

STUDIO MULTIDISCIPLINARE DELLA SINDONE DI ARQUATA DEL TRONTO “*EXTRACTUM AB ORIGINALI*”

P. DI LAZZARO, M. GUARNERI, D. MURRA, V. SPIZZICHINO
ENEA - Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni
Centro Ricerche Frascati, Roma

M. MISSORI

CNR – Istituto dei Sistemi Complessi
Monterotondo Scalo, Roma

V. PIRACCINI

Accademia delle Belle Arti
Roma

A. MENCATTINI

Università degli studi di Tor Vergata
Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Roma

A. DANIELIS

Ospite ENEA
Centro Ricerche Frascati, Roma



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

STUDIO MULTIDISCIPLINARE DELLA SINDONE DI ARQUATA DEL TRONTO *“EXTRACTUM AB ORIGINALI”*

P. DI LAZZARO, M. GUARNERI, D. MURRA, V. SPIZZICHINO
ENEA - Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni
Centro Ricerche Frascati, Roma

M. MISSORI

CNR – Istituto dei Sistemi Complessi
Monterotondo Scalo, Roma

V. PIRACCINI

Accademia delle Belle Arti
Roma

A. MENCATTINI

Università degli studi di Tor Vergata
Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Roma

A. DANIELIS

Ospite ENEA
Centro Ricerche Frascati, Roma

I Rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina
<http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/rapporti-tecnici>

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

STUDIO MULTIDISCIPLINARE DELLA SINDONE DI ARQUATA DEL TRONTO “EXTRACTUM AB ORIGINALI”

P. DI LAZZARO, M. GUARNERI, D. MURRA, V. SPIZZICHINO, M. MISSORI, V. PIRACCINI, A. MENCATTINI
A. DANIELIS

Riassunto

In questo Rapporto riassumiamo i principali risultati della prima campagna di misure in loco della Sindone di Arquata, una copia in scala 1:1 della Sindone di Torino risalente al 1653 la cui peculiarità è una doppia impronta umana frontale e dorsale non prodotta tramite un evidente disegno o pittura come nelle altre copie della Sindone. Le misure sono state effettuate utilizzando sofisticate tecnologie ottiche e spettroscopiche non invasive particolarmente adatte allo studio dei Beni Culturali, nell'ambito di un accordo tra il Comune di Arquata, l'Unità Tecnica Applicazione delle Radiazioni del Centro ENEA di Frascati e l'Istituto dei Sistemi Complessi del CNR.

Le misure sperimentali hanno permesso di ottenere dati scientifici di assoluto interesse, atti a individuare la possibile origine sia della doppia impronta, sia delle macchie simulanti sangue e rattoppi presenti sulla Sindone di Arquata. Questi risultati sperimentali permettono anche di elaborare un piano per la corretta conservazione della Sindone di Arquata nel lungo periodo.

Parole chiave: Sindone, Arquata del Tronto, Lino, Tessuto, Spettroscopia, Fluorescenza indotta da laser, Radar topologico, Fluorescenza ultravioletta, Riflettanza, Assorbanza.

MULTIDISCIPLINARY STUDY OF THE SHROUD OF ARQUATA “EXTRACTUM AB ORIGINALI”

Abstract

In this report we summarize the main results of the first in-depth measurement of the Shroud of Arquata, a 1:1 copy of the Shroud of Turin which dates back to 1653. The most peculiar feature of the Shroud of Arquata is the front and back human footprint which is not produced by apparent drawings or painting as in the other copies of the Shroud. In the frame of an agreement between the City of Arquata, the Technical Unit Application of Radiation of the ENEA Centre of Frascati and the Institute of Complex Systems of CNR, we used sophisticated optical and spectroscopic non-invasive technologies, suitable to the study of Cultural Heritage.

The elaboration of experimental results allowed to obtain scientific data apt to suggest the possible origins of the double image, of the stains simulating blood and of the false patches embedded on the Shroud of Arquata.

In addition, the experimental data allowed to develop a plan for the proper long-term conservation of the Shroud of Arquata.

Keywords: Shroud, Arquata del Tronto, Linen, Fabric, Spettroscopy, Laser induced fluorescence, Imaging topological Radar, Ultraviolet fluorescence, Reflectance, Absorbance.

INDICE

Introduzione	7
1. Cenni storici	8
2. Analisi della Sindone di Arquata	8
3. Elaborazione delle immagini fotografiche	14
4. Fluorescenza indotta da luce ultravioletta	16
5. Misure tramite radar topologico	18
6. Misure di fluorescenza indotta da laser	25
7. Misure di spettri Raman	34
8. Misure di riflettanza assoluta nell'ultravioletto, visibile e vicino infrarosso	35
9. Riassunto e analisi dei risultati sperimentali	41
10. Conclusioni e raccomandazioni per la conservazione	44
Ringraziamenti	45
Bibliografia e note	47

STUDIO MULTIDISCIPLINARE DELLA SINDONE DI ARQUATA DEL TRONTO, "EXTRACTUM AB ORIGINALI"

Introduzione

Durante i lavori di restauro della chiesa di S. Francesco presso Borgo di Arquata del Tronto, in provincia di Ascoli Piceno, nel 1980 viene ritrovata una doppia urna di legno dorato, celata nella nicchia di un altare. Dentro si trova un grande lenzuolo ripiegato e una pergamena. Sul lenzuolo è visibile l'impronta frontale e dorsale di un corpo umano, e al centro è impressa la scritta 'EXTRACTVM AB ORIGINALI' (estratto dall'originale, ovvero santificato dal contatto diretto con la vera reliquia).

Si tratta di una copia in scala 1:1 della Sindone di Torino, la più preziosa e controversa reliquia della cristianità [1]. La copia di Arquata riproduce in modo accurato l'immagine e le macchie presenti sulla Sindone di Torino: oltre alla doppia impronta umana si notano macchie rossastre al costato, sui piedi e sulla testa, i disegni che ricordano i rattoppi corrispondenti alle bruciature procurate alla Sindone di Torino dall'incendio del 1532, e persino le macchie di acqua.

Tuttavia, c'è una importante differenza tra la Sindone di Arquata e le altre 50 copie della Sindone di Torino sopravvissute ai nostri tempi [2]: ad una prima analisi, nell'impronta umana non si riconoscono tratti di pennello, né disegni, né dettagli anatomici del volto e del corpo. Viceversa, l'origine pittorica e artistica delle altre copie della Sindone è evidente anche ad un'analisi superficiale [2, 3].

E' quindi necessaria un'analisi strumentale per stabilire l'origine dell'impronta e la tecnica utilizzata per produrla. Trattandosi di un bene culturale, oltre che di un oggetto di devozione, le analisi strumentali devono preservare l'integrità del bene, e quindi devono essere non invasive e non a contatto.

Presso l'Unità Tecnica Applicazione delle Radiazioni del Centro ENEA di Frascati e presso l'Istituto dei Sistemi Complessi del CNR di Montelibretti sono state sviluppate sofisticate tecnologie ottiche e spettroscopiche non invasive, particolarmente adatte allo studio dei Beni Culturali, la cui applicazione a dipinti, affreschi, disegni e documenti di grande importanza storica e artistica ha prodotto risultati di assoluto rilievo internazionale [4, 5, 6, 7]. Inoltre, presso la stessa Unità Tecnica del Centro ENEA di Frascati, a partire dal 2005 si sono formate competenze di rilievo internazionale sugli studi scientifici dell'immagine corporea della Sindone di Torino [8, 9, 10, 11]. Il Comune di Arquata del Tronto ha ritenuto di avvalersi di queste competenze scientifiche e tecnologiche, siglando un accordo con ENEA e CNR per effettuare il primo studio scientifico strumentale della Sindone di Arquata.

1. Cenni storici

Nel 1980 la Sindone di Arquata è stata rinvenuta insieme ad una pergamena di autentica, attualmente in possesso di un privato, di cui si può visionare solo una trascrizione [12]. Si tratta di un testo in latino, redatto ad Alba (Cuneo) nel 1655 e firmato da Paolo Brizio, vescovo di Alba, e da Guglielmo Sanzia, notaio e cancelliere vescovile. Il documento riporta che il 4 Maggio 1653, durante l'ostensione della Sacra Sindone nella piazza di Castelgrande a Torino, monsignor Brizio stese e fece toccare sull'originale una copia conforme della Sindone, su tela di lino dipinta, larga 5 palmi e lunga 20, che gli era stata consegnata da padre Massimo Bucciarelli, al quale fu restituita al termine della cerimonia.

Bisogna notare che Massimo Bucciarelli era fratello del vescovo Giovanni Paolo Bucciarelli, nativo di Arquata, che aveva ricoperto in passato il ruolo di segretario di Federico Borromeo, nipote di San Carlo Borromeo, assai devoto alla Sindone di Torino e 'causa' del suo spostamento da Chambery a Torino. Infatti, la Sindone arriva a Torino nel Settembre 1578 per volere di Emanuele Filiberto di Savoia allo scopo di abbreviare il viaggio intrapreso dallo stesso Carlo Borromeo, allora arcivescovo di Milano, che si stava recando a piedi da Milano a Chambery per venerare la Sindone, sciogliendo il voto fatto durante la peste che aveva colpito Milano nel 1576 [1].

La connessione tra Arquata e la Sindone di Torino tramite i fratelli Bucciarelli è quindi intricata ma sufficientemente delineata.

Nel 1656 il vescovo Bucciarelli muore e lascia la copia della Sindone ai frati francescani di Borgo di Arquata che la custodiscono nel convento di S. Francesco, piegata sotto l'altare ligneo nella cappella che lo stesso Bucciarelli aveva fatto realizzare e che contiene una tela raffigurante S. Carlo Borromeo con il cordone francescano.

Da quel momento, i documenti e le notizie sulla Sindone di Arquata sono sporadici. C'è una lettera datata 1903 indirizzata al Santo Padre e firmata da alcuni cittadini di Borgo di Arquata in cui si lamenta il pessimo stato di conservazione della chiesa francescana, passata alla proprietà del Demanio dopo l'Unità d'Italia, richiedendo un intervento del Papa anche perché nella chiesa si conservano diverse reliquie, tra cui "il Sacro Lenzuolo" [12]. Un articolo del 1915 pubblicato sulla rivista Picenum Seraphicum descrive il convento di S. Francesco e sottolinea che il telo era conservato con la sua pergamena nella sagrestia della chiesa.

2. Analisi della Sindone di Arquata

La Sindone di Arquata è stata rimossa dalla nicchia nella cappella di destra, il vetro di protezione è stato tolto e infine il telo è stato posto su un telaio metallico appositamente realizzato e collocato nella navata di destra della chiesa di S. Francesco in una posizione conveniente per effettuare le misure, vedi la Fig. 1.

2.1 Confronto con altre copie. L'orientamento della Sindone di Arquata, reso obbligato dalla scritta centrale, presenta l'impronta frontale a sinistra e quella dorsale a destra rispetto all'osservatore (Fig. 2a), analogamente all'orientamento tradizionale della Sindone di Torino, vedi Fig. 2b.



Figura 1. Posizionamento della Sindone di Arquata durante le misure all'interno della chiesa di S. Francesco. Davanti alla Sindone sono visibili a sinistra il radar topologico RGB-ITR e a destra il sistema per la spettroscopia LIF, posto su un treppiede.

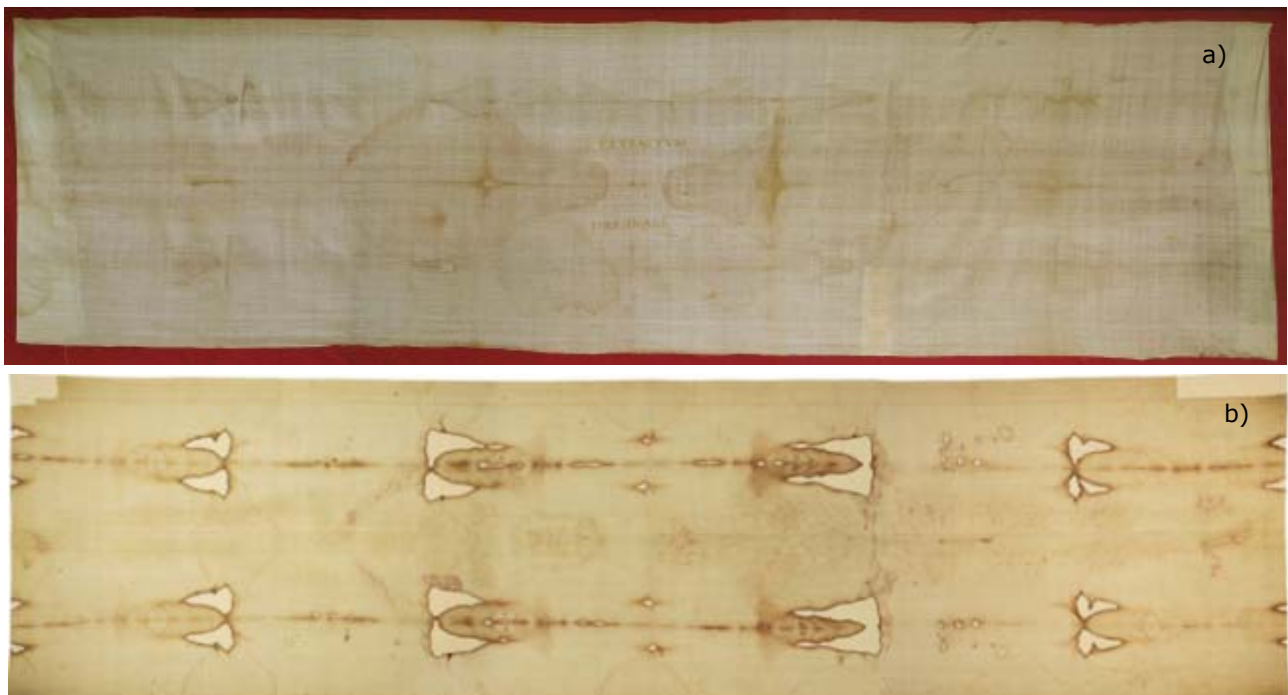


Figura 2. a) Fotografia della Sindone di Arquata cucita su un telo di seta rossa. I colori sono bilanciati sul bianco di riferimento. Foto ENEA. b): Fotografia della Sindone di Torino. Tratto da <http://www.comune.torino.it/>

Lo stesso orientamento della Sindone di Arquata si trova in altre copie della Sindone, come nella Sindone di Logroño [3], con la scritta SACADO DEL ORIGINAL EN TVRIN EN 4 DE MAYO DEL 1623, quindi "santificata" sempre il 4 Maggio, festa della Sindone; quella conservata a Casale Monferrato (con la scritta EXTRACTUM EX ORIGINALI TAURINI ANNO 1643) [2]; quella conservata a Savona (EXTRACTUM EX ORIGINALI

TAURINI ANNO 1653) [2], quindi "santificata" insieme alla Sindone di Arquata), e quella conservata ad Imperia (EXTRACTUM AB ORIGINALI TAURINI ANNO 1678) [2]. Al contrario, alcune copie realizzate a Chambery prima dello spostamento a Torino hanno la scritta tale da orientare la copia ruotata di 180° rispetto alla modalità attuale.

Come accennato nell'introduzione, uno dei principali motivi di interesse scientifico della doppia impronta umana sulla Sindone di Arquata è l'apparente mancanza di tratti di pennello e disegni, e l'assenza di dettagli anatomici, che la differenzia dalle altre copie della Sindone. Questo fatto è reso evidente nella Fig. 3, che mostra il volto di alcune tra le più famose copie della Sindone e il "volto" della Sindone di Arquata.



Figura 3. A sinistra: raccolta di otto volti di altrettante copie della Sindone attualmente conservate in Spagna e Portogallo, confrontate con il volto della Sindone di Torino posta al centro. Tratto da [3]. A destra, volto della Sindone di Arquata, foto ENEA.

2.2 Analisi del tessuto. La Sindone di Arquata è un telo di lino rettangolare, disposto con il lato lungo orizzontale e ripiegato in modo da avere la stessa lunghezza della Sindone di Torino. Le nostre misure della Sindone di Arquata danno i seguenti risultati: lunghezza orizzontale dopo piegatura dei bordi 4360 mm; altezza verticale variabile tra 1135 mm (ai bordi) e 1150 mm (al centro). Tramite spessimetro abbiamo misurato in diversi punti perimetrali uno spessore del telo variabile tra 0.25 mm e 0.3 mm \pm 0.01 mm. Tenendo conto della densità media di un tessuto lino, pari a circa 1.54 g/cm³, e del fattore di riempimento medio del tessuto pari a circa 83% (come mostreremo nella Fig. 6), deduciamo un peso pari a circa 1.9 Kg, considerando la lunghezza intera di 5 m.

Il telo al tatto dà la sensazione di una stoffa di lino morbido, sottile, non grossolano, di pregio, tessuto a mano. Lungo il suo perimetro, il lino è imbastito con un filo di cotone in modo grossolano su un tessuto shantung di seta rosso cremisi, bordato da shantung di seta giallo ocra d'oro. Il lino è tessuto ad *armatura tela* (trama perpendicolare all'ordito) con diametro e densità dei fili irregolare (valori medi 26 fili/cm di ordito/cm, 27 fili/cm di trama) tipici della filatura manuale tramite telaio artigianale. La cimosa è presente su tutta la lunghezza di entrambi i bordi laterali dell'ordito. L'analisi al microscopio ottico delle fibrille di un filo di lino (ingrandimento 100x, vedi Fig. 4) ha rivelato la presenza sporadica di cotone, in quantità non superiore al 3%, probabilmente a causa di una precedente lavorazione di un tessuto di cotone che ha lasciato tracce sui pettini del telaio.

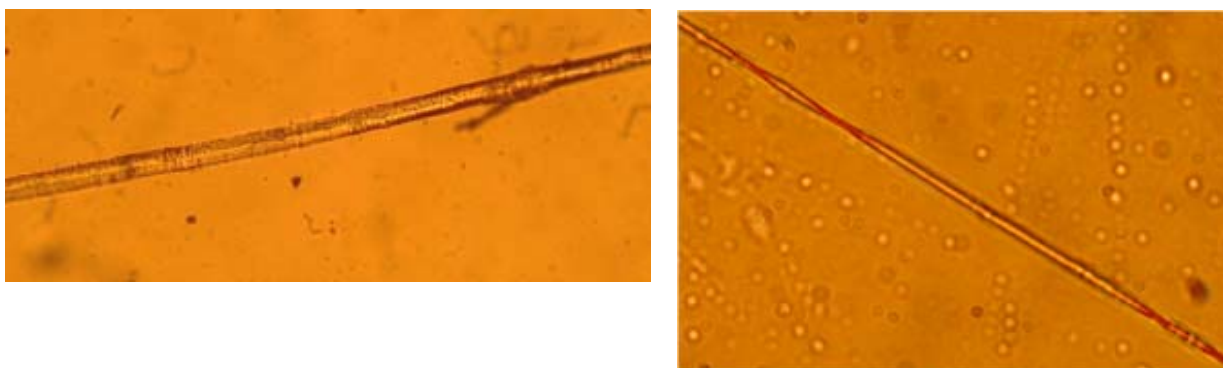
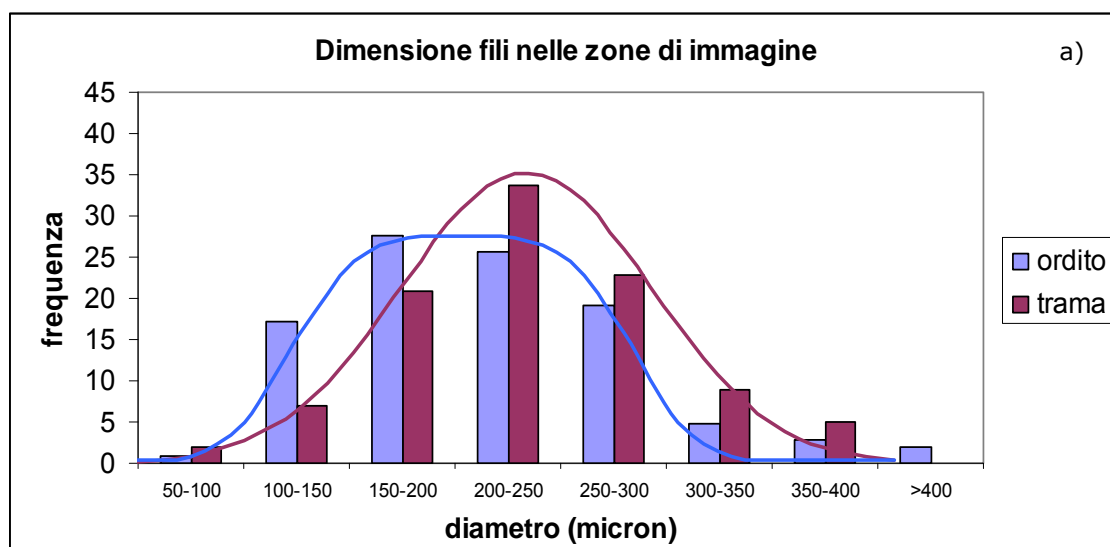


Figura 4. Foto al microscopio di una fibrilla del filo di lino (a sinistra) e una delle fibrille di cotone rinvenute all'interno del filo di lino (a destra).

