili come:

- 1) scivolamento di isole di colore dovuto ad un allargamento/restringimento di cretti (di ampiezza rilevabile $\geq 50\mu\text{m}$) che definiscono i bordi di tali isole;
- 2) dilatazione/contrazione della superficie pittorica che si presenta come compatta (ad una risoluzione di osservazione di $50\mu\text{m}$).

In tutte e tre le aree indagate è presente un cretto che divide in due parti ciascuna superficie osservata. Di queste tre aree, la 2F e la 3F presentano dei movimenti piuttosto contenuti e omogeneamente distribuiti lungo la superficie indagata; nell'area 1F invece, interessata da un cretto un po' più ampio delle altre due, si rilevano diverse entità di movimento nelle due parti ai lati del cretto: si calcolano movimenti decisamente più ampi (nel caso A-B addirittura doppi) nella parte destra, rispetto alla sinistra. Non è nota la causa di questa disomogeneità di risposta, ma è plausibile che sia in qualche modo associata ad una diversa compattezza della pittura nelle due porzioni, o alla presenza di disomogeneità nelle aree adiacenti non indagate.

Le deformazioni della pittura della *Deposizione dalla Croce* di Anonimo Abruzzese XVI sec.



		Rispetto alla fessura...	AREA 1F	AREA 2F	AREA 3F
DEFORMAZIONE	Da A a B	ΔL/L	...a destra +150μm/32mm ± 50μm	+100μm/64mm ± 50μm	+100μm/76mm ± 50μm
		ε %	...a sinistra +100μm/43mm ± 50μm		
	Da C a D	ΔL/L	...a destra -100μm/34mm ± 50μm	<50μm/88mm	-100μm/88mm ± 50μm
		ε %	...a sinistra -150μm/45mm ± 50μm		
		...a destra	0.47 ± 0.16%	0.16 ± 0.08%	0.13 ± 0.07%
		...a sinistra	0.23 ± 0.12%		
		...a destra	0.33 ± 0.16%	<0.06%	0.11 ± 0.06%
		...a sinistra	0.29 ± 0.12%		

Grafico: Individuazione dei 4 momenti in cui sono state effettuate le scansioni ottiche, nel grafico che descrive le variazioni nel tempo di umidità relativa dell'ambiente a cui il dipinto su tavola è stato sottoposto per circa tre mesi durante la campagna di indagini.

Tabella: Raccolta delle misure di deformazione relative a ciascuna area monitorata. Si è scelto di calcolare le differenze di lunghezza della superficie pittorica in occasione dei due consistenti salti di umidità relativa ambientale: dall'acquisizione A alla B e dall'acquisizione C alla D.

6.4. ELABORAZIONE DELLE INFORMAZIONI SUL COMPORTAMENTO DEL DIPINTO SU TAVOLA IN RISPOSTA ALLE VARIAZIONI DI UMIDITA'

Nei paragrafi precedenti sono state riportate tutte le singole acquisizioni effettuate sul dipinto, senza metterle in relazione le une con le altre. Un secondo passo verso la valutazione del funzionamento della traversatura con molle nei confronti del tavolato è quindi individuare i rapporti tra traverse, tavolato e pittura, in termini di deformazioni, forze e sollecitazioni.

Le informazioni che è possibile estrapolare a partire dalle acquisizioni di cui sopra sono:

- profilo della parte pittorica in ogni istante di interesse monitorato
- sollecitazione a cui il tavolato è sottoposto in ogni istante di interesse monitorato
- quantificazione del contributo del sistema di traversatura nella limitazione dei movimenti del tavolato
- tendenza al movimento del tavolato privo di sistema di traversatura
- contributo della preparazione pittorica ai movimenti della pittura

Grazie alla quantificazione di questi parametri è possibile effettuare una valutazione circa l'adeguatezza della traversatura con molle rispetto agli obiettivi del restauro.