Sulla parte bassa del telo è presente un rattoppo rettangolare avente dimensioni 100 mm × 300 mm (orizzontale × verticale) realizzato con un tessuto di lino di fattura grossolana e ad armatura tela più recente (quindi meno ossidato e più chiaro) del telo della Sindone, spesso 0.4 mm. Non si rilevano altri interventi e il telo appare in un discreto stato di conservazione.

Tramite fotografie macro in diverse zone del tessuto, abbiamo ottenuto una statistica del diametro dei fili di trama e ordito, i cui risultati sono riassunti nella Fig. 5.



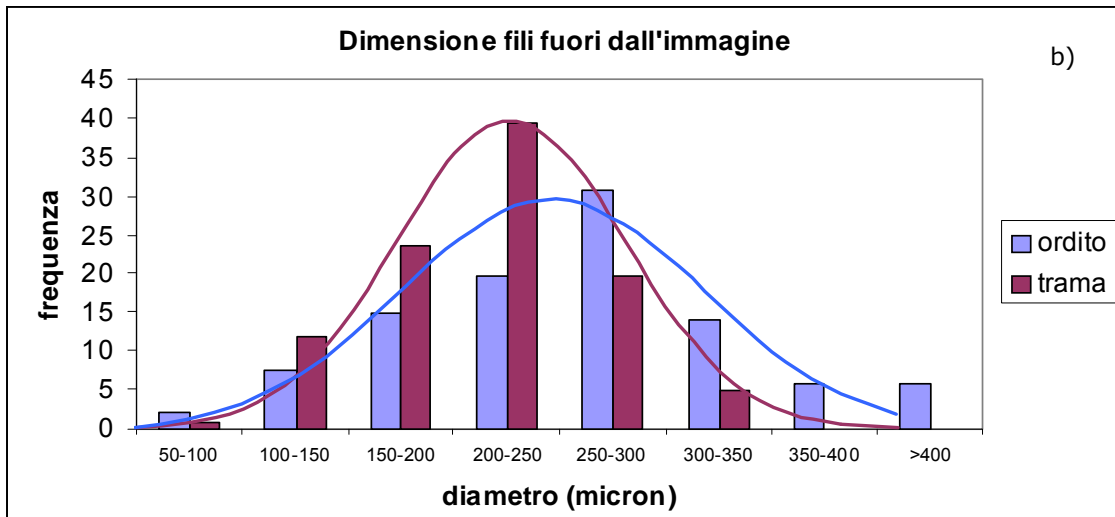


Figura 5. Istogramma della distribuzione del diametro dei fili: a) nelle zone interne all'impronta, b) esterne all'impronta.

Mentre i fili della trama presentano la stessa distribuzione della dimensione del diametro fuori e dentro l'impronta, con un picco di frequenza intorno ai (0.2-0.25) mm, i fili di ordito hanno un diametro significativamente diverso all'interno e all'esterno dell'impronta, vedi Fig. 5. In pratica, la densità del tessuto (trama + ordito) all'interno dell'impronta è mediamente minore rispetto all'esterno dell'impronta, come riassunto nella Fig. 6.

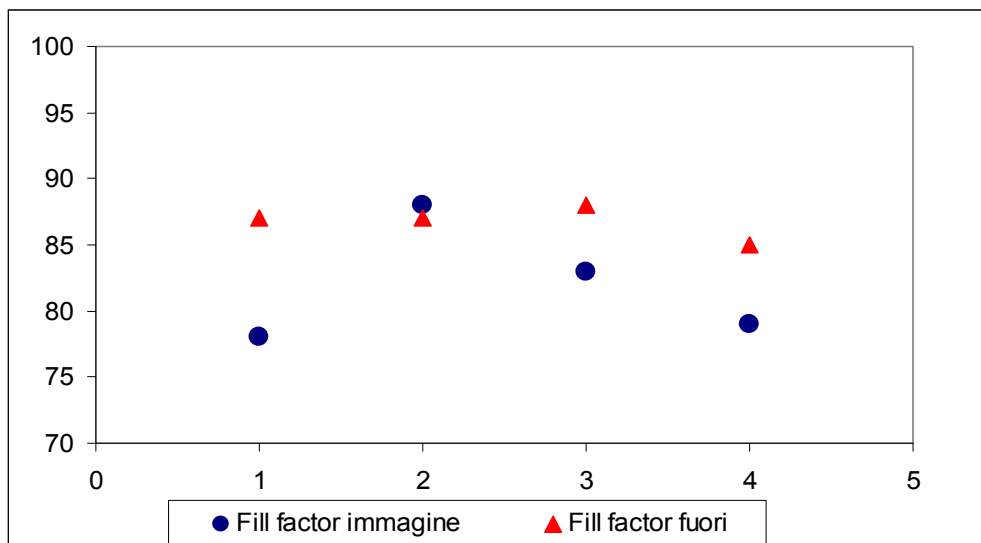


Figura 6. Fattore di riempimento del tessuto (inversamente proporzionale alla trasparenza) in otto zone della Sindone, quattro all'interno dell'impronta (pallini blu) e quattro all'esterno dell'impronta (triangoli rossi).

Di conseguenza, all'interno delle zone di immagine, dove il lino è meno fitto e quindi più "trasparente", il colore rosso cremisi del tessuto di seta sottostante la Sindone è più visibile all'osservatore, e può contribuire al colore percepito dell'impronta rispetto alle zone del lino esterne all'impronta. Questa osservazione suggerisce di porre un'attenzione particolare alla normalizzazione del colore nelle misure di riflettanza e di RGB-ITR descritte nei paragrafi seguenti.

2.3 Le macchie e l'impronta. Sia l'osservazione tramite lente di ingrandimento sia le fotografie macro permettono di appurare che i fili del tessuto non sono cementati, e non vi sono pellicole, sedimenti o grumi di materiale apportato, né dentro né fuori l'impronta. La doppia impronta corporea della Sindone di Arquata è sfumata e poco definita, anche a causa del contributo cromatico della sottostante seta rossa nei punti in cui il tessuto è più diradato e consumato, quindi parzialmente trasparente, vedi §2.2 e Fig. 7.

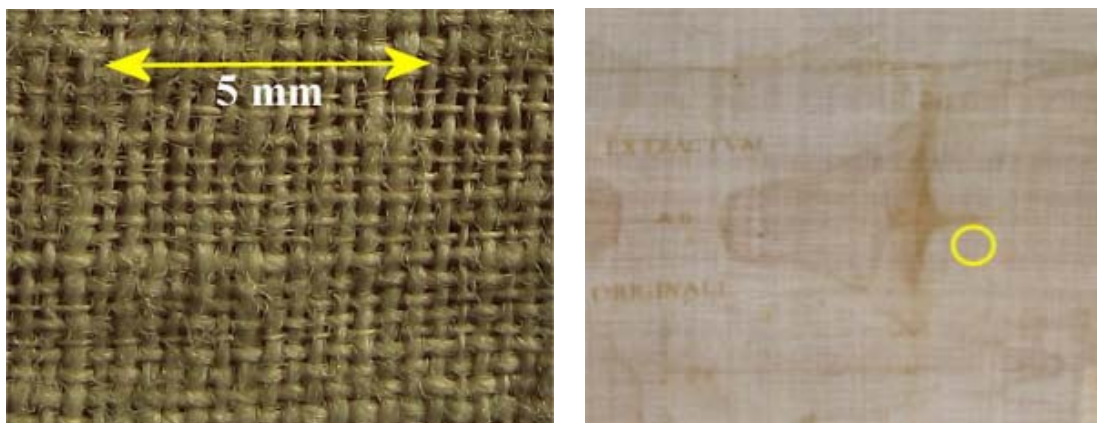


Figura 7. A sinistra: fotografia di una zona dell'impronta dorsale in cui il telo appare consumato in modo irregolare. Il diametro dei fili di lino varia tra 0.1 mm e 0.4 mm. A destra: posizione della zona relativa alla stessa fotografia. Foto ENEA.

Il colore che simula le macchie di sangue ha una tonalità Terra Rossa Sinopia, mentre il disegno che simula le bruciature è color Terra d'Ombra. Le lettere della scritta EXTRACTUM AB ORIGINALI sono regolari, forse scritte/dipinte a mano con tonalità Terra d'Ocra Gialla. Nelle macchie che simulano sangue sulle braccia, si percepisce un *ductus* simile al disegno delle bruciature.

Notiamo che nella Sindone di Arquata i piedi sono paralleli, ciascuno avente una macchia che simula il sangue del foro generato dalla crocifissione, vedi la Fig. 8, mentre nella Sindone di Torino non vi è l'immagine dei piedi, ma due estese macchie di sangue corrispondenti alla pianta del piede destro e il tallone del piede sinistro (vedi Fig. 2b), da cui si deduce che i piedi sono inclinati l'uno verso l'altro.



Figura 8. Impronta posteriore dei piedi nella Sindone di Arquata. I piedi sono paralleli, ciascuno con una macchia che simula il sangue del foro generato dalla crocifissione. La striscia più chiara a destra della foto è dovuta al ripiegamento del bordo del telo di lino atto a ottenere una lunghezza apparente uguale a quella della Sindone di Torino. Nella zona di ripiegamento, lo spessore doppio del telo permette di apprezzare un colore più chiaro: questo dimostra come il colore percepito del telo di lino dipenda anche dal colore del sottostante tessuto di seta rossa. Foto ENEA.

3. Elaborazione delle immagini fotografiche

Tutte le immagini fotografiche riportate in questo Rapporto sono state bilanciate con il bianco di riferimento dato da un foglio di carta A4. Le immagini sono state ottenute usando due macchine fotografiche: una Canon EOS 1000D con obiettivo Canon EF-S, 18-55 mm, diametro 58 mm e una Fujifilm FinePix S1600 con obiettivo Fujinon 28-420 mm. L'illuminazione della Sindone è stata fornita da una lampada alogena Philips 13704R 1000W R7s 230V 1CT, le cui caratteristiche tecniche sono riportate in [13], mentre la Figura 9 mostra lo spettro di emissione.

La lampada è stata usata come unica fonte di illuminazione ed è stata posta a circa 2 m di distanza dalla superficie in esame e a circa 1.80 m di altezza ed angolata in modo da evitare fenomeni di riflessione diretta.

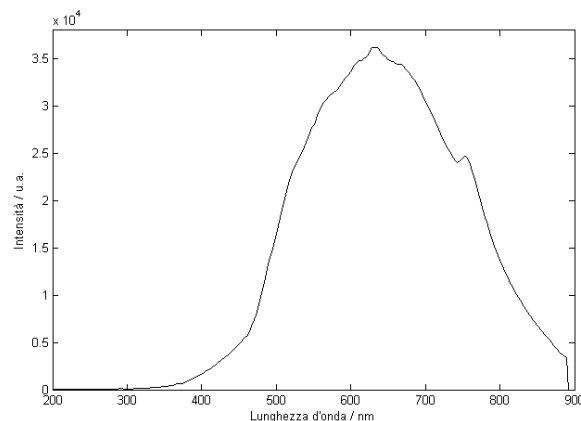


Figura 9 Spettro della lampada alogena utilizzata come sorgente di illuminazione nelle immagini fotografiche e nella misure LIF in remoto.

Sulle gambe, l'osservazione con lente di ingrandimento rivela la presenza di alcune tracce (impercettibili a occhio nudo) dei segni che simulano colpi di flagello, tramite sostanza rossa leggerissima mista a poco legante, riportati con pennello sottile.

Allo scopo di evidenziare i quasi invisibili segni di flagello sulle gambe, tramite il software Corel PaintShop Pro X4 abbiamo separato la foto delle gambe nelle sue tre componenti RGB e abbiamo considerato il valore assoluto della differenza B-R tra le componenti R e B. Il risultato è riportato nella Fig. 10, che mostra come l'immagine B-R permetta di vedere chiaramente sia i singoli segni simulanti la flagellazione, sia il contorno delle dita dei piedi e del tallone, talmente poco contrastati da risultare invisibili all'osservatore.

La stessa elaborazione B-R applicata alla foto del volto ha fornito interessanti indizi sulla tecnica usata per realizzare l'impronta dell'immagine: nella Fig. 11 l'elaborazione B-R mostra sul volto righe ascrivibili ad abrasione e ad uno scorrimento di sostanze liquide, entrambi lungo la direzione "verticale" della foto e quindi orizzontale rispetto all'orientamento nella Fig. 2, ovvero lungo i fili di ordito. Questa osservazione collima con i risultati delle Figg. 5 e 6.

D'altro canto, l'osservazione dell'immagine negativa della foto del volto, mostrata in Fig. 12, mostra come l'impronta non presenti zone di luce e ombra invertite, come ci si aspetterebbe da un'immagine creata tramite strinatura su bassorilievo riscaldato o tramite un disegno.

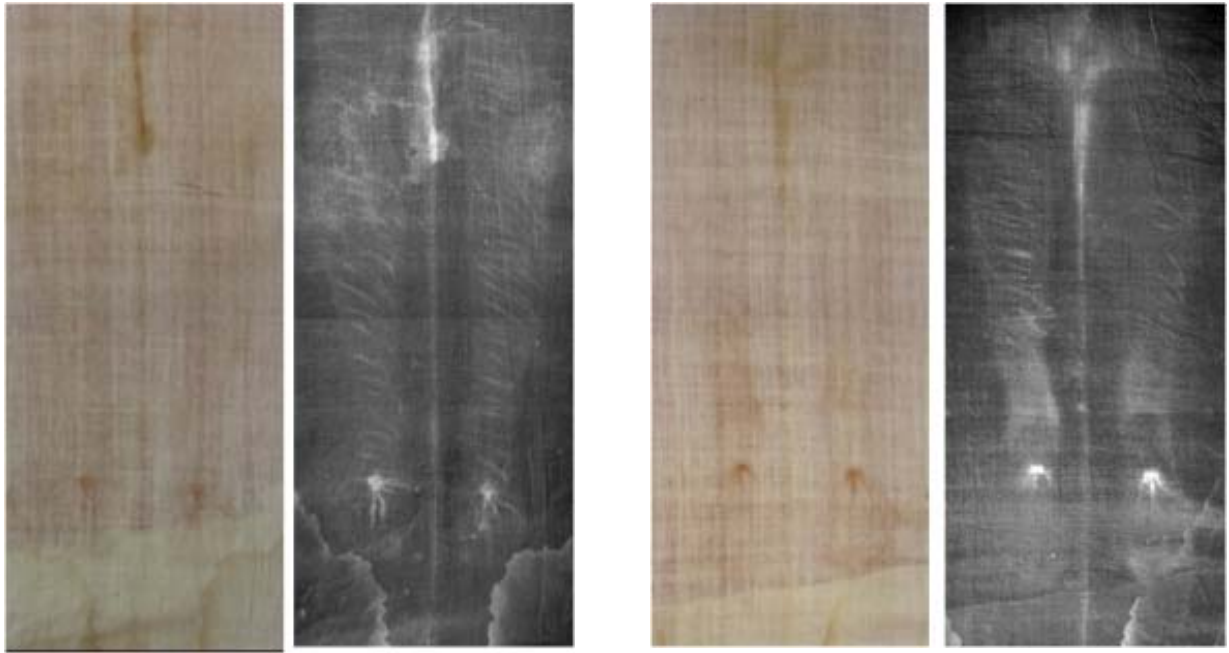


Figura 10. A sinistra: foto della immagine frontale delle gambe e dei piedi. Accanto, stessa foto sottraendo le componenti B-R. A destra: stesso accoppiamento di foto, relativo all'immagine dorsale di gambe e piedi. L'immagine elaborata B-R permette di vedere chiaramente i segni che simulano la flagellazione, quasi invisibili nella foto e consente di apprezzare il contorno dei piedi, dal tallone, all'alluce, alle singole dita, che risultano completamente invisibili all'osservatore. Il contrasto delle foto B-R è stato aumentato allo scopo di evidenziare nitidamente i segni dei flagelli.



Figura 11. A sinistra: fotografia dell'impronta del volto frontale. A destra: stessa fotografia elaborata B-R, che mostra sul volto segni ascrivibili ad abrasione e ad un passaggio di sostanze liquide, entrambi lungo la direzione "verticale" della foto e quindi lungo i fili di ordito.

Figura 12. *Negativo della foto del volto della figura 11. L'immagine negativa non mostra zone di luce e ombra invertite, come si otterrebbe da un volto realizzato tramite strinatura da bassorilievo caldo o tramite disegno.*



4. Fluorescenza indotta da luce ultravioletta

Molti materiali illuminati da luce ultravioletta (UV) emettono radiazione di fluorescenza visibile, a vari livelli di intensità a seconda della loro composizione chimica. Pertanto, la fluorescenza emessa dal lino a seguito di illuminazione UV può evidenziare sia eventuali sostanze estranee aggiunte al lino (perché emettono una fluorescenza di intensità/colore diversa rispetto al lino), sia il contrasto di contorni e di segni direzionali di eventuali pennellate. Queste sostanze estranee non sono sempre visibili con la normale illuminazione, e per questo la fluorescenza indotta da luce UV è un potente mezzo di investigazione per evidenziare sostanze invisibili all'occhio umano [14].

Nelle misure sulla Sindone di Arquata abbiamo usato come sorgente di luce UV una lampada di Wood commerciale [15] in condizioni di buio per evitare contributi della luce ambiente alla fluorescenza misurata.

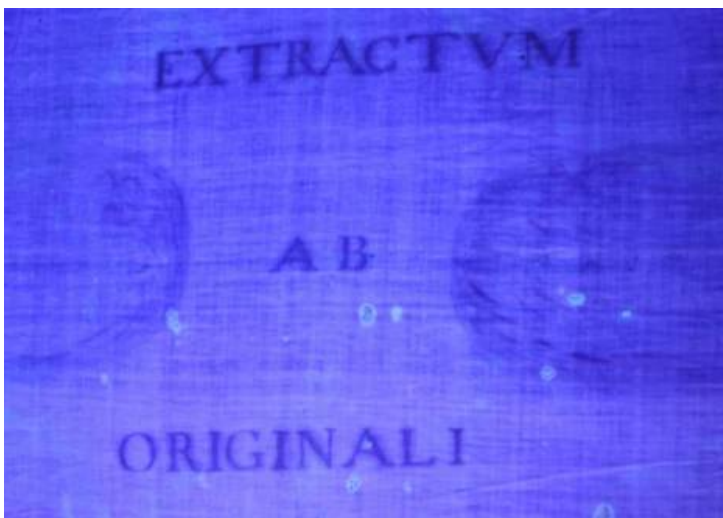
La Fig. 13 mostra il confronto tra le foto con illuminazione normale e con illuminazione UV della zona centrale della Sindone di Arquata. La foto in fluorescenza da illuminazione UV evidenzia la presenza di gocce di stucco (fortemente fluorescenti) e i segni che simulano il sangue sui capelli della nuca e sulla fronte (meno fluorescenti del lino) incluso il segno "3 rovesciato" che simula l'analogia forma del sangue sulla fronte dell'uomo della Sindone di Torino.

Notiamo nella Fig. 13 che il colore della scritta è molto simile a quello dei capelli nella foto con illuminazione visibile, mentre la foto di fluorescenza evidenzia un differente contrasto, suggerendo che le sostanze usate per la scritta siano diverse da quelle per disegnare i capelli.



Figura 13. Sopra: fotografia della zona della scritta posta tra le impronte del volto e della nuca. I colori sono bilanciati sul bianco di riferimento.

Sotto: fotografia con illuminazione ultravioletta. Le foto sono prese con angoli di vista leggermente differenti. Le differenze di contrasto e di colore tra le due foto fornisce informazioni utili ad identificare le sostanze estranee e le tecniche di realizzazione della scritta in confronto con l'impronta, come illustrato nel testo.



La Fig. 14 mostra i dettagli del volto, sia in illuminazione visibile che UV. Il volto è sfumato: l'unico contorno ben visibile è relativo ai capelli. La foto in fluorescenza indotta da UV permette di evidenziare una linea forse ascrivibile alle labbra del volto, e due gruppi di macchie di stucco non facilmente visibili in illuminazione normale.



Figura 14.
A sinistra: foto dell'impronta del volto frontale.
A destra: stessa fotografia con illuminazione

Per evidenziare alcuni dettagli tramite confronto, è utile la tecnica di *overlay*, ovvero la sovrapposizione dell'immagine in fluorescenza indotta da UV con l'immagine in illuminazione normale. La Fig. 15 mostra l'*overlay* della zona del volto frontale, con diversi fattori di trasparenza. E' interessante notare che un aumento del contrasto della foto in fluorescenza permette di evidenziare una gora di acqua che ha trasportato ai propri bordi materiali fluorescenti nel celeste. I materiali in questione possono essere costituiti da sporcizia, e/o colore, e/o sostanze reattive che hanno cambiato nel tempo la composizione della cellulosa del lino rendendola localmente fluorescente. Questa gora è quasi invisibile nella foto in illuminazione normale, vedi la Fig. 15 a destra. Ve ne sono altre i cui contorni sono ben visibili anche in illuminazione normale, vedi la Fig. 2a.

Un'ulteriore informazione data dalla Fig. 15 è la conferma che i tratti che simulano il sangue sui capelli hanno una composizione/densità diversa da quella dell'impronta, e il loro contrasto nella foto di fluorescenza permette di identificare il ductus pittorico di un pennello sottile.

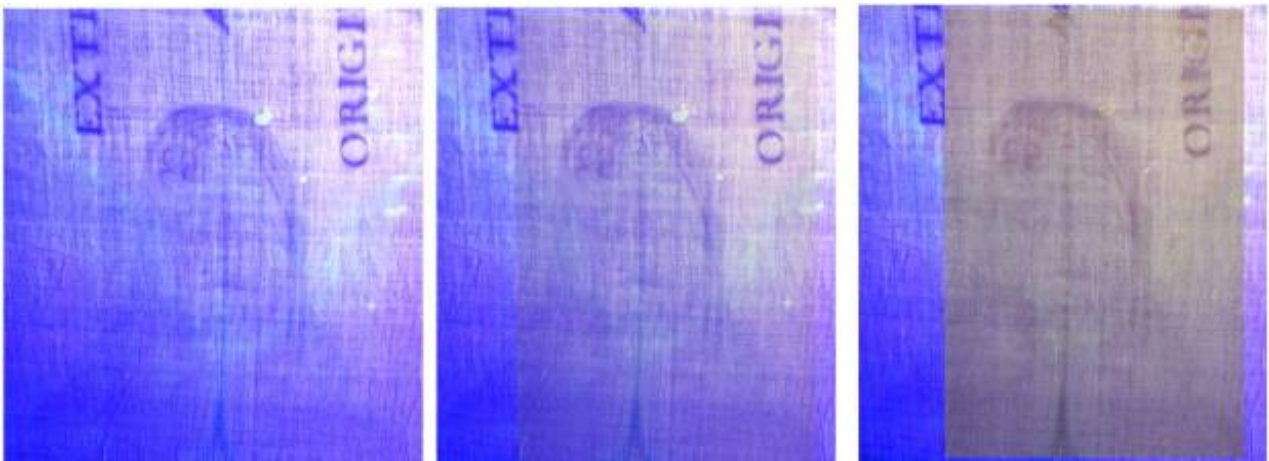


Figura 15. A sinistra: fotografia della fluorescenza indotta da illuminazione UV dell'impronta del volto frontale. Il contrasto è aumentato rispetto alla foto di fluorescenza nella figura 14 per evidenziare la presenza di una macchia d'acqua, con i bordi fluorescenti nel celeste. Al centro: stessa foto a sinistra, con la sovrapposizione di una striscia contenente la foto del volto in illuminazione normale, avente una trasparenza dell'80%. A destra, la stessa immagine al centro, ma con una trasparenza del 20%

5. Misure tramite radar topologico

Presso i Laboratori UTAPRAD-DIM del Centro ENEA di Frascati è stato progettato e sviluppato un prototipo di laser scanner chiamato RBG-ITR (Red Green Blue Imaging Topological Radar), per la visione remota e non invasiva a colori e in 3D, vedi Fig. 16. Questa tecnologia, nata per controllare le strutture all'interno dei reattori nucleari a fusione e in ambienti ostili in cui l'uomo non può accedere, trova applicazione, combinata con un sofisticato software per la raccolta e l'analisi dei dati, nelle procedure diagnostiche propedeutiche al restauro nel campo della conservazione, valorizzazione e fruizione dei Beni Artistici e Culturali [5].

Figura 16. Foto del Radar topologico RGB-ITR brevettato da ENEA per l'analisi, la valorizzazione e la fruizione dei Beni Artistici e Culturali.

Il sistema di scansione ottica è sul treppiede, mentre i diodi laser e i sistemi elettronici di controllo e acquisizione sono nei box accanto.



Il Radar ottico funziona usando la luce anziché le onde radio. Il raggio laser emesso è la somma di tre sorgenti coerenti (laser a diodo unimodali) di lunghezze d'onda corrispondenti ai tre colori primari: rosso (660 nm), verde (532 nm) e blu (440 nm). Tramite un sistema ottico movimentato da una scansione meccanica a grande angolo ($80^\circ \times 310^\circ$) i raggi laser raggiungono la superficie che si intende analizzare. Il segnale ottico retro-diffuso dal bersaglio è raccolto su tre fibre ottiche che filtrano e separano le componenti RGB misurate da tre fotodiodi distinti. Ciò favorisce il controllo separato dei colori e la restituzione corretta della cromia della scena mediante l'impiego del profilo di colore prescelto per la ripresa. La misura di scansione laser viene calibrata su un campione bianco prodotto dalla Spectralon. Questa calibrazione è importante soprattutto per assicurare un confronto corretto delle eventuali variazioni di colore in misure future, allo scopo di valutare l'evoluzione dello stato di conservazione.

Il fascio laser è modulato in ampiezza a due frequenze, 5 MHz e 190 MHz. La prima modulazione fornisce una misura approssimativa della distanza tra lo strumento e la superficie da analizzare (fino a 30 metri) mentre la seconda modulazione fornisce una misura precisa in un ridotto ambito di distanze (circa 0.8 metri). La combinazione di queste due informazioni di distanza permette una misura molto precisa (sub-millimetrica) della distanza effettiva tra superficie e strumento permettendo quindi una ricostruzione tridimensionale della superficie/oggetto studiato. L'accuratezza relativa con cui possono essere registrati e misurati i livelli di dettaglio tridimensionale raggiungibile su una scena reale (monumento, chiesa, ecc.) è di 10^{-5} (da confrontare col valore di 10^{-2} per ottiche da 50 mm di focale convenzionali). Questo significa, ad esempio, che su particolari in rilievo su una volta di una cattedrale alta 20–30 metri sono possibili misure di dislivelli dell'ordine di alcune centinaia di micron (metrologia remota).

I dati raccolti vengono trasferiti al computer per l'elaborazione e la riproduzione virtuale. Di fatto, ogni pixel dell'immagine registrata contiene 4 informazioni: 3 colori e la distanza strumento-bersaglio. E' quindi possibile "leggere" un'opera d'arte nella sua composizione colorimetrica, mentre il software può ricostruire l'immagine a tre dimensioni, ingrandendola come se la si osservasse con un microscopio.

In sintesi, RGB-ITR fornisce riproduzioni fedeli delle immagini raccolte con risoluzione spaziale superiore ai dispositivi convenzionali, ed è in grado di trasmettere agli esperti

del settore un'enorme quantità di informazioni, che permettono di seguire nel tempo gli effetti di invecchiamento o di un eventuale restauro, oltre a rendere possibile la proiezione di immagini 3-D a scopi museali o di catalogo con un dettaglio che un visitatore non può apprezzare in condizioni standard di osservazione.

5.1 RGB-ITR applicato alla Sindone di Arquata. Nelle misure sulla Sindone di Arquata, RGB-ITR è stato posto alla distanza di 5.5 metri dal telo e il minimo dettaglio longitudinale nella ricostruzione tridimensionale è di 0.6 mm. La misura è stata completata in una notte lavorando in automatico, perché le misure effettuate con RGB-ITR non necessitano della presenza della luce ambientale.

La Fig. 17 mostra un esempio di immagine tridimensionale della Sindone di Arquata ottenuta tramite RGB-ITR.

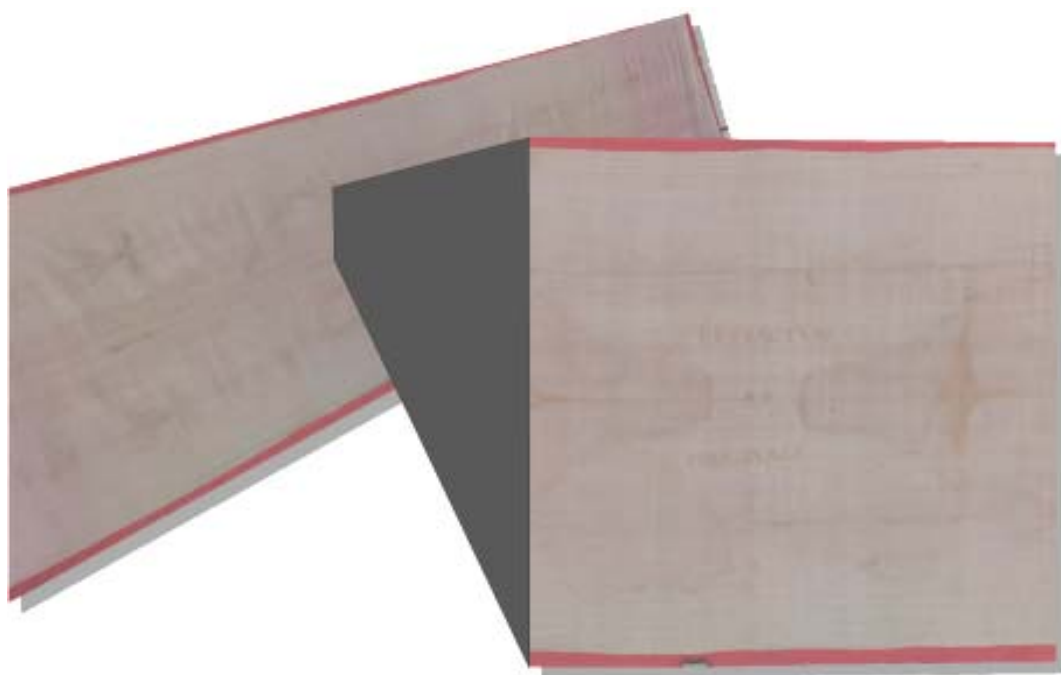


Figura 17. Esempio di immagine colorimetrica tridimensionale della Sindone di Arquata acquisita tramite il Radar topologico RGB-ITR. Ogni dettaglio dell'immagine acquisita può essere ingrandito a piacere fino ai limiti di risoluzione spaziale dell'acquisizione.

5.2 IR-ITR. Il radar topologico ENEA può essere utilizzato anche con luce laser infrarossa (IR) a 800 nm, in modo da ottenere un'immagine in riflettografia IR, grazie ad un rivelatore CCD sensibile nella regione IR che acquisisce la radiazione retrodiffusa dall'oggetto irraggiato dalla luce laser IR, fornendo un'immagine in scala di grigi.

La riflettografia IR è particolarmente utile per evidenziare la presenza di materiali apportati (coloranti, acqua, etc.) che sono penetrati al di sotto della superficie analizzata. Infatti, la maggiore lunghezza d'onda della radiazione IR rispetto a quella visibile consente di ottenere informazioni sotto lo strato superficiale dell'oggetto investigato: ad esempio, nel caso di dipinti, la riflettografia IR permette di rivelare i disegni preparatori, i "pentimenti", le scritte sulla tela coperti dal colore del dipinto.

La Fig. 18 mostra l'immagine IR della Sindone di Arquata ottenuta tramite il radar topologico IR.

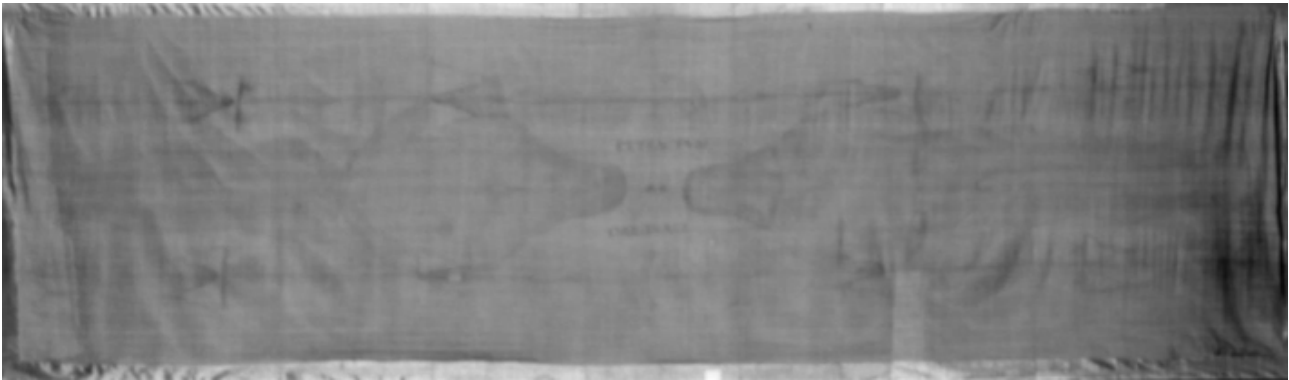


Figura 18. Immagine infrarossa della Sindone di Arquata acquisita tramite Radar topologico IR-ITR.

A parte le ombre delle pieghe del tessuto, nella Fig. 18 riconosciamo le scritte centrali, i triangoli che simulano i fori delle bruciature, il contorno dell'impronta della testa sia frontale che dorsale, le macchie di sangue sul costato sulle braccia e sui piedi, e anche il contorno dell'impronta umana. La loro visibilità (aumentato contrasto) nella riflettografia IR suggerisce che queste parti sono state disegnate o dipinte, perché la radiazione IR permette di evidenziare il pigmento che è penetrato all'interno dei fili di lino del telo.

Nella Fig. 18 si vedono anche il contorno di alcune macchie d'acqua e due lunghe strisce orizzontali che potrebbero essere dovute a strinatura (anche la colorazione tramite riscaldamento non è superficiale e penetra all'interno del tessuto), oppure ad ossidazione accelerata da stress meccanico, nel caso il telo sia stato ripiegato lungo le stesse linee per lunghi periodi di tempo.

Viceversa, nella Fig. 18 non si riconosce un contrasto tra l'interno dell'impronta e il resto del lino, confermando che la parte interna dell'impronta non è dipinta.

5.3 Elaborazione numerica delle immagini ITR. L'elevata risoluzione spaziale delle immagini laser e le informazioni colorimetriche acquisite hanno permesso di ricavare informazioni aggiuntive sia qualitative che quantitative sull'opera in esame mediante elaborazioni numeriche su diversi canali di colore e su più spazi colorimetrici. Nello specifico, abbiamo effettuato analisi cromatiche mediante lo spazio di colore HSV (Hue Saturation Value), analisi multi-risoluzione mediante le trasformate Wavelet e di Fourier ed analisi direzionali. Il fine di queste elaborazioni è di evidenziare zone poco o per nulla visibili ad occhio nudo e di fornire dati quantitativi che possono rivelarsi utili per uno studio accurato di dettagli presenti nelle impronte (testa, gambe).

5.3.1 Analisi/Enhancement cromatica. Allo scopo di fornire immagini monocromatiche e a colori ad elevato contrasto e al tempo stesso di preservare il peso che i tre canali Rosso, Verde e Blu hanno nella formazione dell'immagine, è stata effettuata una trasformazione dallo spazio RGB allo spazio HSV. La rappresentazione HSV fornisce una separazione tra la parte cromatica (H tinta e S saturazione) e la parte di luminanza (V intensità) di un'immagine, dando così la possibilità di trattare in modo indipendente queste informazioni e di conservare il contributo dei tre layers Rosso, Verde e Blu [5]. In particolare, il canale di Saturazione, che fornisce una stima del grado di purezza di una tinta, si è rivelato utile per questo tipo di studio. Ricostruendo

l'immagine di Saturazione mediante una procedura che prevede l'utilizzo di FFT (Fast Fourier Transform) e di gradienti direzionali è stato possibile aumentare in modo significativo il contrasto della Saturazione, vedi la Fig. 19.

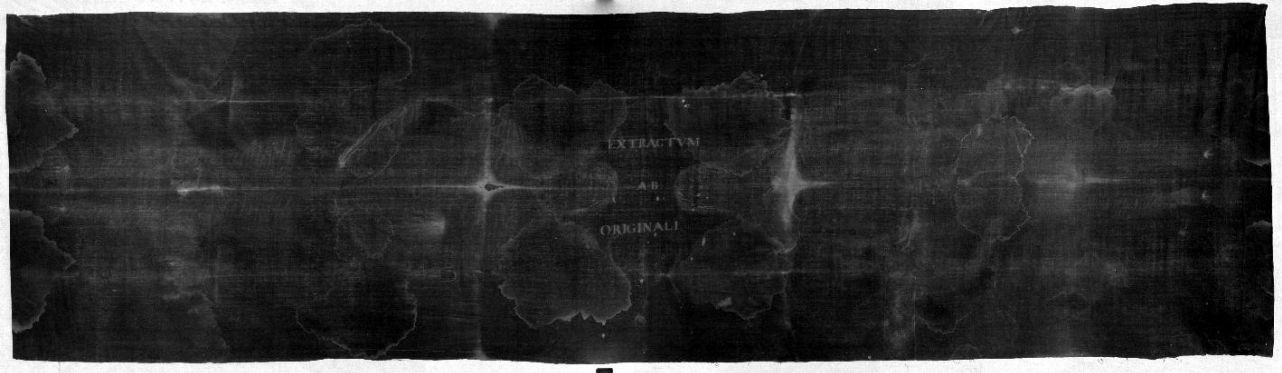


Figura 19. Canale di Saturazione dell'immagine di texture RGB-ITR della Sindone di Arquata elaborato con FFT (Fast Fourier Transform). L'immagine a toni di grigio evidenzia maggiormente i contorni del corpo frontale e dorsale sul telo, oltre alle macchie di acqua.

La Fig. 20 riporta l'immagine a colori ricostruita con questo nuovo canale di Saturazione confrontata con l'immagine originale RGB-ITR.

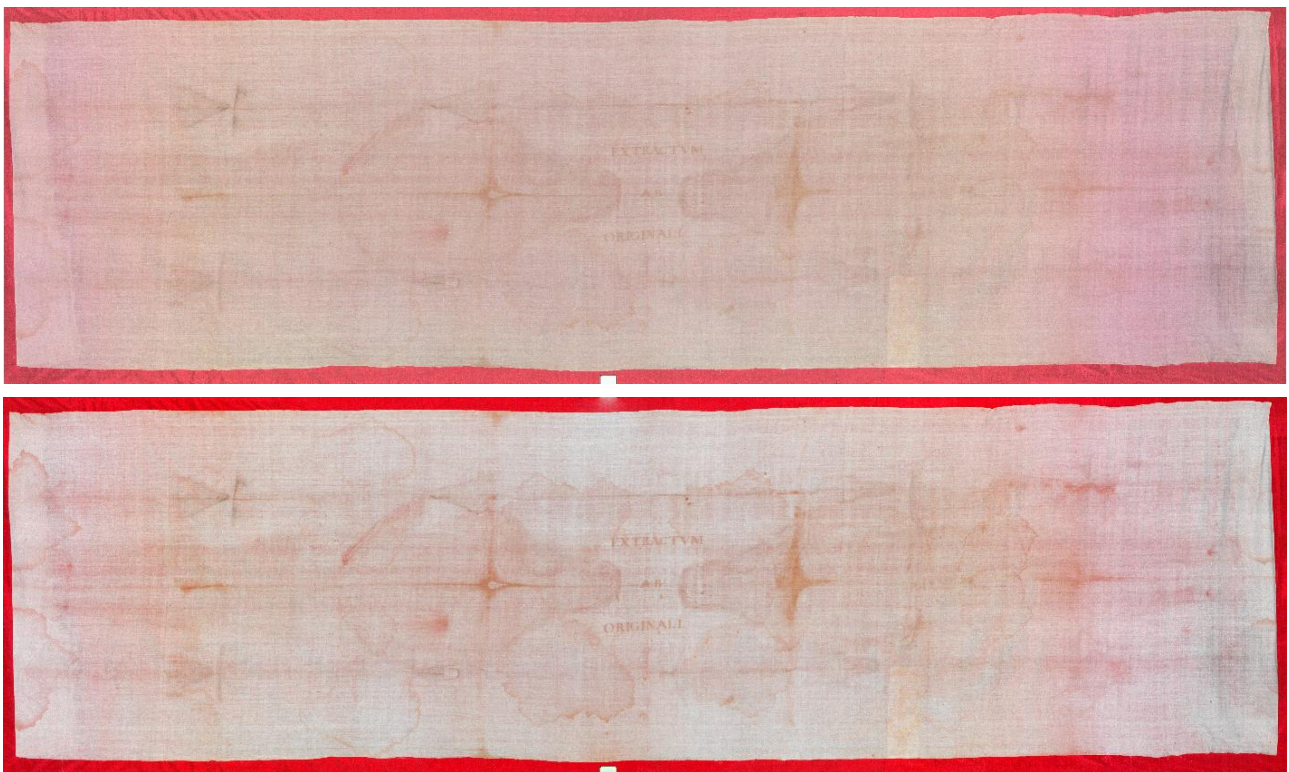
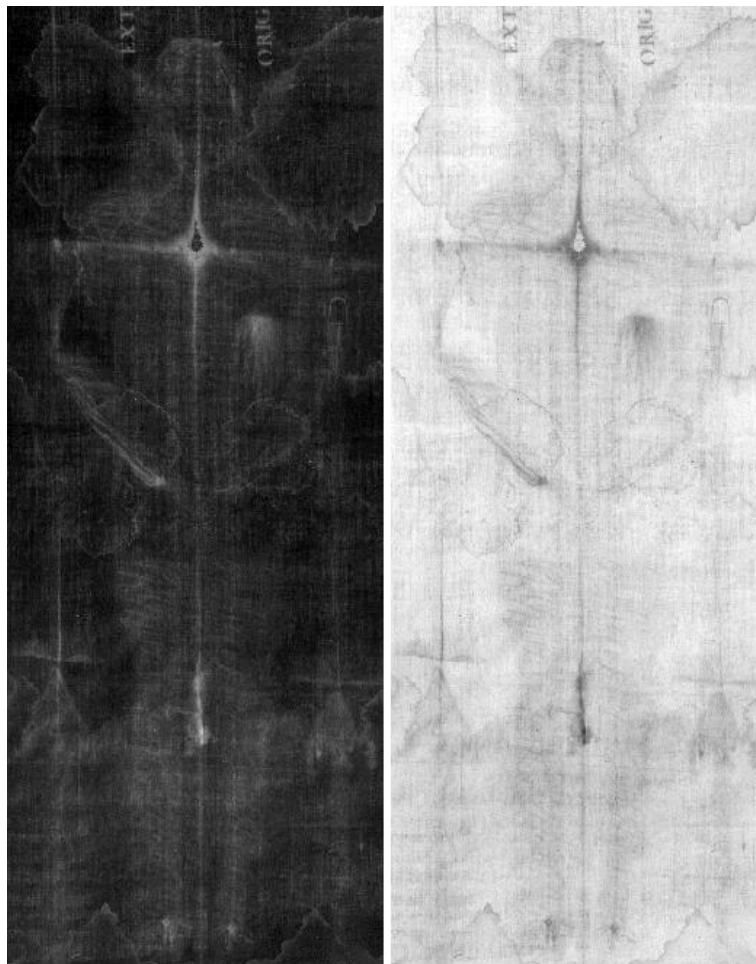


Figura 20. Sopra: Immagine di texture RGB-ITR originale della Sindone di Arquata. Sotto: Immagine di texture RGB-ITR dopo l'elaborazione del canale di Saturazione. Il maggior contrasto cromatico prodotto permette di evidenziare meglio i diversi particolari presenti sul telo.