6.4.1. Profilo della parte pittorica in ogni istante di interesse monitorato

Come visto in precedenza, il sistema di monitoraggio delle forze si basa sulla misura dell'altezza delle singole molle, preventivamente tarate, e sul calcolo della forza corrispondente; ma l'altezza stessa delle molle fornisce indicazioni utili per risalire alle variazioni di profilo della superficie dipinta. È possibile definire il profilo di questa superficie istante per istante, sommando alle altezze delle molle la deformazione della traversa e il rilievo del profilo del fronte effettuato al momento zero.

Il procedimento di elaborazione seguito ha visto le seguenti fasi:

- misura manuale del profilo al tempo zero della superficie dipinta dell'opera: misurazione tramite comparatore della profondità della superficie in z rispetto ad una barra metallica graduata con funzione di riferimento fisso in x ;
- registrazione delle posizioni in z delle molle nel momento dell'acquisizione del profilo al tempo zero;
- registrazione della flessione della traversa nel momento dell'acquisizione del profilo al tempo zero;
- a ciascun valore di x corrispondente alle posizioni delle molle si associano: un valore che descrive in z la posizione della traversa, e un valore che descrive in z la posizione del dipinto (dal fronte). In questo modo è possibile tracciare la curvatura di traversa e dipinto;
- in ogni istante monitorato di interesse, per ciascuna x relativa alla posizione delle molle si calcola la profondità in z che la superficie pittorica ha rispetto al riferimento fisico del ponticello in alluminio, sommando punto per punto il contributo di deformazione delle molle, deformazione della traversa, in relazione con i dati acquisiti al momento zero, secondo la formula:

$$Z_{dipinto}(t_i) = Z_{molla}(t_0) - Z_{molla}(t_i) + Z_{traversa}(t_0) - Z_{traversa}(t_i) + Z_{dipinto}(t_0)$$

.6.4

Per effettuare questa somma si applica l'approssimazione secondo cui ciascuna misura può essere considerata giacente lungo z . In realtà solo la misura di profilo del dipinto, per sua realizzazione, è costituita da valori esattamente giacenti lungo z : le misure relative alla traversa mantengono un allontanamento dall'asse z trascurabile, come discusso nel paragrafo 6.3.2, e le misure delle altezze delle molle sono in direzione radiale rispetto alla curvatura della traversa. La radialità di queste misure comporta un angolo che si discosta dall'asse z di una quantità che aumenta via via dal centro verso l'esterno della traversa, e sarà di entità massima in corrispondenza della massima curvatura della traversa calcolata. Nel caso peggiore rilevato (acquisizione A) si misura un angolo massimo di 5° su una misura di accorciamento della molla di 1,43mm in direzione radiale: si calcola che questa misura si discosta dalla misura lungo z di 0,005mm che equivale ad un errore percentuale pari allo 0,3%. Ai fini del calcolo del profilo della superficie pittorica si considera questa quantità trascurabile.

In questa sede ci si limita a riportare i profili corrispondenti alla linea della traversa centrale, in quanto caratterizzati con maggior precisione rispetto alle altre due linee monitorate e per posizione maggiormente significativi del comportamento del tavolato. Il grafico 6.6 riporta il profilo del dipinto lungo la linea corrispondente alla traversa centrale in quattro momenti climatici significativi (indicati con lettere coerenti alle misure ottiche sul fronte).

Il profilo così calcolato mostra il comportamento del dipinto su tavola strumentato con la traversatura con molle in risposta alle variazioni climatiche dell'ambiente; si può affermare pertanto che il profilo così calcolato descrive il comportamento del tavolato come somma dei due contributi deformativi fondamentali: 1) dovuto alle forze delle molle agenti su di esso e 2) dovuto alla variazione dell'umidità relativa ambientale.

Tra le acquisizioni A ed E riportate nel grafico 6.6, corrispondenti rispettivamente ad una umidità relativa ambientale di 40% e 70%, si registra una variazione di freccia di curvatura del tavolato di quasi 8mm. Nei paragrafi 6.4.2 e 6.4.3 si analizzano i due contributi deformativi e se ne quantifica l'azione sulla deformazione totale risultante.