La Fig. 21 mostra il dettaglio dell'impronta del corpo frontale, elaborata in Saturazione e la sua immagine complementare, le quali mettono in evidenza i segni di flagello sulle gambe (analogamente all'elaborazione B-R delle foto, vedi la Fig. 10) e dei segni interni all'impronta lungo la direzione longitudinale della stessa impronta, forse ascrivibili ad una volontaria erosione meccanica da parte dell'artista, confermando i risultati della Fig. 11.

Figura 21. Impronta del corpo frontale. Immagine elaborata in Saturazione (a sinistra) e la sua immagine complementare (a destra).



5.3.2 Analisi/Enhancement multi-risoluzione. Per ottenere un aumento di contrasto che preveda l'integrazione delle informazioni RGB e IR (e dunque l'aggiunta di un'informazione assente nel visibile) è utile la tecnica di fusione di immagini con trasformate Wavelet. Le trasformate Wavelet consentono di estrarre a vari livelli di decomposizione e di smoothing i dettagli spaziali da un'immagine e di fondere due informazioni differenti preservandone le caratteristiche. Registrando l'immagine IR su quella RGB (resa monocromatica), sfruttando ancora una volta lo spazio di colore HSV ed effettuando aumenti di contrasto analoghi all'elaborazione precedente, è stato possibile fondere le informazioni di dettaglio spaziale proveniente dal canale IR e di luminanza (value) acquisito nel visibile con la tecnica Wavelet. Con questa procedura è come se si andasse a "colorare" il dettaglio spaziale dell'immagine IR, la quale, come spiegato in precedenza, contiene informazioni sulla presenza di sostanze apportate sul telo e penetrate all'interno del tessuto. L'effetto di questa integrazione può essere osservato nella Fig. 22.

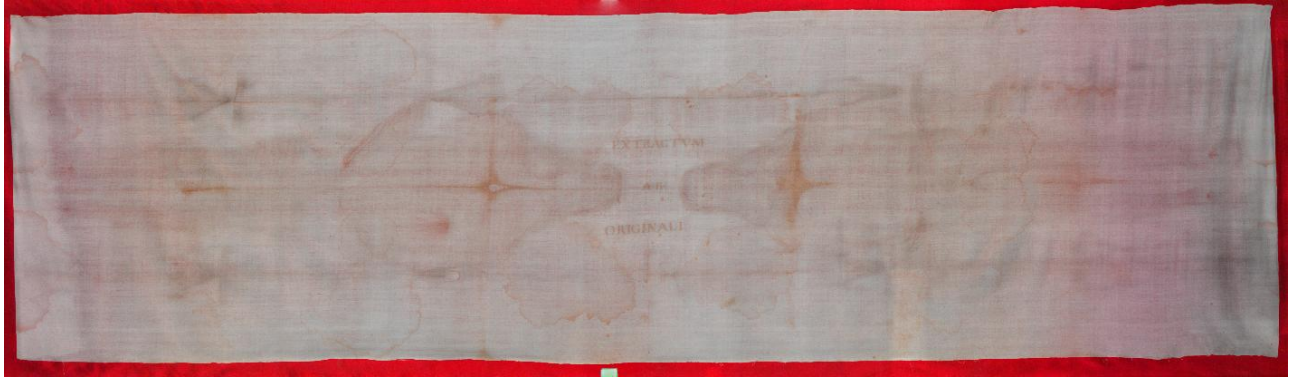


Figura 22. Integrazione delle immagini IR e RGB della Sindone di Arquata. In questo caso si osserva un aumento di contrasto non cromatico ma di intensità (o luminanza), in quanto la parte cromatica (tinta e saturazione) non è stata alterata.

5.3.3 Analisi/Enhancement direzionale. Applicando filtri direzionali all'immagine di Saturazione elaborata con la tecnica di cui sopra, è stato possibile fornire un'indicazione quantitativa dell'orientazione delle componenti direzionali presenti nelle immagini che riproducono il volto frontale e dorsale. Per una maggior localizzazione dei filtri direzionali verso la zona di interesse (testa) è stata applicata una finestra di Gauss all'immagine di Saturazione, vedi la Fig. 23.

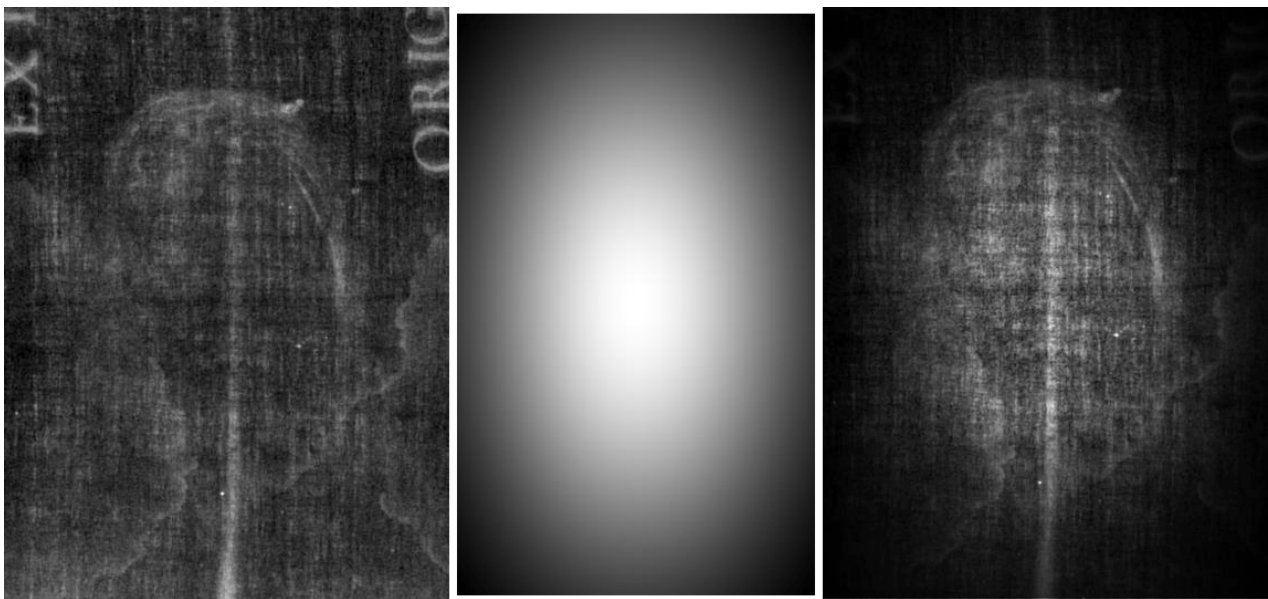


Figura 23. Filtraggio dell'impronta del volto frontale. Canale di Saturazione elaborato (a sinistra), finestra di Gauss centrata nell'immagine (al centro) e Saturazione elaborata e filtrata con finestra di Gauss (a destra). L'aumento di contrasto localizzato evidenzia maggiormente il particolare dell'impronta del volto.

A conferma di quanto già evidenziato nella Fig. 11, i risultati del filtraggio applicato mostrano una prevalenza delle componenti direzionali nella direzione verticale dell'immagine, lungo i fili di ordito.

Nella Fig. 24 è riportata l'immagine di Saturazione della testa frontale aumentata di contrasto lungo la direzione dominante secondo l'operazione del filtraggio applicato.

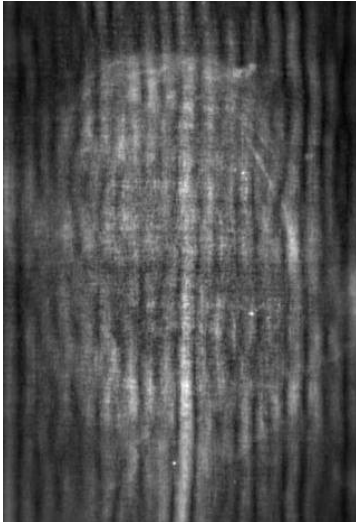
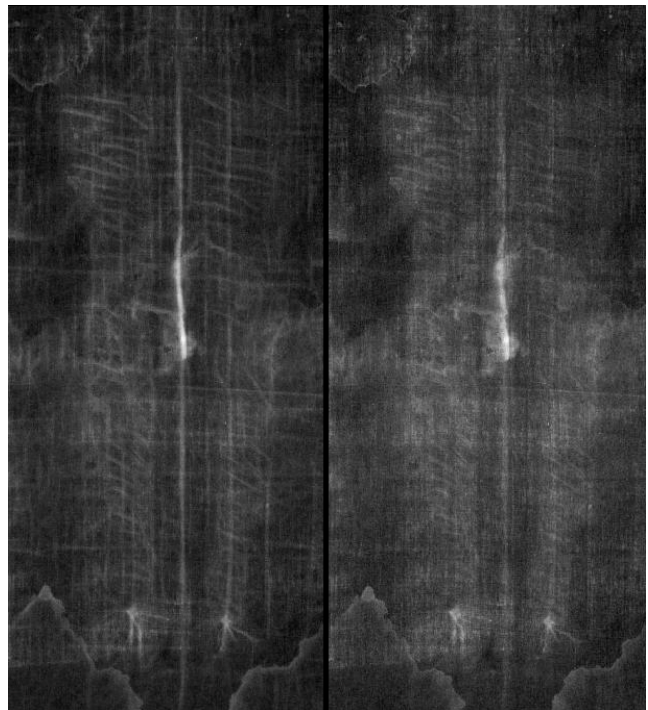


Figura 24. Immagine di Saturazione dell'impronta del volto frontale con aumento di contrasto localizzato nella direzione dominante secondo il filtraggio direzionale testato. Il risultato è stato ottenuto mediante la somma dell'immagine di Saturazione e dell'immagine filtrata lungo la direzione orizzontale della Sindone (verticale rispetto alla figura qui riportata) e successiva normalizzazione del risultato.

Infine, nella Fig. 25 sono riportate l'immagine di Saturazione dell'impronta frontale delle gambe con aumento di contrasto lungo le direzioni delle componenti direzionali presenti e la stessa immagine non filtrata. Il risultato dell'immagine filtrata rende i segni di flagello più contrastati rispetto a quelli emersi tramite elaborazione B-R delle fotografie, mostrati nella Fig. 10.

Figura 25. Immagine di saturazione con aumento di contrasto lungo le direzioni delle componenti direzionali secondo i filtri applicati (sinistra) e immagine di saturazione non filtrata (a destra). Nell'immagine filtrata sono maggiormente evidenti i segni che simulano flagellazione.



6. Misure di fluorescenza indotta da laser

Quando si irraggia un materiale con luce laser UV, i fotoni sono assorbiti nello strato superficiale del materiale stesso, generando transizioni elettroniche tra i livelli energetici delle molecole irraggiate. Gli elettroni transitano nei livelli energetici più alti e decadono in un livello intermedio tramite una transizione non radiativa (che non coinvolge emissione di radiazione visibile) e infine tornano al livello fondamentale originario, emettendo una radiazione chiamata "fluorescenza", vedi la Fig. 26.

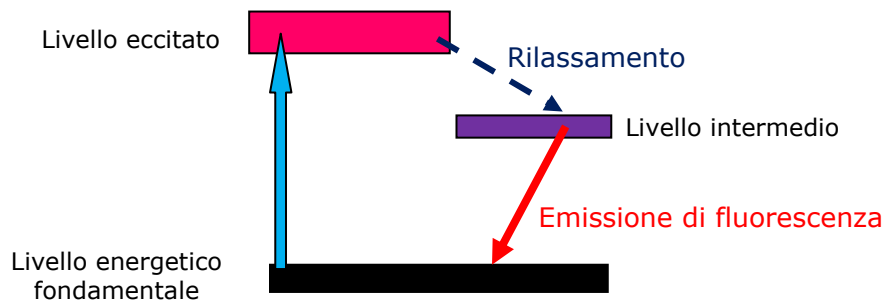


Figura 26. Schema delle transizioni energetiche degli elettroni delle molecole eccitate da impulsi monocromatici ultravioletti. La freccia celeste indica la transizione dal livello energetico fondamentale al livello eccitato causata dall'irraggiamento laser. La freccia tratteggiata rappresenta la transizione non radiativa verso il livello intermedio. La freccia rossa indica la transizione radiativa verso il livello fondamentale, che genera l'emissione di fluorescenza che fornisce informazioni sul materiale alla superficie dell'oggetto irraggiato.

Il tempo di decadimento e lo spettro della fluorescenza sono diversi per ciascuna sostanza, e quindi la misura della fluorescenza può fornire informazioni sul materiale presente alla superficie dell'oggetto irraggiato. Per questo è utile misurare la fluorescenza indotta da laser (LIF, Laser Induced Fluorescence).

6.1 Lo scanner LIF Il prototipo LIF ENEA utilizzato per la campagna di misure sulla Sindone di Arquata è mostrato nella Fig. 27 insieme allo schema di irraggiamento e di raccolta del segnale di fluorescenza. Si tratta di un laser Nd-YAG operante in quarta armonica alla lunghezza d'onda di 266 nm, un sistema di ottiche per la guida del fascio e la raccolta del segnale e un detector che permette di ottenere informazioni di interesse analitico e qualitativo sulla superficie analizzata attraverso lo studio dell'emissione di fluorescenza indotta dalla radiazione laser.

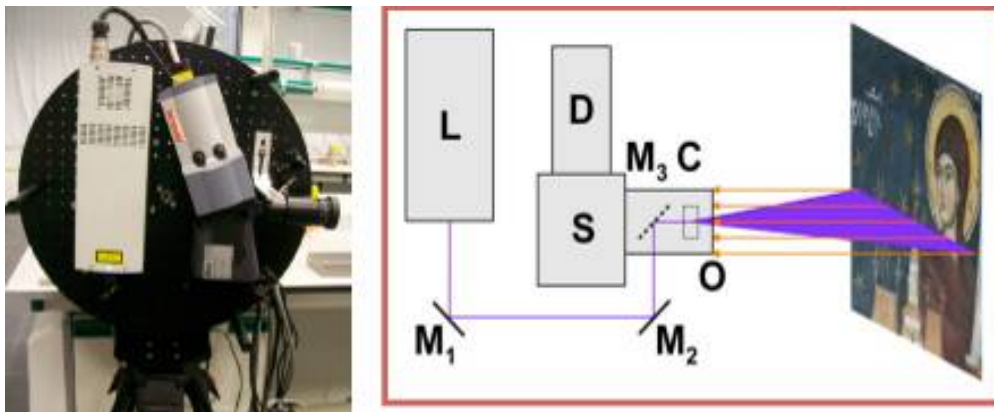


Figura 27. A sinistra, foto dello scanner LIF realizzato da ENEA. A destra, corrispondente schema di irraggiamento e ricezione. L = laser, M = specchi, C = lente cilindrica che trasforma il fascio laser in una lama di luce, O = teleobiettivo, S = spettrometro, D = rivelatore. Tratto da [6].

La motorizzazione orizzontale e verticale di precisione permette la scansione di ampie superfici. Il fascio laser è trasformato in una sottile lama di luce da una lente cilindrica allineata al sistema di raccolta costituito da un teleobiettivo all'ingresso di uno spettrometro Jobin-Yvon CP240 collegato al rivelatore. Il rivelatore consiste in un sensore ICCD ANDOR iStar DH734 di forma quadrata: le informazioni spettrale e

spaziale vengono così a trovarsi sulle due direzioni ortogonali del detector, con risoluzione spaziale sub millimetrica e spettrale di circa 2nm [6].

Il sistema LIF ENEA è caratterizzato da una risoluzione orizzontale pari a 640 pixel, angolare pari a 0.1 mrad, con tempo minimo di acquisizione di 200 ms per linea, un angolo di vista di 5.7°, che consente di scansionare linee lunghe 2.5 m a 25 m di distanza. Il sistema è portatile, lavora a distanza (fino a 25 m), è non invasivo e i tempi di scansione e acquisizione sono rapidi.

6.2 Le misure LIF sulla Sindone di Arquata Il sistema LIF è stato posto ad una distanza di circa 6 metri dal telo sindonico che era stato posto orizzontalmente ad un'altezza di circa un metro da terra (vedi la Fig. 1). L'intera larghezza del telo è stata ripresa tramite 15 scansioni verticali, con una risoluzione spaziale, sia orizzontale che verticale, di 0.5 cm. Tali scansioni sono numerate da sinistra a destra e di seguito denominate area01 ... area15.

A partire dagli spettri di fluorescenza raccolti in ciascun punto del telo sono state create delle immagini di fluorescenza. L'analisi degli spettri tramite la PCA (Principal Component Analysis [6]) ha permesso di individuare le bande maggiormente significative per un'amplificazione delle differenze spettrali, e quindi delle caratteristiche chimiche presenti sulla superficie, come mostrato nella Fig. 28.

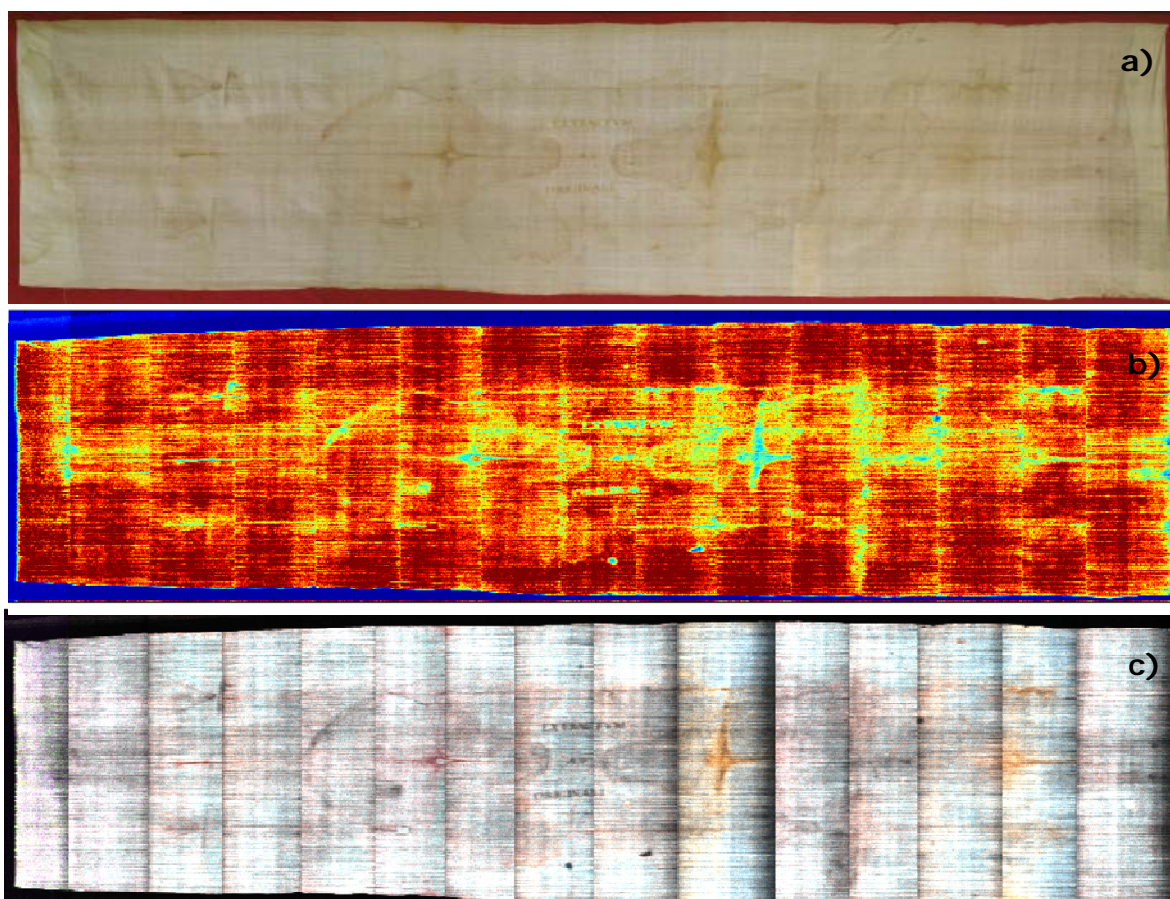


Figura 28. a) Foto della Sindone di Arquata. b) Immagine LIF della Sindone di Arquata filtrando la fluorescenza a 405 nm. L'immagine è stata ricostruita dall'unione delle 15 immagini filtrate ottenute per le sezioni verticali in cui il telo è stato virtualmente suddiviso. c) Immagine LIF di fluorescenza in falsi colori: il blu corrisponde alla fluorescenza a 380 nm, il verde corrisponde alla fluorescenza a 440 nm, il rosso alla fluorescenza a 485 nm.

Le bande individuate sono state usate sia per filtrare i dati alle corrispondenti lunghezze d'onda (Fig. 28b) sia per costruire immagini in falsi colori per visualizzare la distribuzione spaziale dei diversi contributi spettrali (Fig. 28c).

Le immagini di fluorescenza filtrate e in falsi colori della Fig. 28 presentano macchie (relative a punti con spettri a bassa intensità) che non si evidenziano ad occhio nudo.

Dal confronto degli spettri di fluorescenza ottenuti nelle varie zone della Sindone di Arquata si nota come il segnale di fluorescenza della cellulosa sia dominante in ogni punto analizzato: in particolare, si riconoscono le bande tipiche della cellulosa a 380 nm, 440 nm, 465 nm. Rammentiamo che la cellulosa è il principale costituente delle fibre di lino.

Nel confronto tra differenti punti del telo, le aree laterali (superiore e inferiore) sono state prese come riferimento dello spettro della sola cellulosa invecchiata a causa sia dell'età sia delle condizioni generali di conservazione. Nella Fig. 29 è presentato un confronto tra spettri relativi a fasce laterali di differenti aree del tessuto della Sindone di Arquata, mentre nella Fig. 30 è mostrato lo spettro di fluorescenza medio del lino delle fasce laterali in confronto allo spettro medio ottenuto da una cartapesta risalente al 1600 circa (epoca in cui la cartapesta era ricavata da stracci di lino e cotone).

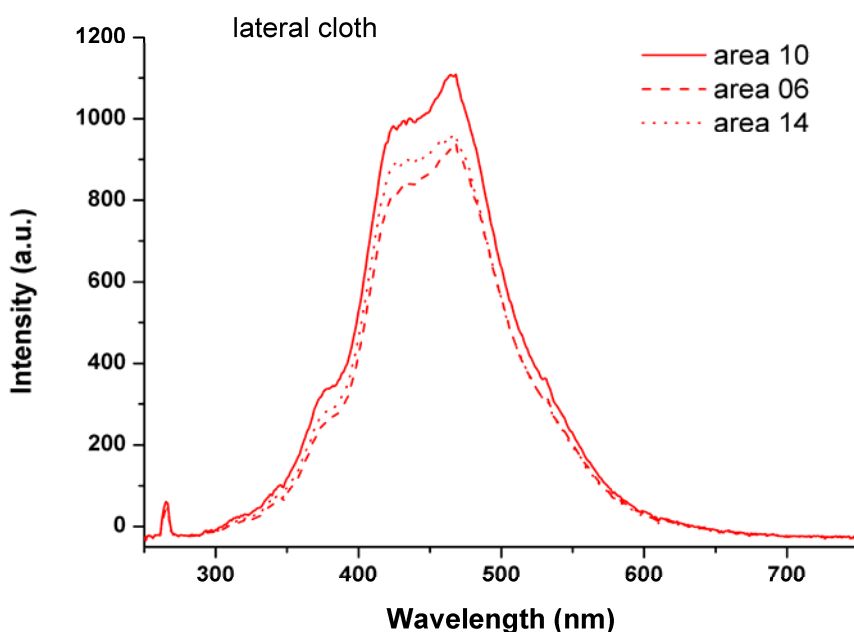


Figura 29. Confronto degli spettri relativi a differenti fasce laterali del tessuto della Sindone di Arquata. Gli andamenti spettrali sono molto simili, con una leggera differenza nell'intensità della fluorescenza.

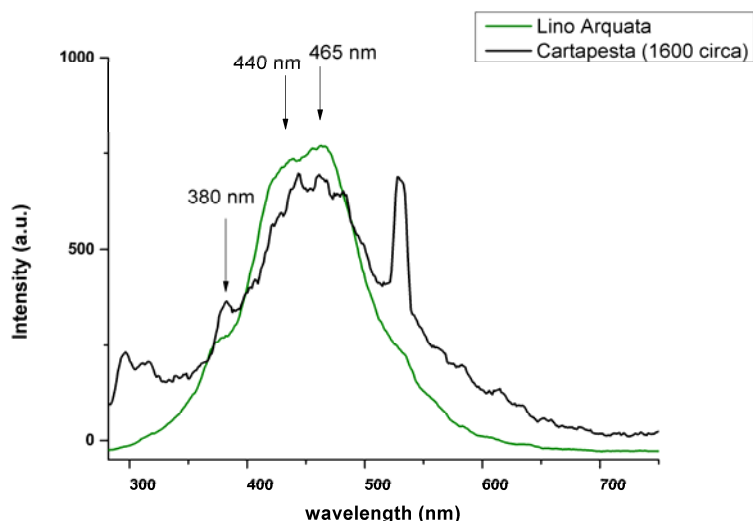


Figura 30. Confronto tra lo spettro di fluorescenza relativo ad una parte laterale pulita del lino della Sindone di Arquata e quello relativo ad un campione di cartapesta risalente al XVII secolo ricavato da stracci di lino e cotone sottoposti ad adeguati trattamenti. Il segnale a 532 nm è relativo alla seconda armonica del laser utilizzato come sorgente e non va considerato.

Nella Fig. 30 lo spettro relativo alla cartapesta rinascimentale è più "rumoroso" a causa delle condizioni sperimentali, ma in entrambi gli spettri sono presenti le stesse bande nell'intervallo spettrale riferibile alla fluorescenza della cellulosa tra 360 a 480 nm circa. Ciò conferma che le caratteristiche della fluorescenza della cellulosa della Sindone di Arquata sono le stesse di una cellulosa vecchia di 400 anni.

Nelle Figg. 31a - 31d sono mostrati alcuni esempi di confronto tra gli spettri misurati in differenti punti delle aree indicate nelle figure.

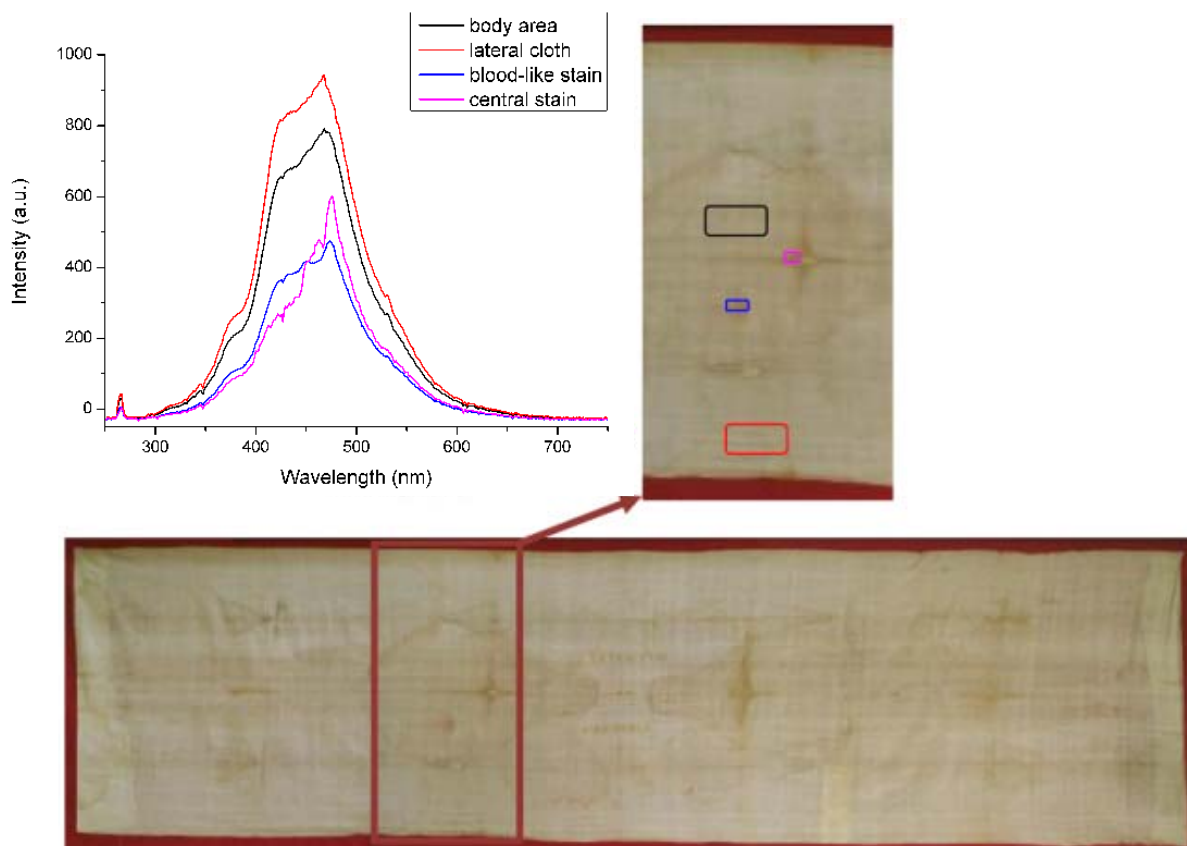


Figura 31a. In alto a sinistra: spettri LIF misurati nelle zone evidenziate dai diversi rettangoli colorati a destra, nella zona centrale dell'impronta frontale evidenziata in basso.

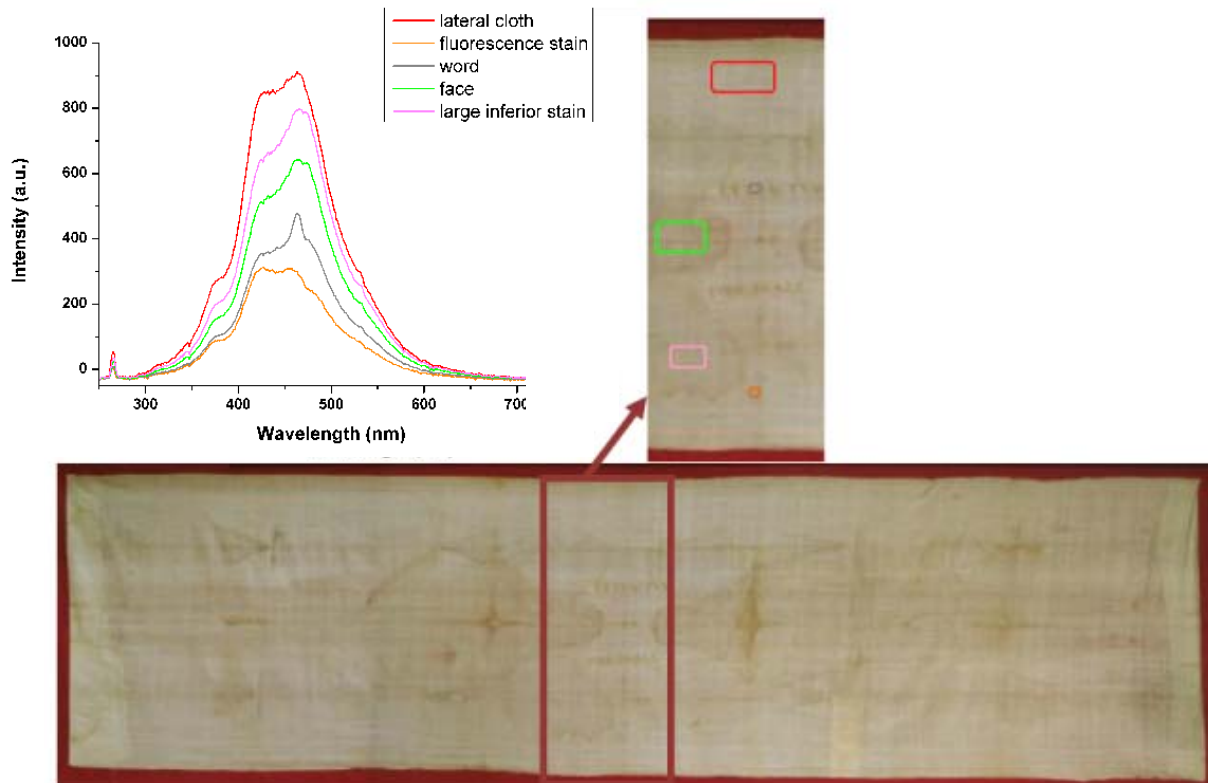


Figura 31b. In alto a sinistra: spettri LIF misurati nelle zone evidenziate dai diversi rettangoli colorati in alto a destra, nella zona centrale della Sindone di Arquata evidenziata in basso.

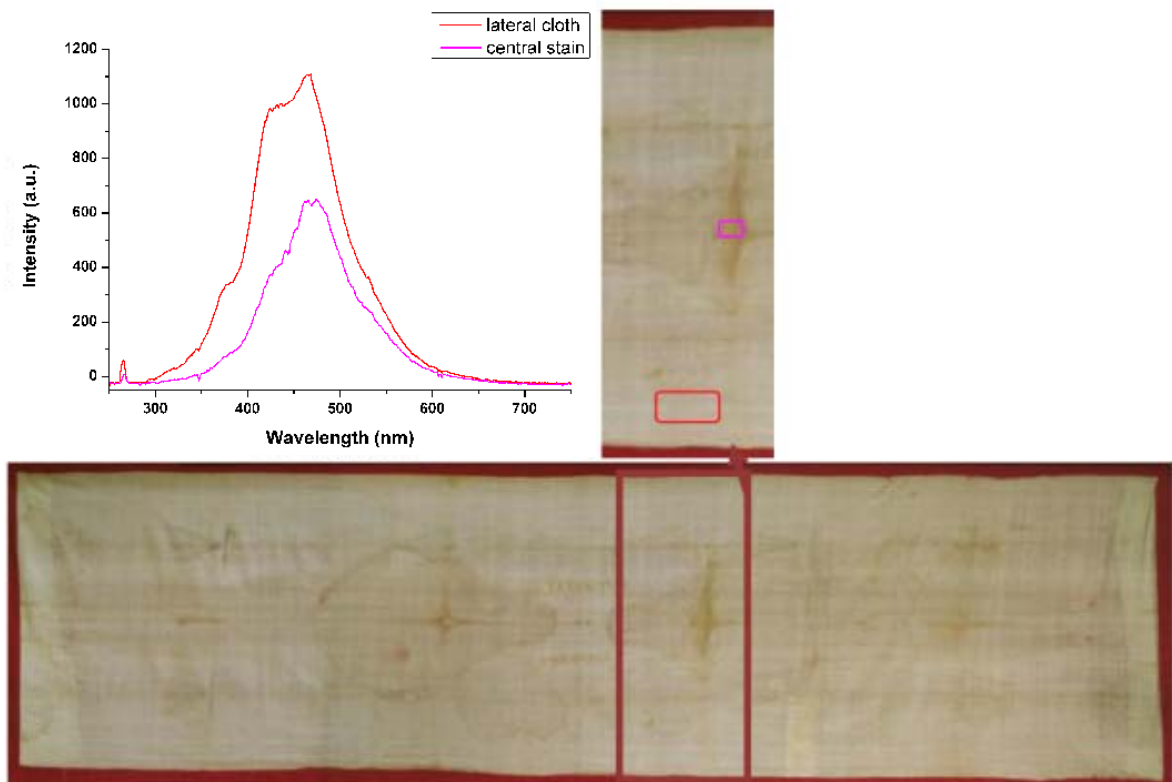


Figura 31c. In alto a sinistra: spettri LIF misurati nelle zone evidenziate dai diversi rettangoli colorati in alto, nella zona superiore della impronta dorsale evidenziata in basso.

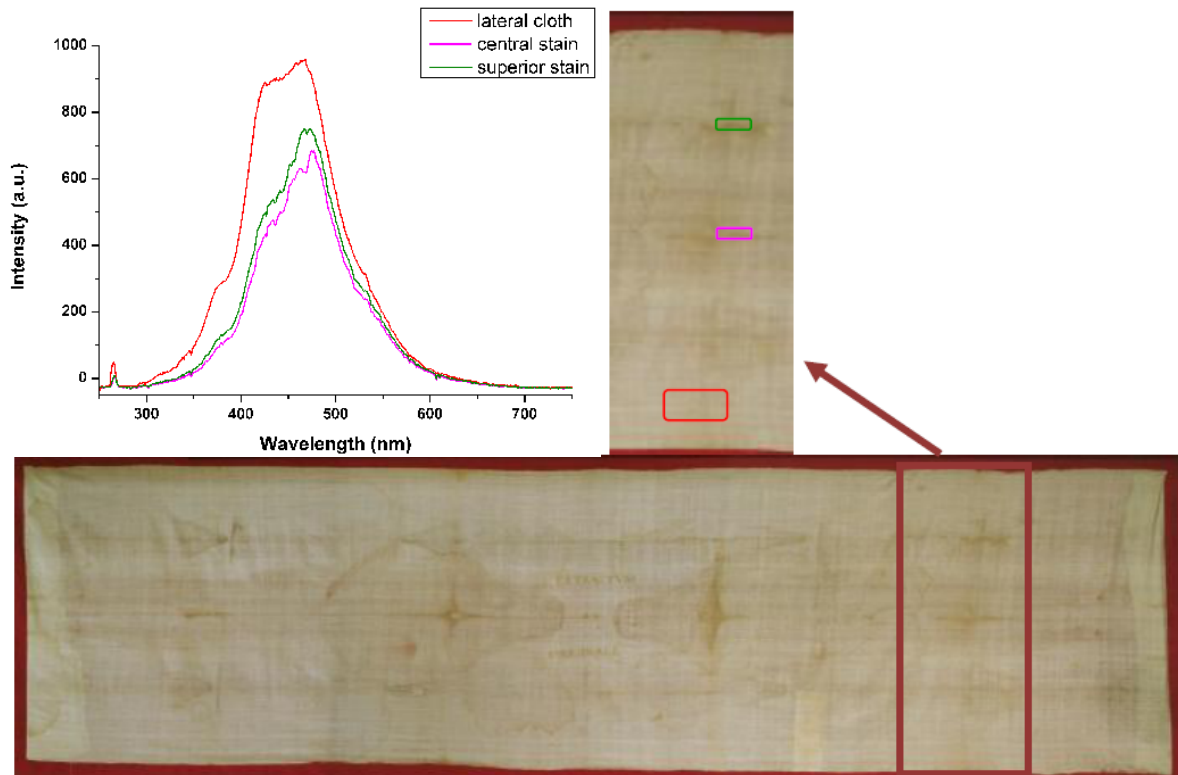


Figura 31d. In alto a sinistra: spettri LIF misurati nelle zone evidenziate dai diversi rettangoli colorati in alto a destra, nella zona delle gambe dell'impronta dorsale evidenziata in basso.

Le Figg. 31a-31d confermano che gli spettri sono dominati dal segnale della cellulosa sia all'interno che all'esterno dell'impronta, ma in alcune aree l'intensità di tali bande diminuisce notevolmente, tanto da rendere ben evidenti dei picchi più stretti a lunghezze d'onda vicine al massimo di emissione del lino. Alcuni esempi sono riportati nella Fig. 32: si tratta delle macchie sul costato, delle macchie centrali e delle lettere della scritta posta al centro del telo. I picchi evidenziati si trovano tutti vicini, ma decentrati rispetto al massimo della fluorescenza della cellulosa del lino che si posiziona a 465 nm, come evidenziato anche nella Fig. 30.