6.4.2. Sollecitazione e deformazione provocate dall'azione delle forze delle molle sul tavolato

I dati di monitoraggio dinamometrico possono essere elaborati tramite modellazione matematica al fine di calcolare sollecitazione e deformazione indotte nel tavolato dalla forza delle molle. Per fare questi calcoli ci si serve del modello matematico realizzato da Marcon [31], con l'inevitabile adattamento dei dati di input legati alla geometria e alle caratteristiche meccaniche dell'opera in oggetto, seguendo le stesse scelte semplificative descritte nel paragrafo 6.3. Rispetto al modello utilizzato per il calcolo delle caratteristiche meccaniche del tavolato, si utilizzano gli stessi dati di input costanti, e si introducono come input variabili i valori delle forze delle molle misurati sperimentalmente e il valore di densità calcolato tramite le prove meccaniche; l'output prodotto è la quantificazione delle sollecitazioni e delle deformazioni. Nella tavola 6.11 si riportano a titolo di esempio gli

output grafici della modellazione matematica di una situazione simulata e si riassumono i valori di sollecitazione (σ), deformazione (ϵ) e freccia di inflessione, calcolati per la linea della traversa centrale, provocati dalle forze registrate nelle quattro situazioni di monitoraggio selezionate come le più significative e delle quali è stato descritto nel grafico 6.6 il profilo effettivo del dipinto. Nel grafico 6.7 si riporta invece la deformazione imposta al dipinto per l'effetto delle forze della traversatura con molle. Si calcola che per una media di 15,3N per punto di ancoraggio sulla traversa centrale, sviluppatasi in un clima con circa 40% di umidità relativa, il dipinto viene inflesso per una freccia di 7,9mm (acquisizioni A e D); per una media di 14,4N invece, corrispondente a circa 65% di umidità relativa, la freccia di flessione calcolata è pari a 7,4mm (acquisizioni C ed E). Tramite il modello matematico di Marcon è possibile esplorare infine l'ipotetica inflessione che il dipinto avrebbe per azione di una forza media su ciascun punto di ancoraggio pari a 25N: si superano i 10mm di freccia.

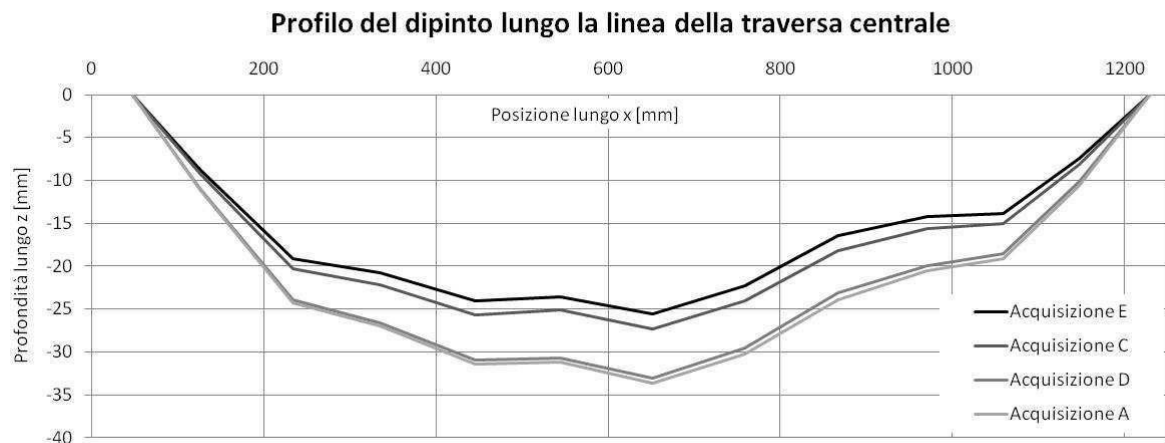


Grafico 6.6. Profilo del dipinto calcolato lungo la linea della traversa centrale. Le quattro acquisizioni sono corrispondenti a momenti climatici significativi (grafico 6.8).