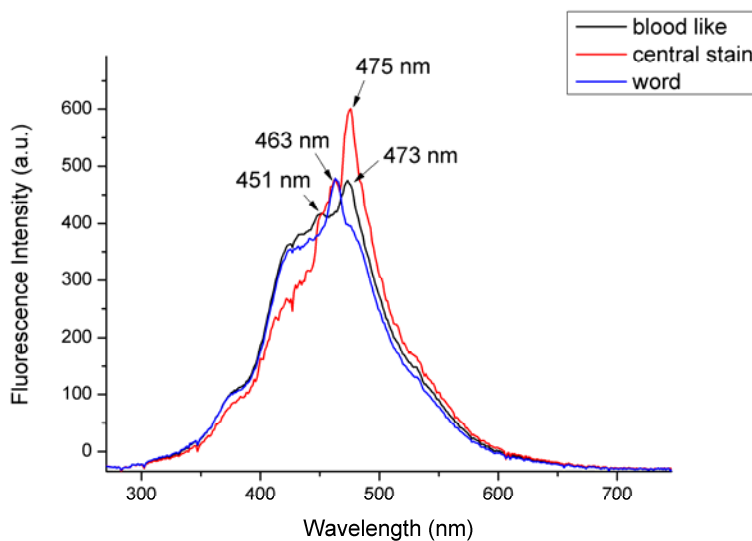


Figura 32. Confronto tra gli spettri ottenuti in corrispondenza della macchia del costato, della macchia centrale e di una delle lettere.

La Fig. 32 mostra che negli spettri di fluorescenza delle lettere della scritta al centro del telo e in alcuni punti delle macchie centrali sono presenti bande a 463 e 475 nm non evidenti altrove.

Inoltre, come evidenziato nella Fig. 33, gli spettri di fluorescenza mettono in evidenza differenze tra diversi punti relativi alle macchie centrali.

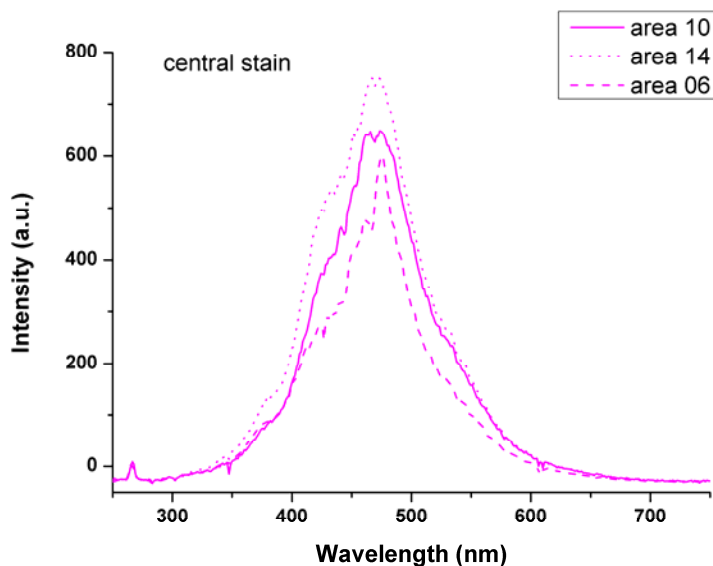


Figura 33. Confronto tra spettri di fluorescenza relativi a diverse macchie centrali, prese nelle strisce delle Figure 31a e 31c.

I cambiamenti nell'intensità dello spettro di fluorescenza della cellulosa possono anche essere riferiti a degradazioni della cellulosa, riconducibili, ad esempio, a bruciature. Tale tipologia di comportamento è stata, infatti, rilevata nelle analisi effettuate a Frascati su un lino moderno strinato con una moneta riscaldata a 200 °C.

Per quanto riguarda le macchie rossastre che simulano sangue, gli spettri di tali macchie sono stati confrontati con gli spettri LIF acquisiti su campioni di riferimento di pigmenti rossi comunemente utilizzati durante il Rinascimento. I pigmenti presi in considerazione sono: terra rossa, lacca di robbia, ocre rossa, rosso di Pozzuoli, rosso inglese, rosso di Ercolano, cinabro.

I risultati ottenuti sono riportati nella Fig. 34. Un solo pigmento, la lacca di robbia, presenta un segnale di fluorescenza rilevabile, che peraltro non è sovrapponibile con il segnale rivelato sulle macchie della Sindone caratterizzate da una colorazione rossastra, mostrato nelle Figg. 31a e 32.

Possiamo quindi concludere che nessuno dei sette pigmenti nella Fig. 34 è stato utilizzato per realizzare le macchie rossastre sulla Sindone di Arquata. Esistono altri pigmenti rossi disponibili nel XVII secolo di cui non è stato possibile reperire campioni atti ad eseguire misure di riferimento: si tratta di pigmenti sia di origine vegetale (ad esempio il cosiddetto sangue di drago, il brasiletto chiamato anche verzano, il rubiae radix), che di origine animale (usati sin dall'antichità come il kermes, la cocciniglia, la porpora) che minerali inorganici (rosso di piombo, sinopice, sandice, minio, sandaraca, realgar, cerussa, rubico). Ci riserviamo in futuro di reperire tali pigmenti per confrontarli con gli spettri LIF delle macchie rosse della Sindone di Arquata.

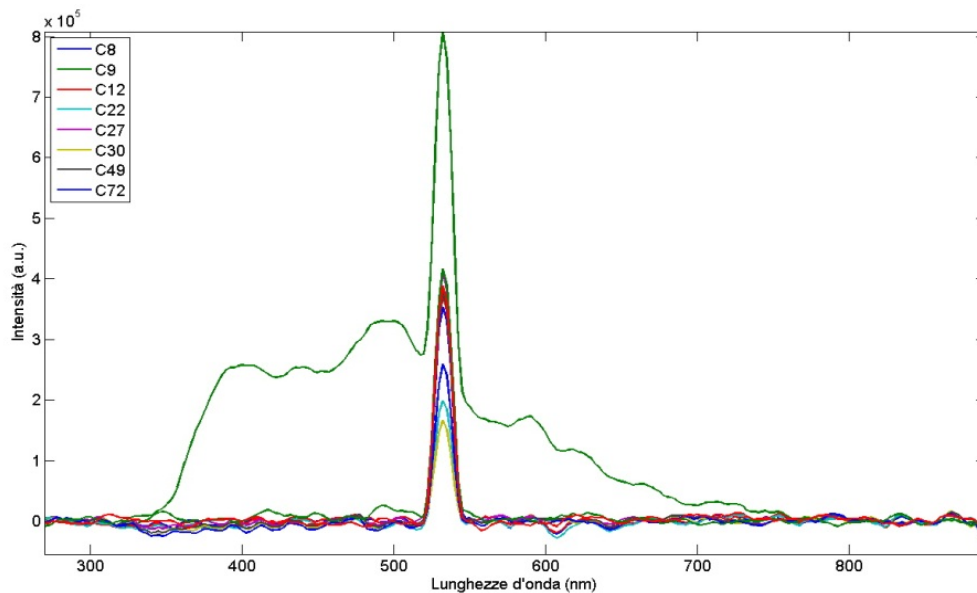


Figura 34. Spettri LIF eccitati a 266 nm di 7 differenti pigmenti comunemente usati nel Rinascimento: terra rossa, lacca di robbia, oca rossa, rosso di Pozzuoli, rosso inglese, rosso di Ercolano, cinabro. Il picco a 532 nm è un segnale spurio dovuto alla seconda armonica del laser impiegato per l'eccitazione dei campioni. La lacca di robbia è l'unico pigmento a presentare un segnale di fluorescenza rilevabile. Nessuno di questi spettri è sovrapponibile con lo spettro LIF delle macchie rossastre presenti sulla Sindone di Arquata, vedi la Fig. 32.

Infine, gli spettri LIF del lino della Sindone di Arquata sono stati confrontati con spettri LIF relativi a cellulosa moderna. In particolare, la Fig. 35 mostra gli spettri di fluorescenza di una carta e di un cotone moderni ottenuti con lo stesso sistema LIF impiegato per la campagna di misure sulla Sindone di Arquata.

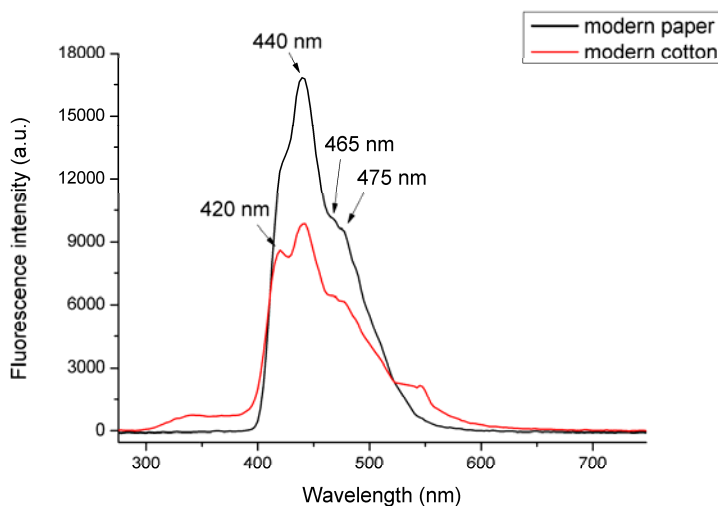


Figura 35. Spettri di fluorescenza di campioni di carta e cotone moderni. Eccitazione LIF a 266 nm, la stessa utilizzata per la Sindone di Arquata.

L'analisi degli spettri nella Fig. 35 evidenzia la presenza di bande a 465 e 475 nm parzialmente coperte dalla forte emissione centrata a 440 nm. Si può quindi dedurre che tali componenti spettrali corrispondano ai picchi chiaramente visibili in varie aree della Sindone (vedi Figg. 29, 30 e 31) resi evidenti dalla diminuzione di intensità della banda a 440 nm nel caso di cellulosa invecchiata. Se così fosse, la variazione di

segnale in queste zone può indicare una modificazione chimica differenziale delle fibre di cellulosa che dipende dall'invecchiamento.

7. Misure di spettri Raman

La spettroscopia Raman è una tecnica che si basa sul cosiddetto effetto Raman, ovvero la diffusione anelastica della radiazione incidente da parte delle molecole del materiale irraggiato che a sua volta emette radiazione ad una frequenza minore (componente Stokes) o maggiore (componente anti-Stokes) rispetto alla radiazione incidente. I segnali Stokes e anti-Stokes permettono di rivelare i legami chimici di molte sostanze, i quali fungono come "impronte digitali" per rilevarne la presenza. Per questo motivo, la spettroscopia Raman è comunemente utilizzata nelle analisi chimiche e negli studi sulla struttura dei composti chimici.

Lo strumento utilizzato per le misure Raman sulla Sindone di Arquata è uno spettrometro i-Raman B&W Tek, modello BWS415, equipaggiato con una sonda per misure in situ, vedi Fig. 36. Il sistema è dotato di un diodo laser a 785 nm con potenza di uscita variabile fino a 0,3 W. La regolazione della potenza media emessa dal laser consente di massimizzare il rapporto segnale-rumore e di ridurre al minimo il tempo d'integrazione. Un filtro interferenziale elimina eventuali bande secondarie dalla radiazione laser. La radiazione emessa dal campione attraversa un filtro Notch che blocca l'emissione elastica Rayleigh. Il sistema di rivelazione è costituito da una fibra ottica accoppiata ad uno specchio collimatore che riflette la radiazione sul reticolo di diffrazione di uno spettrometro (con risoluzione spettrale di circa $4,5 \text{ cm}^{-1}$ nell'intervallo $175 \text{ cm}^{-1} - 3200 \text{ cm}^{-1}$). Il segnale è quindi inviato ad un detector CCD costituito di un array lineare (2048 pixels) dotato di un sistema di raffreddamento termoelettrico incorporato, che consente di ridurre in modo efficace il rumore della corrente di buio e quindi di migliorare la gamma dinamica e il limite di rilevabilità.



Figura 36. Spettrometro Raman utilizzato per le misure sulla Sindone di Arquata e foto scattata durante una misura.

La Fig. 37 mostra un tipico risultato ottenuto dallo spettrometro Raman sulla Sindone di Arquata. In tutti i vari punti di lavoro provati, lo spettro misurato appare saturato dall'emissione della cellulosa, che nasconde il segnale Raman cercato nelle zone dell'impronta. La conclusione è che la spettroscopia Raman, che ha fornito eccellenti risultati quando usata su dipinti e affreschi, non è adatta alla misura della diffusione Raman di tessuti cellulosici come nel caso del lino.

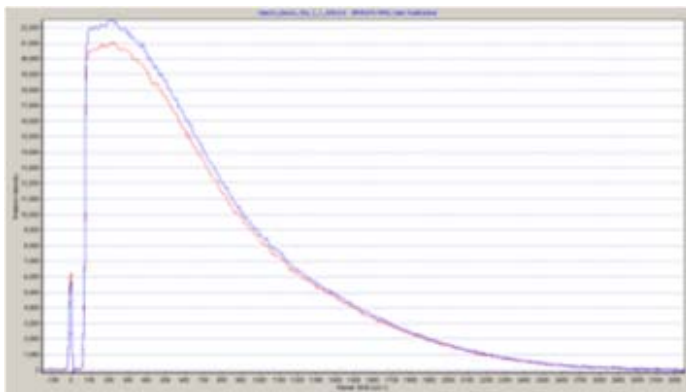


Figura 37. Due tipici spettri misurati dallo spettrometro Raman della Fig. 36 sulla Sindone di Arquata. Entrambi gli spettri sono evidentemente coperti dall'intensa emissione della cellulosa del lino, che nasconde il segnale Raman cercato.

8. Misure di riflettanza assoluta nell'ultravioletto, visibile e vicino infrarosso

Come già accennato, il lino è costituito principalmente di cellulosa. La cellulosa è un polimero composto da unità di formula chimica $(C_6H_{10}O_5)_n$, che sono collegate tra loro mediante specifici legami chimici detti glicosidici, fino a formare catene composte da un numero di unità variabile da circa $n=100$ a circa $n=10.000$. I polimeri di cellulosa hanno una forte tendenza ad aggregarsi in entità strutturali altamente ordinate fino a formare fibre i cui diametri vanno da circa 1 micrometro a circa 10 micrometri. Le fibre di cellulosa sono utilizzate da secoli per la realizzazione di svariati manufatti, fra i quali i tessuti e la carta sono quelli più comuni al giorno d'oggi.

Le fibre di cellulosa pura non assorbono luce nell'ultravioletto, visibile e vicino infrarosso, ovvero per lunghezze d'onda superiori a circa 200 nm [16]. Il colore biancastro della superficie dei manufatti costituiti da fibre di cellulosa pura, ad esempio la carta di alta qualità oppure i tessuti non colorati, è dovuto al fenomeno di diffusione della luce. La diffusione provoca la deviazione dei raggi luminosi da un percorso rettilineo e si manifesta quando la radiazione elettromagnetica investe corpi costituiti da elementi arrangiati in modo irregolare aventi dimensioni paragonabili a quelle della lunghezza d'onda della radiazione che incide sul corpo.

L'ingiallimento che spesso si osserva ad occhio nudo nei manufatti formati da fibre di cellulosa pura invecchiati naturalmente è causato dallo sviluppo di gruppi ossidati nei polimeri della cellulosa. Questi gruppi ossidati agiscono come cromofori, cioè sono gruppi di atomi che creano una data banda di assorbimento spettrale a seguito delle transizioni elettroniche localizzate spazialmente su di essi. L'ingiallimento è dovuto al fatto che i gruppi ossidati cromofori nella cellulosa assorbono nell'intervallo spettrale di minore lunghezza d'onda della luce visibile (corrispondente ai colori viola e blu) e diffondono la porzione spettrale gialla e rossa, producendo il caratteristico colore

giallo, o giallo poco luminoso (marrone). Rammentiamo che il colore marrone è dato dalla stessa terna RGB del colore giallo, ma con una luminosità molto minore.

E' possibile ottenere un ingiallimento dei manufatti in cellulosa, con caratteristiche simili a quelle che si verificano nell'invecchiamento naturale, anche con procedimenti di degradazione basati sul riscaldamento del manufatto stesso a temperature dell'ordine di 100 °C -200 °C per diversi secondi. Uno studio spettroscopico di questi fenomeni può mettere in evidenza le caratteristiche specifiche di questo tipo di degradazione discriminandola da altre possibili cause che possono modificare le proprietà ottiche (cioè il colore) dei manufatti. Infatti, nel caso in cui siano presenti pigmenti oppure coloranti applicati al manufatto, un'indagine eseguita tramite spettroscopia ottica può evidenziare profili di assorbimento diversi da quelli provocati dall'invecchiamento naturale o artificiale e può, quindi, fornire informazioni sul fenomeno o sul processo che ha dato luogo alla variazione delle proprietà ottiche osservata sul manufatto stesso.

Tuttavia, le consuete leggi dell'ottica dei materiali omogenei non sono applicabili in presenza di diffusione della luce, come nei materiali a base di cellulosa: è possibile ricavare le proprietà ottiche dei materiali disomogenei attraverso specifiche misure della loro riflettività che, in questo caso, è indicata come riflettanza diffusa [17].

8.1 Apparato sperimentale Gli spettri di riflettanza diffusa assoluta nell'ultravioletto (UV), visibile (Vis) e vicino infrarosso (NIR) della Sindone di Arquata sono stati misurati in diverse regioni di forma circolare (diametro 6 mm) descritte nella Tabella 1 e raffigurate nella Fig. 38, utilizzando un apparato per spettroscopia portatile della Avantes BV descritto in [7]. L'apparato è schematizzato nella Fig. 39.

Regione misurata (colore nella Fig. 38)	Descrizione	Coordinate x-y (cm)
1 nero	Lino rado	33dx - 19
2 rosso	Lino sotto gora centrale	180dx - 11
3 verde chiaro	Macchia costato venatura	147sx - 45
4 blu	Testa	192.5sx - 60
5 azzurro	Gora centrale	180dx - 27
6 lilla	Gamba frontale polpaccio sx	50sx - 50
7 giallo	Lettera I	213sx - 46
8 verde oliva	Macchia finta bruciatura	67sx - 30
9 blu scuro	Piede dorsale	33.5dx - 55
10 viola scuro	Macchia torace dorsale	169dx - 60

Tabella 1. Denominazione delle regioni misurate sulla Sindone di Arquata, descrizione e loro coordinate orizzontali x riferite al lato a destra (dx) oppure a sinistra (sx) del telo, e verticali y (rispetto al lato inferiore del telo).

La sorgente luminosa (AvaLight-DH-S-BAL) è formata da una lampada al deuterio ed una alogena che generano un'emissione di radiazione continua nell'intervallo spettrale UV-Vis-NIR. La sorgente è collegata tramite una fibra ottica di 800 micron di diametro ad una sfera integratrice (AvaSphere-30-REFL) di 30 mm di diametro con rivestimento interno in Spectralon, per illuminare il manufatto tramite il foro della stessa sfera, vedi la Fig. 39. La sfera integratrice viene utilizzata per raccogliere la radiazione diffusa dalla superficie analizzata. Il foro della porta di misura della sfera integratrice ha un diametro di 6 mm.

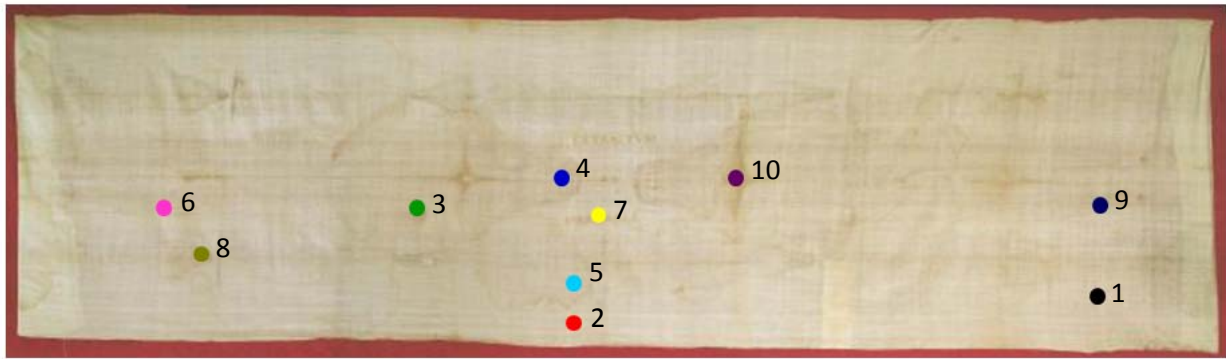


Figura 38. Punti in cui sono state effettuate le misure di riflettanza assoluta sulla Sindone di Arquata. In riferimento alla Tabella 1, la corrispondenza delle zone di misura è come segue: 1=nero, 2=rosso, 3=verde chiaro, 4=blu, 5=azzurro, 6=lilla, 7=giallo e 8=verde oliva, 9=blu scuro e 10= viola scuro.

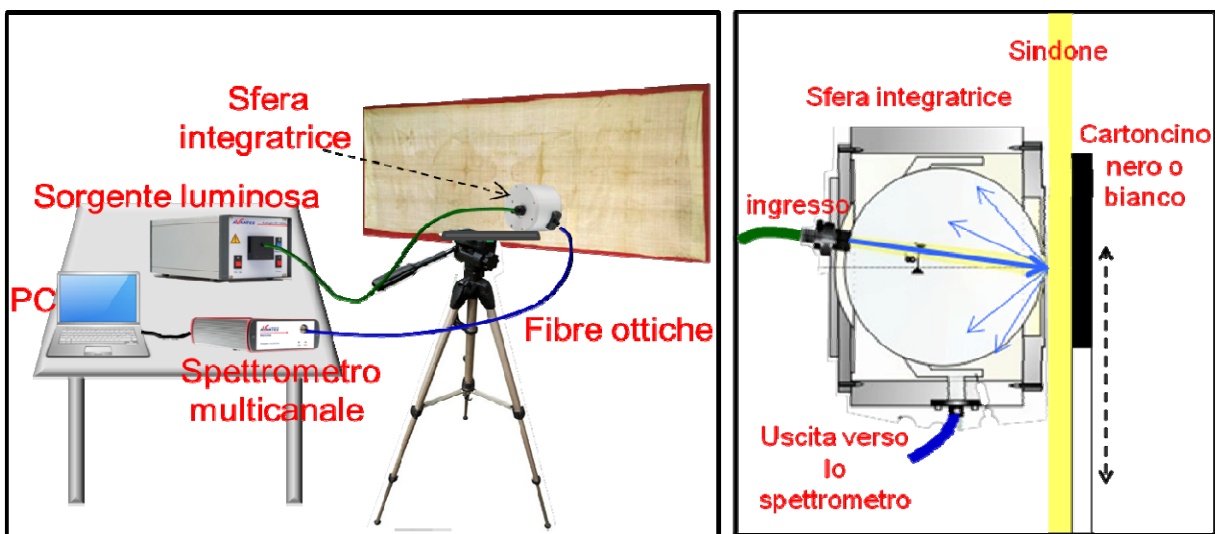


Figura 39. A sinistra: schema dell'apparato sperimentale utilizzato per la misura della riflettanza assoluta della Sindone di Arquata. A destra: dettaglio dell'invio della radiazione verso il lino e raccolta della radiazione riflessa dal lino tramite sfera integratrice.

La radiazione raccolta dalla sfera è inviata tramite una fibra ottica di 600 micron di diametro ad uno spettrometro multicanale AvaSpec-2048x14-USB2 dotato di un rivelatore CCD da 2048x14 elementi. Lo spettrometro utilizza un reticolo di diffrazione che permette la rivelazione e la misura della radiazione nell'intervallo spettrale che va da 248 nm a 1050 nm (corrispondente all'energia dei fotoni luminosi compresi tra 1.18 eV a 4.96 eV) con una risoluzione spettrale di 2.4 nm. Un personal computer è utilizzato per il controllo delle funzioni dello spettrometro e per la registrazione dei dati. Questo tipo di approccio sperimentale è totalmente non invasivo per il manufatto in studio.

Per ogni area circolare analizzata sulla Sindone di Arquata (Tabella 1 e Fig. 38) sono stati misurati due spettri di riflettanza diffusa: uno ottenuto posizionando sotto al manufatto un riferimento di bianco (R_w) e l'altro ottenuto posizionando sotto al manufatto un riferimento di nero (R_b). I valori di riflettanza del riferimento bianco e nero sono stati misurati separatamente. Facendo la media dei segnali di 10 acquisizioni consecutive della durata di 3 secondi ciascuna, è possibile acquisire gli spettri di riflettanza con un errore assoluto inferiore a 0.01.

Infine, tutti gli spettri misurati sono stati normalizzati ad un riferimento di riflettanza diffusa in Spectralon, tarato in fabbrica, che ha consentito di ricavare dalle misure effettuate i valori assoluti di R_w e R_b nell'UV, Vis e NIR.

8.2 Risultati sperimentali

Dai valori di riflettanza diffusa assoluta R_w e R_b , mediante l'applicazione del modello di Kubelka e Munk [17], è possibile ricavare lo spettro di riflettanza diffusa assoluta R_∞ che è indipendente dal substrato o dallo sfondo sul quale è posto il manufatto. Nelle Fig. 40 e 41 sono rappresentati di spettri di R_∞ ottenuti sulle zone della Sindone di Arquata visualizzabili nella Fig. 38.

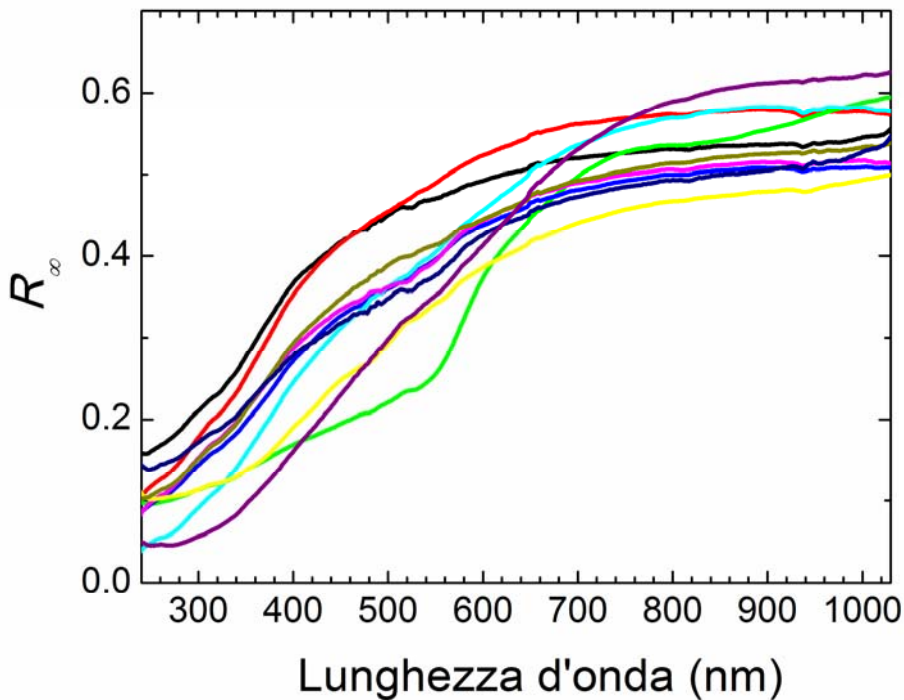


Figura 40. Spettri di riflettanza assoluta indipendente dallo sfondo del manufatto (R_∞) delle regioni misurate sulla Sindone di Arquata visualizzate nella Fig. 38 e nella Tabella 1. La scala delle ordinate è in unità assolute di riflettanza, cioè 0 corrisponde al nero e 1 al bianco.

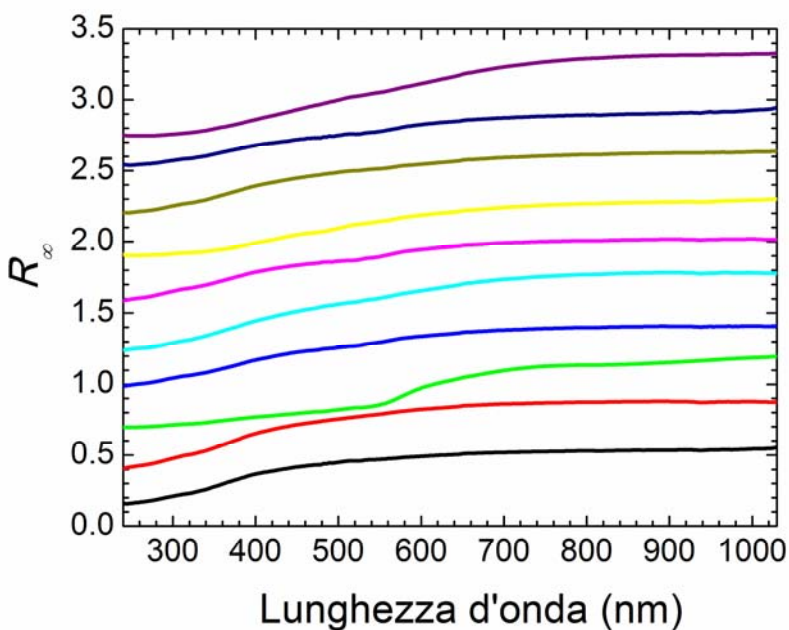


Figura 41. Spettri di riflettanza assoluta della Fig. 40 dove, per comodità di lettura, tutti gli spettri dal 2 in poi (vedi la Tabella 1) sono traslati verticalmente di 0.3 rispetto al precedente spettro: quindi, dal 2 in poi la scala delle ordinate è in unità arbitrarie. Per visualizzare la posizione sulla Sindone di Arquata dei punti in cui sono stati misurati gli spettri di questa figura, fare riferimento alla Fig. 38 e alla Tabella 1.

Gli spettri R_∞ possono essere trasformati in spettri di assorbimento ottico $\alpha(\lambda)$ delle fibre di cellulosa del telo della Sindone di Arquata utilizzando una versione migliorata del modello di Kubelka e Munk [7, 17]. I risultati di questo procedimento sono mostrati nella Fig. 42, e anche nella Fig. 43 dopo averli traslati verticalmente per comodità di lettura. Nella Fig. 44 gli spettri di assorbimento ottico sono mostrati dopo aver sottratto a ciascuno spettro l'assorbimento della regione 1 (zona di lino senza impronte, presa come riferimento) per eliminare il contributo dell'invecchiamento naturale della cellulosa alla variazione delle proprietà ottiche del telo.

Figura 42. Spettri di assorbimento ottico delle fibre di cellulosa della Sindone di Arquata nelle regioni misurate. Per visualizzare la posizione sulla Sindone di Arquata dei punti in cui sono stati misurati gli spettri di questa figura, fare riferimento alla Fig. 38 e alla Tabella 1.

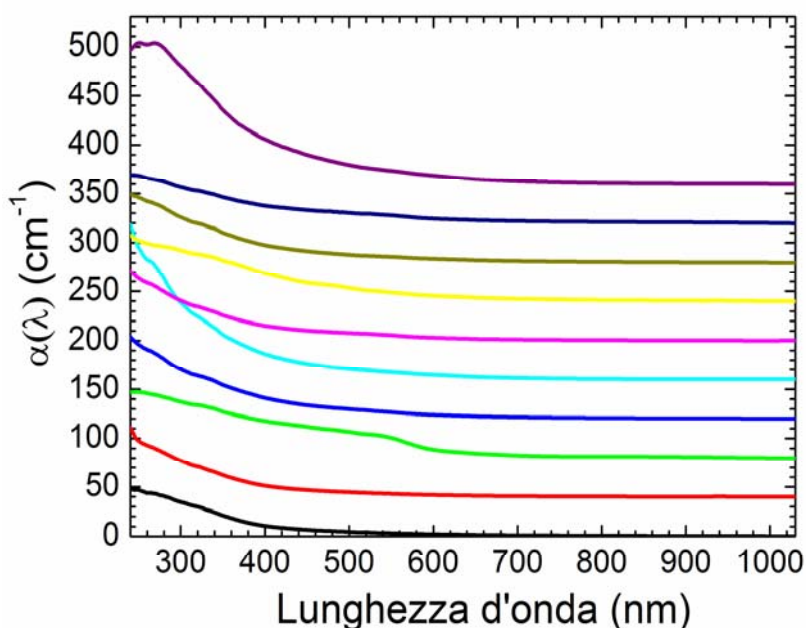
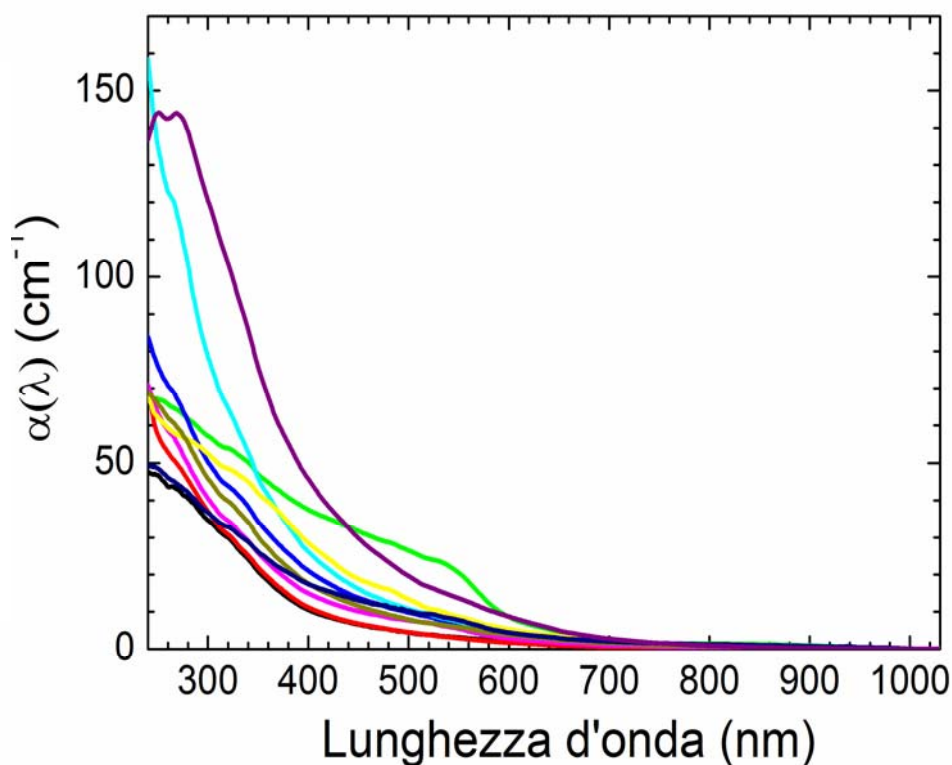


Figura 43. Spettri di assorbimento ottico delle fibre di cellulosa della Sindone di Arquata nelle regioni misurate. Per comodità di lettura, tutti gli spettri dal 2 in poi (vedi la Tabella 1) sono traslati verticalmente di 40 cm^{-1} rispetto allo spettro precedente. Quindi, per gli spettri dal 2 in poi la scala delle ordinate è in unità arbitrarie. Per visualizzare la posizione dei punti sulla Sindone di Arquata in cui sono stati misurati gli spettri di questa figura, fare riferimento alla Fig. 38 e alla Tabella 1.

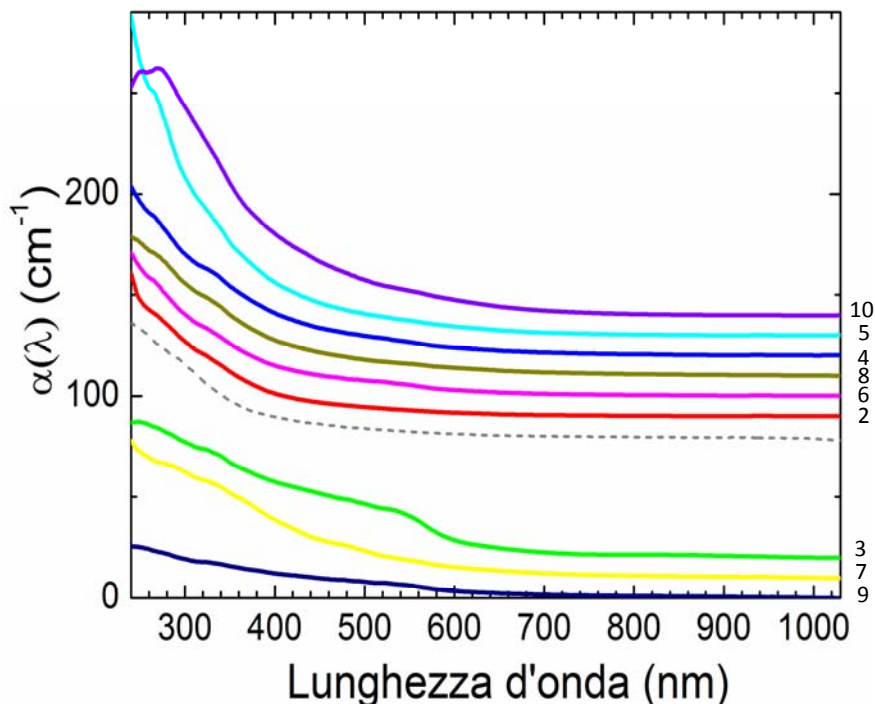


Figura 44. Spettri di assorbimento ottico delle fibre di cellulosa della Sindone di Arquata nelle regioni misurate, dopo aver sottratto l'assorbimento dello spettro della regione 1. 2=rosso, 3=verde chiaro, 4=blu, 5=azzurro, 6=lilla, 7=giallo, e 8=verde oliva, 9=blu scuro e 10=viola scuro. Per visualizzare la posizione sulla Sindone di Arquata dei punti in cui sono stati misurati gli spettri di questa figura, fate riferimento alla Fig. 38 e alla Tabella 1. Per confronto è mostrato lo spettro di assorbimento (traslato e moltiplicato per un fattore 2.64) di un campione di carta antica prodotto a Perpignan (Francia) nel 1413 in buono stato di conservazione (linea tratteggiata grigia). Gli spettri 2, 4, 5, 6, 8 e 10 sono stati traslati sulla scala delle ordinate (valori di α) per migliorare la leggibilità del grafico.

Dalle Figg. 40 e 41, notiamo che in tutte le regioni del telo analizzate R_{∞} è più intensa nel vicino infrarosso (NIR), mentre diminuisce nelle regioni Vis e UV, con diverse tipologie di andamenti.

Le Figg. 42, 43 e 44 mostrano che l'assorbimento ottico è massimo nella zona spettrale UV, e poi diminuisce nelle regioni Vis e si porta quasi a zero nel NIR. Pertanto, la progressiva diminuzione di R_{∞} che si osserva nell'UV nelle regioni studiate (vedi Figg. 40 e 41) può essere correlata all'aumento dell'assorbimento ottico delle fibre di cellulosa del manufatto. Dal momento che la cellulosa pura e non degradata non assorbe fino a 200 nm, l'ampio assorbimento ottico misurato nella Sindone di Arquata suggerisce la presenza di diversi tipi di cromofori caratterizzati da differenti bande di assorbimento. In riferimento alla Fig. 44, gli spettri delle regioni 2, 4, 5, 6 e 8 mostrano caratteristiche simili con un primo leggero flesso a circa 270 nm ed un secondo a circa 340 nm. Lo spettro della zona 10 mostra un andamento simile fino a circa 300 nm e poi presenta un massimo a 270 nm invece di un flesso e un secondo massimo a 252 nm. Gli spettri delle regioni 3, 7 e 9 mostrano invece andamenti che si differenziano qualitativamente da quelli descritti finora per la presenza di strutture di diversa intensità a lunghezze d'onda superiori a 500 nm.

Pertanto, gli spettri di assorbimento si possono dividere in due gruppi che mostrano due andamenti distinti:

- a) Un gruppo di spettri (2, 4, 5, 6, 8 e in parte 10) mostra caratteristiche molto simili a quelle osservate in campioni contenenti fibre di cellulosa ossidate per invecchiamento, come quelle che si trovano all'interno di campioni cartacei antichi, vedi carta di Perpignan nella Fig. 44, cioè la presenza di strutture a 340 e 270 nm [7].
- b) Un altro gruppo (3, 7 e 9, rispettivamente corrispondenti alla macchia costato, lettera I e al piede dorsale, vedi Tabella 1) mostra spettri di assorbimento che sembrano avere contributi dovuti a elementi estranei alla cellulosa, come pigmenti oppure coloranti con caratteristiche spettrali ben distinte. Inoltre, notiamo una certa somiglianza fra gli spettri delle zone 3 (macchia costato) e 10 (macchia centrale dorsale) per la presenza di un flesso a 550 nm, più marcata nella zona 3.

I dati di riflettanza e assorbimento ad 800 nm delle Figg. 40 e 42 confermano che le parti scure (meno riflettenti e più assorbenti) della Fig. 18 ottenuta tramite IR-ITR a 800 nm sono causate da sostanze estranee aggiunte.

9. Riassunto e analisi dei risultati sperimentali

- I. In questo Rapporto Tecnico abbiamo riassunto e illustrato una notevole mole di risultati ottenuti applicando diverse tecniche ottiche non invasive nella prima campagna di misure dirette e in loco della Sindone di Arquata. La Sindone di Arquata è una copia in scala 1:1 della Sindone di Torino posta in contatto con la sacra reliquia nell'anno 1653, in cui la doppia impronta corporea, ad occhio nudo, non sembra realizzata tramite tecniche convenzionali di disegno o pittura.
- II. I nostri risultati mostrano che non esiste una singola tecnologia o apparato in grado di identificare la tecnica/metodologia usata per realizzare la doppia impronta corporea e le altre macchie sulla Sindone di Arquata. E' solo il confronto tra le risultanze delle misure dei diversi apparati sperimentali che può dare una risposta soddisfacente alle domande scientifiche sull'origine delle macchie e delle impronte sul telo della Sindone.
- III. Le fotografie ad elevata risoluzione separate nei tre canali RGB corrispondenti ai tre colori fondamentali rosso, verde e blu hanno permesso di: a) evidenziare pigmenti leggeri e quasi invisibili che simulano i segni di flagellazione sulle gambe, vedi Fig. 10. b) Identificare i segni assolutamente invisibili dei contorni di alcune parti anatomiche, come i piedi, vedi Fig. 10. c) Evidenziare tracce invisibili all'interno dell'impronta corporea, ascrivibili ad abrasione e ad un passaggio di sostanze liquide lungo la direzione dei fili di ordito, vedi Fig. 11. A rinforzare quest'ultima osservazione, le macrofotografie hanno mostrato che i fili di ordito hanno un diametro medio significativamente inferiore all'interno dell'impronta rispetto all'esterno dell'impronta, vedi Fig. 5. Di conseguenza, la densità del tessuto (trama + ordito) all'interno dell'impronta è mediamente minore (e quindi più trasparente) rispetto all'esterno dell'impronta, vedi Fig. 6. Ciò può favorire la percezione del colore rosso del telo sottostante la Sindone nella zona dell'impronta, la quale, in questo modo, appare mediamente più scura della zona circostante.