Profilo calcolato del dipinto lungo linea della traversa centrale per effetto delle sole forze delle molle

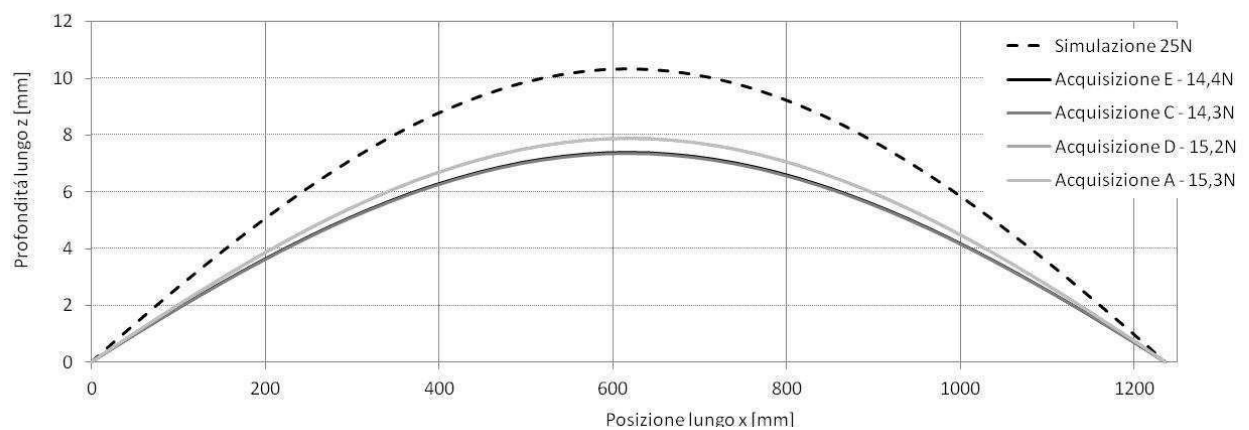


Grafico 6.7. Ipotetico profilo che il dipinto avrebbe lungo la linea della traversa centrale per effetto delle sole forze esercitate dalle molle. Le quattro acquisizioni sono corrispondenti a momenti climatici significativi (grafico 6.8).

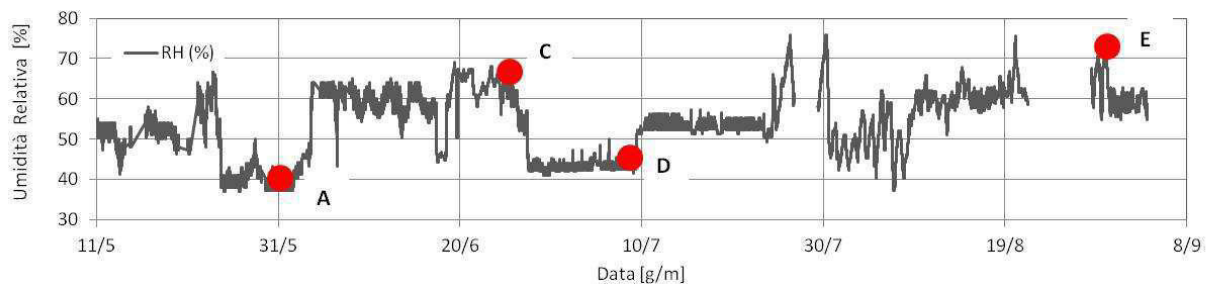


Grafico 6.8. Umidità relativa alla quale è stato sottoposto il tavolato originale. In rosso sono individuati quattro momenti climatici significativi in corrispondenza dei quali sono stati calcolati i profili di cui ai grafici 6.6 e 6.7.