- IV. La fluorescenza visibile indotta da una lampada di Wood ad emissione ultravioletta ha evidenziato la presenza di pigmenti usati per simulare i capelli e le macchie di sangue sulla testa dell'impronta corporea, oltre a materiale estraneo casualmente caduto sul telo, ad esempio alcune gocce di stucco, vedi Fig. 13. Sia l'immagine di fluorescenza del volto (vedi Fig. 14), sia il negativo dell'immagine del volto illuminato da luce visibile (vedi Fig. 12) suggeriscono che l'impronta non è stata creata tramite strinatura da bassorilievo caldo.
- V. Il Radar topologico RGB ha permesso di realizzare una mappa colorimetrica tridimensionale della Sindone, vedi Figg. 17 e 20, creando un primo *database* che permetterà di monitorare l'effettivo stato di conservazione del telo e della visibilità delle macchie, di volta in volta, nelle future analisi. Questa mappa colorimetrica può anche essere usata per esibizioni museali di grande impatto visivo, e a scopo didattico. Le elaborazioni numeriche delle immagini ITR su diversi canali di colore e su più spazi colorimetrici hanno permesso di ricavare informazioni aggiuntive qualitative e quantitative sulla Sindone, vedi Figg. 20, 22 e 25, e in particolare a evidenziare il contorno della doppia impronta e delle macchie, vedi Figg. 19-21.
- VI. L'immagine ottenuta dal Radar topologico infrarosso, vedi Fig. 18, mostra che il contorno dell'impronta corporea (inclusi i capelli), le macchie di sangue, il disegno delle false bruciature e delle lettere della scritta sono dovute a sostanze penetrate all'interno dei fili del tessuto di lino della Sindone, suggerendo la loro probabile origine pittorica con un pigmento molto diluito che è penetrato all'interno dei fili del tessuto. Viceversa, la stessa Fig. 18 mostra come l'interno dell'impronta appare esente da materiale estraneo (pigmento) penetrato in profondità.
- VII. L'analisi spaziale e spettrale della fluorescenza indotta da laser LIF (vedi Figure da 28 a 33) a) mostra lo stesso spettro tipico della cellulosa sia all'interno che all'esterno dell'impronta corporea, vedi Fig. 31. Il confronto con lo spettro LIF di una cartapesta rinascimentale (Fig. 30) conferma che le caratteristiche della fluorescenza della cellulosa della Sindone di Arquata sono le stesse di una cellulosa invecchiata 400 anni. b) Alcuni picchi spettrali di fluorescenza relativi alle macchie sul costato, alle macchie centrali e alle lettere della scritta (vedi Fig. 32) si differenziano rispetto agli altri spettri, suggerendo che queste sono state realizzate da un pigmento differente rispetto a quello usato per il contorno dell'impronta corporea, del sangue, etc. c) Lo spettro di fluorescenza delle macchie rosse che simulano sangue non corrispondono a nessuno degli spettri dei seguenti pigmenti rossi comunemente usati nel Rinascimento: terra rossa, lacca di robbia, ocrina rossa, rosso di Pozzuoli, rosso inglese, rosso di Ercolano, cinabro, vedi Fig. 34 e relativi commenti.
- VIII. Le misure di spettroscopia Raman hanno evidenziato che il segnale retro-diffuso dalla cellulosa del lino sovrasta il segnale Raman delle macchie della Sindone, impedendone una valutazione scientifica, vedi la Fig. 37.
- IX. Gli spettri di riflettanza e assorbanza assoluti a) convalidano i risultati LIF riguardo la presenza dominante di cellulosa ossidata da invecchiamento sia all'interno che all'esterno dell'impronta corporea (vedi VIIa), confermando che l'impronta non è stata creata tramite pigmenti. b) Pigmenti sono presenti nelle

lettere e nelle macchie che simulano sangue. c) Lo spettro della macchia di sangue sul costato suggerisce la presenza di pigmento miscelato con una sostanza caratterizzata da un flesso di assorbimento intorno ai 550 nm. A titolo di esempio, in letteratura abbiamo trovato che la metaemoglobina, una forma di emoglobina ossidata da invecchiamento, presenta un peculiare andamento spettrale, mostrato nella Fig. 45, compatibile con il flesso a 550 nm visibile nelle Figg. 42, 43 e 44. Pertanto, è possibile che l'artista che ha creato la Sindone di Arquata nel XVII secolo abbia dipinto la macchia sul costato mescolando pigmento con sangue. d) L'elevata riflettanza ad 800 nm della Fig. 40 conferma che le parti meno riflettenti e più assorbenti della Fig. 18 (quelle scure: contorno impronta, capelli, macchie simulanti bruciature e sangue, vedi VI), ottenute anch'esse a 800 nm, sono causate da sostanze aggiunte. e) L'insieme degli spettri di riflettanza/assorbanza assoluti suggerisce che impronta corporea sulla Sindone di Arquata è stata realizzata tramite un processo di degradazione del lino in grado di aumentare la velocità di ossidazione (invecchiamento) delle fibre di cellulosa, confermando indirettamente i risultati delle foto scomposte nei canali RGB, vedi IIIc e Fig. 11, e del Radar Topologico, vedi V e Fig. 23; alcuni dettagli (rattoppi, sangue, lettere) sono stati invece realizzati mediante pigmenti applicati al tessuto.

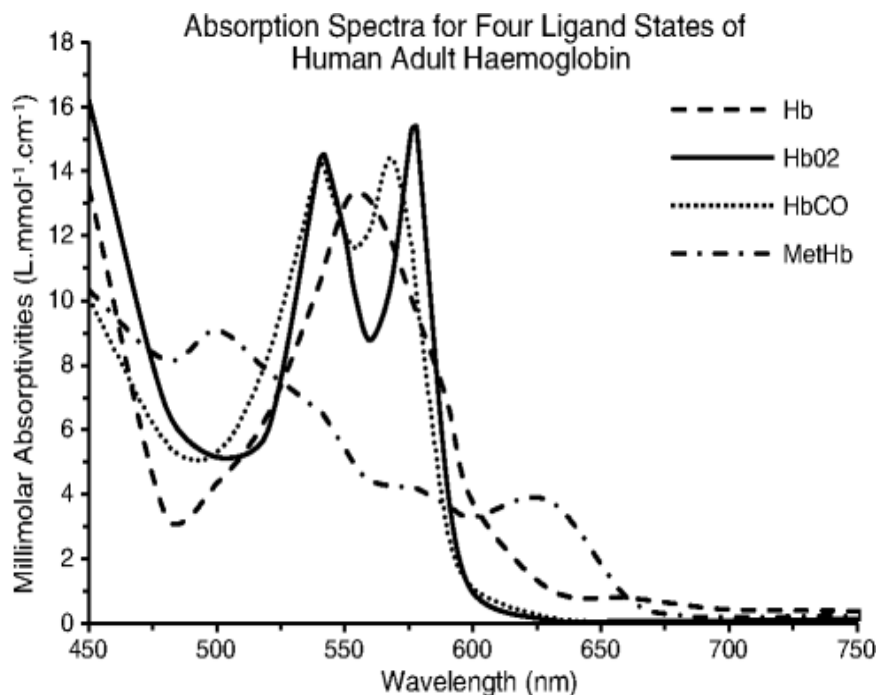


Figura 45. Spettri di assorbimento di deossiemoglobina (Hb), ossiemoglobina (HbO₂), carbossiemoglobina (HbCO) e metaemoglobina (Meth) di un adulto. Quest'ultima è una emoglobina fortemente ossidata da invecchiamento. Tratto da [18].

- X. Nel puntualizzare vantaggi e limiti di ciascuna tecnologia impiegata in questa campagna di misure, i nostri risultati possono contribuire a identificare alcune delle tecnologie più appropriate e degli strumenti più adatti a realizzare analisi non invasive di tessuti cellulósici antichi, inclusa la Sindone di Torino.

10. Conclusioni e raccomandazioni per la conservazione

In questo Rapporto Tecnico abbiamo riassunto i principali risultati della prima campagna di misure dirette e in loco della Sindone di Arquata, effettuate dal 18 al 20 Giugno 2014 tramite sofisticate tecnologie ottiche e spettroscopiche non invasive particolarmente adatte allo studio dei Beni Culturali. Le misure effettuate hanno permesso di ottenere dati scientifici di notevole interesse, che gettano luce sulla possibile origine sia della doppia impronta corporea, sia delle macchie simulanti sangue, rattoppi, acqua presenti sulla Sindone di Arquata, come riassunto nel §9.

I risultati sperimentali permettono anche di elaborare un piano per la corretta conservazione della Sindone di Arquata nel tempo. In questo ambito, le misure tramite radar topologico descritte nel §5 costituiscono una memoria dell'attuale mappa colorimetrica della Sindone, che potrà essere confrontata con i risultati della stessa misura ripetuta in future analisi: questo confronto permetterà di stabilire l'effettivo stato di conservazione del telo e della visibilità delle macchie e dell'impronta.

I risultati delle macrofotografie descritti nel §2 e §3 mostrano che lo stato di conservazione attuale è relativamente buono. Le principali preoccupazioni sono in relazione all'usura del tessuto in diversi punti del telo, vedi ad esempio la Fig. 7, alla presenza sul telo di diverse gocce di stucco (diametro intorno ai 5 mm, vedi §4), e alla sporcizia nerastra (particolato) all'altezza dei piedi dell'immagine dorsale, vedi le Figg. 2a, 8 e 20.

Vi sono una serie di accorgimenti che possono essere adottati per migliorare lo stato di conservazione negli anni a venire, elencati nel seguito.

- a) La resistenza meccanica del tessuto lino è influenzata dall'umidità dell'aria: è necessario evitare l'allungamento e il restringimento del telo causati dall'alternarsi di aria secca nel periodo estivo e di aria umida nel periodo invernale. Di conseguenza, la teca che contiene la Sindone di Arquata dovrebbe avere un sistema di regolazione e controllo tale da mantenere l'umidità relativa compresa tra il 40% e il 50%, in un ambito di valori che è ottimale per il lino [11].
- b) La cellulosa è sensibile all'ossidazione, che provoca ingiallimento del lino, come illustrato nel §8. Di conseguenza, la quantità di ossigeno presente nell'aria a contatto con il telo della Sindone deve essere ridotta, ma non annullata per evitare la crescita di batteri anaerobici [11]. Consigliamo di riempire la teca che contiene la Sindone con una miscela di aria e gas inerte a pressione atmosferica, ad esempio il gas Argon ha un costo ragionevole ed è già usato nella teca che contiene la Sindone di Torino. Le percentuali della miscela Argon-aria devono essere tali da garantire la presenza di circa lo 0.5% di ossigeno molecolare [11]. Inoltre, il gas Argon puro è privo di umidità, e quindi alla miscela aria-Argon dovrebbe essere addizionato vapore acqueo in modo da mantenere un'umidità relativa del 40-50%, vedi punto a).
- c) Un'ulteriore causa di ingiallimento è la componente violetta e ultravioletta della luce. In termini di conservazione, l'ideale sarebbe porre la Sindone di Arquata in una teca metallica chiusa per mantenerla al buio, così come accade per la Sindone

di Torino. Tuttavia, trattandosi di un oggetto di devozione e di un bene culturale la cui esposizione è importante per i cittadini di Arquata e per i suoi turisti, la Sindone di Arquata può essere esposta al pubblico continuativamente, a patto di rispettare alcuni accorgimenti, elencati di seguito.

- La teca deve essere collocata in una posizione tale da non ricevere l'illuminazione solare diretta proveniente dalle finestre della chiesa.
- Le lampade usate per l'illuminazione artificiale non devono emettere componenti spettrali nell'UV e nel violetto: ad esempio, vanno assolutamente evitati i LED a luce fredda, che hanno già creato problemi in alcune opere pittoriche conservate nei musei, vedi [19]. In pratica, è opportuno scegliere una sorgente di luce che abbia una temperatura di colore compresa tra 2700 K e 3300 K, in un intervallo che garantisce sia una buona resa cromatica sia l'assenza di luce violetta-UV.
- Per maggiore sicurezza, al vetro di protezione della teca dovrebbe essere applicata una pellicola trasparente in grado di filtrare la radiazione UV.
- Il flusso luminoso sul telo deve essere limitato per evitare danni termici e fotochimici a lungo termine. Quindi, l'illuminazione artificiale deve essere accesa solo a richiesta del visitatore e per un periodo di tempo limitato: indicativamente, nel caso di un illuminamento sul telo di 300 lux, non più di 2 minuti consecutivi, eventualmente reiterabili [20]. Un'accensione a tempo tramite monete potrebbe essere una soluzione ragionevole per evitare periodi prolungati di illuminazione.

Ringraziamenti

Un lavoro complesso come quello riassunto in questo Rapporto è possibile solo tramite la collaborazione di molte persone in grado di "gettare il cuore oltre l'ostacolo" per risolvere problemi di tipo scientifico, organizzativo, logistico, finanziario e burocratico. Gli autori di questo Rapporto hanno avuto l'onere e l'onore di affrontare e risolvere i problemi scientifici e tecnologici legati all'analisi della Sindone di Arquata, ma per gli altri aspetti è doveroso ringraziare un ampio gruppo di persone e associazioni, che include:

_ il responsabile dell'Unità Tecnica Sviluppo di Applicazioni delle Radiazioni dell'ENEA, Roberta Fantoni, per aver sostenuto l'idea della campagna di misure e operato per ottenere le necessarie autorizzazioni per l'Accordo di Programma tra Enea e Comune di Arquata del Tronto;

_ il Sindaco di Arquata del Tronto, Domenico Pala, per la supervisione di tutti gli aspetti amministrativi e organizzativi di competenza comunale;

_ il consigliere comunale Leonardo Gabrielli, delegato del Sindaco all'organizzazione delle misure ed efficientissimo punto di riferimento dei ricercatori per ogni esigenza;

_ Pina Traini, giornalista della Sala Stampa della Santa Sede e presidente dell'Associazione culturale *Il Portico di Padre Brown* per aver intuito l'importanza della

valorizzazione scientifica della Sindone di Arquata e curato il primo contatto tra Enea e Comune di Arquata;

_ Paolo Monaci Freguglia (Polifemo srl) e Francesca Saracino per aver aiutato e sostenuto Pina Traini in questa proposta;

_ Vittorio Ricci e Maurizio Ramazzotti (UCID) per i contributi organizzativi e finanziari in vari momenti e occasioni che hanno preceduto le misure;

_ Nadia Beani e Filiberto Caponi (Confartigianato Ascoli) per il contributo finanziario e le discussioni che hanno preceduto le misure;

_ Stefano Luzi (Tre Elle srl) per il progetto e la realizzazione del sostegno del telo della Sindone utilizzato durante le misure;

_ Piergiorgio Bassi (PGB group);

_ l'associazione Pro-Loce Arquata.

Un ringraziamento particolare va ai cittadini di Borgo di Arquata del Tronto per averci accolto con simpatia e curiosità, trasmettendo il loro profondo rispetto per la Sindone di Arquata.



Bibliografia e note

[1] Per una lettura introduttiva alle problematiche storiche, iconografiche e scientifiche della Sindone di Torino, vedi ad esempio E. Marinelli, M. Marinelli: *Alla scoperta della Sindone* (Edizioni Messaggero Padova, 2010).

[2] E. Marinelli, M. Marinelli: *The copies of the Shroud* Atti dell'International Workshop on the Scientific approach to the Acheiropoietos Images (IWSAI), a cura di P. Di Lazzaro (ENEA, 2010) pp. 155-160. Disponibile su <http://www.acheiropoietos.info/proceedings/proceedings.php>

[3] C. Barta, A.V. Carrascosa: *The Shroud of Turin and its ancient copies* Scientific Research and Essays vol. 7, pp. 2526-2544 (2012).

[4] Per una panoramica delle tecnologie ENEA applicate ai Beni Culturali, vedi il volume di Energia, Ambiente e Innovazione, special issue on *Knowledge, Diagnostics and Preservation of Cultural Heritage*, a cura di C. Clemente, P. Di Lazzaro, R. Giorgi. (ENEA, Dicembre 2012) <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/EAI/anno-2012/knowledge-diagnostics-and-preservation-of-cultural-heritage/knowledge-diagnosis-and-preservation-of-cultural-heritage>

[5] M. Guarneri, A. Danielis, M. Francucci, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, A. Mencattini: *3D remote colorimetry and watershed segmentation techniques for fresco and artwork decay monitoring and preservation* Journal of Archaeological Science **46**, 182-190 (2014).

[6] L. Caneve, F. Colao, R. Fantoni, L. Fiorani: *Scanning lidar fluorosensor for remote diagnostic of surfaces* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **720** 164-167 (2013).

[7] A. Mosca Conte, O. Pulci, M.C. Misiti, J. Lojewska, L. Teodonio, C. Violante, M. Missori: *Visual degradation in Leonardo da Vinci's iconic self-portrait: a nano scale study* Applied Physics Letters vol. 104, pp. 224101-4 (2014).

[8] P. Di Lazzaro, D. Murra, E. Nichelatti, A. Santoni, G. Baldacchini: *Superficial and Shroud-like coloration of linen by short laser pulses in the vacuum ultraviolet* Applied Optics vol. 51, pp. 8567-8578 (2012). Questo articolo di rassegna contiene i riferimenti a diversi lavori ENEA sull'immagine sindonica pubblicati dal 2006 al 2012.

[9] P. Di Lazzaro, D. Murra, B. Schwartz: *Pattern recognition after image processing of low-contrast images, the case of the Shroud of Turin* Pattern Recognition vol. 46, pp. 1964-1970 (2013).

[10] Per una panoramica delle pubblicazioni degli studi ENEA sull'immagine della Sindone di Torino, vedi www.frascati.enea.it/fis/lac/excimer/sindone/sindone.html

[11] P. Di Lazzaro, D. Murra, A. Santoni, E. Nichelatti: *The conservation of the Shroud of Turin: optical studies* Energia, Ambiente e Innovazione, special issue on Knowledge, Diagnostics and Preservation of Cultural Heritage, pp. 89-94 (2012). Disponibile su <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/pdf-eai/speciale-cultural-heritage/14-the-conservation-pdf>

[12] C. Ciociola, L. Castelli: *La Sindone di Arquata del Tronto tra storia e leggenda* (FAS editore, 2010). ISBN 9788896823033.

[13] Caratteristiche della lampada di illuminazione Philips: Temperatura di colore: 3200 K. Flusso luminoso: 26.600 Lm. Potenza di emissione nominale: 1000 W. Tensione: 230 V

[14] Secondo capitolo del manuale *Ultraviolet and fluorescence photography* Kodak technical publication n° M-27 (1968). Grazie a Barrie Schwartz (STERA Inc.) per aver rintracciato e reso disponibile questo prezioso manuale.

[15] Bulbo Osram Sylvania da 15 W, che emette luce UV con larghezza spettrale 350 nm-390 nm a $1/e^2$ e picco spettrale a 370 nm.

[16] A. Mosca Conte, O. Pulci, A. Knapik, J. Bagniuik, R. Del Sole, J. Łojewska, and M. Missori: *Role of cellulose oxidation in the yellowing of ancient paper* Physical Review Letters **108**, 158301-5 (2012).

[17] M. Missori, O. Pulci, L. Teodonio, C. Violante, I. Kupchak, J. Bagniuik, J. Łojewska, and A. Mosca Conte: *Optical response of strongly absorbing inhomogeneous materials: Application to paper degradation* Physical Review B **89**, 054201-8 (2014).

[18] W.G. Zijlstra, A. Buursma, W.P. Meeuwsenvanderroest: *Absorption-spectra of human fetal and adult oxyhemoglobin, de-oxyhemoglobin, carboxyhemoglobin, and methemoglobin* Clinical Chemistry **37**, 1633-638 (1991).

[19] Vedi ad esempio

http://www.almanacco.cnr.it/reader/cw_usr_view_articolo.html?id_articolo=4073&giornale=4054 . Vedi anche

<http://www.hightechnologylighting.com/info/leds+and+gallery+lighting>

[20] La luminanza di 1 lux corrisponde ad una densità di potenza luminosa pari a circa $1,47 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ ad una lunghezza d'onda convenzionale di 555 nm. Quindi, se la Sindone è illuminata ad esempio con 300 lux = $0,44 \text{ W/m}^2$, due minuti di esposizione comportano una densità di energia luminosa ricevuta dal telo equivalente a:
 $0,44 \text{ W/m}^2 \times 120 \text{ s} = 53 \text{ J/m}^2 = 0,0053 \text{ J/cm}^2$.

Edito dall' **ENEA**
Servizio Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma

www.enea.it

Stampa: Tecnografico ENEA - CR Frascati
Pervenuto il 19.1.2015

Finito di stampare nel mese di gennaio 2015